



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

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA
CNC DE CORTE POR LÁSER EN LÁMINAS DE ACRÍLICO Y
MADERA MDF DE HASTA 6mm DE ESPESOR PARA EL
LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA DE LA
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**

AUTORES:

**CAZCO CHIRBOGA ROGER EFRAÍN
GORDÓN CAIZAPANTA DIEGO MAURICIO**

DIRECTOR: ING. SEGURA SANGUCHO LUIS JAVIER

SANGOLQUÍ

2015

Certificación

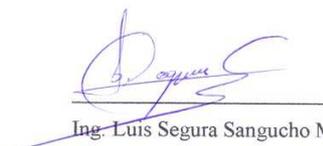


DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA CNC DE CORTE POR LÁSER EN LÁMINAS DE ACRÍLICO Y MADERA MDF DE HASTA 6mm DE ESPESOR PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE", fue realizado en su totalidad por Roger Efraín Cazco Chiriboga y Diego Mauricio Gordón Caizapanta, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas – ESPE, por lo tanto me permito acreditar y autorizar a los autores para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 25 de Noviembre de 2015



Ing. Luis Segura Sangucho MSc.
DIRECTOR

Autoría de Responsabilidad



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

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

El proyecto de titulación "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA CNC DE CORTE POR LÁSER EN LÁMINAS DE ACRÍLICO Y MADERA MDF DE HASTA 6mm DE ESPESOR PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE" ha sido desarrollado citando las fuentes correspondientes y respetando las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.

En virtud de esta declaración, las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Sangolquí, 25 de Noviembre de 2015

Roger Efraín Cazco Chiriboga
CI. 1716367428

Diego Mauricio Gordón Caizapanta
CI. 1724544497

Autorización



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

AUTORIZACIÓN

Nosotros: Roger Efraín Cazco Chiriboga y Diego Mauricio Gordon Caizapanta

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la institución, del proyecto de titulación: "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA CNC DE CORTE POR LÁSER EN LÁMINAS DE ACRÍLICO Y MADERA MDF DE HASTA 6mm DE ESPESOR PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS DE MANUFACTURA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE", cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Sangolquí, 25 de Noviembre de 2015

Roger Efraín Cazco Chiriboga
CI. 1716367428

Diego Mauricio Gordón Caizapanta
CI. 1724544497

Dedicatoria

Primeramente a Dios y a la Virgen Dolorosa, que han sido guías en toda mi vida, personal y estudiantil. A mis padres Vicente y María, que han sido el apoyo incondicional y se merecen todo en esta vida. A mis hermanos Kevin y Allen, para ellos que son mi razón de seguir adelante.

Roger Cazco

Dedicatoria

A mis amigos y familiares, especialmente Adriana que supo aclararme la mente.

Diego Gordón

Agradecimientos

A Dios y a mi Madre Dolorosa, por ser el soporte de todas y cada una de mis decisiones, por llevarme siempre con salud y bienestar, para seguir cumpliendo con mis metas.

A mis padres, Vicente y María, por el apoyo y el cariño que siempre me han brindado, por el conocimiento transmitido para poder ser una persona de bien y un gran profesional. Por los consejos que me han llevado a ser un mejor hijo, mejor amigo, mejor hermano. Por criarme como soy.

A mis hermanos, Kevin, por tantos momentos compartidos, alegrías y tristezas, que nos han llevado a tener una relación de hermanos muy fuerte. Y Allen por ser el ángel que ilumina mi vida y la de toda mi familia. Ambos por ser mi razón de seguir cumpliendo sueños.

Al resto de mi familia, por estar siempre pendientes de mí, por todos los consejos y ayuda que han brindado para poder salir adelante y llegar a este objetivo.

A "Los Parses", por todas las grandes vivencias desde el colegio hasta ahora, que han sido parte de esta vida llena de alegrías. A mis demás amigos y amigas con las que hemos compartido momentos inolvidables.

A todos y cada uno de los profesores que gracias a sus enseñanzas han sido artífices de este gran proyecto, y de todo el aprendizaje durante la vida universitaria.

Roger Cazco

Agradecimientos

A mi hermana Mariuxi, a mis padres Mónica y Mauricio por haberme apoyado y brindado el patrocinio económico sin el cual esta tesis no pudo ser elaborada. Por siempre haber creído en mí. Por todas las veces que tuvieron y tendrán que despertarme.

A mis tíos Adriana y Rodmy, a mis abuelos María, Teresa y Ángel que siempre me respaldaron y supieron que lo lograría. Por haberme cuidado, educado y por inculcarme valores que forman parte de la persona que soy ahora.

A mis amigos, por haberme apoyado y acompañado a lo largo de mi camino. Por todas las experiencias que vivimos y viviremos.

A todas las personas que apoyaron en el desarrollo y revisión de la máquina y el presente trabajo.

Un agradecimiento especial a David Balseca, un gran amigo, cuyas ideas contribuyeron de gran manera en el desarrollo de la máquina.

Diego Gordón

Índice General

Certificación	ii
Autoría de Responsabilidad.....	iii
Autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vii
Índice General	ix
Índice de Figuras	xv
Índice de Tablas.....	xxiii
Resumen	xxiv
Abstract.....	xxv
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2. ANTECEDENTES.....	1
1.3. JUSTIFICACIÓN	2
1.4. OBJETIVOS	3
1.4.1. Objetivo General.....	3
1.4.2. Objetivos Específicos	3
1.5. ALCANCE DEL PROYECTO	3
1.6. METODOLOGÍA	4
1.7. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	5
CAPÍTULO II.....	6
MARCO TEÓRICO	6
2.1. INTRODUCCIÓN AL CORTE POR LÁSER.....	6
2.1.1. Principios Básicos del Láser.....	6
2.1.2. Características del Rayo Láser	12
2.1.3. Tipos de Láseres Industriales	14

2.1.4. Interacción de Láseres con Materiales	15
2.1.5. Corte por Láser	17
2.1.6. Parámetros del Corte por Láser	20
2.2. INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA	21
2.2.1. Definición	21
2.2.2. Morfología del Robot	22
2.2.2.1. Estructura Mecánica de un Robot.....	22
2.2.2.2. Robot Cartesiano	23
2.3. SENSORES Y ACTUADORES	24
2.3.1. Actuadores	24
2.3.1.1. Tornillo Sin Fin	25
2.3.1.2. Ballscrew	26
2.3.1.3. Motores Paso a Paso	27
2.3.2. Sensores	29
2.3.2.1. Sensores de Posición	30
2.3.2.2. Sensores de Presencia.....	32
2.4. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE MECANIZADO CNC	33
2.4.1. Diseño CAD	33
2.4.2. Programación CNC	34
2.4.3. Software Controlador	35
2.4.4. Driver.....	36
2.4.5. Máquina	37
2.5. USOS ESPECÍFICOS DE ACRÍLICO Y MADERA MDF	37
2.5.1. Acrílico	37
2.5.2. Madera MDF	38
2.6. NORMAS DE SEGURIDAD.....	41
2.6.1. Causas de Accidentes	41

2.6.2. Medidas de Seguridad	42
2.6.2.1. Medidas de Seguridad en Fase de Diseño del Robot	42
2.6.2.2. Medidas de Seguridad en el diseño de la célula robotizada	43
2.6.2.3. Medidas de Seguridad en fase de Instalación.....	43
CAPÍTULO III	45
DISEÑO MECATRÓNICO	45
3.1. CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO	45
3.2. ALTERNATIVAS DE DISEÑO.....	46
3.2.1. Transmisión de Movimiento.....	46
3.2.2. Movimiento Lineal	47
3.2.3. Motores	48
3.2.4. Acoples	49
3.3. SELECCIÓN DEL TIPO LÁSER Y SUS ELEMENTOS.....	51
3.3.1. Selección del láser	51
3.3.2. Selección de fuente de poder	53
3.3.3. Selección de espejos y lente de enfoque.....	54
3.3.4. Selección de accesorios	54
3.3.5. Selección de refrigeración	56
3.4. DISEÑO DE SISTEMAS MECÁNICOS	57
3.4.1. Selección Inicial	57
3.4.1.1. Selección de tornillos de bola.....	57
3.4.1.2. Selección de guías lineales	62
3.4.1.3. Selección de chumaceras.....	64
3.4.2. Diseño de la Máquina.....	65
3.4.2.1. Diseño del sistema de movimiento del eje X	67
3.4.2.2. Diseño del sistema de movimiento del eje Y	80
3.4.2.3. Diseño de estructura	96

3.4.2.4. Diseño de paneles	98
3.4.2.5. Diseño de la mesa de trabajo	101
3.4.2.6. Diseño de resortes.....	106
3.4.2.7. Diseño del sistema de refrigeración	117
3.4.2.7.1. Diseño sistema de convección forzada.....	117
3.4.2.7.2. Diseño de bomba de agua.....	125
3.4.3. Diseño de tornillos, guías y selección de acoples.....	133
3.4.3.1. Tornillo de bola y guía del eje X	140
3.4.3.2. Tornillo de bola y guías del eje Y	146
3.4.3.3. Selección de acoples.....	150
3.5. DISEÑO ELECTRÓNICO.....	151
3.5.1. Selección de elementos electrónicos.	151
3.5.1.1. Selección de tarjeta de control.....	156
3.5.1.2. Selección de Fuente de alimentación	156
3.5.1.3. Selección de motores a pasos	157
3.5.1.4. Selección de drivers de los motores	159
3.5.2. Diseño de placa de control de temperatura y corriente	160
3.5.2.1. Etapa de adquisición de datos de corriente.....	161
3.5.2.2. Etapa de adquisición de datos de temperatura.....	165
3.5.2.3. Etapa de salidas a relés	166
3.5.2.4. Diseño de la tarjeta PCB.....	169
3.5.3. Diseño del armario de control y del panel de controles e indicadores .	173
3.5.3.1. Diseño del armario de control	174
3.5.3.2. Diseño del panel de controles e indicadores.....	177
3.5.4. Caída de tensión, selección de cables y protecciones.....	180
3.5.4.1. Caída de tensión en el circuito de potencia	181
3.5.4.2. Caída de tensión en los circuitos de control	184

3.5.4.3. Caída de tensión en los circuitos de motores.....	188
3.5.4.4. Caída de tensión en el circuito del láser	192
3.5.4.5. Cálculo de protecciones.....	194
3.6. PROGRAMACIÓN Y SOFTWARE DE CONTROL.....	196
3.6.1. Programación Arduino	196
3.6.2. Configuración del software MACH3	199
CAPÍTULO IV	204
CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN.....	204
4.1. CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS MECÁNICOS.....	204
4.1.1. Construcción de Estructura.....	204
4.1.2. Construcción y Montaje de Paneles Exteriores	204
4.1.3. Construcción de marcos y soportes de ejes.	205
4.2. INSTALACIÓN DE COMPONENTES	206
4.2.1. Instalación de componentes mecánicos.	206
4.2.2. Instalación de componentes eléctricos y electrónicos.	209
4.2.3. Instalación de componentes de corte láser.....	212
CAPITULO V	216
PRUEBAS Y RESULTADOS	216
5.1. PRUEBAS Y RESULTADOS EN ACRÍLICO	216
5.1.1. Altura del Cabezal	216
5.1.2. Potencia Constante – Velocidad Variable.	218
5.1.3. Velocidad Constante – Potencia Variable.	220
5.1.4. Resumen.	222
5.2. PRUEBAS Y RESULTADOS EN MDF.	223
5.2.1. Altura del Cabezal	223
5.2.2. Potencia Constante – Velocidad Variable.	223
5.2.3. Velocidad Constante – Potencia Variable.	226

5.2.4. Resumen	228
5.3. CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS.....	228
5.3.1. Eje X.....	229
5.3.2. Eje Y.....	234
5.3.3. Circunferencias.....	238
CAPÍTULO VI.....	243
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	243
6.1. CONCLUSIONES.....	243
6.2. RECOMENDACIONES	244
Bibliografía.....	246
ANEXO A: Planos Mecánicos.....	250
ANEXO B: Planos Eléctricos.....	251
ANEXO C: Manual fuente Láser	252
ANEXO D: Manual Tubo Láser.....	253

Índice de Figuras

Figura 1.- Ciclo PDCA según Edwards Deming	4
Figura 2.- Esquema de inversión de población en sistemas láser de tres niveles de energía.....	8
Figura 3.- Esquema de las etapas de amplificación: (a) estado inicial de bajo nivel de energía, (b) bombardeo óptico, (c) inicio de la emisión estimulada, (d) amplificación por emisión estimulada, (e) amplificación continua debido a la reflexión resultando en una subsecuente salida de rayos láser.	11
Figura 4.- Esquema Ilustrativo del concepto de coherencia: (a) haz de luz con ondas en coherencia espacial y temporal, y (b) haz de luz con ondas sin coherencia espacial y temporal.....	13
Figura 5.- Varios efectos de la interacción del rayo láser con los materiales: (a) calentamiento, (b) derretimiento de la superficie, (c) vaporización de la superficie, (d) formación de plasma y (e) ablación.....	16
Figura 6.- Tipos de articulaciones para robots.....	22
Figura 7.- Configuraciones frecuentes para Robots.....	23
Figura 8.- Representación de un vector en coordenadas cartesianas en (a) 2 dimensiones y (b) 3 dimensiones.....	24
Figura 9.- Tornillos sin fin.....	25
Figura 10.- Ballscrew	26
Figura 11.- Tipos de Apoyos.....	27
Figura 12.- Motor a Pasos NEMA 17	28
Figura 13.- Esquema de movimiento de carga. Ejes X e Y.	28
Figura 14.- Disposición de un encoder incremental.....	31
Figura 15.- Esquema de funcionamiento de un resolver.....	31
Figura 16.- Esquema de funcionamiento de LVDT.....	32
Figura 17.- Componentes de un Sistema de Mecanizado CNC.....	33
Figura 18.- Tipos de desalineación en ejes.....	49

Figura 19.- Características de los láseres de la serie DX.	52
Figura 20.- Características de las fuentes de poder.	53
Figura 21.- Características de los espejos y lentes.	54
Figura 22.- Fotografía del soporte para espejos.	55
Figura 23.- Fotografía del cabezal.	55
Figura 24.- Fotografía de los soportes del tubo láser.	56
Figura 25.- Características del chiller CW3000DG	56
Figura 26.- Estándar Internacional de grados de precisión para tornillos de bola (μm). ..	57
Figura 27.- Grado de precisión recomendado por aplicación.	58
Figura 28.- Grado de precisión vs. Longitud del tornillo vs. Diámetro Externo (Unidades mm).	59
Figura 29.- Estilo de la brida de la nuez.	60
Figura 30.- Especificaciones de tornillos de bola según la norma DIN 69051 parte B ..	61
Figura 31.- Especificaciones de guías lineales de bola.	63
Figura 32.- Especificaciones de chumaceras de piso.	64
Figura 33.- Especificaciones de chumaceras de pared.	65
Figura 34.- Estructura con ejes de movimiento montados.	66
Figura 35.- Ejes de movimiento, establecimiento de ejes de coordenadas, vista aérea ...	66
Figura 36.- Sistema de movimiento del eje X.	67
Figura 37.- Diagrama de cuerpo libre del ensamble de la placa del cabezal.	68
Figura 38.- Estudio de esfuerzos del ensamble de la placa del cabezal.	69
Figura 39.- Análisis del factor de seguridad del ensamble de la placa del cabezal.	69
Figura 40.- Reacciones en A) la nuez del tornillo, B) la guía, del ensamble de la placa del cabezal.	70
Figura 41.- Diagrama de cuerpo libre del tornillo de bolas del eje X.	72
Figura 42.- Reacciones en los apoyos del tornillo de bolas del eje X en el sistema de coordenadas de SAP2000.	72
Figura 43.- Resultados del análisis del tornillo de bolas del eje X usando el software SAP2000.	73
Figura 44.- Diagrama de cuerpo libre de la guía del eje X.	74

Figura 45.- Reacciones en los apoyos de la guía del eje X en el sistema de coordenadas de SAP2000.....	75
Figura 46.- Resultados del análisis de la guía del eje X usando el software SAP2000. ..	75
Figura 47.- Diagrama de cuerpo libre del ensamble del soporte de la guía y el tornillo de bolas del eje X.....	77
Figura 48.- Estudio de esfuerzos del ensamble del soporte de la guía y el tornillo de bolas del eje X.....	78
Figura 49.- Análisis del factor de seguridad del ensamble del soporte de la guía y el tornillo de bolas del eje X.	79
Figura 50.- Reacciones en A) el apoyo izquierdo, B) el apoyo derecho, del ensamble del soporte de la guía y el tornillo de bolas del eje X.	80
Figura 51.- Sistema de movimiento del eje Y.....	81
Figura 52.- Diagrama de cuerpo libre del ensamble del soporte del eje Y.	82
Figura 53.- Estudio de esfuerzos del ensamble del soporte del eje Y.....	83
Figura 54.- Análisis del factor de seguridad del ensamble del soporte del eje Y.	83
Figura 55.- Reacciones en A) el apoyo de la guía izquierda, B) el apoyo de la guía derecha, C) el apoyo del tornillo, del ensamble del soporte del eje Y.....	84
Figura 56.- Diagrama de cuerpo libre del tornillo de bolas del eje Y.....	86
Figura 57.- Reacciones en los apoyos del tornillo de bolas del eje Y en el sistema de coordenadas de SAP2000.....	87
Figura 58.- Resultados del análisis del tornillo de bolas del eje Y usando el software SAP2000.	87
Figura 59.- Diagrama de cuerpo libre de la guía izquierda del eje Y.	89
Figura 60.- Reacciones en los apoyos de la guía izquierda del eje Y en el sistema de coordenadas de SAP2000.....	89
Figura 61.- Resultados del análisis de la guía izquierda del eje Y usando el software SAP2000.	90
Figura 62.- Diagrama de cuerpo libre de la guía derecha del eje Y.....	91
Figura 63.- Reacciones en los apoyos de la guía derecha del eje Y en el sistema de coordenadas de SAP2000.....	92

Figura 64.- Resultados del análisis de la guía derecha del eje Y usando el software SAP2000.	92
Figura 65.- Diagrama de cuerpo libre de los soportes de las chumaceras A) de la parte frontal, B) de la parte posterior, del eje Y.....	94
Figura 66.- Estudio de esfuerzos de los soportes de las chumaceras A) de la parte frontal, B) de la parte posterior, del eje Y.....	94
Figura 67.- Análisis del factor de seguridad de los soportes de las chumaceras A) de la parte frontal, B) de la parte posterior, del eje Y.....	95
Figura 68.- Reacciones en los apoyos de los soportes de las chumaceras A) de la parte frontal, B) de la parte posterior, del eje Y.....	95
Figura 69.- Diagrama de cuerpo libre de la estructura.....	96
Figura 70.- Resultado del estudio de Von-Mises de la estructura.....	97
Figura 71.- Resultado del análisis del factor de seguridad de la estructura.	97
Figura 72.- Análisis de deformación del panel interior que separa el área de corte del tubo láser.	98
Figura 73.- Análisis de deformación del panel e la parte posterior de la máquina.	99
Figura 74.- Análisis de deformación de la puerta derecha del armario eléctrico de la máquina.	100
Figura 75.- Análisis de deformación del cajón de la máquina.	100
Figura 76.- Análisis del factor de seguridad del cajón de la máquina.	101
Figura 77.- Mesa de trabajo.	102
Figura 78.- Diagrama de cuerpo libre de la mesa de trabajo.	105
Figura 79.- Resultado del estudio de Von-Mises de la mesa de trabajo.	105
Figura 80.- Resultado del análisis de factor de seguridad de la mesa de trabajo.....	105
Figura 81.- Reacciones en los apoyos de la mesa de trabajo.	106
Figura 82.- Constantes A y m para estimar la resistencia de tensión mínima de alambres para fabricar resortes comunes.	111
Figura 83.- Propiedades mecánicas de algunos alambres para resorte.	111
Figura 84.- Esfuerzos de torsión máximos permisibles de resortes helicoidales de compresión en aplicaciones estáticas.	112

Figura 85.- Ventilador comercial seleccionado.	118
Figura 86.- Modelo de convección forzada en un ducto.	119
Figura 87.- Sistema de refrigeración implementado.	125
Figura 88.- Diagrama de Moody.	130
Figura 89.- Características de los rodamientos tipo UC.	138
Figura 90.- Coeficiente de fricción según el tipo de rodamiento.	139
Figura 91.- Factores de carga para guías lineales.	140
Figura 92.- Tipos de acoples de quijadas de goma.	151
Figura 93.- Circuito RL básico.	153
Figura 94.- Respuesta natural a una entrada escalón con amplitud 5.	154
Figura 95.- Respuesta a una entrada escalón con amplitud 5 para diferentes valores de voltaje.	154
Figura 96.- E-Cut 3 Axis Motion Card.	156
Figura 97.- Curva Torque-Velocidad de rotación para motores nema 23 de corriente máxima de 3 A.	158
Figura 98.- Características de los tipos de motores Nema 23.	158
Figura 99.- Especificaciones del driver ST330.	160
Figura 100.- Circuito de amplificación diferencial de voltaje.	162
Figura 101.- Circuito de comparación de voltaje.	164
Figura 102.- Circuito de amplificación diferencial y comparación de voltaje.	165
Figura 103.- Relación entre la temperatura y la salida digital del sensor DS18B20.	166
Figura 104.- Diseño de los circuitos de la placa en ISIS.	169
Figura 105.- Holguras mínimas recomendadas para circuitos impresos.	170
Figura 106.- Gráfica Corriente vs. Sección transversal para el diseño de circuitos impresos.	170
Figura 107.- Gráfica Ancho de pista vs. Sección transversal para el diseño de circuitos impresos.	172
Figura 108.- Diseño PCB de la tarjeta de control en ARES.	173
Figura 109.- Modelo en 3D de la tarjeta de control.	173
Figura 110.- Espacio destinado para el armario de control.	174

Figura 111.- Ubicación de la fuente del láser en el interior de la máquina.....	175
Figura 112.- Ubicación de los elementos electrónicos en el armario de control.	175
Figura 113.- Ubicación de los porta fusibles en el armario de control.	176
Figura 114.- Ubicación de las canaletas en el armario.....	176
Figura 115.- Panel de controles e indicadores.	177
Figura 116.- Área de indicadores del panel.	178
Figura 117.- Área transversal y diámetros de cable según el calibre AWG.	181
Figura 118.- Primer bloque de programación, declaración de variables y librerías.	197
Figura 119.- Segundo bloque de programación, función void setup().....	197
Figura 120.- Tercer bloque de programación, configuración de las luces piloto de las alarmas.	198
Figura 121.- Cuarto bloque de programación, control del ventilador y paro total si la temperatura sobrepasa el límite.....	198
Figura 122.- Quinto bloque de programación, paro total si la corriente sobrepasa el límite.	199
Figura 123.- Selección del puerto de control en MACH3.	199
Figura 124.- Pestaña de configuración en MACH3.....	200
Figura 125.- Configuración de pines para motores MACH3.....	200
Figura 126.- Pines de cero de máquina y paro de emergencia.....	201
Figura 127.- Configuración del puerto para control de potencia de láser.....	201
Figura 128.- Configuración de paso, velocidad y aceleración de motores.	202
Figura 129.- Configuración practica de desplazamiento de motores.....	202
Figura 130.- Configuración de límites de ejes en MACH3.	203
Figura 131.- Estructura soldada	204
Figura 132.- Manufactura de Paneles exteriores.....	205
Figura 133.- Ubicación de paneles en la estructura	205
Figura 134.- Paneles soldados a la estructura	205
Figura 135.- Componentes mecánicos fabricados.	206
Figura 136.- Tornillos de bolas y guías lineales.	206
Figura 137.- Instalación de guías lineales.	207

Figura 138.- Tornillo de bolas instalado.	207
Figura 139.- Acople LoveJoy instalado.	208
Figura 140.- Ejes de movimiento instalados.	208
Figura 141.- Mesa de trabajo.	209
Figura 142.- Armario eléctrico en proceso de instalación.	209
Figura 143.- Fuente de poder para motores.	210
Figura 144.- Tarjetas de control.	210
Figura 145.- Ventilador y drivers de motores.	210
Figura 146.- Protección de circuitos.	211
Figura 147.- Panel de controles e indicadores de la máquina.	211
Figura 148.- Amperímetro digital.	211
Figura 149.- Sensor de temperatura instalado.	212
Figura 150.- Fuente de poder del tubo láser.	212
Figura 151.- Soportes del tubo láser.	213
Figura 152.- Soportes y espejos instalados.	213
Figura 153.- Tubo láser instalado.	214
Figura 154.- Sistema de refrigeración.	214
Figura 155.- Burbujas presentes en el tubo.	214
Figura 156.- Haz de luz generada en el tubo.	215
Figura 157.- Calibración de haz de luz láser.	215
Figura 158.- Galgas para fijar altura del cabezal de corte.	216
Figura 159.- Pruebas de altura de cabezal en acrílico.	217
Figura 160.- Comparación de cortes con altura de cabezal.	217
Figura 161.- Cortes en acrílico con potencia constante, velocidad variable (vista frontal y superior).	218
Figura 162.- Prueba de corte en acrílico (PWM constante – Velocidad variable).	219
Figura 163.- Gráfico Profundidad-Velocidad para acrílico.	219
Figura 164.- Prueba de corte en acrílico. (Velocidad constante – PWM variable).	220
Figura 165.- Gráfico Profundidad-PWM para acrílico.	221
Figura 166.- Programa en Excel para determinar parámetros de corte en acrílico.	222

Figura 167.- Pruebas de altura de cabezal en MDF (Medidas en mm).....	223
Figura 168.- Corte con altura de cabezal de 8mm.	223
Figura 169.- Cortes en MDF con potencia constante y velocidad variable.	224
Figura 170.- Corte transversal para medir profundidades de corte laser en MDF.....	224
Figura 171.- Gráfica Profundidad-Velocidad para el MDF.	225
Figura 172.- Corte en MDF, velocidad constante y potencia variable.....	226
Figura 173.- Gráfica Profundidad-PWM para MDF.....	227
Figura 174.- Excel para determinar parámetros de corte de MDF.....	228
Figura 175.- Modelo para pruebas de corte.	229
Figura 176.- Constantes para cartas de control X-s.....	231
Figura 177.- Carta de control de Media en Eje X	232
Figura 178.- Carta de Control de Desviación Estándar en Eje X.....	232
Figura 179.- Control Estadístico de Proceso en Eje X.....	233
Figura 180.- Carta de control de Media en Eje Y	236
Figura 181.- Carta de Control de Desviación Estándar en Eje Y.....	236
Figura 182.- Control Estadístico de Proceso en Eje Y.....	237
Figura 183.- Carta de control de Media en circunferencias	240
Figura 184.- Carta de Control de Desviación Estándar en circunferencias	240
Figura 185.- Control Estadístico del Proceso en Circunferencias.....	241

Índice de Tablas

Tabla 1. Tipos de sensores internos	30
Tabla 2. Características de la máquina previas al diseño.....	45
Tabla 3. Comparación entre sistemas de transmisión.....	46
Tabla 4. Comparación de guías de movimiento lineal.....	47
Tabla 5. Comparación entre motores.....	48
Tabla 6. Comparación entre acoples	50
Tabla 7. Comparación entre láseres de CO ₂ y el Nd-Yag.....	51
Tabla 8. Tipos de Nuez	60
Tabla 9. Propiedades físicas de varios materiales.....	119
Tabla 10. Coeficientes de rugosidad de Manning para las tuberías.....	128
Tabla 11. Coeficientes de pérdida por singularidades	130
Tabla 12. Profundidad en acrílico, PWM constante y velocidades variables.....	219
Tabla 13. Profundidad en acrílico, velocidad constante y PWM variable.....	221
Tabla 14. Resumen de parámetros de corte para acrílico.....	222
Tabla 15. Profundidad en MDF, PWM constante y velocidad variable.....	225
Tabla 16. Profundidad den MDF, velocidad constante y PWM variable.....	227
Tabla 17. Resumen de parámetros de corte para MDF.....	228
Tabla 18. Medidas obtenidas del corte en eje X para cartas de control.....	230
Tabla 19. Medidas obtenidas del corte en eje X para cartas de control.....	235
Tabla 20. Medidas obtenidas del corte en circunferencias para cartas de control.....	239

Resumen

En el presente trabajo se diseña y construye una plataforma CNC de corte por láser cuyo objetivo es realizar cortes y grabados en materiales como el acrílico y la madera MDF. En la primera parte, abordada en los capítulos 1 y 2, habla sobre conceptos básicos de robótica, incluyendo tipos de robots y configuraciones de movimiento. Además cuenta con una pequeña introducción a los diferentes tipos de corte por láser y el funcionamiento básico de generación del haz de luz láser. La segunda parte, descrita en el capítulo 3, se basa en el diseño y selección de componentes, tanto mecánicos como electrónicos, que se implementarán en la máquina. También trata sobre el control de velocidad, posición y potencia del láser realizado a la máquina, al igual que el control realizado a los subsistemas requeridos para un óptimo funcionamiento de la misma. La tercera parte comprende el capítulo 4, en donde se expone la construcción e implementación componentes mecánicos, eléctricos y del láser en la máquina. Mientras que en el capítulo 5, se realiza un control estadístico de procesos que comprueba un correcto desempeño de los trabajos realizados. Por último, se detallan las conclusiones obtenidas durante su desarrollo así como las recomendaciones que pueden mejorar una siguiente versión de la máquina.

PALABRAS CLAVES

- **PLATAFORMA CNC**
- **CORTE LÁSER**
- **SUBSISTEMAS**
- **MÁQUINA**
- **CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS**

Abstract

This thesis deals with the design and construction of a CNC Laser Cutting platform, which main purpose is to cut and engrave in acrylic and wooden (MDF) materials. A brief explanation about basic concepts of robotics, including types of robots and motion settings, is done in the first section of this thesis. This entails the chapters 1 and 2. Furthermore, an introduction to laser principles and the different types of laser cutting processes are given. Chapter 3 presents the design and selection of components, both mechanical and electronics, to be implemented in the machine. It also discusses the speed control, laser power and positioning module implemented into the machine; additionally, the required subsystems control for the optimal operation is explained. Chapter 4 gives an explanation about the construction and implementation of mechanical, electrical and laser components set for in the machine. Furthermore, chapter 5 shows a statistical process control analysis, this proves the proper performance of the machine under different regimes of work. This thesis finalizes listing some conclusions and recommendations that identify the next steps that should be done in order to improve the current design.

KEYWORDS

- **CNC PLATFORM**
- **LASER CUTTING**
- **SUBSYSTEM**
- **MACHINE**
- **STATISTICAL PROCESS CONTROL**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, está sometiéndose a un proceso de modernización, el cual exige la potenciación de maquinaria manual a maquinaria CNC y la creación de nueva maquinaria útil para el proceso de capacitación de los estudiantes. Por lo cual, el jefe de laboratorio de procesos manufactura ha solicitado el diseño y construcción de una plataforma CNC de corte por láser en láminas de acrílico y madera MDF de hasta 6mm de espesor.

1.2. ANTECEDENTES

En el año 1917, el físico Albert Einstein publicó como una teoría el principio de un láser, cuando describió su teoría de la emisión estimulada. En 1960, el primer láser fue descrito como "una solución buscando un problema". En el corto plazo, y con un poco de pensamiento creativo, las cualidades distintivas del láser se encontraron para numerosas aplicaciones. El poder del láser produce un intenso haz de luz muy estrecho a partir de una sola orientación utilizada por la ciencia, la tecnología y la medicina. Hoy en día, los láseres están en todas partes: desde los laboratorios de investigación de física cuántica a los consultorios médicos, pasando por las cajas de los supermercados e incluso la red telefónica.

En el laboratorio de Procesos de Manufactura en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, se disponen de varias máquinas para realizar diferentes procesos de manufactura como por ejemplo tornos CNC, impresoras 3D, fresadoras, que benefician varios procesos de manufactura. Dentro del plan de implementar un laboratorio que sea lo más completo posible para procesos de prototipado, se necesita una cortadora por láser para facilitar el corte de materiales como el acrílico y la madera MDF, que a su vez

permitirán a la comunidad politécnica realizar varios prototipos utilizando esta máquina y as demás existentes en el laboratorio.

Para el funcionamiento del corte por láser, se montará en un robot cartesiano, cuyas dos articulaciones principales son prismáticas, sus ejes son ortogonales entre sí y los desplazamientos sobre ellos dan las coordenadas cartesianas X, Y, de los puntos de trabajo. La estructura puede ser de tipo cantiléver o en pórtico. Son rápidos, muy precisos, de fácil control, amplia zona de trabajo y elevada capacidad de carga, pero ocupan mucho espacio relativo y su elemento terminal-herramienta no es especialmente orientable. Se usan en aplicaciones que requieren movimientos lineales de alta precisión en zonas de trabajo que sean fundamentalmente un plano o planos paralelos.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El uso de la tecnología láser en la manufactura de materiales ha sido estudiado durante la última década y hoy en día es presentado, como una tecnología ampliamente insertada en el ámbito industrial. Las ventajas del control numérico computarizado es la facilidad de operación, programación más sencilla, mayor exactitud, adaptabilidad y menos costos de mantenimiento, la combinación del diseño con computadora y mayor productividad, entre otras.

La tecnología CNC permite que los movimientos de la maquinaria se realicen en forma programada en lugar de realizarse a mano por el operario como era tradicional. El control de los ejes de la máquina y por ende la trayectoria de la herramienta, es comandada por el CNC, el cual procesa una secuencia de instrucciones, comúnmente conocidas como el programa, que especifica los movimientos a realizar. Luego de procesar el programa, el ordenador CNC transmite unas señales eléctricas a los controladores de los motores, que instruyen como energizar a los motores, los cuales al responder mueven los ejes de la máquina a los cuales están conectados. Esta tecnología es ideal para la producción en serie de piezas y para realizar un mecanizado complejo y/o de alta precisión, ya que libera al operador de hacer trabajos repetitivos y también elimina posibles errores en sus movimientos.

La implementación de la plataforma de corte por láser, ayudará al fortalecimiento de conocimientos así como al uso y práctica de programación mediante sistemas CAD para el diseño de prototipos, piezas y partes, que puedan ser cortadas en esta máquina. Por su parte, el reconocimiento del código G, código de programación utilizado en maquinaria CNC, con el cual se familiarizarán de manera fácil y práctica para su posterior aplicación.

1.4.OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un robot cartesiano que permita el movimiento del cabezal láser para el corte de planchas de madera MDF o de acrílico mediante el control numérico computarizado.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Diseñar todos y cada uno de los elementos mecánicos y electrónicos que optimicen el desempeño de la máquina y de todos sus componentes.
- Definir las dimensiones del área de corte así como el espesor máximo de corte tanto en acrílico y madera MDF para lograr exactitud en los cortes de espesores deseados.
- Implementar el control del robot cartesiano y su correcto posicionamiento utilizando el programa MACH3 y una de las siguientes tarjetas: Mach3 USB Motion Card, CNC Ethernet smoothstepper o e-Cut Card.
- Verificar el funcionamiento del robot cartesiano basado en el haz de luz láser así como la precisión del corte del material.

1.5. ALCANCE DEL PROYECTO

El alcance de este proyecto es la construcción de un prototipo funcional de una máquina CNC de corte mediante láser, que sea de bajo costo en relación a las cortadoras industriales que utilizan el mismo principio.

El sistema será controlado por el software libre MACH3 que permitirá el movimiento en los 2 ejes establecidos y LAZYCAM, que permite la transformación de un archivo CAD a código G para su correcta operación. El diseño previo de las piezas o figuras que se cortarán con esta máquina, serán visualizadas en un computador que contenga programas de diseño CAD.

Además contará con diferentes elementos mecánicos, electrónicos y de control que permitan el correcto posicionamiento, corte y/o grabado en acrílico y madera MDF.

1.6. METODOLOGÍA

La metodología que se plantea para el desarrollo de un proyecto Mecatrónico, debe permitir la concurrencia de los sistemas mecánicos, eléctricos y de realizar una mejora continua a un plan inicial, el cual se puede apreciar en la Figura 1:

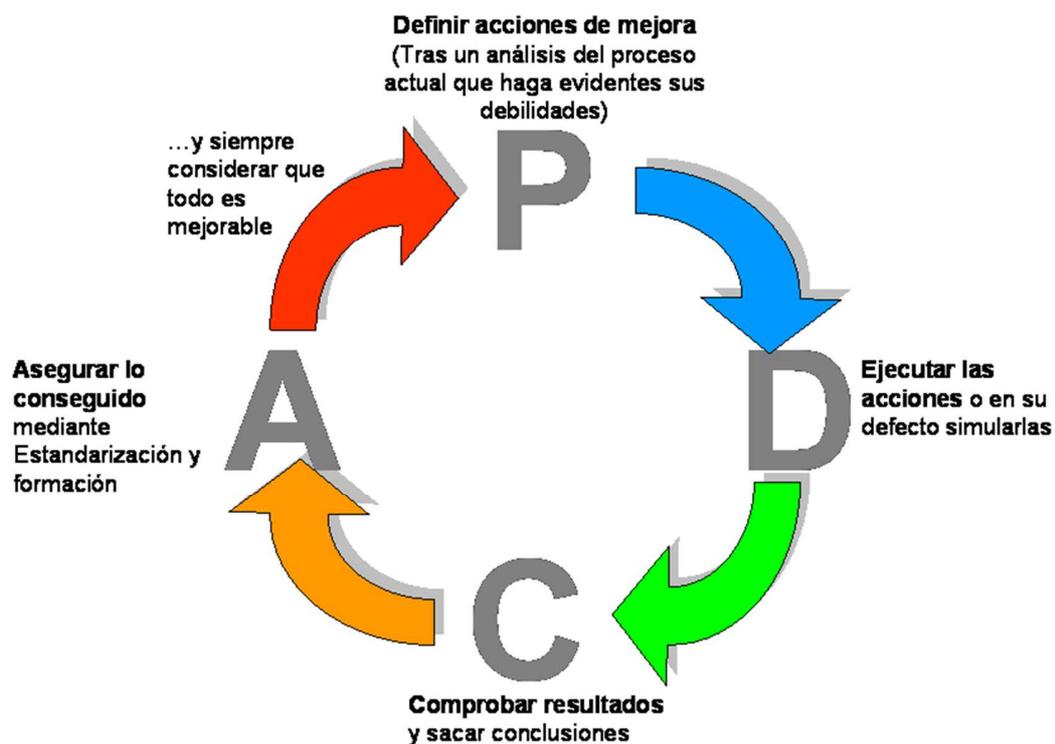


Figura 1.- Ciclo PDCA según Edwards Deming
Fuente: (Deming, 2010)

PDCA, por sus siglas en inglés, será el método que se aplique en este proyecto, detallado a continuación:

- Planificar: Todo proyecto necesita una previa investigación y posterior planificación para definir el camino a seguir y alcanzar las metas establecidas.
- Hacer: De acuerdo a lo planificado y definidos los componentes finales de la máquina, se procede con su ensamble y correcta ubicación.
- Verificar: Se realizan pruebas de funcionamiento para constatar el correcto desempeño de los componentes establecidos para lograr el objetivo propuesto.
- Actuar: Después de las pruebas, se realizan correcciones siempre que se encuentre algún mal funcionamiento de actuadores o sensores. Buscando la mejor manera para dar una solución óptima al problema.

1.7. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente documento se estructura en cinco capítulos claramente definidos.

En el primer capítulo se muestra la introducción del proyecto, los objetivos que se quieren completar, el alcance del proyecto y la importancia del mismo.

El segundo capítulo muestra la principal teoría de diferentes sistemas que componen una cortadora láser CNC, las normas de seguridad que se deben cumplir, y las aplicaciones de la madera MDF y acrílico que sustentan la importancia del proyecto.

En el tercer capítulo se presenta completamente el diseño de la máquina, empezando por los requerimientos de esta y pasando por la selección del láser, diseño de sistemas mecánicos, diseño electrónico, software de control y programación.

El cuarto capítulo hace referencia a la construcción de la máquina y montaje de los elementos que la conforman.

Finalmente, el quinto capítulo muestra las pruebas realizadas con la máquina y un estudio de los resultados que nos permite verificar que los objetivos se hayan cumplido.

Para terminar con el documento se presentan conclusiones y recomendaciones. También se adjuntan los planos y diagramas necesarios para la construcción y el mantenimiento de la misma.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. INTRODUCCIÓN AL CORTE POR LÁSER

2.1.1. Principios Básicos del Láser

Láser, acrónimo de “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” o “Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación”, es un dispositivo que emite un haz de luz monocromático intenso de frecuencia de onda definida. El fenómeno usado para la crear el rayo láser es el de emisión estimulada.

Se tienen dos modelos para poder describir físicamente el comportamiento del láser, en el primero se considera una onda electromagnética que se propaga en una dirección x , en cuyo caso su comportamiento estaría regido por las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3.

$$E(x, t) = A \cdot \sin(\omega t - kx) \quad (2.1)$$

$$\omega = 2\pi v = 2\pi/T \quad (2.2)$$

$$k = 2\pi/\lambda \quad (2.3)$$

En donde:

- $A \left[\frac{V}{m} \right]$: Amplitud del campo eléctrico.
- $\omega \left[\frac{rad}{s} \right]$: Velocidad angular o frecuencia angular.
- $v [Hz]$: Frecuencia de oscilación.
- $T [s]$: Periodo de oscilación.
- $k [m^{-1}]$: Llamado el vector de onda.
- $\lambda [m]$: Longitud de onda.

La longitud de onda y la frecuencia de oscilación están relacionadas mediante la ecuación 2.4 por medio de la velocidad de la luz c . La velocidad de la luz en el vacío tiene un valor de $299\,792\,458\text{ [ms}^{-1}\text{]}$.

$$c = \lambda v \quad (2.4)$$

En donde:

- $c\text{ [}\frac{m}{s}\text{]}$: Velocidad de la Luz.
- $v\text{ [Hz]}$: Frecuencia de oscilación.
- $\lambda\text{ [m]}$: Longitud de onda.

En el segundo modelo se lo considera un flujo de fotones, cada fotón se propaga a la velocidad de la luz y contiene energía igual a la descrita en la ecuación 2.5.

$$E = hv \quad (2.5)$$

En donde:

- $E\text{ [J]}$: Energía del fotón.
- $h\text{ [J}\cdot\text{s]}$: Constante de Plank ($h = 6.626 \times 10^{-34}\text{ [Js]}$).
- $v\text{ [Hz]}$: Frecuencia de oscilación.

Un átomo excitado puede decaer a su nivel bajo de energía de dos formas:

- 1.- El átomo decae espontáneamente (emisión espontánea) a un nivel bajo de energía emitiendo radiación incluso en ausencia de un estímulo que provoque esta disminución de energía.
- 2.- El átomo decae debido a un estímulo exterior (emisión estimulada) a un nivel bajo de energía emitiendo radiación que depende el estímulo recibido.

Para poder producir un rayo láser de alta energía se deben cumplir los siguientes requerimientos:

- 1.- *Inversión de Población*: Esto implica llevar átomos de un nivel bajo de energía a un nivel alto de tal manera que el número de átomos en el nivel alto de

energía sea superior al del nivel bajo. Para poder producir este fenómeno, se bombardea a los átomos con energía eléctrica o con destellos luminosos (emitidos por tubos de cuarzo con gases como kriptón y xenón) con longitudes de onda que faciliten la absorción de radiación, siendo este último el método más común para excitar átomos. Pero para poder llegar a una inversión poblacional, es necesario tener 3 o 4 niveles de energía, es decir en el caso de 3 (Figura 2), primero se elevan los átomos de un estado inicial E_0 a un estado energético E_2 , por medio de la absorción de radiación (de frecuencia calculada mediante la ecuación 2.5, $\nu = (E_2 - E_0)/h$), del cual decae rápidamente sin emitir radiación a un estado E_1 , llamado metaestable, en el cual las emisiones espontáneas son tan pocas que pueden ser despreciables.

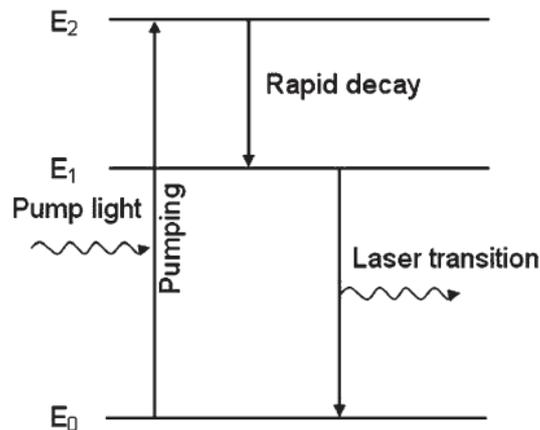


Figura 2.- Esquema de inversión de población en sistemas láser de tres niveles de energía.
Fuente: (Dahotre & Harimkar, 2008)

Para poder calcular la distribución de electrones en cierto nivel de energía se utiliza la ley de distribución de Maxwell-Boltzmann descrita en la ecuación 2.6.

$$N_2 = N_1 \cdot \exp[-(E_2 - E_1)/kT] \quad (2.6)$$

En donde:

- E_1, E_2 [J]: Energía en los niveles 1 y 2 respectivamente.
- N_1, N_2 $\left[\frac{1}{m^3}\right]$: Densidad de electrones o población en los niveles 1 y 2 respectivamente (número de electrones libres por unidad de volumen).

- $k [J \cdot ^\circ K^{-1}]$: Constante de Boltzmann $k = 1.380\ 6488(13) \times 10^{-23} [J \cdot ^\circ K^{-1}]$.
- $T [^\circ K]$: Temperatura de equilibrio del sistema.

2.- *Emisión Estimulada*: Se produce cuando se hace interactuar a un átomo en estado metaestable con un fotón estimulante de frecuencia definida, haciendo que el átomo decaiga a su nivel bajo de energía produciendo como resultado un fotón de igual frecuencia, energía, que viaja en la misma dirección y tiene la misma fase que el fotón inicial. De esta manera se logra que los rayos de luz viajen en la misma dirección para poder aumentar su intensidad, fenómeno que no sucederían si la emisión fuera espontánea. Para poder determinar la velocidad a la que se da la transición de electrones de un estado energético 1 a un estado energético 2 (con energía descrita por la ecuación 2.5) y sus diferentes emisiones, se usan las ecuaciones 2.7, 2.8 y 2.9.

$$dN_{\text{absorción}} = N_1 \cdot u(\nu) \cdot B_{12} \cdot dt \quad (2.7)$$

$$dN_{\text{emisión espon.}} = N_2 \cdot A_{21} \cdot dt \quad (2.8)$$

$$dN_{\text{emisión estim.}} = N_2 \cdot u(\nu) \cdot B_{21} \cdot dt \quad (2.9)$$

En donde:

- $N_1, N_2 \left[\frac{1}{m^3} \right]$: Densidad de electrones o población en los niveles 1 y 2 respectivamente (número de electrones libres por unidad de volumen).
- $u(\nu) \left[\frac{W}{m^2} \right]$: Densidad del campo de radiación incidente a una frecuencia ν .
- $B_{12} [J^{-1}m^3s^{-2}]$: Coeficiente de Einstein de absorción que da la probabilidad por unidad de tiempo y por unidad de densidad de energía espectral de que un electrón en un estado 1 con energía E_1 salte a un estado 2 con energía E_2 .
- $B_{21} [J^{-1}m^3s^{-2}]$: Coeficiente de Einstein de emisión inducida que da la probabilidad por unidad de tiempo y por unidad de densidad de energía

espectral de que un electrón en un estado 2 con energía E_2 decaiga a un estado 1 con energía E_1 emitiendo un fotón con energía $E = h\nu$.

- $A_{21} [s^{-1}]$: Coeficiente de Einstein de emisión espontánea que da la probabilidad por unidad de tiempo de que un electrón en un estado 2 con energía E_2 decaiga espontáneamente a un estado 1 con energía E_1 .

3.- *Amplificación*: Debido a que los fotones viajan en la misma dirección, con la misma fase, y frecuencia, se produce un efecto de resonancia resultando en un incremento de su amplitud de onda, sin embargo esto no es suficiente para obtener un láser de alta energía. Para poder amplificar las ondas, se realiza este proceso en una cavidad resonante que consiste en un conjunto de espejos bien alineados altamente reflejantes, de los cuales uno tendrá reflectividad muy cercana a 100% y el otro una menor, alrededor de 85%, para permitir la salida del rayo láser y al mismo tiempo continuar con el proceso (Figura 3). Para mantener una oscilación láser, la ganancia en la cavidad resonante debe ser suficiente para superar pérdidas por difracción, pérdidas por absorción y dispersión tanto en los espejos como en el medio donde se propaga el láser en la cavidad resonante, etc. Para poder superar estas pérdidas la ganancia G debe ser igual o mayor a la unidad cumpliendo así la condición en la ecuación 2.12. La ecuación 2.10 describe la irradiancia final después de la reflexión en los dos espejos de la cavidad resonante, la ecuación 2.11 define la ganancia en la cavidad resonante después de la reflexión en los dos espejos de la cavidad resonante y la ecuación 2.13 permite calcular el coeficiente de ganancia mínimo o umbral para que pueda existir amplificación en la cavidad resonante.

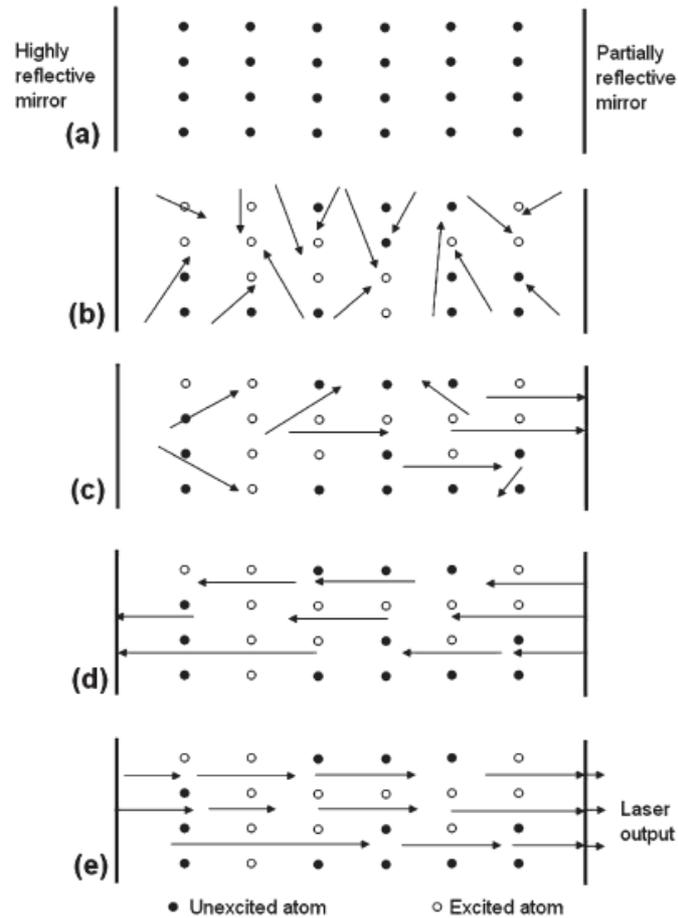


Figura 3.- Esquema de las etapas de amplificación: (a) estado inicial de bajo nivel de energía, (b) bombardeo óptico, (c) inicio de la emisión estimulada, (d) amplificación por emisión estimulada, (e) amplificación continua debido a la reflexión resultando en una subsecuente salida de rayos láser.

Fuente: (Dahotre & Harimkar, 2008)

$$I_1(L) = r_1 r_2 I_0 e^{2(k_{th} - \gamma)L} \quad (2.10)$$

$$G = \frac{I_1}{I_0} = 1 \quad (2.11)$$

$$r_1 r_2 e^{2(k_{th} - \gamma)L} = 1 \quad (2.12)$$

$$k_{th} = \gamma + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{r_1 r_2} \right) \quad (2.13)$$

En donde:

- $I_1, I_0 \left[\frac{W}{m^2} \right]$: Irradiancias final e inicial respectivamente.

- L [cm]: Longitud de la cavidad resonante (distancia entre espejos).
- r_1, r_2 : Reflectancia de los espejos 1 y 2 respectivamente.
- k_{th} [cm^{-1}]: Coeficiente de ganancia umbral.
- γ [cm^{-1}]: Coeficiente de pérdidas.
- G : Ganancia o ganancia de ida y vuelta.

2.1.2. Características del Rayo Láser

El rayo láser surge principalmente de la emisión estimulada y la cavidad resonante lo cual le da propiedades muy diferentes a la de la luz normal, estas propiedades permiten que el rayo láser tenga varias aplicaciones en campos como la medicina (dermatología, oftalmología principalmente), computación (lectura y escritura en unidades de almacenamiento óptico), metrología, manufactura, tratamientos superficiales, etc. Las principales características de este son:

- *Monocromaticidad*: Se refiere a la propiedad del láser de una longitud de onda definida que le permite permanecer en un espectro determinado de la luz, esto se produce debido a que la emisión estimulada se emiten protones iguales a los que interactúan con el átomo y la cavidad resonante mantiene sus propiedades de fase y frecuencia.
- *Colimación (Direccionalidad)*: Propiedad del láser de propagarse en una sola dirección sin divergencias, es decir que los fotones del rayo láser mantienen su dirección y se mantienen alineados, lo que permite enfocar el haz de luz en una pequeña zona determinada a grandes distancias.
- *Coherencia del Rayo*: Es el grado de orden de las ondas luminosas (Figura 4), es decir que los fotones al propagarse se encuentran alineados entre si ordenadamente teniendo una fase coherente o constante (es decir tiene la misma fase). Existen 2 tipos de coherencia, la espacial y la temporal.
 - *Coherencia espacial*: Correlaciona las fases del campo eléctrico de ondas luminosas en un mismo instante de tiempo pero en diferentes puntos del espacio, es decir que las ondas luminosas al propagarse

tienen una misma diferencia de fase en un tiempo $t_1 > 0$ y en un tiempo $t_2 > t_1 > 0$.

- *Coherencia temporal*: Correlaciona la fase del campo eléctrico de una onda luminosa en un mismo punto en el espacio dentro de un período de tiempo, es decir que la fase de campo eléctrico se mantiene constante en un periodo de tiempo T .
- *Brillo*: El brillo o resplandor es definido como la cantidad de potencia emitida por la luz en un área determinada, como los rayos láser son poco divergentes, se puede enfocar gran cantidad de fotones en una pequeña zona generando niveles altos de energía. Esta propiedad particularmente es la que permite que tenga aplicaciones en el campo de la manufactura.

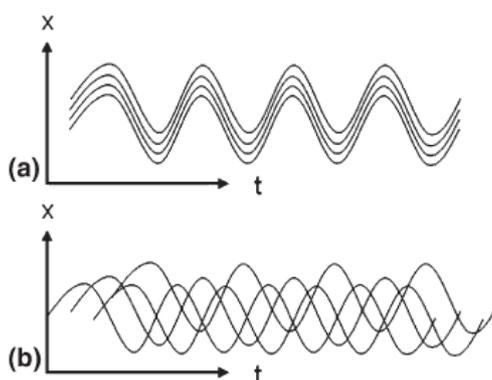


Figura 4.- Esquema Ilustrativo del concepto de coherencia: (a) haz de luz con ondas en coherencia espacial y temporal, y (b) haz de luz con ondas sin coherencia espacial y temporal. Fuente: (Dahotre & Harimkar, 2008)

- *Tamaño del Punto Focal (Enfoque Preciso)*: Se refiere a la propiedad del rayo láser de ser enfocado en áreas muy pequeñas, en el orden de los μm , haciendo que la energía se concentre en dicho espacio que es conocido como punto focal. Esto nos permite determinar la irradiancia que es el flujo de energía radiante por unidad de área, en otras palabras se puede concluir que mientras menor es el punto focal, mayor será la concentración de energía en dicha zona del láser.

- *Modos Temporales:* Es la forma en la que el láser sale del generador, puede ser de dos tipos, de onda continua, es decir que la energía del láser es descargada continua e ininterrumpidamente, o de pulsaciones, es decir que la energía del láser es descargada periódicamente.

2.1.3. Tipos de Láseres Industriales

Los láseres se clasifican basándose en la naturaleza física del medio de activación, de este modo aparecen cuatro grupos bien diferenciados que son:

- 1.- *Láseres de Estado Sólido:* Los láseres de estado sólido son aquellos en el cual se emplea un material en estado sólido dopado de un pequeño porcentaje de iones (impurezas) como medio de generación o activación. El láser de rubí fue el primer láser al cual se le dio aplicación y esta era medir distancias. Los principales láseres de estado sólido son Láser de Rubí, Nd:YAG, Nd:glass, Alexandrite, Ti-sapphire, Er:YAG, Nd:YLF. El láser Nd:YAG es el más importante de esta categoría, teniendo un sin número de aplicaciones en campos como medicina, campo militar, manufactura, etc. En el campo de la manufactura es especialmente usado para el grabado, corte y suelda de metales dado a sus altos niveles de energía. Puede ser usado para marcar materiales transparentes como acrílicos y vidrio, y para el proceso de prototipado rápido.
- 2.- *Láseres de Gas:* Los láseres de gas son aquellos en el cual se emplea un fluido en estado gaseoso como medio de generación o activación. La ventaja de estos láseres son que son baratos y su medio de activación es homogéneo. Sin embargo al ser un gas un fluido de baja densidad, se necesita un gran volumen del gas para obtener la inversión de población, por lo que estos láseres son de mayor tamaño. Los principales láseres de gas son HeNe, Argón, Kriptón, HeCd, CO₂, ArF, KrF, XeCl, XeF, Cooper vapor, Gold vapor. El láser de CO₂ es el más importante de esta categoría, sus principales aplicaciones en el campo de la manufactura en suelda de metales y corte de metales, MDF, acrílico y otros materiales suaves.

- 3.- *Láseres de Semiconductor:* Los láseres de semiconductor son aquellos en el cual se emplea materiales semiconductores tipo n y tipo p para la activación. Aunque al principio parece que estos láseres pertenecen a la categoría de láseres de estado sólido esta asociación es errónea debido a que los láseres de semiconductores se activan por medio de recombinación radiactiva similar a la que ocurre en los diodos LED, es decir, cuando se polariza directamente a estos, los electrones se recombinan con los huecos en el dispositivo liberando energía en forma de fotones. Sin embargo a diferencia de los diodos LED, cuando a un semiconductor láser se le polariza con una cierta corriente (dependiendo del tipo de semiconductor) mayor a la corriente de umbral, se invierte la población y con la emisión estimulada se logra la acción láser. Los principales láseres de Semiconductor son InGaAs, AlGaInP, InGaAsP, AlGaAs. Sus aplicaciones abarcan diferentes campos como las telecomunicaciones como fuente de luz para la fibra óptica, lectores de código de barras, lectores de CD, DVD, Blu-ray, tratamientos térmicos, revestimientos, soldadura de costura y para el bombeo de otros láseres.
- 4.- *Láseres de Colorante:* Los láseres de colorante son aquellos en el cual se emplea solución líquida que consiste en colorantes orgánicos disueltos en un solvente adecuado para la activación. La principal característica de estos láseres es que ofrecen una amplia gama de longitudes de onda, las cuales pueden ser sintonizables. Los principales láseres de Semiconductor son Rhodamine 6G, Coumarin 102, Stilbene. Sus aplicaciones abarcan principalmente campos como la dermatología (tratar cicatrices, remover tatuajes, broncear la piel), astronomía, separar isótopos y manufactura.

2.1.4. Interacción de Láseres con Materiales

El hecho de que el rayo láser incida en un material implica que en la superficie del material incide radiación electromagnética, como el láser es un tipo de luz pueden existir diferentes reacciones entre las cuales tenemos reflexión, refracción, transmisión, dispersión y absorción. Esta última es la de mayor importancia en manufactura debido a

que este fenómeno resulta en varios diferentes efectos en el material en el que el láser incide (Figura 5), entre los principales efectos tenemos calentamiento, derretimiento de la superficie, vaporización de la superficie, formación de plasma y ablación, los cuales son la base de varios procesos de maquinado. Los efectos causados por la absorción son conocidos como efectos térmicos, y generalmente resultan en la excitación de electrones libres, vibraciones, o ambos.

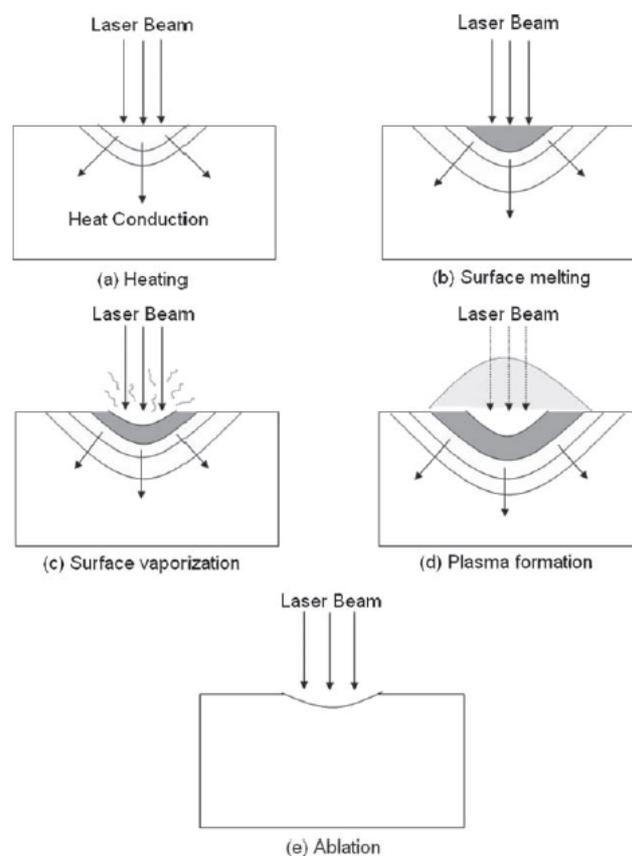


Figura 5.- Varios efectos de la interacción del rayo láser con los materiales: (a) calentamiento, (b) derretimiento de la superficie, (c) vaporización de la superficie, (d) formación de plasma y (e) ablación.

Fuente: (Dahotre & Harimkar, 2008)

Para poder estimar la cantidad de energía absorbida por el material es necesaria la aplicación de la ley de Beer-Lambert la cual relaciona la intensidad incidente con la profundidad a la que esta se encuentra en contacto con el material. La ecuación 2.14 permite calcular la energía absorbida.

$$I(z) = I_0 e^{-\mu z} \quad (2.14)$$

En donde:

- $I(z) \left[\frac{W}{m^2} \right]$: Irradiancia a una profundidad z .
- $I_0 \left[\frac{W}{m^2} \right]$: Irradiancia incidente en la superficie del material.
- $\mu [cm^{-1}]$: Coeficiente de absorción.
- $z [cm]$: Profundidad medida desde la superficie del material, donde incide inicialmente el láser, hacia adentro del material.

2.1.5. Corte por Láser

El corte por láser es un proceso térmico de maquinado de dos dimensiones mediante el cual se remueve el material de una zona específica de la pieza de trabajo mediante el enfoque de un rayo láser de alta intensidad. Este proceso se lleva a cabo mediante la absorción de la radiación luminosa del láser por parte del material, pasando por procesos térmicos de calentamiento, derretimiento y vaporización del material. El corte por láser es un proceso de alta velocidad que nos permite tener un buen acabado ya que produce cortes finos de alta precisión. Puede cortarse con láser tanto materiales suaves (como madera o acrílico) como materiales duros (metales), en el caso de metales, es necesario el uso de un chorro de gas adicional para aumentar la eficiencia y para remover material derretido de la zona de corte, en el caso de materiales suaves se usa un chorro de aire natural para evitar que los gases causados por la vaporización empañen la lente. El corte por láser es un proceso industrial de alta eficiencia que presenta las siguientes ventajas:

- Es un proceso en el cual no existe contacto de herramientas con la pieza de trabajo, por lo cual no es necesario el uso de sujetadores lo que permite el maquinado de materiales flexibles y muy delgados.
- Es un proceso fácil de automatizar por lo que la mayoría de cortadoras láser son máquinas CNC dándole al proceso velocidades altas de corte y control preciso de las dimensiones de corte.

- Es un proceso que brinda un muy buen acabado en los cortes debido a que como es una luz enfocada de alta intensidad minimiza el esfuerzo térmico (expansión y contracción del material) producido alrededor de la zona de corte.
- Es un proceso flexible que permite el maquinado de distintos tipos de materiales desde metales ferrosos y no ferrosos hasta no metales.

Existen diferentes formas de realizar el corte por láser, esto es definido principalmente por las propiedades térmicas y físicas del material a maquinar, por el espesor y por el tipo de láser a emplearse para el proceso. Los cuatro tipos de corte por láser existentes se detallan a continuación:

1. *Corte por evaporación láser:* Proceso de corte por láser mediante el cual se vaporiza el material por medio de la absorción de la energía del rayo láser. Debido a que el cambio de fase es directamente a vapor, el acabado es de alta calidad con bordes limpios (sin muchas irregularidades). Se usa gas inerte (gas que no reacciona químicamente en condiciones normales) para potenciar el corte. Este proceso es ideal para el maquinado de materiales orgánicos como tela, papel, madera y otros polímeros, dado a su baja conductividad térmica y bajo punto de vaporización. La velocidad de penetración del rayo láser en la pieza de trabajo puede ser estimada asumiendo que el flujo de calor es unidimensional.
2. *Corte por fusión láser:* Proceso de corte por láser mediante el cual se derrite el material por medio de la absorción de la energía del rayo láser y en el cual se usa un chorro de gas no reactivo (como argón y nitrógeno) constante para desalojar el material derretido. Debido a que se crea una pequeña capa de material derretido, el láser debe estar levemente inclinado al igual que el chorro de aire. En el corte por fusión láser la energía requerida de la fuente para realizar el maquinado es menor. Este proceso es ideal para el maquinado de materiales no ferrosos como titanio, aluminio, etc., de alta conductividad térmica.

3. *Corte láser reactivo o asistido por oxígeno:* Proceso de corte por láser mediante el cual el material es calentado por medio de la absorción de la energía del rayo láser hasta el punto en el que se produce una reacción exotérmica con el gas oxidante (oxígeno) la cual evapora la capa derretida del material dejada por el calentamiento del láser. Este proceso es ideal para el maquinado de materiales como acero suave, acero inoxidable, titanio y aleaciones de aluminio, debido a su alta conductividad térmica y a que reaccionan químicamente con el oxígeno.
4. *Técnica de fractura controlada:* Proceso de corte por láser mediante el cual la energía del láser que incide en un material le aplica un esfuerzo mecánico en el área en la que apunta el láser, provocando así una separación (fractura) controlable del material. La energía usada para este proceso es menor a la que se usaría si se tratara de evaporar el material, y debido a que la fractura tiende a propagarse, la velocidad en este proceso es superior a la de los demás. Los láseres de este tipo generalmente usan dos fuentes, una Nd-YAG y una de CO_2 , siendo la primera la que incide perpendicularmente en el material y la segunda la que incide con cierta inclinación causando así un esfuerzo térmico que provoca la fractura. Este proceso es ideal para el maquinado de materiales como alúmina, y otros materiales cerámicos, debido a su naturaleza quebradiza.

Aunque el proceso de corte por láser es un proceso de alta calidad y buen acabado, se puede ver que la zona que rodea a la trayectoria de corte tiene diferentes aspectos dependiendo del tipo de corte usado, las zonas principalmente pueden mostrar estrías, rebabas y efectos de calentamiento que puede causar cambios en las propiedades del material en esa zona.

2.1.6. Parámetros del Corte por Láser

El corte por láser es un proceso complejo en donde varios parámetros determinan la geometría y calidad metalúrgica de las piezas de trabajo. A continuación se detallará los efectos de los principales parámetros en el proceso de cortado:

- *Efectos del tipo de láser:* El tipo de láser puede afectar en el acabado de los cortes, por ejemplo en la industria el láser más usado es el láser de CO_2 de onda continua debido a su flexibilidad para cortar gran variedad de materiales, sin embargo el Nd-YAG se está popularizando al cortar mismos espesores con menos potencia de la fuente y dejando un mejor acabado. Sin embargo al momento de aplicaciones médicas el ultravioleta es el más usado, todo depende de la aplicación que se desee realizar.
- *Efecto de la potencia del láser:* La potencia del láser determina la energía transmitida a la pieza de trabajo, por lo tanto la calidad y ejecución del corte son determinadas por este parámetro. También determina el avance máximo que es definido como la máxima velocidad a la que se produce el corte. Se puede concluir que a mayor potencia del láser y menor avance se tiene un mayor ancho de corte, a mayor potencia del láser y mayor avance se tiene un acabado con menos aspereza, es decir mejor acabado.
- *Efecto del sistema óptico (lente):* El sistema óptico básicamente se refiere a la lente con la que se trabaja para enfocar el láser. La lente determina la distribución de energía en el rayo, el diámetro del rayo, la profundidad de corte y la posición del láser con respecto a la pieza de trabajo.
- *Efecto de los parámetros de la boquilla:* El mayor aporte de la boquilla es que permite el flujo de gas hacia la pieza de trabajo cuando se usa un chorro de gas para potenciar el corte. Este parámetro influye evitando que vapores empañen la lente, y ayudando a expulsar el material derretido de la pieza de trabajo, en otras palabras el tamaño de boquilla influye en la cantidad de material removido de la pieza de trabajo y la fuerza con la que este sale despedido.

- *Efecto del tipo de gas usado para potenciar el proceso:* Este parámetro principalmente determina la cantidad de calor añadido al proceso de corte, esto depende del tipo de gas usado. En el caso del corte reactivo, el gas usado (oxígeno) juega un rol muy importante al provocar la reacción química para evaporar el material derretido.

2.2. INTRODUCCIÓN A LA ROBÓTICA

2.2.1. Definición

Actualmente la robótica experimenta un cambio marcado en cuanto a expansión de aplicaciones y campos de actuación, que en cierta medida se encuentran saturadas dentro de talleres de fabricación y que por no existir un estándar de productos o procesos también toman gran cabida en aplicaciones fuera de taller.

La mayoría de definiciones existentes hacen referencia al robot más utilizado destinado a la fabricación flexible o también conocido como robot industrial o robot de producción, dentro de los cuales se encuentran los robots para corte.

La definición más comúnmente aceptada proviene de la Asociación de Industrias Robóticas (RIA), la cual define:

“Un robot industrial es un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materia, herramientas, piezas o dispositivos especiales, según trayectorias variables, programadas para realizar diversas tareas”.

Esta definición ha sido adoptada y modificada parcialmente por la Organización Internacional de Estándares (ISO), que define a un robot industrial como:

“Manipulador multifuncional reprogramable con varios grados de libertad, capaz de manipular materias, piezas, herramientas o dispositivos especiales según trayectorias variables programadas para realizar diversas tareas”.

La ISO hace referencia a que un robot debe tener varios grados de libertad para ser llamado como robot industrial, cumpliendo las características mencionadas en la definición de la RIA.

2.2.2. Morfología del Robot

2.2.2.1. Estructura Mecánica de un Robot

Un robot se conforma por una serie de elementos o eslabones que se unen por medio de articulaciones permitiendo el movimiento relativo entre cada dos eslabones consecutivos. El movimiento de cada articulación puede ser de desplazamiento, de giro o una combinación entre ambos, lo que da lugar a los 6 tipos de articulaciones, indicados en la Figura 6, de las cuales las más utilizadas son la rotacional y la prismática.

Se denomina Grado de Libertad (GDL) a cada movimiento independiente que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior, como se muestra en la Figura 6, cada articulación con sus respectivos grados de libertad. El número de grados de libertad de un robot se determina por la suma de los grados de libertad de cada una de las articulaciones que conforman dicho robot.

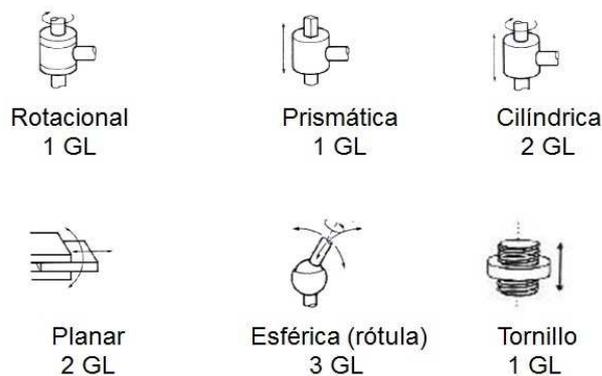


Figura 6.- Tipos de articulaciones para robots.
Fuente: (Barrientos & Peñin, Morfología del Robot, 1996)

Al emplear diferentes combinaciones de articulaciones en un robot se obtienen varias configuraciones dependiendo del diseño, construcción y aplicación del robot, como se muestran en la Figura 7. Tomando en cuenta que para posicionar y orientar un cuerpo en el espacio son necesarios 6 parámetros, 3 para posicionar y 3 para orientar, un robot debería tener al menos 6 GDL para saber con exactitud su posición y orientación.

En la práctica, al ser necesarios los 6 GDL para contar con el correcto posicionamiento y orientación del extremo del robot, existen robots con tan solo 4 o menos GDL, que cumplen con sus funciones específicas.

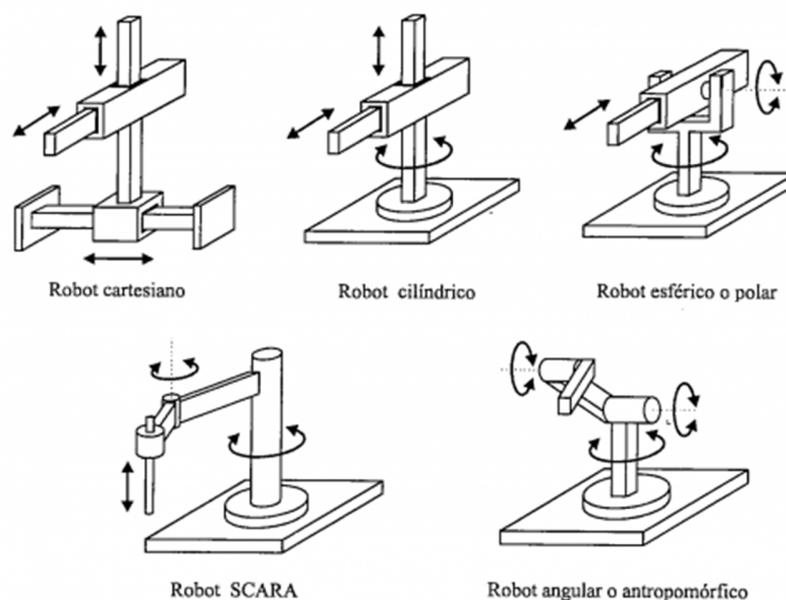


Figura 7.- Configuraciones frecuentes para Robots.
Fuente: (Barrientos & Peñin, Morfología del Robot, 1996)

2.2.2.2. Robot Cartesiano

Al trabajar en un plano, con su sistema coordenado OXY de referencia, un punto a se expresa por los componentes (x, y) que corresponden a los ejes coordenados del sistema OXY . A dicho punto se asocia un vector $P(x, y)$ que parte del origen O hasta el punto a , como se muestra en la Figura 8-a). De esta manera la posición del extremo del vector P se denomina por los componentes (x, y) , denominados coordenadas cartesianas del vector y que son las proyecciones del mismo sobre los ejes OX y OY .

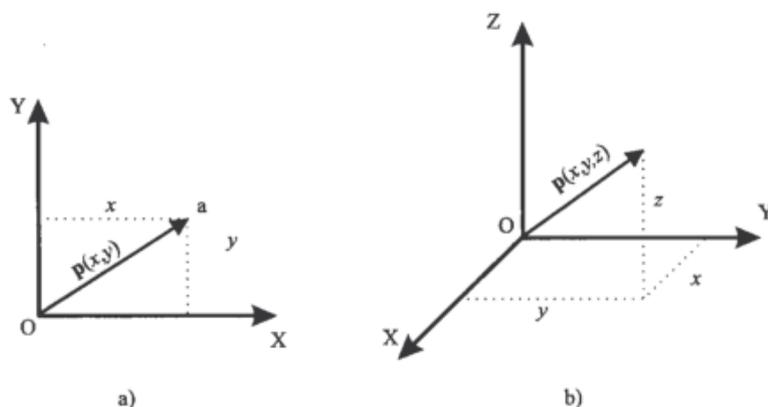


Figura 8.- Representación de un vector en coordenadas cartesianas en (a) 2 dimensiones y (b) 3 dimensiones.

Fuente: (Barrientos & Peñin, Morfología del Robot, 1996)

En el caso de trabajar en tres dimensiones, el vector se denomina con respecto al sistema de referencia $OXYZ$ mediante las coordenadas correspondientes a cada uno de los ejes, como se indica en la Figura 8-b), el vector P está definido por los componentes cartesianos (x, y, z) .

El robot cartesiano demostrado en la Figura 7, presenta las tres articulaciones prismáticas, esta configuración es bastante usual en estructuras industriales, como los pórticos que se emplean para el transporte de grandes cargas. En esta configuración se simplifica el trabajo del controlador del robot que genera las órdenes para ejecutar una trayectoria que se define mediante una secuencia de puntos expresados en coordenadas cartesianas.

2.3. SENSORES Y ACTUADORES

2.3.1. Actuadores

La misión de los actuadores es generar o transmitir movimiento para que los elementos del robot cumplan con las órdenes dadas por el sistema de control. Existen diversos componentes con características diferentes entre cada uno de ellos, hay que analizarlas para seleccionar el tipo de actuador más conveniente, entre estas características se tiene:

- Potencia

- Controlabilidad
- Peso y volumen
- Precisión
- Velocidad
- Mantenimiento
- Costo

2.3.1.1. Tornillo Sin Fin

El tornillo sin fin (Figura 9) es un elemento que transmite el movimiento entre ejes perpendiculares entre sí. Su funcionamiento se basa en convertir el movimiento rotacional que se genera gracias a un motor, en un movimiento lineal. Esto se logra fijando una tuerca o acople para que no rote junto con el tornillo, por esta razón, mientras el tornillo gira, el acople se desplaza de manera lineal.



Figura 9.- Tornillos sin fin.
Fuente: (Rolled Threads Unlimited, 2014)

Cada vez que el tornillo sin fin da una vuelta completa, el acople avanza un número de dientes igual al número de entradas del sin fin. La velocidad de giro del eje conducido depende del número de entradas del tornillo y del acople.

2.3.1.2. Ballscrew

Un tornillo de bolas (Figura 10) es un actuador lineal que convierte el movimiento rotacional en un movimiento lineal prácticamente con una fricción nula, logrando un avance preciso.



Figura 10.- Ballscrew.
Fuente: (EnKon, 2013)

Para la selección del tornillo sin fin y el ballscrew, hay que tomar en cuenta algunos factores como son:

- Velocidad requerida (rpm).
- Velocidad máxima.
- Carga máxima.
- Tipo de apoyo.

Entre otros factores que determinarán la correcta selección de los elementos y para ello se utilizan las siguientes fórmulas:

$$C_s = F \left(4.76 \times 10^6 \frac{d}{L^2} \right) \quad (2.15)$$

Donde:

- C_s [rpm]: Velocidad máxima.
- d [m]: Diámetro de la raíz del tornillo.
- L [m]: Distancia entre apoyos.
- F [m^{-1}]: Factor de apoyo. (Ver Figura 11)
 - A = 0.36
 - B = 1.00
 - C = 1.47
 - D = 2.23

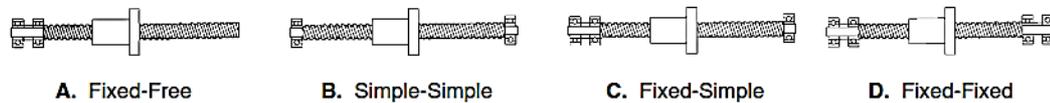


Figura 11.- Tipos de Apoyos.
(TECHNOINC, 2015)

$$P = F \left(14.03 \times 10^6 \frac{d}{L^2} \right) \quad (2.16)$$

Donde:

- P [lb]: Carga máxima.
- d [m]: Diámetro de la raíz del tornillo
- L [m]: Distancia entre apoyos.
- F [m^{-1}]: Factor de apoyo. (Ver Figura 11)
 - $A = 0.25$
 - $B = 1.00$
 - $C = 2.00$
 - $D = 4.00$

Utilizando estas fórmulas y un catálogo cualquiera de tornillos de bolas, se pueden obtener el diámetro necesario y el paso del tornillo que mejor se adapte a los requerimientos.

2.3.1.3. Motores Paso a Paso

Los motores paso a paso (Figura 12) no se consideraban dentro de accionamientos industriales, debido a que sus pares de torsión eran muy pequeños y los pasos entre posiciones consecutivas muy grandes. Se limitaban a controles de posición bastante simples pero en los últimos años han mejorado notablemente sus características técnicas especialmente con lo relacionado a su control y se ha permitido fabricar estos motores capaces de desarrollar pares suficientes en pequeños pasos.



Figura 12.- Motor a Pasos NEMA 17.
Fuente: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2015)

Existen circuitos especiales que simplifican el control de estos motores, que a partir de tres señales generan las secuencias de pulsos para que el circuito de conmutación distribuya a cada fase del motor. La principal ventaja con respecto a los servomotores tradicionales es que asegura un posicionamiento simple y exacto, además giran de manera continua con velocidad variable. Su potencia nominal es baja y el mínimo ángulo de giro llega comúnmente a 1.8° .

Para el movimiento de los ejes X e Y de la cortadora láser, se debe considerar la disposición mostrada en la Figura 13, que representa el movimiento horizontal de la carga anclada al torillo sin fin, utilizando el motor a pasos.

En la ecuación 2.17 se encuentra el torque necesario para mover la carga, gracias al esquema de la Figura 13. Y en las ecuaciones 2.18, 2.19 y 2.20, se muestran las inercias necesarias para llegar al torque requerido.

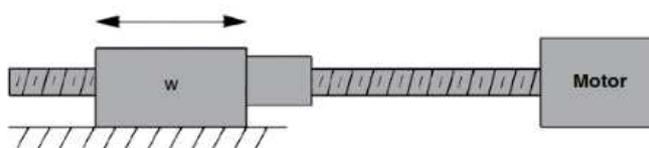


Figura 13.- Esquema de movimiento de carga. Ejes X e Y.

$$T = 2 \times I_0 \times \frac{\omega'}{t} \times \frac{\pi \cdot \theta}{180} \quad (2.17)$$

Donde:

- T [oz. in]: Torque requerido.
- I_0 [lb. in²]: Carga Inercial.
- θ [grados]: Ángulo de paso.
- ω' [$\frac{\text{pasos}}{s}$]: Velocidad.

$$I_0 = I_{eq} + I_{tornillo} + I_{rotor} \quad (2.18)$$

Donde:

- I_0 [lb. in²]: Carga Inercial.
- I_{eq} [lb. in²]: Inercia Equivalente.
- $I_{tornillo}$ [lb. in²]: Inercia del tornillo.
- I_{rotor} [lb. in²]: Inercia del rotor.

$$I_{eq} = W \times \frac{1}{p^2} \times 0.025 \quad (2.19)$$

Donde:

- W [lb]: Peso.
- p [$\frac{\text{hilos}}{\text{in}}$]: Paso.

$$I_{tornillo} = D^4 \times L \times 0.028 \quad (2.20)$$

Donde:

- D [in]: Diámetro del tornillo.
- L [in]: Longitud roscada del tornillo.

2.3.2. Sensores

Para lograr que un robot realice correctamente su tarea y con una gran precisión, velocidad e inteligencia, debe tener conocimiento de su estado propio como el de su

entorno. En la Tabla 1 se muestran varios tipos de sensores internos que facilitan el buen funcionamiento del robot.

2.3.2.1. Sensores de Posición

En el caso del control de la posición angular de un elemento se utilizan esencialmente los Encoders y resolvers. Los Encoders constan de un disco transparente con marcas opacas equidistantes entre sí ubicadas radialmente, como muestra la Figura 14, el eje el cual se quiere medir su posición va acoplado al disco transparente, mientras el eje gira se generan pulsos en el receptor cada vez que la luz atraviesa una marca y se lleva la cuenta de pulsos para saber la ubicación del eje.

Tabla 1.
Tipos de sensores internos

Presencia	Inductivo	
	Capacitivo	
	Efecto Hall	
	Célula Reed	
	Óptico	
	Ultrasonido	
	Contacto	
Posición	Analógicos	Potenciómetros
		Resolver
		Sincro
	Digitales	LVDT
		Encoders absolutos
		Encoders incrementales
		Regla óptica
Velocidad	Taco generatriz	

Fuente: (Barrientos & Peñin, Morfología del Robot, 1996)

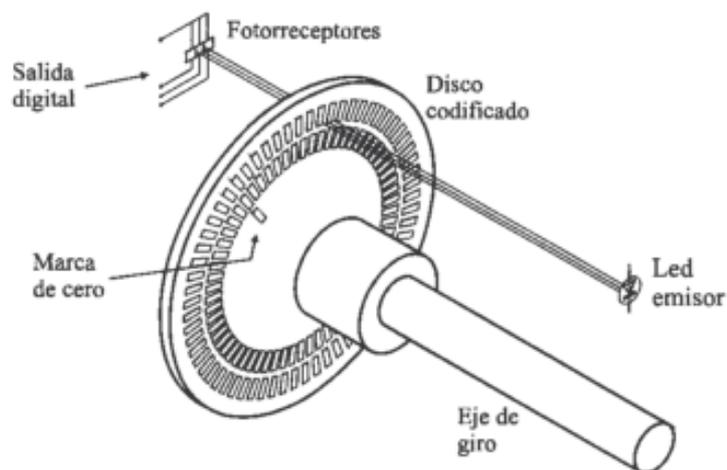


Figura 14.- Disposición de un encoder incremental.
Fuente: (Barrientos & Peñin, Morfología del Robot, 1996)

Por su parte los resolvers y los sincroresolvers, se tratan de sensores analógicos en teoría con resolución infinita. Su funcionamiento se basa en una bobina solidaria al eje excitado por una portadora y por dos bobinas (Figura 15), su exactitud estática está definida como la diferencia entre la posición física del eje y la señal eléctrica de salida, esta es relativamente alta tanto en resolvers o en codificadores ópticos.

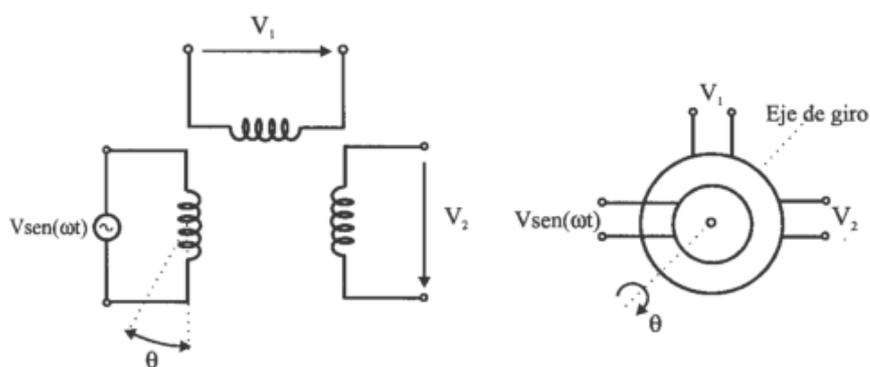


Figura 15.- Esquema de funcionamiento de un resolver.
Fuente: (Barrientos & Peñin, Morfología del Robot, 1996)

Entre los sensores de posición lineales se destaca el transformador diferencial de variación lineal o LVDT gracias a su poco rozamiento y alta repetitividad. Se basa en un núcleo de material ferromagnético unido al eje el cual se quiere medir su movimiento, este núcleo se desplaza linealmente entre un devanado primario y dos secundarios (Figura 16). El LVDT presenta una alta linealidad, gran sensibilidad y una alta respuesta dinámica, su uso es extenso a pesar de ser aplicado en la medición de pequeños desplazamientos.

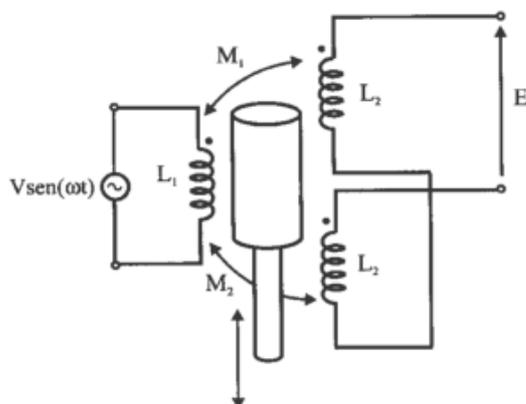


Figura 16.- Esquema de funcionamiento de LVDT.
Fuente: (Barrientos & Peñin, Morfología del Robot, 1996)

2.3.2.2. Sensores de Presencia.

Estos sensores son capaces de detectar la presencia de un objeto dentro de un radio de acción determinado, esta detección puede ser con o sin contacto con el objeto. Existen varios tipos de estos sensores, como lo muestra la Tabla 1. Los sensores de presencia se utilizan en robótica como auxiliares de los sensores de posición que pueden indicar límites de movimiento o permiten localizar la posición de referencia de un elemento.

Los sensores inductivos permiten detectar la presencia de objetos metálicos sin la necesidad de que exista contacto, el mismo principio cumplen los sensores capacitivos, aunque los objetos que detecta no necesariamente son metálicos. Por su parte los sensores de efecto Hall detectan objetos ferromagnéticos por la deformación que estos provocan sobre un campo magnético.

2.4. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE MECANIZADO CNC

Un sistema de mecanizado CNC es un conjunto automatizado de máquinas, herramientas, drivers y programas de control que son operados mediante comandos previamente programados. El lenguaje en el que se programa los comandos se llama código G, el cual describe un conjunto de movimientos que debe realizar la máquina para obtener un elemento previamente diseñado en un software CAD.

Los principales componentes de un sistema de mecanizado CNC son los mostrados en la Figura 17.

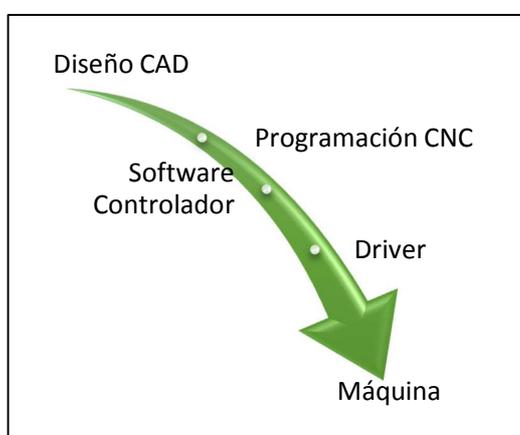


Figura 17.- Componentes de un Sistema de Mecanizado CNC.

2.4.1. Diseño CAD

CAD (Computer Aided Desing) o diseño asistido por computadora es el uso de programas para el diseño o representación gráfica computarizada de objetos en dos o tres dimensiones. Los programas CAD son usados en animaciones computacionales, efectos en películas, publicidad y productos industriales. CAD también es utilizado para procesos de ingeniería desde diseño conceptual hasta la presentación de productos.

Los programas CAD presentan los siguientes beneficios:

- Agilizan el proceso de diseño mediante la fácil visualización del producto final, sub-ensambles y piezas.
- Se reducen los errores al ofrecer gran exactitud en el diseño.

- Brinda una documentación detalla del diseño incluyendo geometría, dimensiones, lista de materiales, etc.
- Permite la reutilización sencilla de diseños.
- Reduce los costos de desarrollo de productos.
- Aumenta la productividad.
- Mejora la calidad del producto.

Algunos de los programas CAD más populares se presentan a continuación:

- *AutoCAD*: Es un software CAD usado para el diseño en 2D y 3D muy popular internacionalmente por sus amplias capacidades de edición, interfaz amigable con el usuario y que faculta el uso de comandos rápidos que permite al diseñador crear modelos rápidamente.
- *SolidWorks*: Es un software CAD cuya principal característica es que permite el modelado rápido en 3D. El programa permite modelar piezas y ensamblajes y extraer de ellos planos. También es un programa CAE que permite la simulación y cálculo de efectos que fenómenos físicos causan en los modelos diseñados.
- *NX*: Es una gama de aplicaciones de tipo CAD/CAM/CAE, aborda la variedad completa de procesos de desarrollo de diseño de productos, manufactura y simulación.
- *Solid Edge*: Es un programa híbrido de CAD en 2D y 3D que usa Synchronous Technology para mejor reutilización de importaciones, cambios ágiles y acelerar el diseño. Ofrece al usuario la posibilidad de modelar partes y ensamblaje, borradores, administración de datos y análisis de elementos finitos.

2.4.2. Programación CNC

Un programa CNC es una lista secuencial de comandos o códigos de maquinado, las cuales tienen toda la información necesaria que serán ejecutadas por la máquina para el mecanizado de la pieza.

La programación de una máquina CNC se realiza mediante un lenguaje conocido como G-code, dentro de este existen dos tipos de códigos, los códigos G (Generales) y los M (Misceláneos).

- *Códigos G*: Son comandos que representan funciones de movimiento de la máquina. Algunos ejemplos son movimientos rápidos, avances radiales, pausas, ciclos.
- *Códigos M*: Son comandos que ejecutan funciones misceláneas o auxiliares que se requieren para el maquinado de piezas, pero cabe recalcar que no son movimientos de máquina. Algunos ejemplos son arranque y paro del husillo, cambio de herramienta, refrigerante, paro de programa, etc.

Existen programas que facilitan el proceso de programación al tomar un diseño CAD y transformarlo en código G para luego cargarlo en un controlador que se encargará del proceso de maquinado. Algunos de los principales programas que transforman el diseño CAD en código G son:

- *LazyCamPro*: Es un programa incluido con el software Mach3 cuyo propósito es importar archivos tipo CAD en formatos .dxf, .dwg, .cmx, etc., y transformarlos en código G el cual será cargado al controlador Mach3.
- *D2NC*: Es un programa usado para generar el código G que es completamente compatible con el software Mach3
- *MeshCam*: Es un programa flexible usado para generar código G de diseños CAD realizados en Rhino, SolidWorks, Inventor, Viacad, AutoCAD y de la mayoría de programas de diseño. Incluso se puede cargar una imagen JPG, BMP O PGN y convertirla en una superficie que puede ser maquinada.

2.4.3. Software Controlador

El software controlador es el programa encargado de interpretar el programa en código G y codificarlo en señales eléctricas que serán enviadas al driver para realizar el proceso de maquinado.

Las señales enviadas al driver de la máquina serán transmitidas en la mayoría de casos por medio de comunicación serial, paralela o Ethernet principalmente. Entre los principales programas controladores se encuentran:

- *Mach3*: Es un programa que corre en una PC, funciona bajo el sistema operativo Windows, permite controlar una máquina de hasta 6 ejes. Ofrece la posibilidad de personalizar su interface y agregar botonería externa. La comunicación se puede establecer de forma paralela, Ethernet o USB.
- *TurboCNC*: Es un programa que corre en una PC, funciona en MSDOS, que permite controlar una máquina de hasta 8 ejes. Su interface es muy simple sin embargo la precisión que ofrece al momento de controlar movimientos mantiene al software competitivo. La comunicación es de forma paralela.
- *LinuxCNC*: Es un programa que corre en una PC, que funciona bajo el sistema operativo Linux, permite controlar una máquina de hasta 9 ejes. Dispone de una librería abierta que permite controlar desde motores a paso hasta servomotores por PWM. Puede incluso manejar elementos robóticos con ejes no cartesianos.

2.4.4. Driver

Driver es la tarjeta de control que recepta las señales enviadas por el controlador y los transforma en señales de control para los actuadores, en este caso servomotores, que se encuentran en las máquinas CNC, de esta manera se accionan los ejes de la máquina y empieza el proceso de maquinado.

La tarjeta de control debe ser compatible con el controlador para que la máquina funcione de manera adecuada por lo que en el mercado existen variedad de drivers para los principales controladores.

Algunos ejemplos de drivers se muestran a continuación:

- Mach3:
 - Mach3 Usb Motion Card.
 - Cnc Ethernet smoothstepper.

- LinuxCNC:
 - HostMot2.
 - Universal Stepper Controller.
 - UPC.
 - PPMC.

2.4.5. Máquina

Máquina es el conjunto de elementos fijos y móviles que actúan en conjunto con la finalidad de producir un trabajo o realizar un producto. La función de la máquina, en este caso, es dar forma al diseño CAD.

2.5. USOS ESPECÍFICOS DE ACRÍLICO Y MADERA MDF

2.5.1. Acrílico

Acrílico, conocido como polimetilmetacrilato o PMMA, es un material plástico altamente flexible capaz de soportar largos periodos de tiempo a la intemperie, transparente y que presenta resistencia al rayado.

Entre las principales características y propiedades del acrílico podemos encontrar las siguientes:

- Alta resistencia al impacto siendo muy superior en este aspecto al vidrio.
- Es un material transparente con una tasa de transmisión de luz del 92%, con pérdida de la definición óptica a causa de la dispersión de la luz alrededor del 1%
- Material liviano de aproximadamente el 50% del peso del vidrio y el 43% del peso del aluminio.
- Resistente a la mayoría de las sustancias químicas como soluciones de álcalis, ácidos e hidrocarburos alifáticos (octano, nafta).
- Resistente a la exposición solar intensa, al frío extremo, cambios bruscos de temperatura, brisa salada y otras condiciones meteorológicas.
- No se encoge con el paso del tiempo.
- Excelente aislante eléctrico con una constante dieléctrica muy elevada.

Entre las principales aplicaciones del acrílico tenemos:

- Aplicaciones para la construcción: Usado como claraboyas, bañeras, hidromasajes, protección y cerramiento de balcones, mamparas, cúpulas termoformadas, estadios, museos, exposiciones de arte, etc.
- Aplicaciones para la publicidad: Usado en letreros luminosos, exhibidores de productos, señalética, esferas, bandejas, llaveros, etc.
- Aplicaciones para la decoración: Como cajoneras, mostradores, percheros, estantes, etc.
- Aplicaciones para el transporte: Usado en la fabricación de parabrisas para motos, parabrisas para lanchas, implementación acrílica para la aviación, etc.
- Aplicaciones industriales y científicas: Usado como protectores de maquinaria industrial, tapas para paneles de control de equipo, láminas de acrílico para la protección de instalaciones, acrílicos con formas especiales, etc.

2.5.2. Madera MDF

Madera MDF (Medium Density Fibreboard) o tablero de fibra de densidad media es aglomerado hecho con fibras de madera aglutinadas mediante fuerte presión y calor hasta alcanzar una densidad media. Su estructura es uniforme y homogénea teniendo en sus caras y cantos un acabado con pocas rugosidades y fabricada en chapas, lo cual permite su fácil maquinado haciéndola idónea para aplicaciones con madera.

Los tableros de madera MDF se clasifican de dos formas:

1. Por su densidad:
 - Alta densidad (HDF)
 - MDF ligero
 - MDF ultraligero
2. Por su apariencia:
 - Tableros crudos
 - Tableros melamínicos y enchapados

Entre las principales características de los tableros de madera MDF podemos encontrar las siguientes:

- Proporciona acabados mucho más homogéneos.
- Ofrece una muy buena pintabilidad.
- Es fácilmente recubrible con foils, chapillas de madera y laminados plásticos.
- Excelente comportamiento en procesos de maquinado.
- Suave al corte y amigable con las herramientas.
- Se trabaja mucho mejor que en madera natural.

Su campo de aplicación es muy amplio, entre los usos más importantes de la madera MDF tenemos:

- Carpintería Arquitectónica
 - Tablero ranurado flexible: Usado en revestimientos de columnas, fachadas de mostrador, paredes onduladas, techos, teatros, fabricación de muebles comerciales y muebles auxiliares como floreros, estanterías, ataúdes, etc.
 - Tablero ranurado rígido: Se utiliza para exhibir distintos productos en centros comerciales, supermercados, tiendas, etc.
 - Tablero decorativo: Usados para apliques de cajón, mostradores, counters. paredes para el hogar y lugares comerciales.
 - Tablero acústico: Se usan en techos y paredes para conseguir diferentes niveles de absorción acústica y proporcionar estética
 - Piso decorativo: Revestimiento elegante para paredes, techos y superficies transitable. Estudios de baile, pisos de coliseos, etc.
 - Puertas y paneles: Para lugares interiores y viviendas.
 - Molduras y zócalos: Se usan para realizar terminaciones en encuentros pared-piso, pared-techo y en marcos de puertas y ventanas.
- Mobiliario para el Hogar
 - Muebles de cocina: Usado para fabricar alacenas y desayunadores.

- Muebles de baño: Usado en muebles de lavamanos y torres o módulos independientes.
 - Vestier y closet.
 - Estanterías, bibliotecas y salas de estar.
 - Muebles de habitación: Cabeceras, camas, mesa de noche y cajones.
 - Muebles y objetos infantiles: Cunas, sillas mecedoras, rompecabezas, etc.
 - Muebles complementarios: Piezas que se adaptan a cualquier espacio como consolas, cajoneras, mesas de centro, mesas auxiliares, repisas, biombos.
- Mobiliario para el Comercio
 - Muebles de oficina: Usado como superficies de trabajo, divisiones, archivadores, estanterías, hacer chaflanes en superficies como puertas y hacer dilataciones y calados en estructuras y puertas.
 - Tiendas, almacenes y supermercados: Usados en vitrinas, mostradores, racks, puntos de pago, torres, anaqueles, islas caja, exhibidores, kioscos, paneles ranurados, muebles para farmacia, muebles para comida rápida, muebles para panadería, etc.
 - Stands de exposiciones y displays
 - Restaurantes bares y hoteles: Mesas, bancos, sillas, mostradores, etc.
 - Museos y galerías de arte: Como piezas para exhibir obras de arte, sillas o incluso obras de arte.
- Múltiples Usos
 - Empaque publicitario (alimentos y objetos): empaques para regalos, empaques para vinos, etc.
 - Esculturas arte y modelos
 - Señalización (letras y logotipos)

- Manualidades (arte country)
- Juguetes didácticos: Animales, carros, trenes, helicópteros, tableros para pintar, letras y números, juguetes para armar, etc.
- Instrumentos musicales
- Prototipos

2.6. NORMAS DE SEGURIDAD

El tema de seguridad y prevención de accidentes en sistemas robotizados, toma importancia debido a dos razones fundamentales. Primero, por el motivo de que el robot posee mayor índice de riesgo a un accidente que cualquier otra máquina similar. Segundo por un aspecto de aceptación social del robot dentro de la fábrica.

2.6.1. Causas de Accidentes

Para prevenir posibles accidentes ocasionados por robots, hay que empezar detectando qué tipo de accidentes se producen, para analizar por qué se originan y determinar cómo se pueden evitar.

Los tipos de accidentes causados por robots industriales son debidos a:

- Colisión entre robot y hombre.
- Aplastamiento o atrapamientos con algún elemento fijo.
- Proyección de una pieza o material transportada por el robot.

Una vez determinados los tipos de accidentes, las causas por las que se originan son las siguientes:

- Mal funcionamiento del sistema de control.
- Acceso indebido de personal a la zona de trabajo.
- Error humano.
- Rotura de parte mecánicas.
- Liberación de energía almacenada.
- Sobrecarga del robot.

- Medio ambiente o herramienta peligrosa.

2.6.2. Medidas de Seguridad

De acuerdo a un estudio realizado por el Instituto de Investigaciones de Seguridad en el Trabajo de Tokio, el 90% de los accidentes en líneas robotizadas ocurren durante las operaciones de mantenimiento, ajuste o programación, mientras el 10% restante ocurre durante el funcionamiento normal de las máquinas.

La seguridad en estos casos presenta dos variantes, la primera que se refiere a la seguridad propia del robot que es responsabilidad del fabricante y la segunda que se refiere al diseño e implantación del sistema, su uso posterior y mantenimiento, responsabilidad del usuario.

2.6.2.1. Medidas de Seguridad en Fase de Diseño del Robot

En el diseño del robot y su sistema de control se deben considerar siempre los posibles accidentes tomando acciones oportunas para evitarlo. De esta manera el robot debe contar con una serie de medidas internas para evitar posibles accidentes, y son las siguientes:

- *Supervisión del sistema de control:* El sistema de control debe realizar una continua supervisión del funcionamiento de todos los subsistemas.
- *Paradas de emergencia:* Deben existir paradas de emergencia que corten por completo la energía del robot.
- *Velocidad máxima limitada:* El sistema de control debe asegurarse que la velocidad máxima de los movimientos cuando una persona esté cerca del robot disminuya.
- *Detectores de sobreesfuerzo:* Los sensores de sobreesfuerzo serán incluidos en los accionamientos para que los desactiven en el caso de un valor excesivo.
- *Pulsador de seguridad:* Las consolas de programación dispondrán de un dispositivo de seguridad que impidan el movimiento accidental del robot.
- *Códigos de acceso:* El acceso de la unidad de control y arranque, parada y modificación del programa, estarán limitadas dependiendo de quien las debe modificar.

- *Frenos mecánicos adicionales:* Si el robot maneja grandes cargas, se deben incluir frenos mecánicos que se activen cuando se corte la alimentación de los actuadores.

2.6.2.2. Medidas de Seguridad en el diseño de la célula robotizada

En el establecimiento del lay-out de la célula se debe considerar la implementación de barreras de acceso y protecciones en general que minimicen el riesgo de accidentes, de manera general tenemos las siguientes:

- *Barreras de acceso a la célula:* Se deben colocar barreras que impidan el acceso a personas en la zona de trabajo.
- *Dispositivos de intercambio de piezas:* En caso que se deban poner o recoger piezas situadas dentro del área de trabajo del robot, se deben utilizar dispositivos que permitan realizar estas acciones a distancia.
- *Movimientos condicionados:* Si el operario debe ingresar al área de acción del robot, se programará para que no efectúe ningún movimiento en este tiempo.
- *Zonas de reparación:* Deben existir zonas de reparación y mantenimiento dentro del campo de acción pero fuera de su zona de trabajo.
- *Condiciones adecuadas en la instalación auxiliar:* Sistema eléctrico con protecciones, aislamientos y demás.

2.6.2.3. Medidas de Seguridad en fase de Instalación

Durante la instalación del sistema y su puesta en marcha, se deben respetar ciertas normas que reducirán el riesgo de accidentes. Estas consideraciones se resumen de la siguiente manera.

- *Abstenerse de entrar en la zona de trabajo:* Mientras se programa y se implanta la aplicación, se debe permanecer fuera del campo de acción del robot, este debe trabajar a velocidades lentas.
- *Señalización adecuada:* La célula deberá tener una adecuada señalización del estado del robot mediante señales luminosas o acústicas. Será aconsejable que

antes de comenzar el ciclo de trabajo se utilicen estas señales o a su vez para advertir un potencial accidente.

- *Prueba progresiva del programa:* El desarrollo y ejecución del programa se debe hacer con la mayor precaución posible, probando el mismo a velocidad lenta y paso a paso.
- *Formación adecuada:* Capacitación al personal que manejará la máquina.

CAPÍTULO III

DISEÑO MECATRÓNICO

3.1. CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO

Previo al diseño de la máquina como tal, debemos fijar las principales características de la misma, que se basan en los requerimientos del cliente, en este caso los requerimientos del laboratorio de Procesos de Manufactura, además de las dimensiones y características de desempeño del tubo de gas generador de láser y del cabezal de corte.

Una vez definidas las necesidades y alcance de la máquina, en la Tabla 2 se detallan las características que serán la base del diseño.

Tabla 2.
Características de la máquina previas al diseño.

#	Característica	Descripción
1	Número de Ejes	Deben ser 3 ejes, dos controlables automáticamente (X, Y) y uno manual (Z)
2	Área de Trabajo	El área de trabajo debe ser aproximadamente de 850 x 1000 mm
3	Precisión de Corte	La precisión del corte la da el tipo del láser, en este caso, Láser de CO ₂ con un haz de luz de 3.5 mm de diámetro
4	Precisión de Posición	La ubicación de la herramienta no debe ser diferente de ± 0.1 mm
5	Temperatura del Tubo	La temperatura del tubo láser no debe ser mayor a los 30°C
6	Velocidad de avance	La velocidad sugerida para cortes por láser es de máximo 1 m/min
7	Profundidad de corte	La profundidad de corte debe ser de 6 mm

Fuente: Necesidades del Laboratorio y demandadas por características del láser.

3.2. ALTERNATIVAS DE DISEÑO

3.2.1. Transmisión de Movimiento

Para la transmisión de movimiento se debe tomar en cuenta la precisión principalmente y no menos importante el área de trabajo, ya que al ser una máquina relativamente pequeña, hay que seleccionar los elementos acordes a esta área. Igualmente el costo y la eficiencia de los mismos se analizan para una correcta selección.

Tabla 3.
Comparación entre sistemas de transmisión.

Parámetros	Sistema		
	Tornillo de Bolas (Ball screw)	Piñón Cremallera	Correas
			
Precisión	La precisión estándar de un tornillo de bolas es $\pm 50\mu\text{m}$ por cada 300mm de largo	Su precisión alcanza los $5\mu\text{m}$ Independientemente de su velocidad o avance	Relativamente tienen una precisión alta, dependiendo del tipo de dentado.
Eficiencia	Tienen una eficiencia que alcanza el 95%	Eficiencia de hasta el 97%	La mayoría de correas tienen una eficiencia entre el 96 y 98%.
Dimensiones	Pueden existir desde los 200mm hasta los 6000mm en áreas de trabajo	Generalmente utilizado para grandes distancias, no tiene un máximo específico.	Existen desde correas para máquinas pequeñas hasta correas de grandes dimensiones
Velocidad	Llega a una máxima de 1400 rad/min dependiendo el apoyo	En comparación con la velocidad de los tornillos de bolas, es una velocidad baja	En correas dentadas hasta 60m/s y en correas planas hasta 100m/s.
Costo	Relativamente medio	Relativamente alto	Relativamente alto

Fuentes: (TECHNOINC, 2015)

El parámetro dominante es la precisión, cualquiera de los tres tipos mostrados en la Tabla 3 se puede seleccionar, pero al ser el costo y las dimensiones parámetros importantes, y como se pretende diseñar una máquina pequeña de bajo costo, se recomienda el uso de los tornillos de bolas, para garantizar una mejor precisión y un mejor rendimiento de la máquina, tomando en cuenta además la velocidad con la que se puede trabajar con estos tornillos.

3.2.2. Movimiento Lineal

En este caso el movimiento lineal viene representado por las guías que no permiten que el movimiento se descuadre y garantiza una mayor exactitud en el recorrido. Para la comparación se toman en cuenta dos elementos que pueden cumplir con estas funciones, los ejes normales y las guías lineales de soporte. La Tabla 4 muestra sus características.

Tabla 4.
Comparación de guías de movimiento lineal.

	Sistema	
	Ejes Simples	Guías Lineales
Parámetros		
Sujeción	No tiene un mecanismo de sujeción para acoplarlo con el marco de movimiento	Viene integrado el acople con agujeros para poder sujetar la estructura
Flexión	Dependerá de la distancia, diámetro y material. Tienden a romperse.	Debido a su diseño, posee sujeciones a lo largo de la guía, lo que minimiza al máximo su flexión.
Precisión	Al fabricar el acople y no tener una geometría exacta, no consta de una buena precisión.	Son altamente precisos y garantizan estabilidad a la hora del movimiento.
Costo	Bajo Costo	Costo moderado

Fuente: Propia

Las guías lineales son específicamente fabricadas para maquinaria CNC o máquinas similares que precisen un movimiento lineal. Su ensamble es sencillo y proporciona estabilidad en la hora del movimiento, además soportan cargas elevadas y no distorsionan su funcionamiento. Por estas razones, las guías lineales son las seleccionadas para esta máquina.

3.2.3. Motores

Los dos grandes grupos de motores que normalmente se usan en aplicaciones similares son los servomotores y los motores paso a paso, en esta ocasión se compararán características elementales de estos dos, tales como precisión, control, torque, entre otras.

Tabla 5.
Comparación entre motores.

Parámetros	Servomotor	Sistema
		Motor a Pasos
Precisión	Rotación precisa dentro de un ángulo limitado. 180° de ida y vuelta.	Es altamente preciso ya que puede dar pasos en ángulos definidos en una rotación de 360°
Control	Se controlan con mayor precisión gracias a su funcionamiento por lazo cerrado.	Control de posición de rotación por incrementos fraccionales
Torque	Mantiene su torque a velocidades altas.	Buen torque a bajas velocidades pero este disminuye al aumentar la velocidad.
Vida Útil	Cerca de 2000 horas.	Cerca de 10000 horas sin exceso de carga.
Costo	Mayor que un motor a pasos.	Relativamente bajo

Fuente: (Son Robots, 2014)

Como se muestra en la Tabla 5, la precisión obtenida con un motor paso a paso es mayor y la velocidad no es muy alta en esta aplicación, así mismo su control es muy sencillo gracias a los drivers existentes, es recomendable seleccionar este tipo de motor, además que son más económicos que los servomotores.

3.2.4. Acoples

Los acoples tiene por función prolongar la línea de transmisión de un eje o conectar dos tramos de diferentes ejes, estén o no alineados entre sí. Al momento de alinear dos ejes, dependiendo de los instrumentos que se usen, pueden existir diferentes tipos de desalineación como muestra la Figura 18.

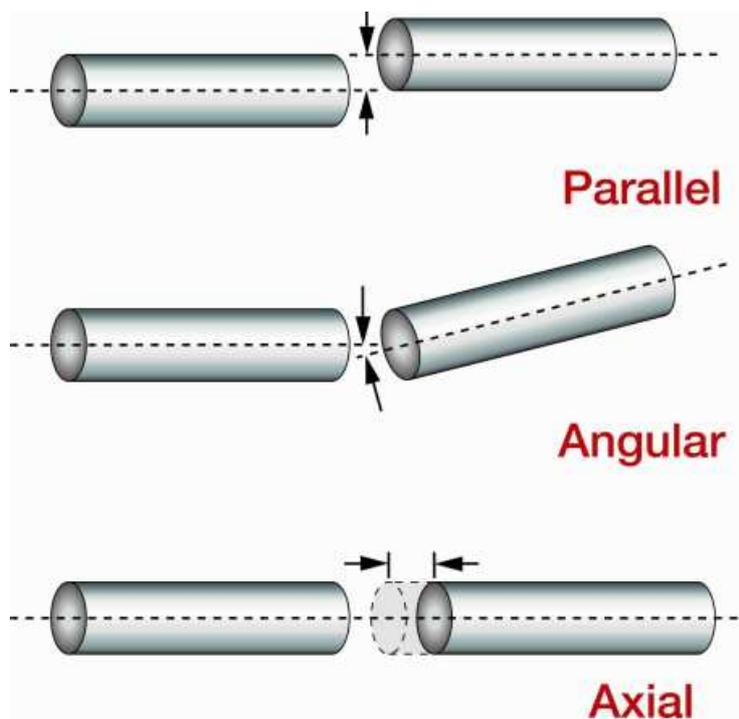


Figura 18.- Tipos de desalineación en ejes.
Fuente: (Power Transmission World, 2015)

La desalineación puede llegar a causar excesiva vibración al momento de transmitir movimiento lo que repercutirá en la precisión del corte, por lo tanto es necesario analizar las correcciones que los distintos acoples puedan brindar al momento de realizar la unión de ejes. La Tabla 6 muestra una comparación entre distintos tipos de acoples.

Tabla 6.
Comparación entre acoples

Tipo de acople	Desalineación Tolerada Axial	Desalineación Tolerada Angular	Desalineación Tolerada Paralela	Considerar
Acoplamientos Rígidos 	Alta	Ninguna	Ninguna	Se exige alineación perfecta. Costo Medio
De Disco Flexible 	Ligera	Ligera	Ligera	Capacidad de absorber impacto. Sin Juego Costo Alto
De Fuelle Metálico 	Ligera	Grande	Moderada	Falla por fatiga. Costo Medio
Quijadas de Goma 	Ligera	Moderada	Ligera	Gran absorción de impacto. Costo Bajo

Fuente: (Quilodrán, 2013)

El acople que mejor se adapta a la aplicación debido a su bajo costo, gran absorción de impacto y a su capacidad de corregir distintos tipos de desalineamiento es el acople de quijadas de goma.

3.3. SELECCIÓN DEL TIPO LÁSER Y SUS ELEMENTOS

3.3.1. Selección del láser

Para poder seleccionar un tipo de láser hay que tomar en cuenta la aplicación para la que se lo requiere. Como se expuso anteriormente en el marco teórico, el láser de CO_2 y el Nd-Yag, son los principales láseres usados en aplicaciones industriales, por lo que se comparará, en la Tabla 7, las principales características de estos dos para poder realizar una selección.

Tabla 7.
Comparación entre láseres de CO_2 y el Nd-Yag.

	CO_2	Nd-Yag
Potencia	Para cortar una profundidad X necesitan mayor potencia que los láseres Nd-Yag	Para cortar una profundidad X necesitan menor potencia que los láseres CO_2
Aplicación	Es usado para el corte y grabado de metales ferrosos, no ferrosos y materiales no metálicos principalmente madera y polímeros.	Es usado en el corte de metales ferrosos y no ferrosos principalmente, y en algunas ocasiones grabado de los mismos.
Modo de generación	El láser se genera en una fuente y debe ser amplificado en un resonador de cristal con gas en su interior que es relativamente grande y ocupa mucho espacio.	El láser se genera en una fuente y se amplifica en una cavidad resonante dentro de la misma, es pequeña y ocupa poco espacio.
Modo de transmisión	Se transmite por medio de espejos de reflectividad mayor al 98%	Se transmite por una manguera de fibra óptica.
Refrigeración	Necesita circulación de agua destilada constante a través del tubo de gas.	Necesita circulación de agua destilada constante a través de la manguera de fibra óptica.
Vida Útil	Depende completamente del tiempo de vida del tubo que suele variar entre 5000 a 12000 horas.	Depende completamente del tiempo de vida de los diodos de bombeo y el cristal, que suele variar entre 8000 a 15000 horas.
Costo	Medio a corto plazo (modo de transmisión y fuente relativamente baratos) y alto a largo plazo debido a que los repuestos tiene costo elevado.	Alto a corto y largo plazo, el medio de transmisión, la fuente y los repuestos tiene costo elevado.

Fuente: Propia

Como se puede apreciar en la Tabla 7 ambos láseres tienen ventajas y desventajas claras con respecto al otro, sin embargo, las características determinantes para la selección serán, la aplicación y el costo. Por lo que se elige el láser de CO_2 para la cortadora láser que se construirá. Ahora bien, se necesita determinar la potencia que el láser necesita para cortar 6mm de espesor de madera y acrílico. Debido a que no existe información concluyente, donde se compare la potencia con la profundidad en materiales como madera MDF y acrílico, ni tampoco algún fundamento teórico de donde se pueda obtener dicha información, se procederá a realizar una selección empírica en base a la experiencia del proveedor del láser para determinar la potencia.

El proveedor indica que para la aplicación y el tipo de material a cortar, un láser de potencia de 80 W es más que suficiente, ya que asegura que con una lente y velocidad de corte adecuada, el láser podrá cortar hasta 15 mm de madera MDF y acrílico. La lente también se seleccionará siguiendo las recomendaciones del proveedor, pero para determinar la velocidad de corte adecuada, se realizará un estudio en base a pruebas en capítulos posteriores. En la Figura 19, se muestra las características del láser de 80 W seleccionado.

Model	Length (mm)	Diameter (mm)	Trigger voltage (KV)	Working voltage (KV)	Working current (mA)	Output power (W)	Maximum power (W)	Catalyzer coated or not
DX-60	1000±2	80±2	24	16	26	60	75	Yes
DX-80	1200±2	80±2	28	18	28	80	95	Yes
DX-100	1400±2	80±2	28	18	30	100	120	Yes
DX-130	1600±2	80±2	35	20	30	130	150	Yes
DX-150	1800±2	80±2	38	22	30	150	180	Yes
DX-180	2000±2	80±2	35	22	30	180	200	Yes

Figura 19.- Características de los láseres de la serie DX.
Fuente: (SDZ Láser, 2012)

3.3.2. Selección de fuente de poder

La fuente de poder se selecciona con el mismo fabricante, ya que este posee fuentes dedicadas para cada uno de los tipos de tubos que vende, por lo tanto se selecciona una fuente de 80 W y 220V (220 V por costo), cuyas características se presentan en la Figura 20. La fuente lleva integrada un potenciómetro de precisión que permite al usuario establecer la corriente a la que debe trabajar el tubo.

Model		X1	X3	X5
Output Power		60-80W	100W	130-180W
Size L×W×H		L×W×H=220×155×80 (mm)	L×W×H=295×165×80 (mm)	L×W×H=340×200×80 (mm)
Output Output	Max Output Voltage	DC 35KV	DC 50KV	DC 50KV
	Max Output Current	DC 35mA	DC 35mA	DC 38mA
Input	Input Voltage	AC220V or AC110V (please attach a note when placing an order)		
	AC Frequency	47—440Hz		
	Cold Surge Current	≤60A(input AC220V) / ≤30A(input AC110V)		
	Leakage Current	≤0.7mA(input AC220V)/≤0.4mA(input AC110V)		
Running	Efficiency	≤92 (full-load)		
	MTBF(Mean Time Between Failures)	≤10000 hours		
	Response Speed	≤1ms(from Switching signal to the output current achieve to 90% of Pre-set current)		
	Control Port	TTL Level switch control,valid level has high/low choices.		
	Voltage-resisting	input output, input machine shell;AC1500V 10mA 60s output cathode is connected with the machine shell		
	Protection	Used in open-circuit state within a short time (request that the outer shell be well connected with the ground, in the meantime, avoid arcing between anode and machine shell.)		
	Working Environment	Work temperature:(-10—40)°C.Relative humidity:≤90%		
	Cooling Type	Forced air cooling		

**Figura 20.- Características de las fuentes de poder.
Fuente: (SDZ Láser, 2012)**

3.3.3. Selección de espejos y lente de enfoque

Como se mencionó anteriormente, los espejos y lentes se seleccionarán con el proveedor del tubo, los espejos que la empresa SDZ laser ofrece son espejos de 25 mm de molibdeno de alta reflectividad mayor al 99%, en cuanto a la lente, es una lente de alta precisión de 25 mm

Optical lens	Reflector lens		Focus Lens	
	Si	Mo	GaAs	ZnSe
Designed wavelength	-		10.6um	
Focus length tolerance	-		±1%	
Appearance tolerance	0 / -0.1mm		0 / -0.1mm	
Thickness tolerance	±0.1mm		±0.1mm	
Finish	S1:40 - 20,S2:finish grinding		20-10	
Eccentric	-		< 3'	
Effective aperture	±0.1mm		±0.1mm	
Chamfer	±0.1mm		±0.1mm	
Coating film	10.6um (AR-coating)		10.6um (AR-coating)	
Parallel degree	< 1'		-	

Figura 21.- Características de los espejos y lentes.
Fuente: (SDZ Láser, 2012)

3.3.4. Selección de accesorios

La lente y los espejos necesitan un soporte adecuado para el montaje, por lo que seleccionan los accesorios que el proveedor recomienda también. Los soportes para los espejos son soportes cuadrados de aluminio, que poseen dos pernos para poder corregir el ángulo de reflexión, lo que facilita la tarea de montaje. A continuación en la Figura 22 se presenta una fotografía del soporte para espejos.



Figura 22.- Fotografía del soporte para espejos.

De la misma forma el cabezal tiene acoplado un soporte para espejo cuya posición se puede variar para obtener el ángulo de reflexión deseado, tiene una boquilla de altura regulable que nos permite ajustar correctamente la altura de la lente con respecto a la pieza de trabajo. De igual forma es hecha de aluminio y se presenta una fotografía del cabezal en la Figura 23.

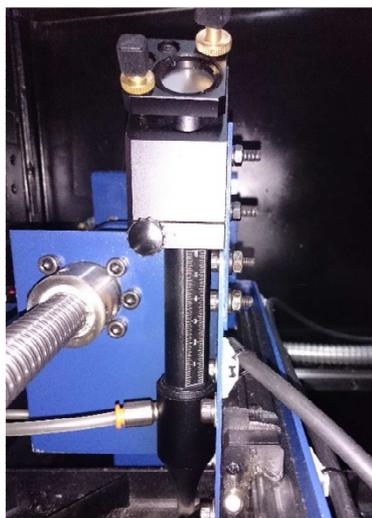


Figura 23.- Fotografía del cabezal.

El tubo láser debe ser de igual forma correctamente enfocado. Para corregir posibles errores de alineamiento, se adquieren dos soportes para el tubo en los cuales se puede regular la altura y la posición. Una fotografía de los soportes del tubo láser se muestra en la Figura 24.



Figura 24.- Fotografía de los soportes del tubo láser.

3.3.5. Selección de refrigeración

Para seleccionar la refrigeración, se toma en cuenta la potencia del láser, y se busca un chiller capaz de enfriar el tubo. Se selecciona entonces como refrigeración al chiller modelo CW3000DG, diseñado específicamente para refrigerar tubos láser de 60W y 80W.

Las características del chiller seleccionado se presentan en la Figura 25.

Model	CW-3000AG	CW-3000DG	CW-3000AF	CW-3000DF	CW-3000AK	CW-3000DK
Voltages	AC220~240V	AC100~120V	AC220~240V	AC100~120V	AC220~240V	AC100~120V
Frequency	50/60Hz					
Current	0.45A	0.9A	0.45A	0.9A	0.5A	1.0A
Cooling capacity	50W/ ° C			60W/ ° C		
capacity	9 L					
Inlet and outlet hold	Outside dimensions 10mm brass connector		Inside dimensions 8mm speedy connector		Inside dimensions 6mm speedy connector	
Max. pumping lift	10 M				70 M	
N.W	9.5Kg				12Kg	
G.W	12Kg				14.5Kg	
Dimensions	47X27X37cm(LxWxH)					
Packing dimensions	59X39X48cm(LxWxH)					

Figura 25.- Características del chiller CW3000DG.
Fuente: (Rabbit Laser USA, 2014)

Aparte de las características mostradas anteriormente, el chiller posee una salida de alarmas que permite alertar si el nivel del agua es muy bajo, existe exceso de temperatura, existe fallo en la bomba o no se tiene la ventilación suficiente.

Por cuestiones económicas, se opta por diseñar una refrigeración de bajo costo con elementos existentes en el mercado, el diseño de dicho sistema se muestra en la sección de diseño de sistemas mecánicos.

3.4. DISEÑO DE SISTEMAS MECÁNICOS

3.4.1. Selección Inicial

3.4.1.1. Selección de tornillos de bola

En base a la aplicación de la máquina y a las características del diseño se hizo una selección inicial del tipo de componentes que se adaptan mejor a la máquina, entre esos elementos se encontraba el tipo de transmisión usada para convertir el movimiento rotacional en movimiento lineal. La mejor alternativa fue el uso de tornillos sin fin de bola (ballscrew) debido a la precisión de estos. Ahora bien, para seleccionar un diámetro externo del tornillo de bolas del cual partir para realizar el diseño de la máquina y los cálculos correspondientes se seguirán las recomendaciones del fabricante y la norma DIN 69051 que estandarizan la precisión y características de los tornillos de bola.

Como se mencionó anteriormente, la precisión de un tornillo de bolas se mide por el deslizamiento que este tiene al hacer que la nuez se desplace una distancia estándar establecida en la norma DIN 69051, en este caso 300 mm de longitud, a este valor de deslizamiento se le llama fluctuación y está representado por el símbolo v_{300p} . En la Figura 26 se presenta la precisión de los tornillos de bola según las normas ISO, DIN, JIS y las mediciones del fabricante (HIWIN), siendo el grado C0 el de mayor precisión y el C10 el de menor precisión. En la Figura 27 se presenta el grado de precisión recomendado por aplicación.

Grade		Ground									
							Rolled				
		C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C10
v_{300p}	ISO, DIN		6		12		23		52		210
	JIS	3.5	5		8		18		50		210
	HIWIN	3.5	5	6	8	12	18	23	50	100	210

**Figura 26.- Estándar Internacional de grados de precisión para tornillos de bola (μm).
Fuente: (Hiwin, Ballscrew Technical Information)**

Application grade		AXIS	Accuracy grade												
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	10			
CNC Machinery Tools	Lathes	X	•	•	•	•	•								
		Z				•	•	•							
	Milling machines Boring machines	X		•	•	•	•	•							
		Y		•	•	•	•	•							
		Z			•	•	•	•							
	Machine Center	X		•	•	•	•								
		Y		•	•	•	•								
		Z			•	•	•								
	Jig borers	X	•	•											
		Y	•	•											
		Z	•	•											
	Drilling machines	X				•	•	•							
		Y				•	•	•							
		Z					•	•	•						
	Grinders	X	•	•	•										
		Y		•	•	•									
	EDM	X		•	•	•									
		Y		•	•	•									
		Z			•	•	•	•							
Wire cut EDM	X		•	•	•										
	Y		•	•	•										
	U		•	•	•	•									
	V		•	•	•	•									
Laser Cutting Machine	X			•	•	•									
	Y			•	•	•									
	Z			•	•	•									
Punching Press	X				•	•	•								
	Y				•	•	•								
Single Purpose Machines			•	•	•	•	•	•							
Wood working Machines									•	•	•	•			
Industrial Robot (Precision)			•	•	•	•									
Industrial Robot (General)								•	•	•	•				
Coordinate Measuring Machine		•	•	•											
Non-CNC Machine					•	•	•								
Transport Equipment						•	•	•	•	•	•	•	•		
X-Y Table			•	•	•	•	•								
Linear Actuator								•	•	•	•				
Aircraft Landing Gear								•	•	•	•				
Airfoil Control								•	•	•	•				
Gate Valve									•	•	•	•			
Power steering									•	•	•				
Glass Grinder				•	•	•	•	•							
Surface Grinder						•	•								
Induction Hardening Machine									•	•	•	•			
Electromachine			•	•	•	•	•	•	•						
All-electric injection molding machine								•	•	•	•	•	•		

Figura 27.- Grado de precisión recomendado por aplicación.

Fuente: (Hiwin, Ballscrew Technical Information)

Basándonos en la Figura 27, se debe elegir un tornillo de bolas que nos permita tener una precisión entre C2 a C4 tanto como para el eje X como para el eje Y, debido a que el eje Z no tendrá movimiento automático, no se considera un tornillo para ese eje. En la Figura 28 se tiene recomendaciones de longitud y diámetro externo del tornillo de bolas para obtener una precisión deseada. Como se propuso un área de corte de 850x1000 mm, se debe elegir una longitud de tornillo de bola aproximada a esa, considerando que los tornillos deben estar fijados en chumaceras a los dos lados, y a un lado del tornillo debe ir un acople y el motor a pasos, se tomará como longitud de los tornillos de bolas 1000 mm y 1200 mm para poder obtener el diámetro externo.

Total Length Grade	O.D.																	
	6	8	10	12	16	20	25	28	32	36	40	45	50	55	63	70	80	100
C0	110	170	300	400	600	700	1000	1000	1200	1300	1500	1600	1800	2000	2000	2000	2000	2000
C1	110	170	400	500	720	950	1300	1500	1800	1800	2300	2500	3100	3500	4000	4000	4000	4000
C2	140	200	500	630	900	1300	1700	1800	2200	2200	2900	3200	4000	5000	5200	5500	6300	6300
C3	170	250	500	630	1000	1400	1800	2000	2500	3200	3500	4000	4500	5000	6000	7100	10000	10000
C4	170	250	500	630	1000	1400	1800	2000	2500	3200	3500	4000	4500	5000	6000	7100	10000	10000
C5	170	250	500	630	1410	1700	2400	2500	3000	3200	3800	4000	5000	5500	6900	7100	10000	10000
C6	400	800	1000	1200	1500	1800	2500	3000	3000	4000	4000	4000	5600	5600	6900	7100	10000	10000
C7	400	800	1000	1200	3000	3000	4000	4000	4500	4500	5600	5600	5600	5600	6900	7100	10000	10000

**Figura 28.- Grado de precisión vs. Longitud del tornillo vs. Diámetro Externo (Unidades mm).
Fuente: (Hiwin, Ballscrew Technical Information)**

Entonces, para poder obtener un grado de precisión C2 en los dos tornillos de bola, se selecciona un diámetro de 20 mm ya que así se puede obtener una longitud de hasta 1300mm. Una vez seleccionado el tornillo se procede a seleccionar el tipo de nuez de bolas que servirá para transmitir el movimiento y el estilo de la brida de la nuez. El estilo de la brida se selecciona en base a la forma de la pieza que se sujetará a la nuez, los tipos de brida se muestran en la Figura 29, la forma de la pieza que se unirá a la brida es una placa en L por lo tanto el estilo de brida puede ser en D o H, en este caso se seleccionará en H debido a que es más común que el otro.

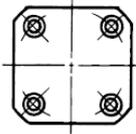
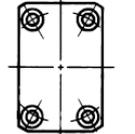
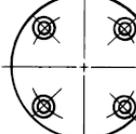
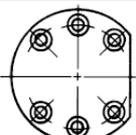
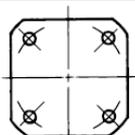
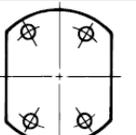
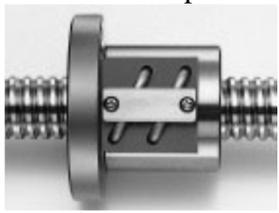
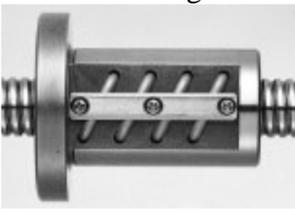
Type symbol	A	B	C	
Flange type	 Square flange	 Rectangle flange	 Circle flange	 Circle flange
Type symbol	D	E	H	
Flange type	 Single side cut, circle flange	 Square (without spot facing)	 Double side cut, circle flange	

Figura 29.- Estilo de la brida de la nuez.
Fuente: (Kuroda)

Finalmente se procede a seleccionar un tipo de nuez, hay tres tipos de nuez existentes que son descritas en la Tabla 8. La ideal para este tipo de aplicaciones es la nuez simple debido a su precisión y a que la carga es ligera.

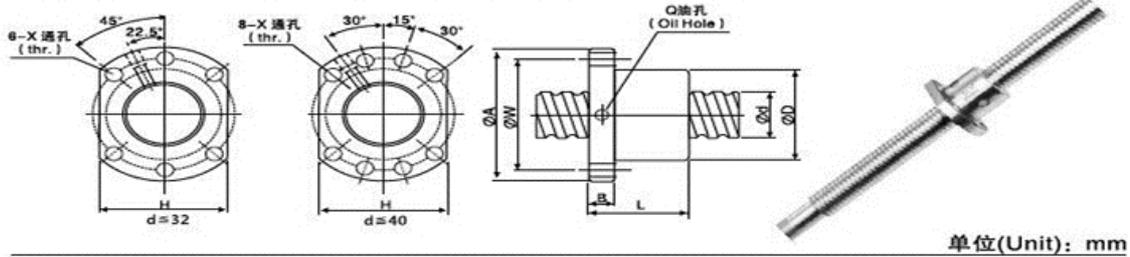
Tabla 8.
Tipos de Nuez

		
<p>Ideal para el uso con pequeñas y medianas cargas.</p> <p>Requieren una precarga leve o normal.</p> <p>Muy alta precisión</p>	<p>Ideal para el uso con medianas y grandes cargas.</p> <p>Requieren una precarga normal y alta.</p> <p>Más compacta que la de doble nuez</p>	<p>Ideal para el uso con medianas y grandes cargas.</p> <p>Requieren una precarga normal y alta.</p> <p>Muy alta precisión y rigidez</p>

Fuente: (Kuroda)

Entonces basándose en la Figura 30, se selecciona inicialmente el tornillo de bolas SFU2005-4 de longitudes de 1000mm y 1200mm.

1、型式 (TYPE) : SFU(DIN 69051 Formolu B)



I: 导程 Lead Da: 珠径 Ball Dia. N: 珠圈数 Number of Circuite K: 刚性 Stiffness(Kgf/μm)
 Ca: 动额定负荷 Basic Dynamic Rating Load(Kgf) Coa: 静额定负荷 Basic Static Rating Load(Kgf)

型号 Type	滚珠丝杠、螺母之基准数据 Dimensions														
	d	l	Da	D	A	B	L	W	X	H	Q	N	Ca	Coa	K
SFU1204-4	12	4	2.381	24/22	40	10	40	32	4.5	30		4	593	1129	12.5
SFU1604-4		4	2.381	28	48	10	40	38	5.5	40	M6	4	629	1270	35
SFU1605-3		5	3.175	28	48	10	43	38	5.5	40	M6	3	765	1240	17
SFU1605-4	16	5	3.175	28	48	10	50	38	5.5	40	M6	4	780	1790	20
SFU1610-3/2		10	3.175	28	48	10	47	38	5.5	40	M6	3	721	1249	15
SFU2005-3		5	3.175	36	58	10	43	47	6.5	44	M6	3	860	1710	22
SFU2005-4	20	5	3.175	36	58	10	51	47	6.6	44	M6	4	1130	2380	25
SFU2010-3/2		10	3.175	36	58	10	47	47	6.6	44	M6	3	830	1680	20
SFU2505-3		5	3.175	40	63	10	43	51	6.6	48	M6	3	980	2300	32
SFU2505-4	25	5	3.175	40	63	10	51	51	6.6	48	M6	4	1280	3110	35
SFU2510-4		10	4.762	40	63	12	85	51	6.6	48	M6	4	1944	3877	33
SFU2510-4/2		10	3.175	40	63	10	54	51	6.6	48	M6	4	1150	2950	30
SFU3205-4		5	3.175	50	81	12	52	65	9	62	M6	4	1450	4150	40
SFU3206-4	32	6	3.175	50	81	12	57	65	9	62	M6	4	1720	4298	43
SFU3210-4		10	6.350	50	81	14	90	65	9	62	M6	4	3390	7170	45
SFU4005-4	40	5	3.175	63	93	14	55	78	9	70	M8	4	1610	5330	49
SFU4010-4		10	6.350	63	93	14	93	78	9	70	M8	4	3910	9520	55
SFU5005-4		5	5.175	75	110	15	55	93	11	85	M8	4	1730	6763	60
SFU5010-4	50	10	6.350	75	110	16	93	93	11	85	M8	4	4450	12500	65
SFU5020-4		20	7.144	75	110	16	138	93	11	85	M8	4	4644	14327	59.5
SFU6310-4	63	10	6.350	90	125	18	98	108	11	95	M8	4	5070	16600	80
SFU6320-4		20	9.525	95	135	20	149	115	13.5	100	M8	4	7573	23860	84.1
SFU8010-4		10	6.350	105	145	20	98	125	13.5	110	M8	4	5620	21300	90
SFU8010-6	80	10	6.350	105	145	22	118	125	13.5	110	M8	6	7810	31800	106
SFU8020-4		20	9.525	125	165	25	154	145	13.5	130	M8	4	8485	30895	108
SFU10020-4	100	20	9.525	150	202	30	180	170	17.5	155	M8	4	9420	39183	134

Figura 30.- Especificaciones de tornillos de bola según la norma DIN 69051 parte B
 Fuente: (JinBo)

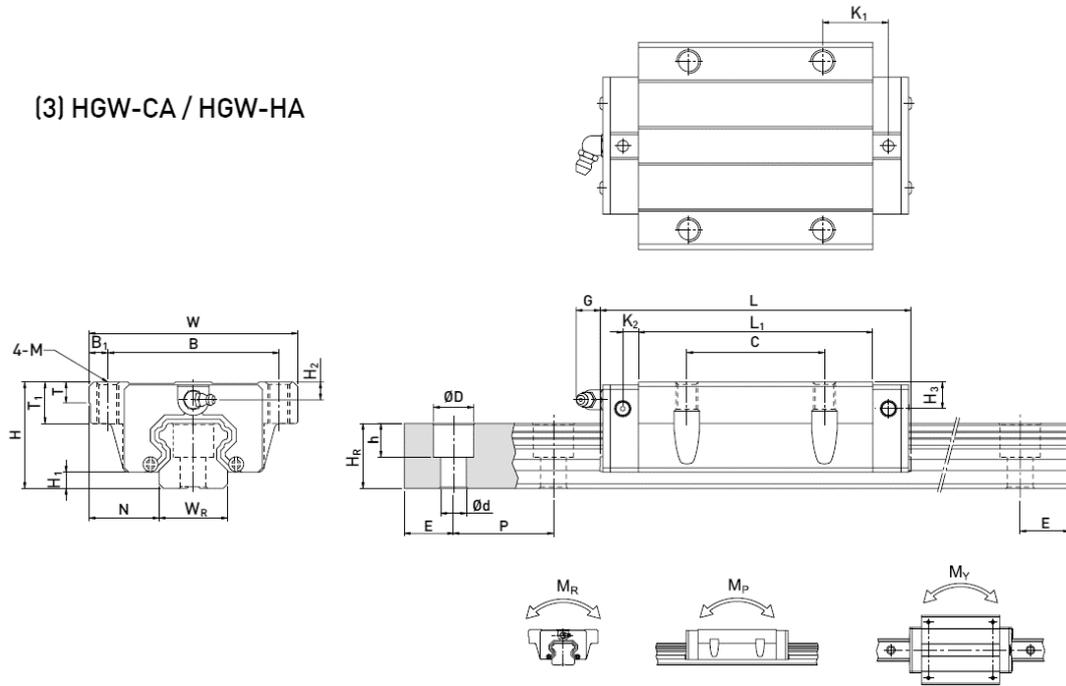
3.4.1.2. Selección de guías lineales

Para la selección inicial de guías se tomarán en cuenta dos puntos, la aplicación y la carga estática que estas soportan. La guía debe soportar al menos la misma carga estática que el tornillo de bolas, el tornillo soporta una carga estática máxima de 2380 kgf o 23.35 kN.

Basándose en la Figura 31 y la selección de series, se eligen las guías de modelo HGW20CA, siendo dos guías de 1000mm de largo y una guía de 1200mm de largo, misma longitud de los tornillos de bola. La selección de series es la siguiente (Hiwin, Linear Guideway Technical Information):

- Serie HG: máquinas de molienda, rectificadoras, fresadoras, máquinas de perforación (taladros), torno, centros de maquinado CNC.
- Serie EG: equipo automático, dispositivo de transferencia de alta velocidad, equipos semiconductores, máquina de corte de madera, equipos de medición de precisión.
- Serie QE/QH: equipos de medición de precisión, equipos semiconductores, equipo automático, máquina de marcado láser, puede ser ampliamente aplicada en la industria de alta tecnología que requiere una alta velocidad, bajo ruido, baja generación de polvo.
- Serie WE/QE: dispositivos automáticos, equipo de transporte, equipos de medición de precisión, equipos semiconductores, máquina de moldeo por soplado, robots de eje simple, robótica.
- Serie MG/PM: dispositivo en miniatura, equipos semiconductores, equipos médicos.
- Serie RG/QR: centros de mecanizado CNC, máquinas de corte de alta resistencia, máquinas rectificadoras CNC, máquinas de moldeo por inyección, máquinas de descarga eléctrica, máquinas de corte de alambre.

(3) HGW-CA / HGW-HA



Model No.	Dimensions of Assembly (mm)		Dimensions of Block (mm)														Dimensions of Rail (mm)					Mounting Bolt for Rail (mm)	Basic Dynamic Load Rating C ₁ (kN)	Basic Static Load Rating C ₀ (kN)	Static Rated Moment			Weight					
	H	H ₁	N	W	B	B ₁	C	L ₁	L	K ₁	K ₂	G	M	T	T ₁	H ₂	H ₃	W _R	H _R	D	h				d	P	E	M _R	M _P	M _Y	Block	Rail	
	kgf	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm				mm	mm	mm	mm	kN-m	kN-m	kN-m	kg	kg/m
HGW15CA	24	4.3	16	47	38	4.5	30	39.4	61.4	8	4.85	5.3	M5	6	8.9	3.95	3.7	15	15	7.5	5.3	4.5	60	20	M4x16	11.38	16.97	0.12	0.10	0.10	0.17	1.45	
HGW20CA	30	4.6	21.5	63	53	5	40	50.5	77.5	10.25	6	12	M6	8	10	6	6	20	17.5	9.5	8.5	6	60	20	M5x16	17.75	27.76	0.27	0.20	0.20	0.40	2.21	
HGW20HA								59.2	72.2	11.5										21.6	10.76	8.58	6	60	20		21.16	33.76	0.33	0.33	0.33	0.32	
HGW25CA	36	5.5	23.5	70	57	6.5	45	58	84	10.7	6	12	M8	8	14	6	5	23	22	11	9	7	60	20	M6x20	26.48	36.49	0.42	0.33	0.33	0.59	3.21	
HGW25HA								78.6	104.6	21										32.75	49.44	0.56	0.57	0.57	0.80								
HGW30CA	42	6	31	90	72	9	52	70	97.4	14.25	6	12	M10	8.5	16	6.5	10.8	28	26	14	12	9	80	20	M8x25	38.74	52.19	0.66	0.53	0.53	1.09	4.47	
HGW30HA								93	120.4	25.75										47.27	69.16	0.88	0.92	0.92	1.44								
HGW35CA	48	7.5	33	100	82	9	62	80	112.4	14.6	7	12	M10	10.1	18	9	12.6	34	29	14	12	9	80	20	M8x25	49.52	69.16	1.16	0.81	0.81	1.56	6.30	
HGW35HA								105.8	138.2	27.5										60.21	91.63	1.54	1.40	1.40	2.06								
HGW45CA	60	9.5	37.5	120	100	10	80	97	139.4	13	10	12.9	M12	15.1	22	8.5	20.5	45	38	20	17	14	105	22.5	M12x35	77.57	102.71	1.98	1.55	1.55	2.79	10.41	
HGW45HA								128.8	171.2	28.9										94.54	136.46	2.63	2.68	2.68	3.69								
HGW55CA	70	13	43.5	140	116	12	95	117.7	166.7	17.35	11	12.9	M14	17.5	26.5	12	19	53	44	23	20	16	120	30	M14x45	114.44	148.33	3.69	2.64	2.64	4.52	15.08	
HGW55HA								155.8	204.8	36.4										139.35	196.20	4.88	4.57	4.57	5.96								
HGW65CA	90	15	53.5	170	142	14	110	144.2	200.2	23.1	14	12.9	M16	25	37.5	15	15	63	53	26	22	18	150	35	M16x50	163.63	215.33	6.65	4.27	4.27	9.17	21.18	
HGW65HA								203.6	259.6	52.8										208.36	303.13	9.38	7.38	7.38	12.89								

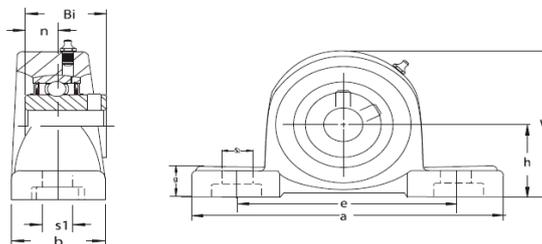
Note : 1 kgf = 9.81 N

**Figura 31.- Especificaciones de guías lineales de bola.
Fuente: (Hiwin, Linear Guideway Technical Information)**

3.4.1.3. Selección de chumaceras

Finalmente se debe seleccionar las chumaceras para los dos tornillos de bola, se considera en el diseño que las chumaceras del tornillo del eje Y deben ser de pared, mientras que las del eje X deben ser de piso, las cuatro chumaceras deben ser de diámetro 20 debido a que los tornillos son de ese diámetro externo. Se seleccionan a los modelos UCP204 (piso) y UCF204 (pared) cuyas características están descritas en la Figura 32 y Figura 33 respectivamente.

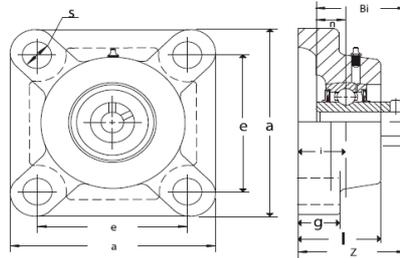
Normal Duty Pillow Blocks
UCP200 SERIES



Unit No.	Shaft Dia		Dimensions (in / mm)											Bolt Used		Bearing No.	Housing No.	Weight kg	Coverst (in / mm)
	in	mm	h	a	e	b	S2	S1	g	w	Bi	n	in	mm					
UCP201 201-8 202 202-10	1/2	12 15	13/16 30.2	5 127	3 3/4 95	1 1/2 38	3/4 19	1/2 13	15/32 12	2 3/8 60	1.2205 31.0	0.7205 12.7	3/8	10	UC201 201-8 202 202-10	P203	0.78	1 23/32 44	
UCP204 204-12	3/4	20	1 5/16 33.3	5 127	3 3/4 95	1 1/2 38	3/4 19	1/2 13	1/2 13	2 17/32 64.3	1.2205 31.0	0.7205 12.7	3/8	10	UC204 204-12	P204	0.66	1 23/32 44	
UCP205 205-14 205-15 205-16	7/8	23 1	1 7/16 36.5	5 1/2 140	4 1/8 105	1 1/2 38	3/4 19	1/2 13	1/2 13	2 25/32 71	1.3306 34.1	0.5630 14.3	3/8	10	UC205 205-14 205-15 205-16	P205	0.86	1 27/32 47	
UCP206 206-18 206-19 206-20	1 1/8 1 3/16 1 1/4	30	1 11/16 42.9	6 1/2 165	4 3/4 121	1 7/8 48	13/16	21/32 17	19/32 15	3 5/16 84	1.5000 38.1	0.6260 15.9	1/2	14	UC206 206-18 206-19 206-20	P206	1.41	2 1/16 52	
UCP207 207-20 207-21 207-22 207-23	1 1/4 1 5/16 1 3/8 1 7/16	35	1 7/8 47.6	6 9/16 167	5 127	1 7/8 48	13/16 21	21/32 17	5/8 16	3 21/32 93	1.6890 42.9	0.6890 17.5	1/2	14	UC207 207-20 207-21 207-22 207-23	P207	1.66	2 5/16 59	
UCP208 208-24 208-25	1 1/2 1 9/16	40	1 15/16 49.2	7 1/4 184	5 13/32 137	2 1/8 54	13/16 21	21/32 17	21/32 17	3 27/32 98	1.9370 49.2	0.7480 19.0	1/2	14	UC208 208-24 208-25	P208	2.12	2 11/16 68	
UCP209 209-26 209-27 209-28	1 5/8 1 11/16 1 3/4	45	2 1/8 54.0	7 15/32 190	5 3/4 146	2 1/8 54	13/16 21	21/32 17	21/32 17	4 3/16 106	1.9370 49.2	0.7480 19.0	1/2	14	UC209 209-26 209-27 209-28	P209	2.40	2 11/16 68	
UCP210 210-30 210-31	1 7/8 1 15/16	50	2 1/4 57.2	8 1/8 206	6 1/4 159	2 3/8 60	7/8 22	25/32 20	3/4 19	4 7/16 113	2.0315 51.6	0.7480 19.0	5/8	16	UC210 210-30 210-31	P210	2.94	2 7/8 73	
UCP211 211-32 211-34 211-35	2 2 1/8 2 3/16	55	2 1/2 63.5	8 5/8 219	6 23/32 171	2 3/8 60	7/8 22	25/32 20	3/4 19	4 29/32 125	2.1890 55.6	0.8740 22.2	5/8	16	UC211 211-32 211-34 211-35	P211	3.66	2 15/16 75	
UCP212 212-36 212-38 212-39	2 1/4 2 3/8 2 7/16	60	2 3/4 69.9	9 1/2 241	7 1/4 184	2 3/4 70	1 25	25/32 20	7/8 22	5 7/16 138	2.5630 65.1	1.0000 25.4	5/8	16	UC212 212-36 212-38 212-39	P212	5.15	3 15/32 88	
UCP213 213-40	2 1/2	65	3 76.2	10 7/16 265	8 203	2 3/4 70	1 3/16 30	1 25	1 25	5 29/32 150	2.5630 65.1	1.0000 25.4	3/4	20	UC213 213-40	P213	6.10	3 15/32 88	
UCP214 214-44	2 3/4	70	3 1/8 79.4	10 15/32 266	8 9/32 210	2 27/32 72	1 3/16 30	1 25	1 1/32 28	6 5/32 156	2.9370 74.6	1.1890 30.2	3/4	20	UC214 214-44	P214	6.90	3 27/32 98	

Figura 32.- Especificaciones de chumaceras de piso
Fuente: (NBR, 2014)

Normal Duty Flange Units
UCF200 SERIES



Unit No.	Shaft Dia		Dimensions (in/mm)										Bolt Used		Bearing No.	Housing No.	Weight kg	Coverst (in/mm)	
	in	mm	a	e	i	g	l	s	z	Bi	n	in	mm						
UCF201 201-8	1/2	12														UC201 201-8			
202-10 203 204 204-12	5/8	15 17 20	3 3/8 86	2 33/64 64	19/32 15	15/32 12	1 25.5	15/32 12	1 5/16 33.3	1.2205 31.0	0.5000 12.7	3/8	10		UC202 202-10 203 204 204-12	F204	0.65	1 15/32 37.0	
UCF205 205-14 205-15 205-16	7/8 1 5/16 1	25 39.5	3 3/4 95	2 3/4 70	5/8 16	9/16 14	1 1/16 27	15/32 12	1 13/32 35.7	1.3386 34.1	0.5630 14.3	3/8	10		UC205 205-14 205-15 205-16	F205	0.85	1 9/16 39.5	
UCF206 206-18 206-19 206-20	1 1/8 1 3/16 1 1/4	30 48.5	4 1/4 108	3 17/64 83	45/64 18	9/16 14	17/32 31	15/32 12	1 19/32 40.2	1.5000 38.1	0.6200 15.9	3/8	10		UC206 206-18 206-19 206-20	F206	1.60	1 29/32 48.5	
UCF207 207-20 207-21 207-22 207-23	1 1/4 1 5/16 1 3/8 1 7/16	35 48.5	4 19/32 117	3 5/8 92	3/4 19	5/8 16	1 11/32 34	35/64 14	1 3/4 44.4	1.6890 42.9	0.6890 17.5	7/16	12		UC207 207-20 207-21 207-22 207-23	F207	1.60	1 29/32 48.5	
UCF208 208-24 208-25	1 1/2 1 9/16	40 55.0	5 1/8 130	4 1/8 102	53/64 21	5/8 16	1 13/32 36	5/8 16	2 1/32 51.2	1.9370 49.2	0.7480 19.0	1/2	14		UC208 208-24 208-25	F208	2.05	2 5/32 55.0	
UCF209 209-26 209-27 209-28	1 5/8 1 11/16 1 3/4	45 56.0	5 13/32 137	4 9/64 105	55/64 22	23/32 18	1 1/2 38	5/8 16	2 1/16 52.2	1.9370 49.2	0.7480 19.0	1/2	14		UC209 209-26 209-27 209-28	F209	2.38	2 7/32 56.0	
UCF210 210-30 210-31	1 7/8 1 15/16	50 62.5	5 5/8 143	4 3/8 111	55/64 22	23/32 18	1 9/16 40	5/8 16	2 5/32 54.6	2.0315 51.6	0.7480 19.0	1/2	14		UC210 210-30 210-31	F210	2.50	2 5/16 58.5	
UCF211 211-32 211-34 211-35	2 2 1/8 2 3/16	55 62.5	6 3/8 162	5 1/8 130	63/64 25	25/32 20	1 11/16 43	3/4 19	2 5/16 58.4	2.1890 55.6	0.8740 22.2	5/8	16		UC211 211-32 211-34 211-35	F211	3.60	2 15/32 62.5	
UCF212 212-36 212-38 212-39	2 1/4 2 3/8 2 7/16	60 73.0	6 7/8 175	5 5/8 143	1 9/16 29	25/32 20	1 7/8 48	3/4 19	2 23/32 68.7	2.5630 65.1	1.0000 25.4	5/8	16		UC212 212-36 212-38 212-39	F212	4.90	2 7/8 73.0	
UCF213 213-40	2 1/2	65	7 3/8 187	5 55/64 149	1 3/16 30	25/32 20	1 31/32 50	3/4 19	2 3/4 69.7	2.5630 65.1	1.0000 25.4	5/8	16		UC213 213-40	F213	5.90	2 29/32 73.5	
UCF214 214-44	2 3/4	70	7 19/32 193	5 63/64 152	1 7/32 31	15/16 24	2 1/8 54	3/4 19	2 31/32 75.4	2.9370 74.6	1.1890 30.2	5/8	16		UC214 214-44	F214	6.30	3 5/32 80.0	
UCF215 215-47 215-48	2 15/16 3	75	7 7/8 200	6 17/64 159	1 11/32 34	15/16 24	2 7/32 56	3/4 19	3 3/32 78.5	3.0630 77.8	1.3110 33.3	5/8	16		UC215 215-47 215-48	F215	6.80	3 9/32 83.0	
UCF216	80	208	165	34	24	58	23	83.3	82.6	33.3		20			UC216	F216	8.2		
UCF217	85	220	175	36	26	63	23	87.6	85.7	34.1		20			UC217	F217	9.3		
UCF218	90	235	187	40	26	68	23	96.3	96.0	39.7		20			UC218	F218	11.3		

Figura 33.- Especificaciones de chumaceras de pared.
Fuente: (NBR, 2014)

3.4.2. Diseño de la Máquina

Una vez realizada la selección inicial de los elementos importantes, se procede a diseñar la estructura tomando en cuenta las dimensiones de los elementos base seleccionados. En la Figura 34 se presenta el diseño de la estructura el sistema de movimiento, los perfiles seleccionados para la estructura son perfiles cuadrados de

25.4mm (1in) y de 1.5mm de espesor. Se selecciona el tubo de 1 in debido a que la pared de la guía que se apoya al soporte es de 20 mm, por lo que el tubo es adecuado para soportar las guías, en cuanto al espesor, fue una selección a priori que se estudiará más adelante para saber si resiste los esfuerzos. En la Figura 35 se muestra los ejes de coordenadas establecidos para la cortadora láser.

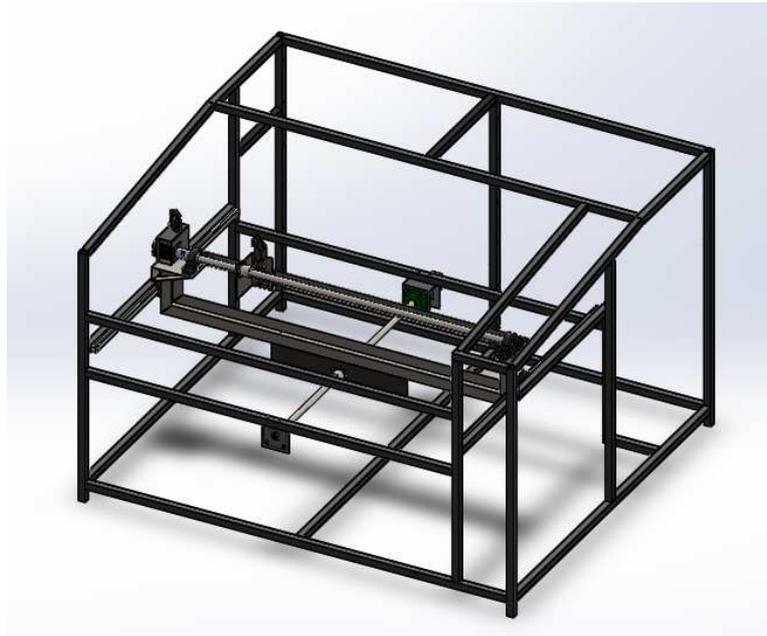


Figura 34.- Estructura con ejes de movimiento montados

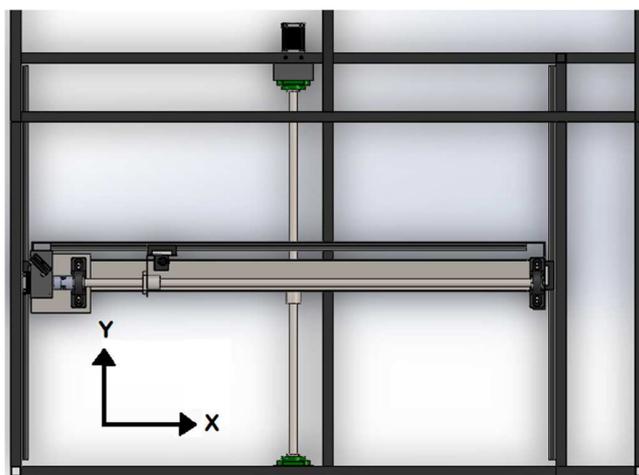


Figura 35.- Ejes de movimiento, establecimiento de ejes de coordenadas, vista aérea

3.4.2.1. Diseño del sistema de movimiento del eje X

Como se puede observar en la Figura 36, el sistema de movimiento en X es simple y la carga que este debe soportar es una carga muy ligera dado a que la carga que soporta la guía y el tornillo son los pesos del cabezal y la placa de acople del mismo. Debido a la naturaleza de la aplicación, que es corte por láser, no existe esfuerzo de herramienta, por lo tanto las únicas fuerzas que actúan sobre la estructuras de los sistemas de movimientos son los pesos de sus elementos.

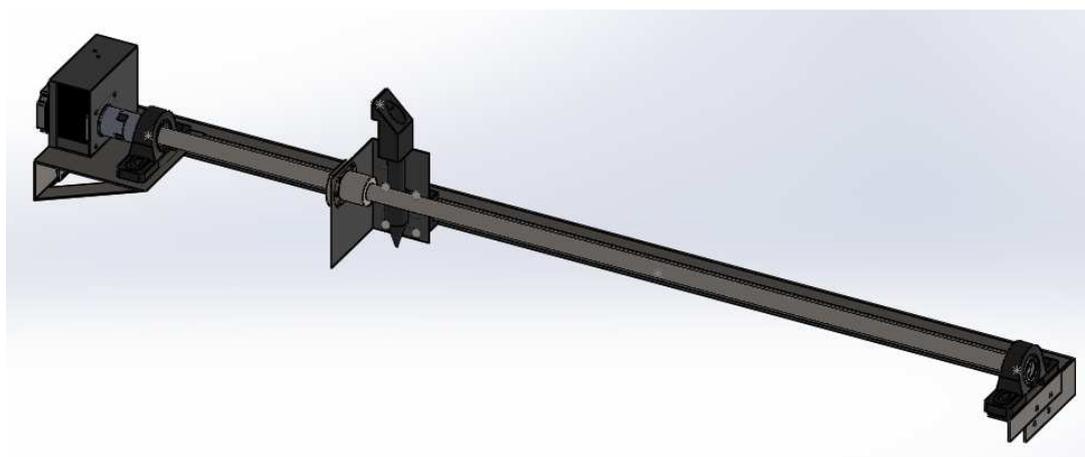


Figura 36.- Sistema de movimiento del eje X

Se analizará primero los esfuerzos que actúan sobre la placa de acople del mismo, de esa manera se obtendrán las cargas que actúan en el tornillo y la guía. Se empieza por establecer los apoyos y las fuerzas externas que actúan, en este caso solo el peso, por problemas al momento de realizar la simulación, se remplazará la parte baja del cabezal (la que contiene la lente) por una fuerza equivalente remota para obtener el mismo efecto en el estudio. En la Figura 37 se muestra el diagrama de cuerpo libre del ensamble.

Los estudios que se deben realizar son el estudio de esfuerzos para poder obtener el esfuerzo de Von-Mises, el cual nos ayudará a determinar las zonas que soportan mayores esfuerzos y son más propensas a fallas, el estudio de reacciones en la zona de los apoyos, para obtener las cargas que actúan en la guía y en el tornillo, y el análisis del factor de seguridad, donde se usará el esfuerzo de Von-Mises y el esfuerzo de fluencia para determinar las zonas donde la pieza fallará.

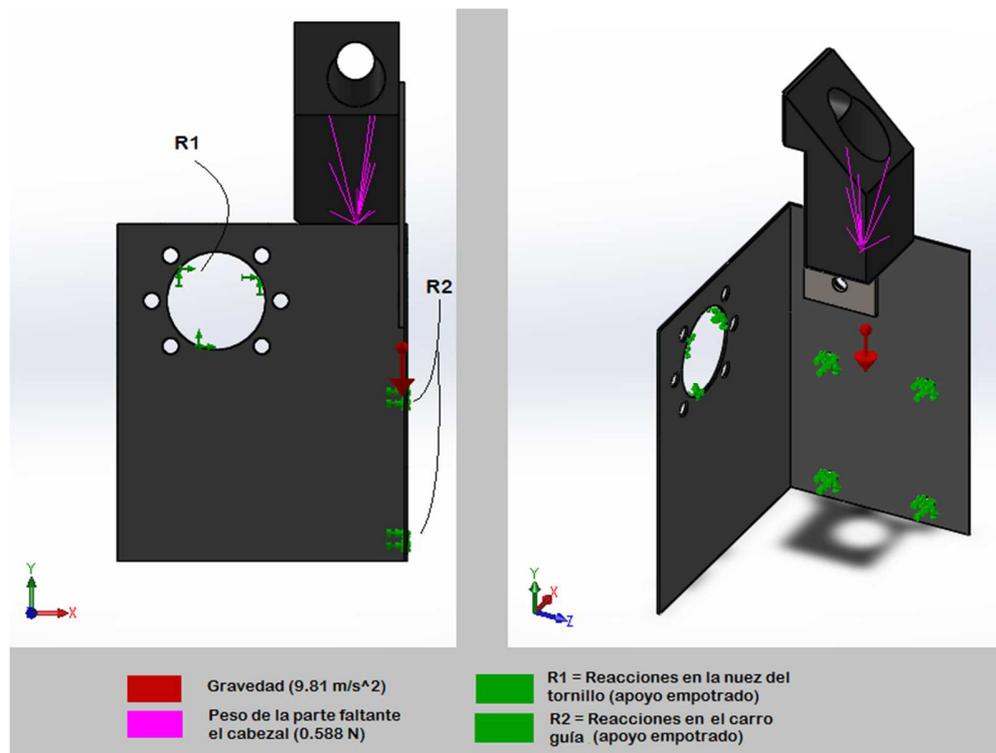


Figura 37.- Diagrama de cuerpo libre del ensamblaje de la placa del cabezal.

Entonces, los resultados del estudio de esfuerzos se muestran en la Figura 38, los esfuerzos presentados son bajos debido a que solo el peso de los elementos actúa sobre el ensamblaje. Posteriormente en la Figura 39 se muestra el análisis de factor de seguridad, se elige un factor de seguridad de 2, y se puede observar en el gráfico que todo el ensamblaje es azul, lo que indica que en todas las zonas se cumple la relación definida en la ecuación 3.1. Si alguna zona fuese de color rojo, indicaría que la relación no se cumple y esa zona está por debajo del factor de seguridad y puede ser propensa a fallos.

$$\frac{\sigma_{Fluencia}}{\sigma_{Von-Mises}} \geq F.S. \quad (3.1)$$

En donde:

- $F.S.$: Factor de Seguridad
- $\sigma_{Fluencia}$ [MPa]: Esfuerzo de fluencia
- $\sigma_{Von-Mises}$ [MPa]: Esfuerzo de Von-Mises

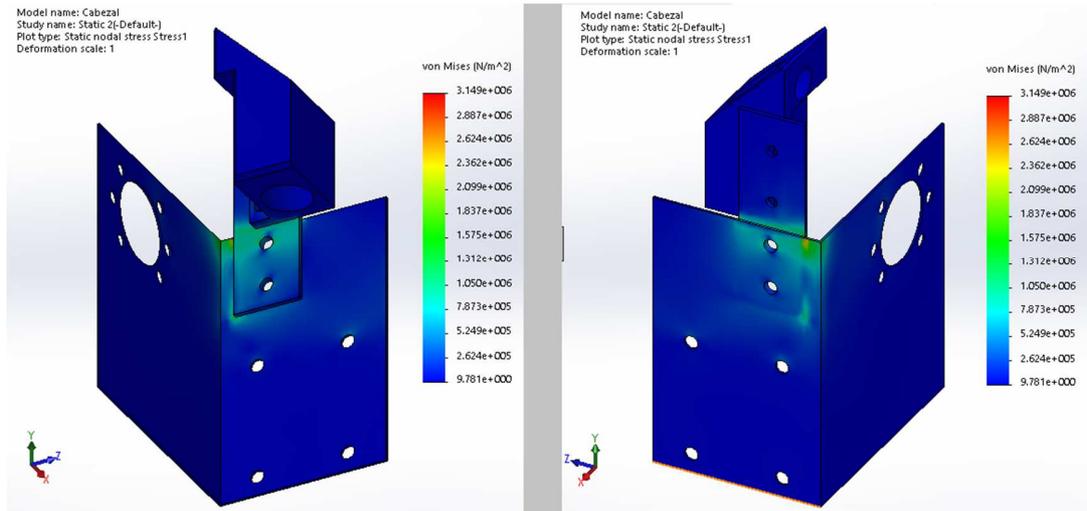


Figura 38.- Estudio de esfuerzos del ensamble de la placa del cabezal.

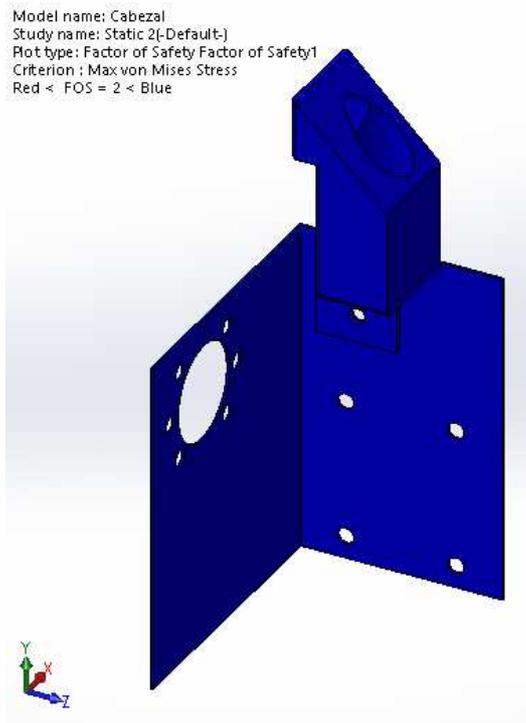


Figura 39.- Análisis del factor de seguridad del ensamble de la placa del cabezal.

En la Figura 40 se presentan las reacciones en los apoyos, como se puede observar los valores son bajos comparados con la resistencia nominal a las cargas estáticas del tornillo

y la guía mostradas en la Figura 30 y Figura 31. En la sección A de la Figura 40 se puede observar los valores resultantes de las reacciones en X, Y y Z, sin embargo en la sección B se tienen varias reacciones por cada tornillo que está en contacto con la guía, es necesario obtener reacciones resultantes para la sección B, para ello es necesario trasladar las fuerzas al centro de gravedad del carro de la guía, este proceso va a generar momentos en los planos XY, YZ y XZ, los cuales serán muy bajos, estando estos en el orden de los N-mm y menores, por lo tanto se despreciaran estos momentos de bajo valor que no influyen significativamente en el cálculo.

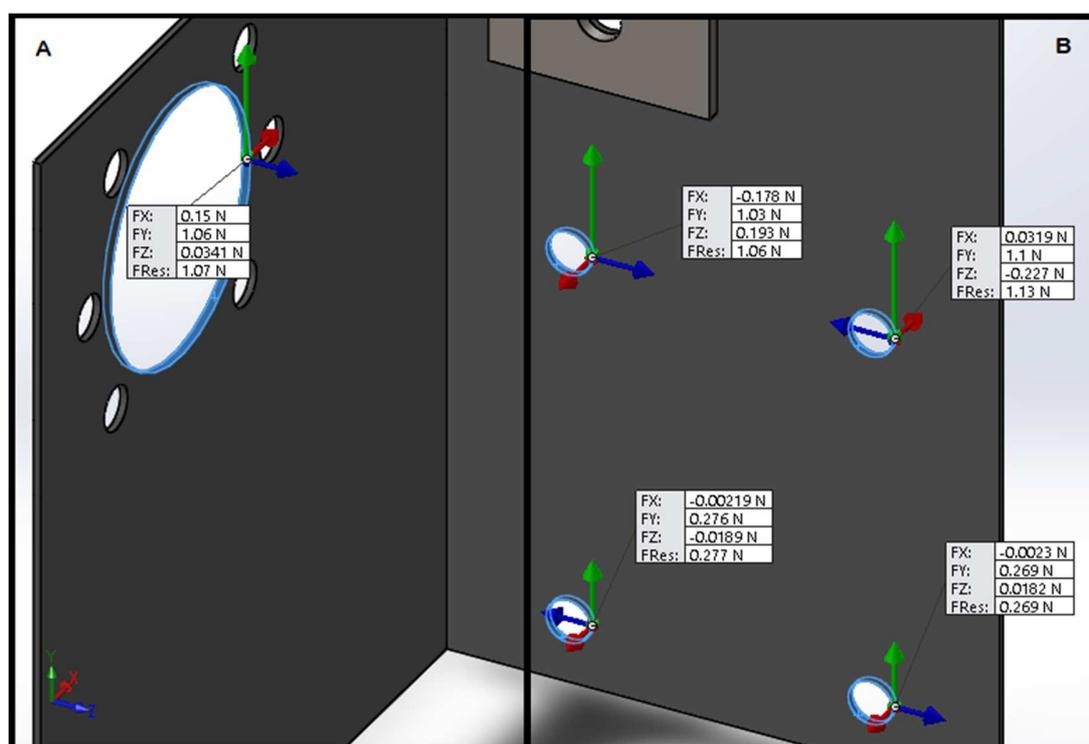


Figura 40.- Reacciones en A) la nuez del tornillo, B) la guía, del ensamble de la placa del cabezal.

Para el cálculo de las reacciones resultantes en cada eje coordenado de R2, se aplica una simple sumatoria de fuerzas, se usan las ecuaciones 3.2, 3.3 y 3.4 para el cálculo, para obtener la reacción resultante total se aplica la ecuación 3.5, obteniendo los siguientes resultados:

$$R_X = \sum_{i=1}^n R_{X_i} \quad (3.2)$$

$$R_Y = \sum_{i=1}^n R_{Y_i} \quad (3.3)$$

$$R_Z = \sum_{i=1}^n R_{Z_i} \quad (3.4)$$

$$R = \sqrt{R_X^2 + R_Y^2 + R_Z^2} \quad (3.5)$$

En donde:

- R_X, R_Y, R_Z [N]: Reacciones resultantes en los ejes X, Y y Z respectivamente
- R [N]: Reacción resultante total

Entonces se obtiene de lo anterior:

$$R_{2X} = -0.178 + 0.0319 - 0.0023 - 0.00219$$

$$R_{2X} = -0.15 \text{ N}$$

$$R_{2Y} = 1.03 + 1.1 + 0.269 + 0.276$$

$$R_{2Y} = 2.675 \text{ N}$$

$$R_{2Z} = -0.0189 + 0.0182 - 0.227 + 0.193$$

$$R_{2Z} = -0.0347 \text{ N}$$

$$R_2 = \sqrt{(-0.0347)^2 + (2.675)^2 + (-0.15)^2}$$

$$R_2 = 2.679 \text{ N}$$

Mientras que los valores de R_1 son los mostrados en la Figura 40 A y son los siguientes:

$$R_{1X} = 0.15 \text{ N}$$

$$R_{1Y} = 1.06 \text{ N}$$

$$R_{1Z} = 0.0341 \text{ N}$$

$$R_1 = 1.07 \text{ N}$$

Como las reacciones en Z son de un valor muy bajo, estas no serán tomadas en cuenta para futuros cálculos.

A continuación se usará el software SAP2000 para el análisis de esfuerzos en la guía y el tornillo de bolas, en el software se ingresa las propiedades del material, la sección transversal, longitud de el tornillo de bolas, los apoyos y las fuerzas externas, que en este caso son las componentes de R1 en dirección contraria, y se obtiene el diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 41.

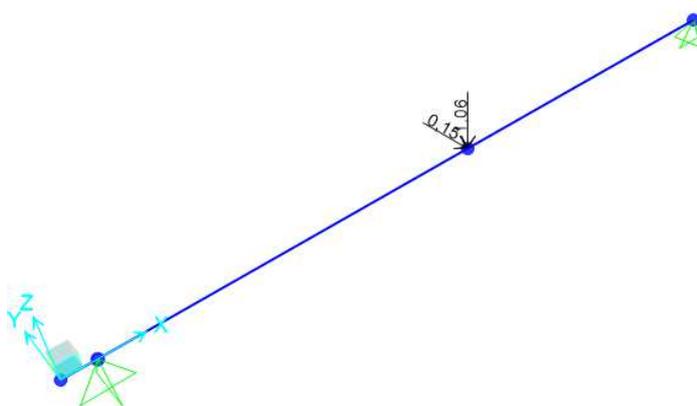


Figura 41.- Diagrama de cuerpo libre del tornillo de bolas del eje X.

Se realiza un análisis inicial para obtener las reacciones en los apoyos, estas reacciones se muestran en la Figura 42.

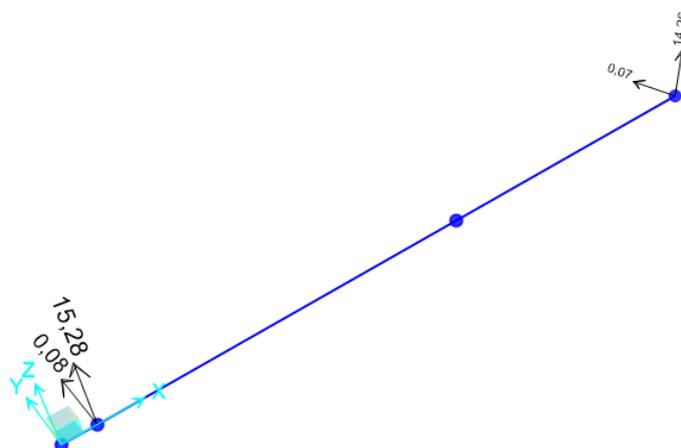


Figura 42.- Reacciones en los apoyos del tornillo de bolas del eje X en el sistema de coordenadas de SAP2000.

Se realiza un análisis completo para obtener datos relevantes como diagramas de fuerza cortante. Diagrama de momento flector, diagrama de deflexión y diagrama de esfuerzo de Von-Mises, este último es el que usaremos para determinar si el tornillo resiste los esfuerzos. Los resultados se muestran en la Figura 43.

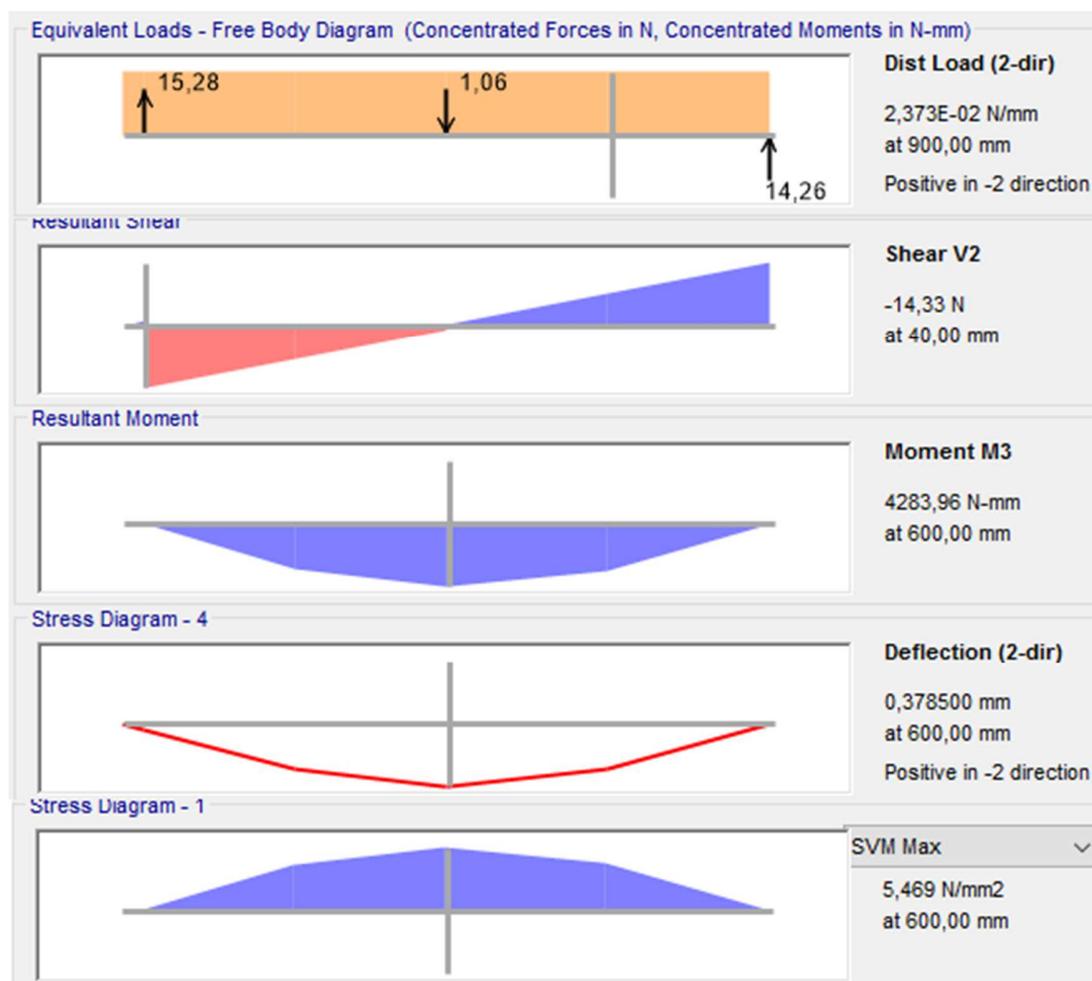


Figura 43.- Resultados del análisis del tornillo de bolas del eje X usando el software SAP2000.

Para determinar si el tornillo va a fallar se usará el criterio de fallo de Von-Mises aplicando la ecuación 3.1, aparte de esto se comparará la carga estática que el tornillo de bolas fin soporta, según la Figura 30, y la carga estática a la que este está sometido para ver si este es apropiado para la aplicación. Entonces se tiene:

Datos:

- $\sigma_{Fluencia\ del\ acero\ aleado} = 620.422\ MPa$
- $\sigma_{Von-Mises\ máximo} = 5.469\ MPa$
- $F.S.\ (mínimo) = 2$
- $Coa\ (carga\ estática\ máxima) = 23347\ N$
- $Coas\ (Carga\ estática\ soportada) = R1 = 1.07\ N$

$$\frac{620.422}{5.469} \geq F.S.$$

$$133 \geq F.S.$$

$$133 \geq 2$$

$$Coa \geq Coas$$

$$23347\ N \geq 1.07\ N$$

De lo anterior se puede concluir que el tornillo de bolas seleccionado para el eje X no fallará y soportará la carga a la que es sometido.

De la misma forma que se analizó el tornillo de bolas, se procederá a analizar la guía del eje X, obteniendo el diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 44, las reacciones en los apoyos mostradas en la Figura 45 y el resultado del estudio mostrado en la Figura 46.

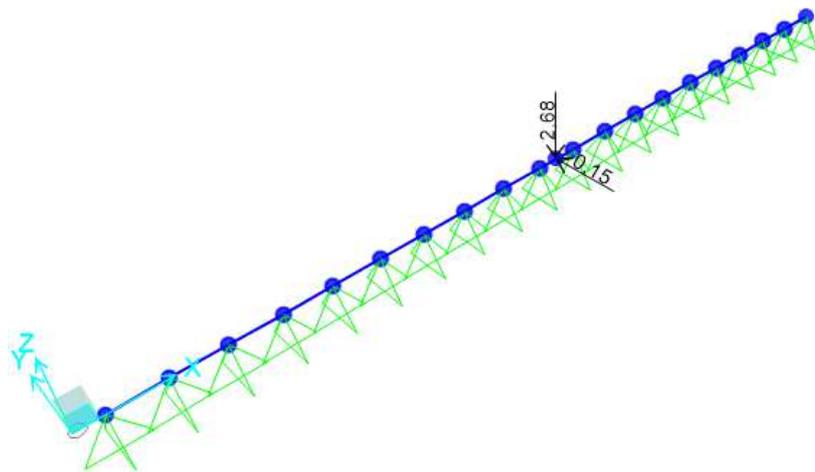


Figura 44.- Diagrama de cuerpo libre de la guía del eje X.

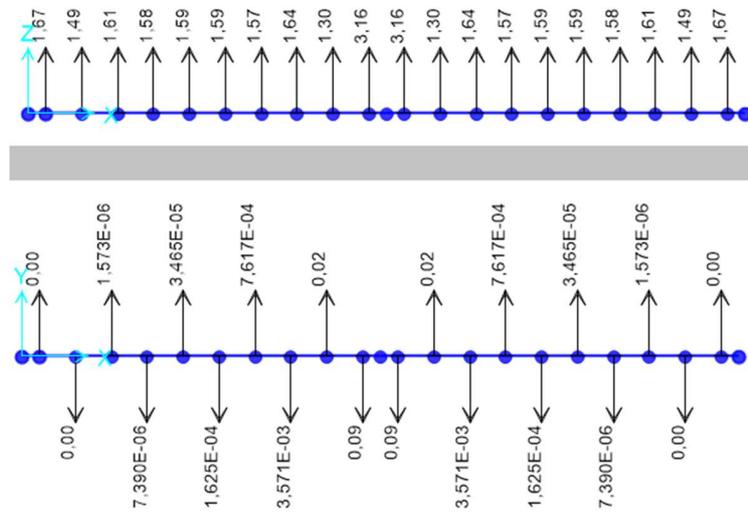


Figura 45.- Reacciones en los apoyos de la guía del eje X en el sistema de coordenadas de SAP2000.

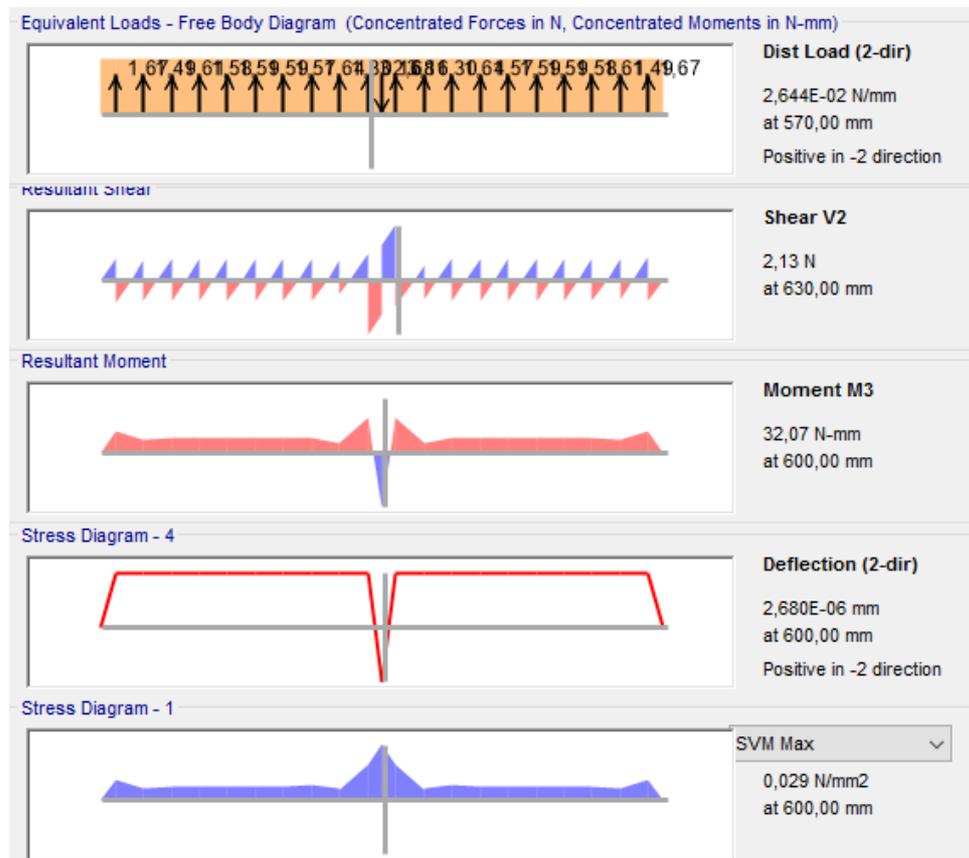


Figura 46.- Resultados del análisis de la guía del eje X usando el software SAP2000.

Como se puede observar en la Figura 45, las reacciones en el plano YX, en el sistema de coordenadas del software SAP2000, son muy bajas, por lo que se despreciará esas reacciones en futuros cálculos, basándose en el criterio de fallo de Von-Mises, se determinará si la guía va a fallar, aplicando la ecuación 3.1, aparte de esto se comparará la carga estática que la guía soporta, según la Figura 31, y la carga estática a la que esta está sometida para ver si la guía es apropiada para la aplicación. Entonces se tiene:

Datos:

- $\sigma_{Fluencia\ del\ acero\ aleado} = 620.422\ MPa$
- $\sigma_{Von-Mises\ máximo} = 0.029\ MPa$
- $F.S.\ (mínimo) = 2$
- $Coa\ (carga\ estática\ máxima) = 27760\ N$
- $Coas\ (Carga\ estática\ soportada) = R1 = 2.679\ N$

$$\frac{620.422}{0.029} \geq F.S.$$

$$21393.86 \geq F.S.$$

$$21393.86 \geq 2$$

$$Coa \geq Coas$$

$$27760\ N \geq 2.679\ N$$

De lo anterior se puede concluir que la guía seleccionada para el eje X no fallará y soportará la carga a la que es sometida.

Una vez obtenidas las reacciones del tornillo de bolas y la guía, se procede al análisis de los componentes restantes del sistema de movimiento del eje X, a continuación se analizarán los esfuerzos que soportan las piezas que conforman el soporte del tornillo y la guía del eje X. En la Figura 47 se presenta el diagrama de cuerpo libre, en la Figura 48 el estudio de esfuerzos de Von-Mises y en la Figura 49 el estudio del factor de seguridad aplicando el criterio de falla de Von-Mises (ecuación 3.1).

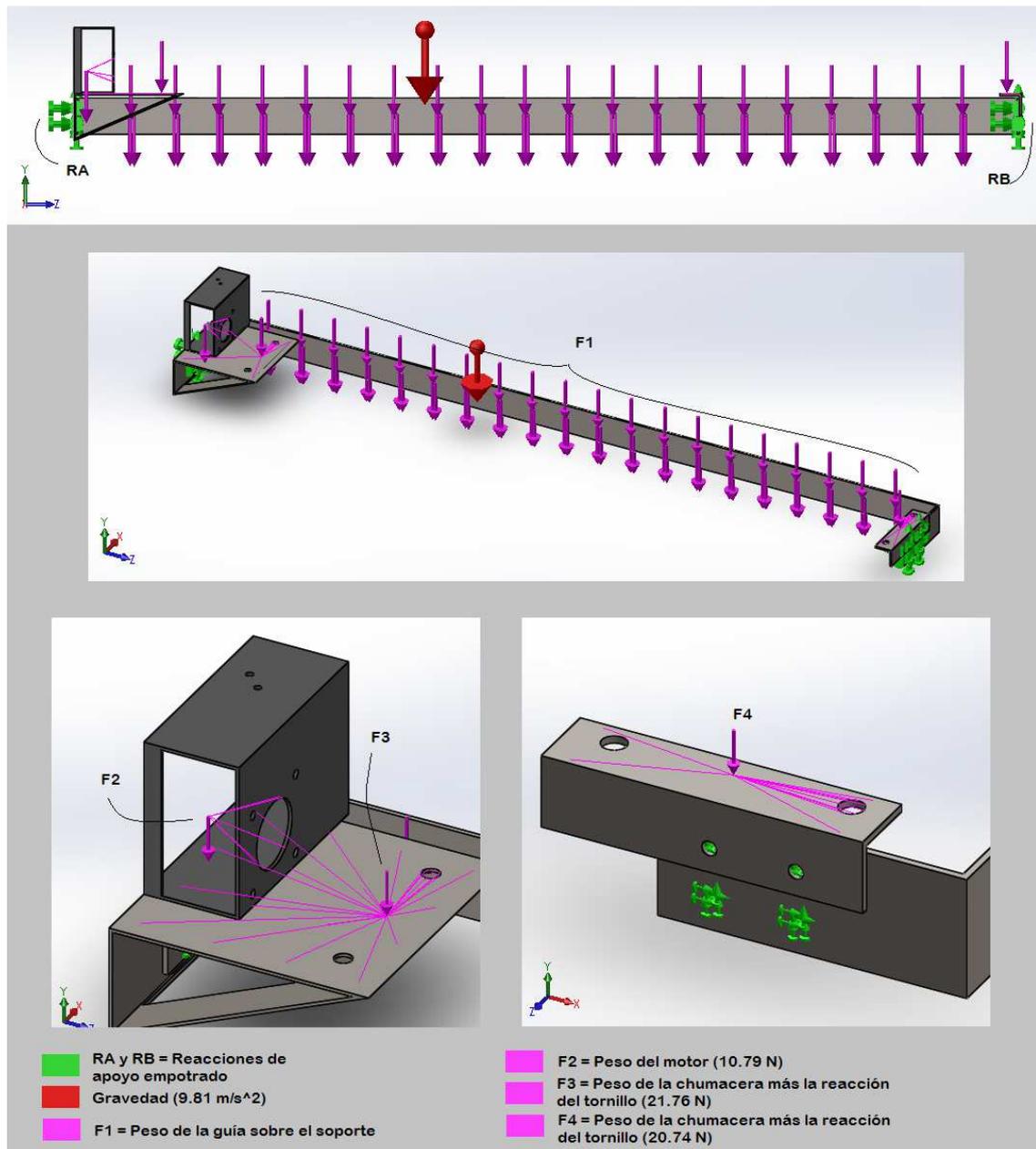


Figura 47.- Diagrama de cuerpo libre del ensamble del soporte de la guía y el tornillo de bolas del eje X.

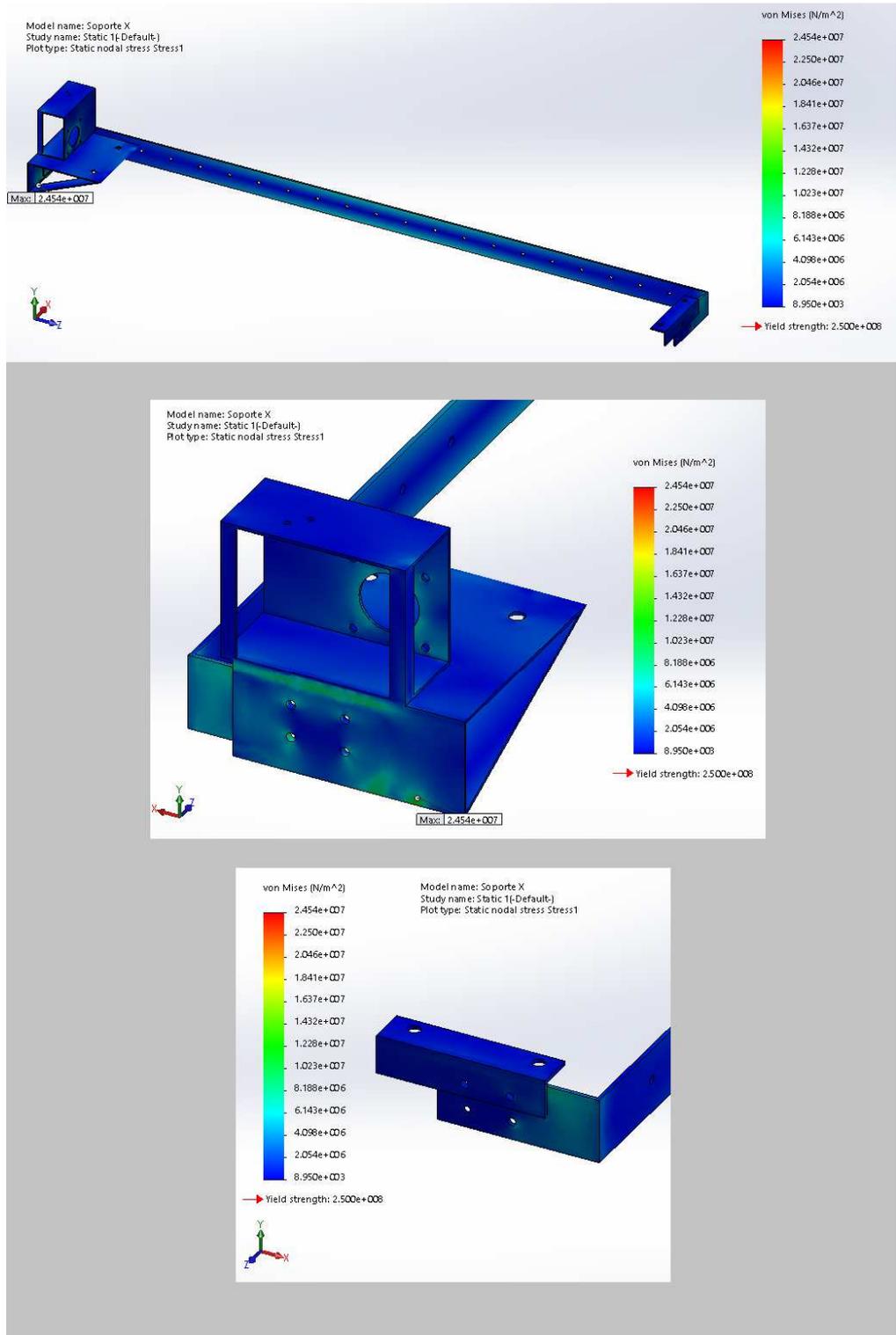


Figura 48.- Estudio de esfuerzos del ensamble del soporte de la guía y el tornillo de bolas del eje X.

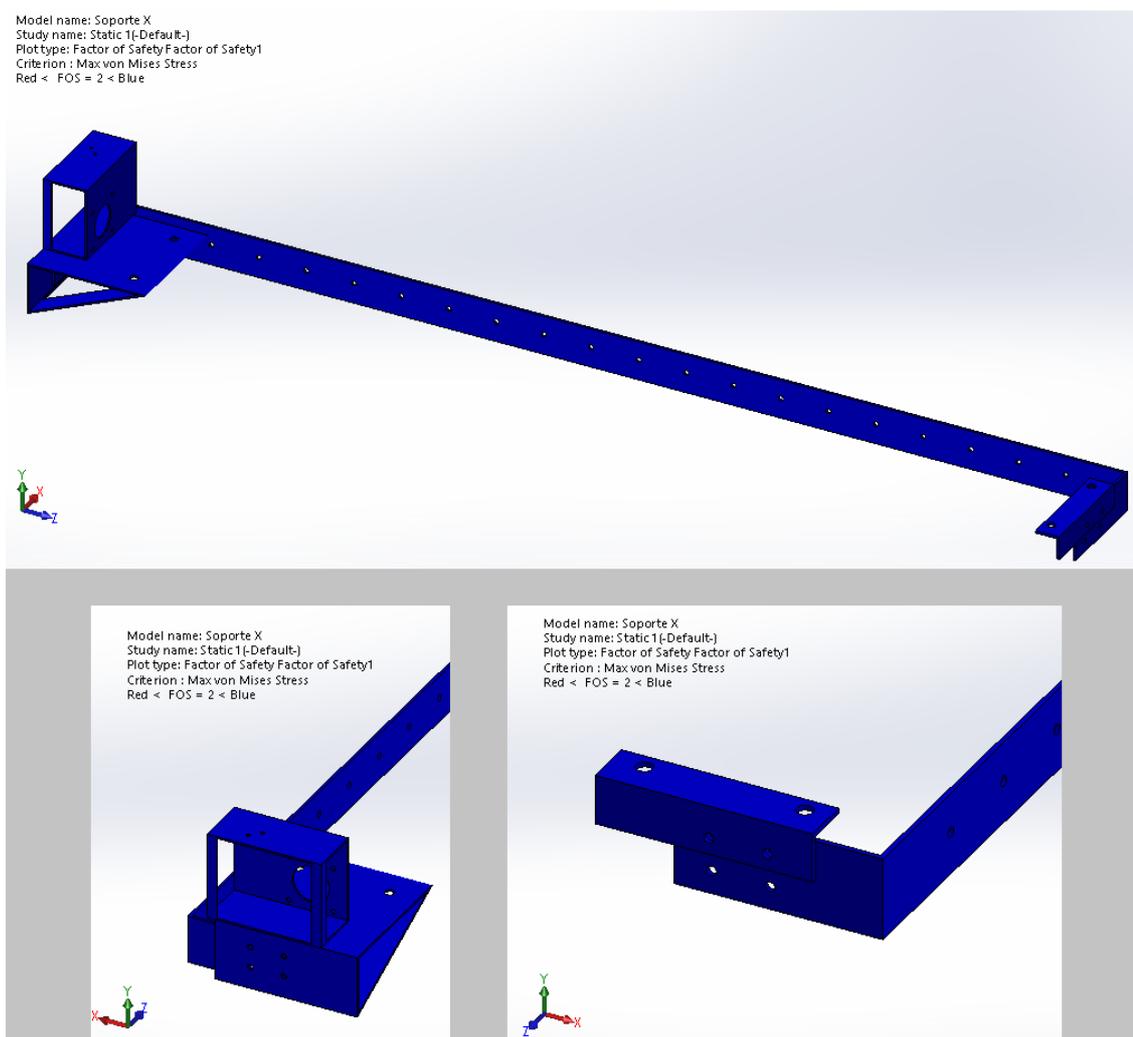


Figura 49.- Análisis del factor de seguridad del ensamble del soporte de la guía y el tornillo de bolas del eje X.

Como se puede apreciar en la Figura 48 y Figura 49, los esfuerzos de Von-Mises en el soporte no superan el valor del esfuerzo de fluencia, también se puede observar que el valor del factor de seguridad no es menor a dos en ningún punto, por lo que el soporte no fallará.

En la Figura 50 se muestran las reacciones que se generan en los apoyos, dichas reacciones se usarán en el cálculo del soporte del eje Y que se presenta a continuación.

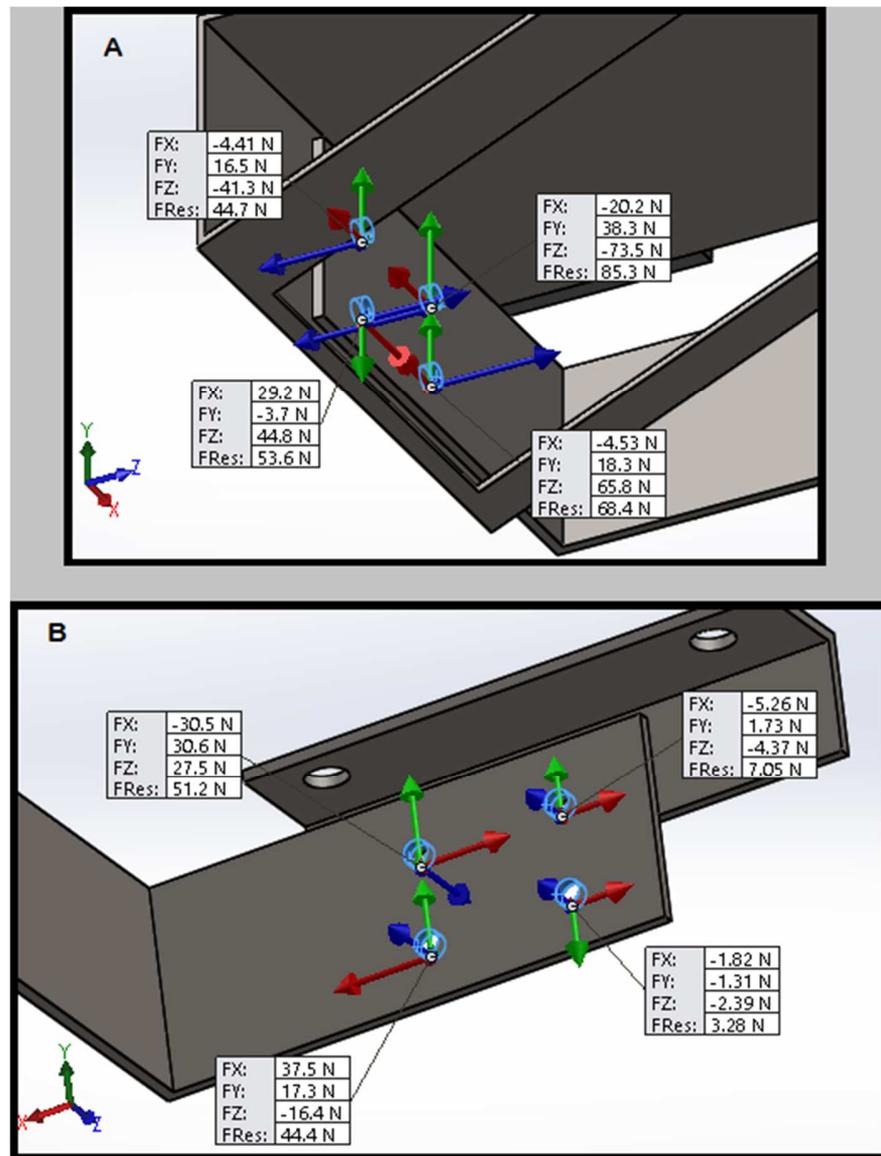


Figura 50.- Reacciones en A) el apoyo izquierdo, B) el apoyo derecho, del ensamble del soporte de la guía y el tornillo de bolas del eje X.

3.4.2.2. Diseño del sistema de movimiento del eje Y

Como se puede observar en la Figura 51, el sistema de movimiento en Y consta de dos guías que estarán fijadas a la estructura, un soporte que se encarga de unir las guías con el tornillo de bolas y el tornillo para transmitir el movimiento del motor, la carga que

este debe soportar es el peso de todos los componentes del sistema de movimiento del eje X más el peso de sus propios componentes.

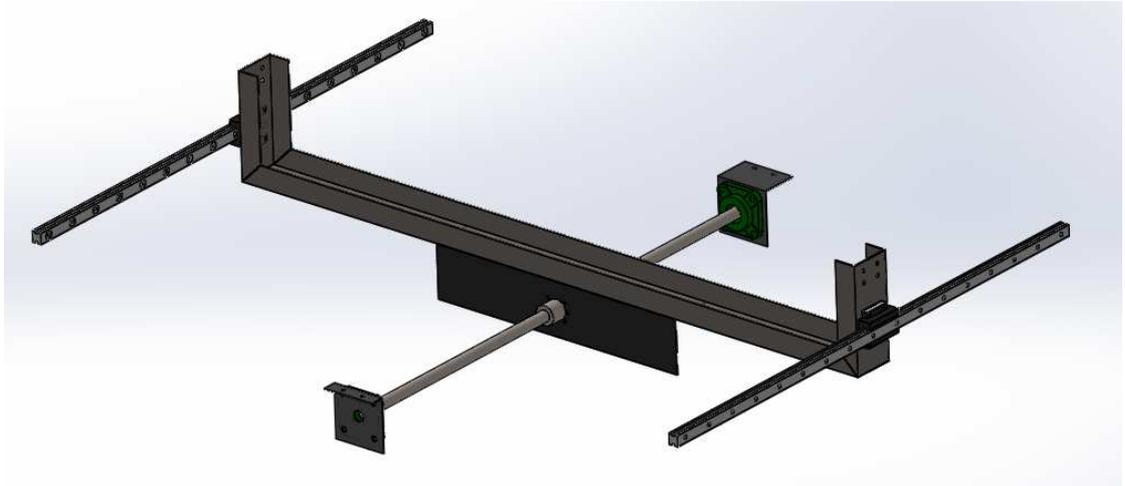


Figura 51.- Sistema de movimiento del eje Y.

Se analizará primero los esfuerzos que actúan sobre el soporte, de esa manera se obtendrán las cargas que actúan en el tornillo y las guías. Se empieza por establecer los apoyos y las fuerzas externas que actúan.

Los estudios que se deben realizar son el estudio de esfuerzos para poder obtener el esfuerzo de Von-Mises, el cual nos ayudará a determinar las zonas que soportan mayores esfuerzos y son más propensas a fallas, el estudio de reacciones en la zona de los apoyos, para obtener las cargas que actúan en las guías y en el tornillo, y el análisis del factor de seguridad, donde se usará el esfuerzo de Von-Mises y el esfuerzo de fluencia para determinar las zonas donde la pieza fallará.

En la Figura 52 se muestra el diagrama de cuerpo libre del soporte del eje Y con las fuerzas externas que actúan sobre él, las reacciones son tomadas del análisis anterior del soporte del eje X, cuyos valores se muestran en la Figura 50. En la Figura 53 se muestran

los resultados del análisis de los esfuerzos de Von-Mises y en la Figura 54 se muestra el estudio de factor de seguridad.

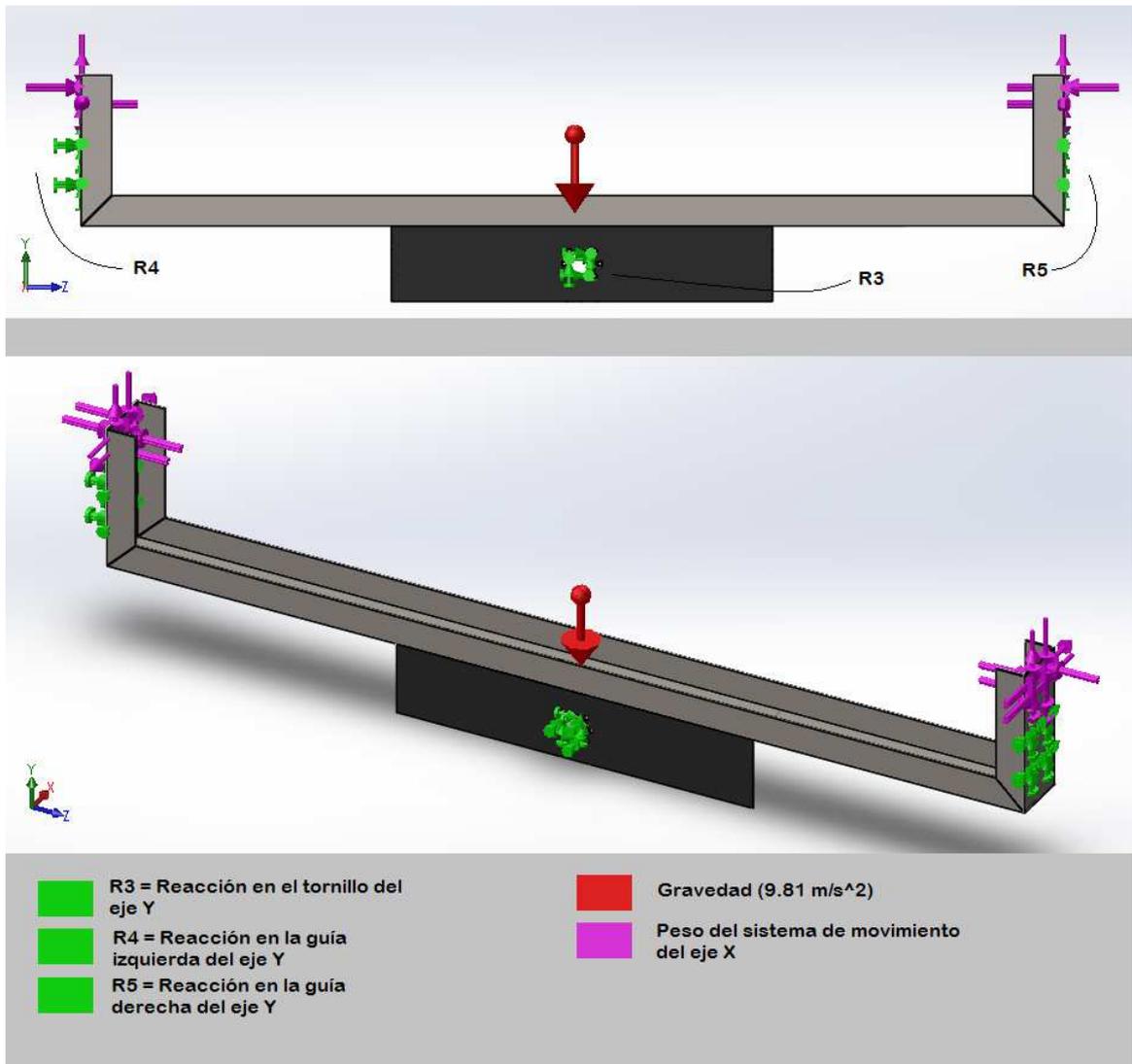


Figura 52.- Diagrama de cuerpo libre del ensamblaje del soporte del eje Y.

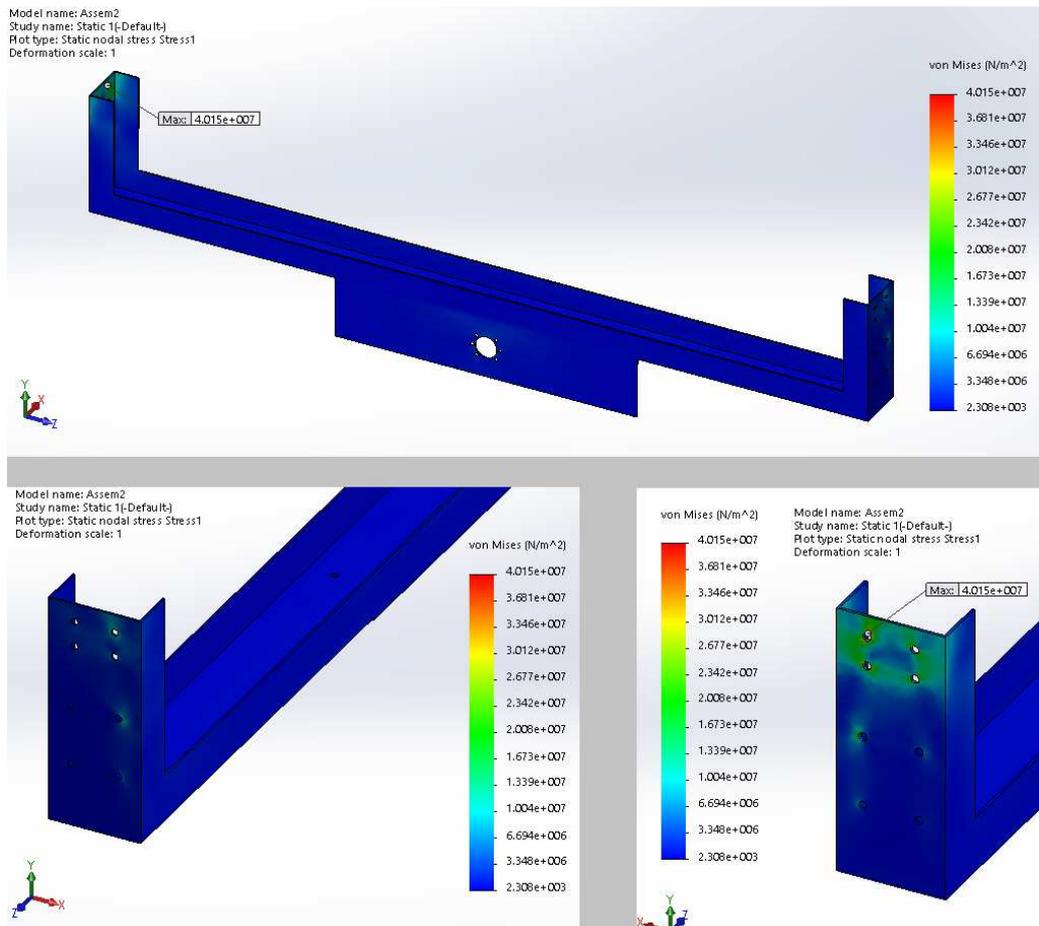


Figura 53.- Estudio de esfuerzos del ensamble del soporte del eje Y.

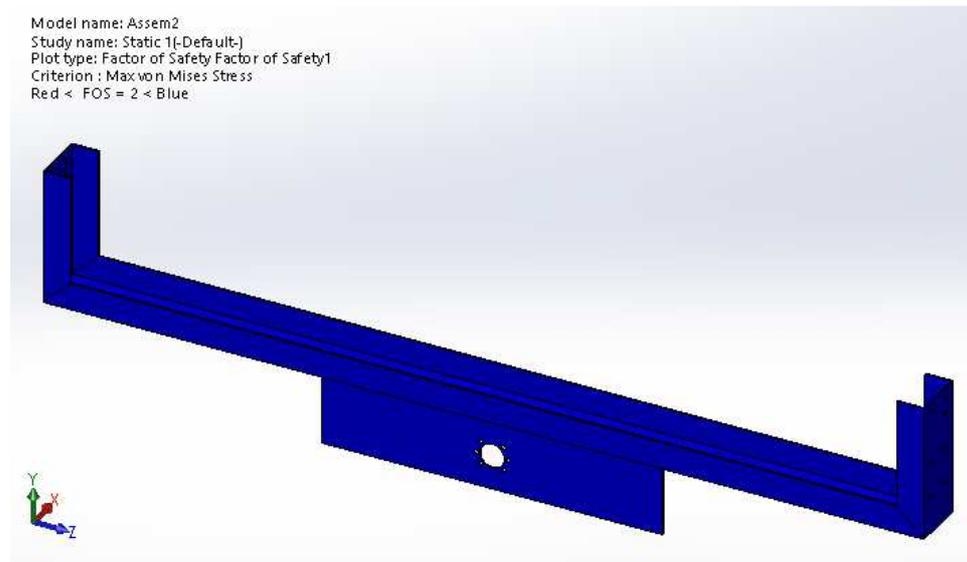


Figura 54.- Análisis del factor de seguridad del ensamble del soporte del eje Y.

Como se puede apreciar en la Figura 53 y Figura 54, los esfuerzos de Von-Mises en el soporte no superan el valor del esfuerzo de fluencia, también se puede observar que el valor del factor de seguridad no es menor a dos en ningún punto, por lo que el soporte no fallará.

En la Figura 55 se muestran las reacciones que se generan en los apoyos, dichas reacciones se usarán para el análisis de los tornillos y las guías.

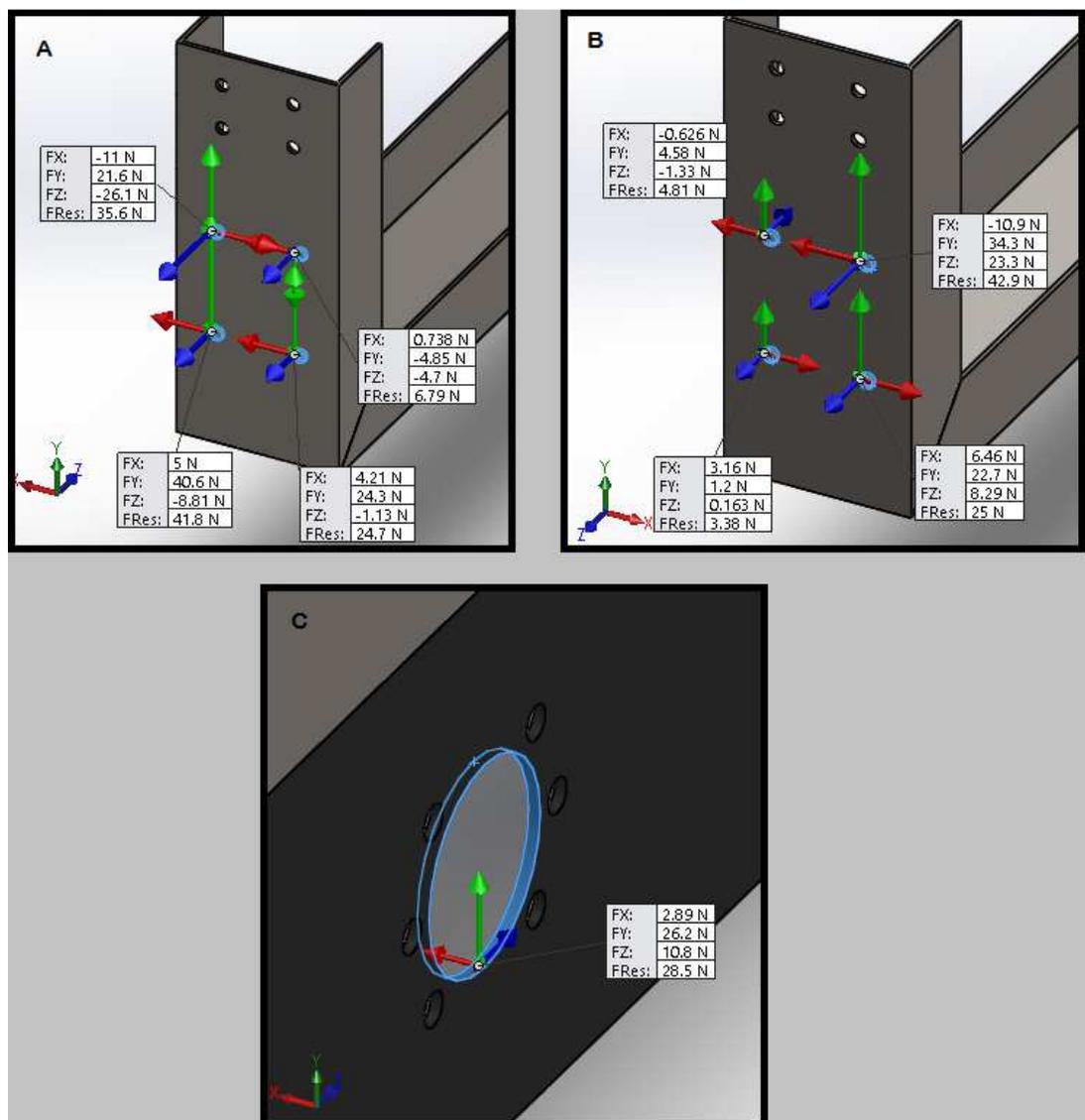


Figura 55.- Reacciones en A) el apoyo de la guía izquierda, B) el apoyo de la guía derecha, C) el apoyo del tornillo, del ensamble del soporte del eje Y.

Es necesario obtener reacciones resultantes para las guías, para ello es necesario trasladar las fuerzas al centro de gravedad del carro de la guía, este proceso va a generar momentos en los planos XY, YZ y XZ, los cuales serán muy bajos, por lo tanto se despreciaran estos momentos de bajo valor que no influyen significativamente en el cálculo.

Para el cálculo de las reacciones resultantes en cada eje coordenado de R4 y R5, se aplica una simple sumatoria de fuerzas, se usan las ecuaciones 3.2, 3.3 y 3.4 para el cálculo, para obtener la reacción resultante total se aplica la ecuación 3.5, obteniendo los siguientes resultados:

$$R4_x = -11 + 0.738 + 5 + 4.21$$

$$R4_x = -1.052 \text{ N}$$

$$R4_y = 21.6 - 4.85 + 24.3 + 40.6$$

$$R4_y = 81.65 \text{ N}$$

$$R4_z = -26.1 - 4.7 - 1.13 - 8.81$$

$$R4_z = -40.74 \text{ N}$$

$$R4 = \sqrt{(-1.052)^2 + (81.65)^2 + (-40.74)^2}$$

$$R4 = 91.25 \text{ N}$$

$$R5_x = -0.626 - 10.9 + 6.46 + 3.16$$

$$R5_x = -1.906 \text{ N}$$

$$R5_y = 4.58 + 34.3 + 22.7 + 1.2$$

$$R5_y = 62.78 \text{ N}$$

$$R5_z = -1.33 + 23.3 + 8.29 + 0.163$$

$$R5_z = 30.42 \text{ N}$$

$$R5 = \sqrt{(-1.906)^2 + (62.78)^2 + (30.42)^2}$$

$$R5 = 69.79 \text{ N}$$

Mientras que los valores de $R3$ son los mostrados en la Figura 55 C y son los siguientes:

$$R3_x = 2.89 \text{ N}$$

$$R3_y = 26.2 \text{ N}$$

$$R3_z = 10.8 \text{ N}$$

$$R3 = 28.5 \text{ N}$$

A continuación se usará el software SAP2000 para el análisis de esfuerzos en las guías y el tornillo de bolas, en el software se ingresa las propiedades del material, la sección transversal, longitud de el tornillo de bolas, los apoyos y las fuerzas externas, que en este caso son las componentes de $R3$ en dirección contraria, y se obtiene el diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 56.

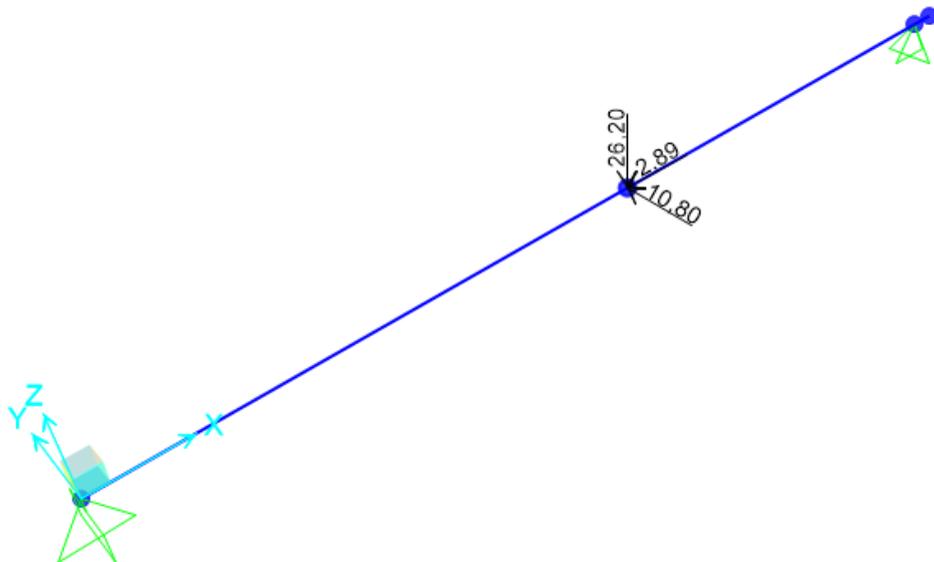


Figura 56.- Diagrama de cuerpo libre del tornillo de bolas del eje Y.

Se realiza un análisis inicial para obtener las reacciones en los apoyos, estas reacciones se muestran en la Figura 57.

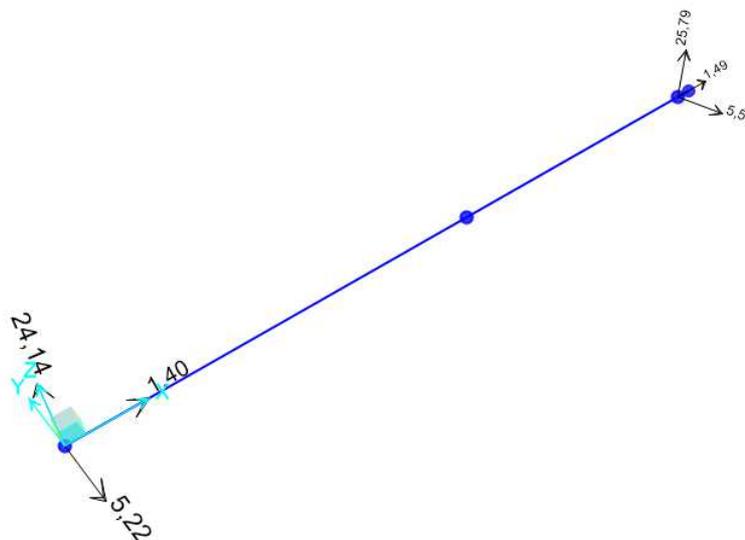


Figura 57.- Reacciones en los apoyos del tornillo de bolas del eje Y en el sistema de coordenadas de SAP2000.

Se realiza un análisis completo para obtener datos relevantes como diagramas de fuerza cortante, Diagrama de momento flector, diagrama de deflexión y diagrama de esfuerzo de Von-Mises, este último es el que usaremos para determinar si el tornillo resiste los esfuerzos. Los resultados se muestran en la Figura 58.

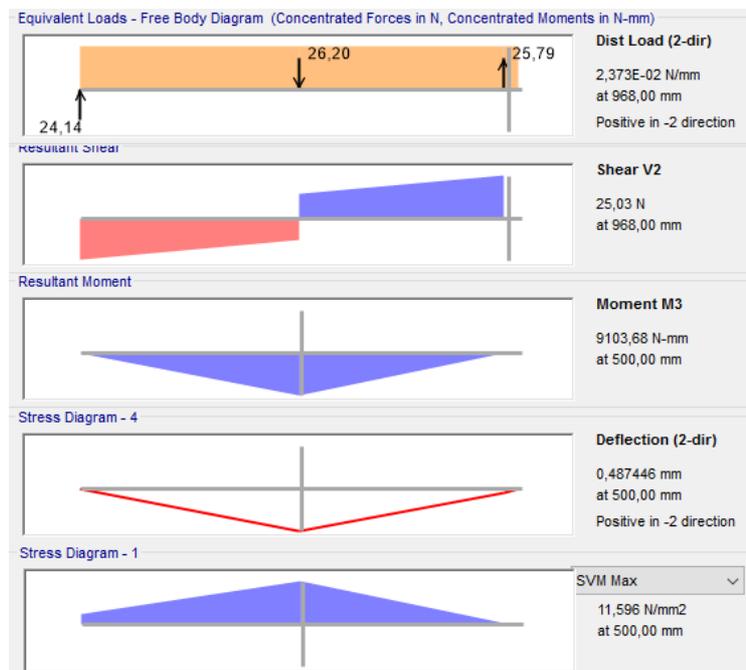


Figura 58.- Resultados del análisis del tornillo de bolas del eje Y usando el software SAP2000.

Para determinar si el tornillo va a fallar se usará el criterio de fallo de Von-Mises aplicando la ecuación 3.1, aparte de esto se comparará la carga estática que el tornillo de bolas fin soporta, según la Figura 30, y la carga estática a la que este está sometido para ver si este es apropiado para la aplicación. Entonces se tiene:

Datos:

- $\sigma_{Fluencia\ del\ acero\ aleado} = 620.422\ MPa$
- $\sigma_{Von-Mises\ máximo} = 11.596\ MPa$
- $F.S.\ (mínimo) = 2$
- $Coa\ (carga\ estática\ máxima) = 23347\ N$
- $Coas\ (Carga\ estática\ soportada) = R1 = 28.5\ N$

$$\frac{620.422}{11.596} \geq F.S.$$

$$53 \geq F.S.$$

$$53 \geq 2$$

$$Coa \geq Coas$$

$$23347\ N \geq 28.5\ N$$

De lo anterior se puede concluir que el tornillo de bolas seleccionado para el eje X no fallará y soportará la carga a la que es sometido.

De la misma forma que se analizó el tornillo de bolas, se procederá a analizar la guía izquierda del eje Y, obteniendo el diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 59, las reacciones en los apoyos mostradas en la Figura 60, y el resultado del estudio mostrado en la Figura 61.

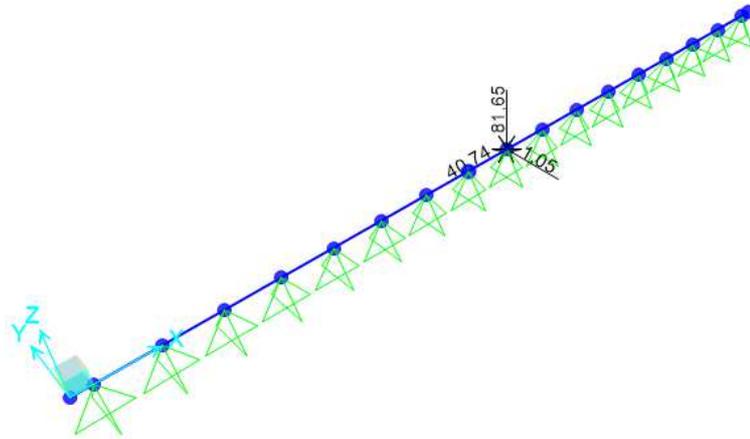


Figura 59.- Diagrama de cuerpo libre de la guía izquierda del eje Y.

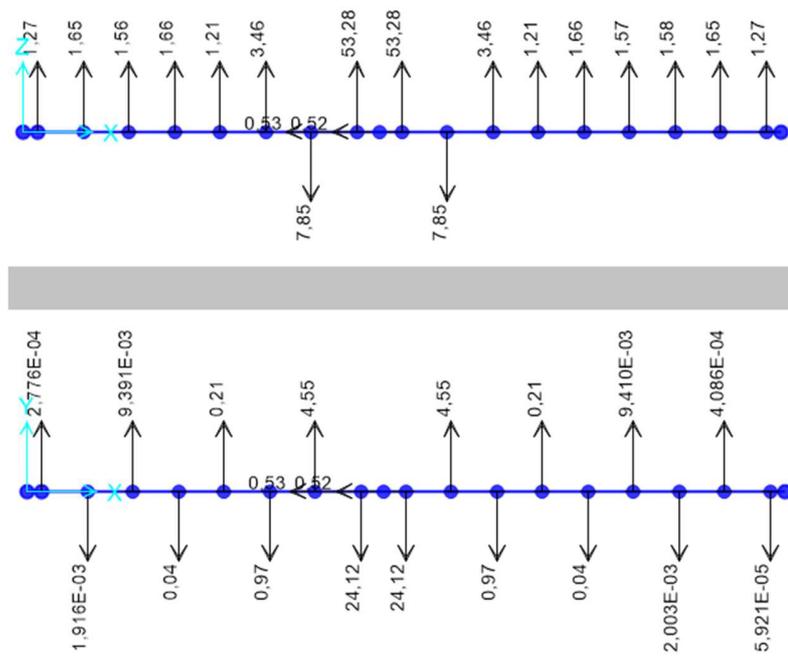


Figura 60.- Reacciones en los apoyos de la guía izquierda del eje Y en el sistema de coordenadas de SAP2000.

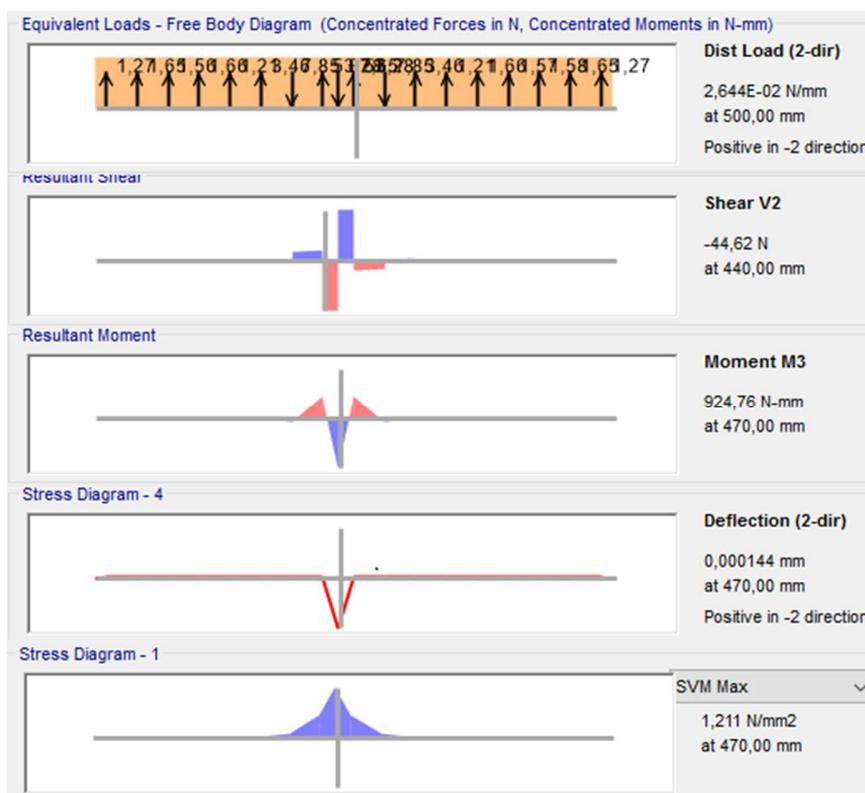


Figura 61.- Resultados del análisis de la guía izquierda del eje Y usando el software SAP2000.

Como se puede observar en la Figura 60, algunas de las reacciones en el plano YX, en el sistema de coordenadas del software SAP2000, son muy bajas, por lo que se despreciará esas reacciones en futuros cálculos, basándose en el criterio de fallo de Von-Mises, se determinará si la guía va a fallar, aplicando las ecuación 3.1, aparte de esto se comparará la carga estática que la guía soporta, según la Figura 31, y la carga estática a la que esta está sometida para ver si la guía es apropiada para la aplicación. Entonces se tiene:

Datos:

- $\sigma_{Fluencia\ del\ acero\ aleado} = 620.422\ MPa$
- $\sigma_{Von-Mises\ máximo} = 1.21\ MPa$
- $F.S.\ (mínimo) = 2$
- $Coa\ (carga\ estática\ máxima) = 27760\ N$
- $Coas\ (Carga\ estática\ soportada) = R1 = 91.25\ N$

$$\frac{620.422}{1.21} \geq F.S.$$

$$512 \geq F.S.$$

$$512 \geq 2$$

$$Coa \geq Coas$$

$$27760 N \geq 91.25 N$$

De lo anterior se puede concluir que la guía izquierda seleccionada para el eje Y no fallará y soportará la carga a la que es sometida.

Ahora se procederá a analizar la guía derecha del eje Y, obteniendo el diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 62, las reacciones en los apoyos mostradas en la Figura 63, y el resultado del estudio mostrado en la Figura 64.

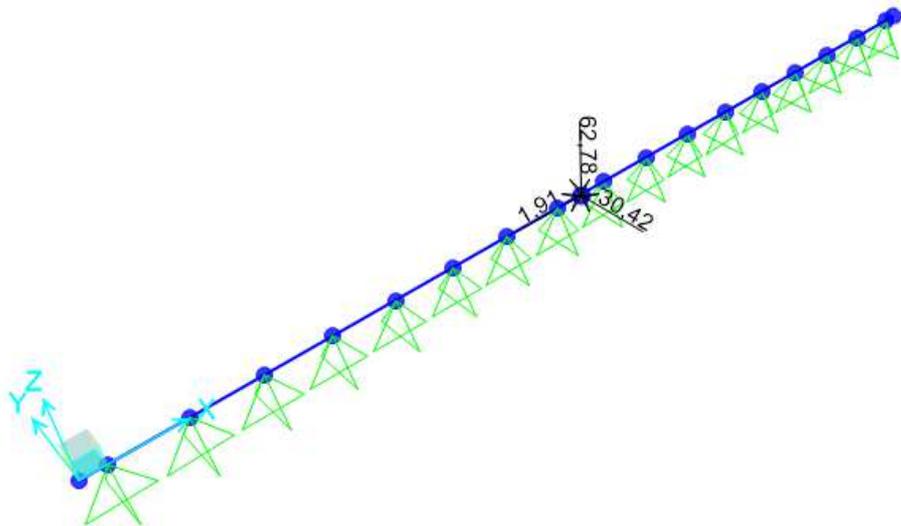


Figura 62.- Diagrama de cuerpo libre de la guía derecha del eje Y.

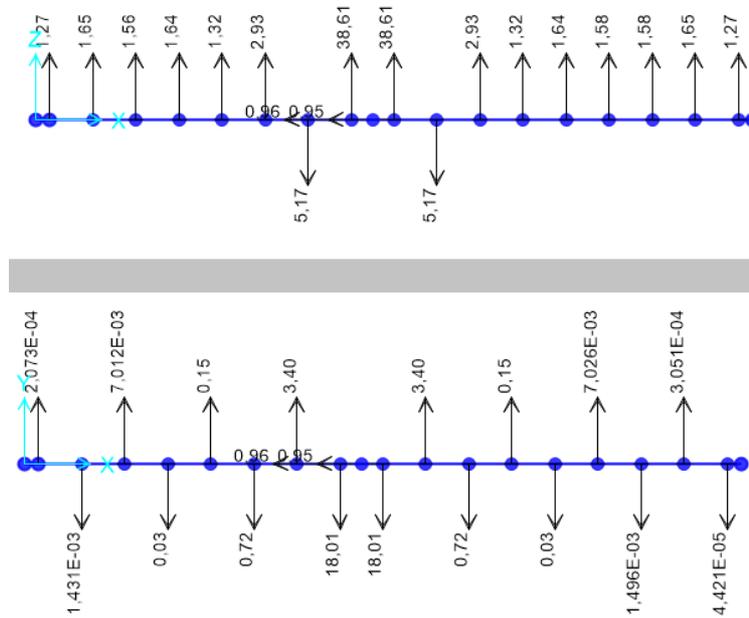


Figura 63.- Reacciones en los apoyos de la guía derecha del eje Y en el sistema de coordenadas de SAP2000.

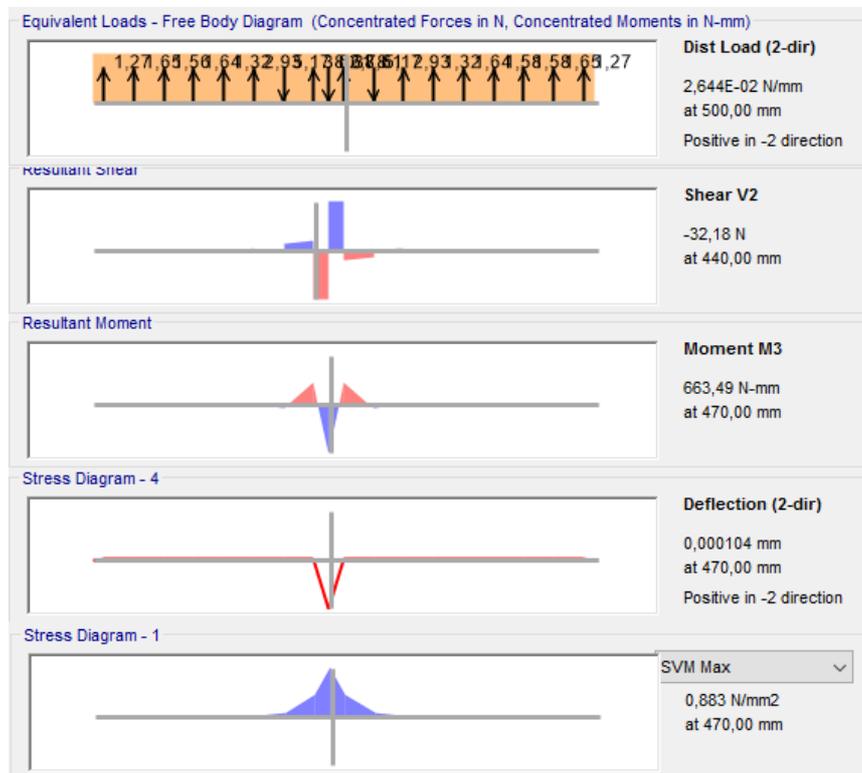


Figura 64.- Resultados del análisis de la guía derecha del eje Y usando el software SAP2000.

Como se puede observar en la Figura 63, algunas de las reacciones en el plano YX, en el sistema de coordenadas del software SAP2000, son muy bajas, por lo que se despreciará esas reacciones en futuros cálculos, basándose en el criterio de fallo de Von-Mises, se determinará si la guía va a fallar, aplicando la ecuación 3.1, aparte de esto se comparará la carga estática que la guía soporta, según la Figura 31, y la carga estática a la que esta está sometida para ver si la guía es apropiada para la aplicación. Entonces se tiene:

Datos:

- $\sigma_{Fluencia\ del\ acero\ aleado} = 620.422\ MPa$
- $\sigma_{Von-Mises\ máximo} = 0.883\ MPa$
- $F.S.\ (mínimo) = 2$
- $Coa\ (carga\ estática\ máxima) = 27760\ N$
- $Coas\ (Carga\ estática\ soportada) = R1 = 69.79\ N$

$$\frac{620.422}{0.883} \geq F.S.$$

$$744 \geq F.S.$$

$$744 \geq 2$$

$$Coa \geq Coas$$

$$27760\ N \geq 69.79\ N$$

De lo anterior se puede concluir que la guía derecha seleccionada para el eje Y no fallará y soportará la carga a la que es sometida.

Finalmente se realizará un estudio de las placas que soportan las chumaceras para determinar si estas fallarán. En la Figura 65 se presenta el diagrama de cuerpo libre, en la Figura 66 los resultados del estudio de esfuerzos de Von-Mises y en la Figura 67 el resultado del estudio de factor de seguridad.

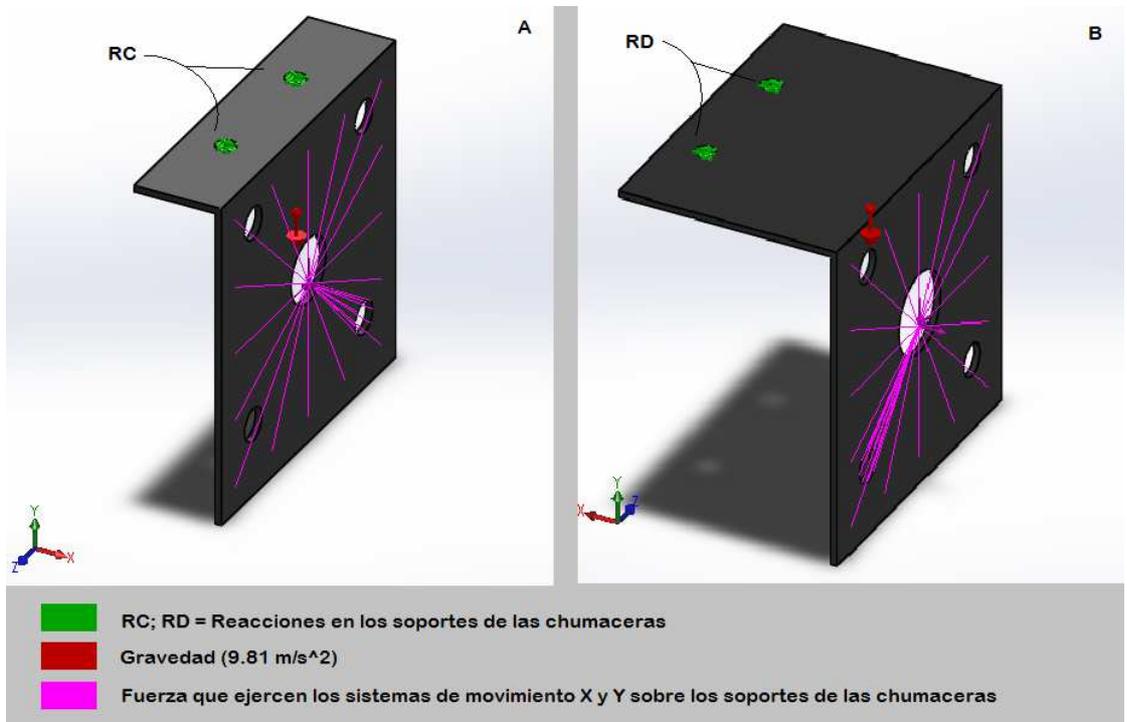


Figura 65.- Diagrama de cuerpo libre de los soportes de las chumaceras A) de la parte frontal, B) de la parte posterior, del eje Y.

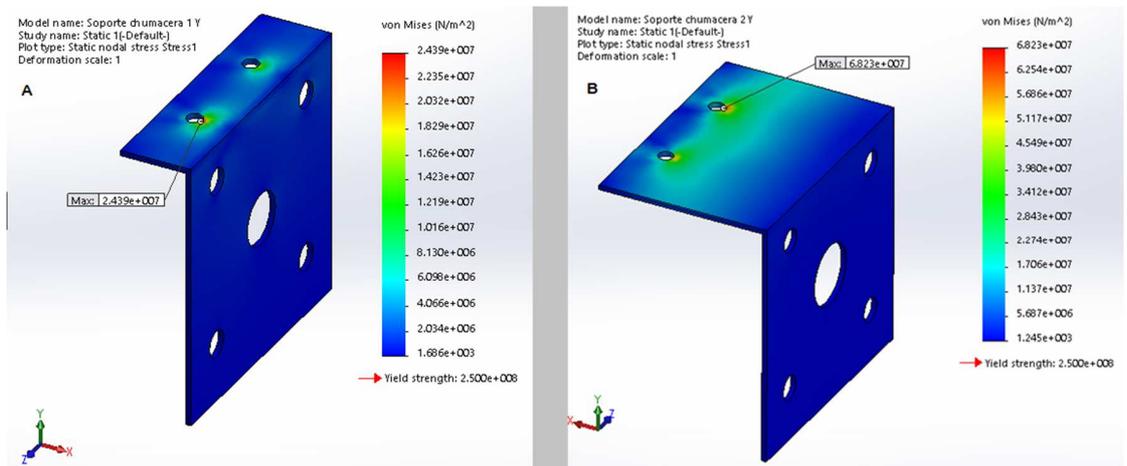


Figura 66.- Estudio de esfuerzos de los soportes de las chumaceras A) de la parte frontal, B) de la parte posterior, del eje Y.

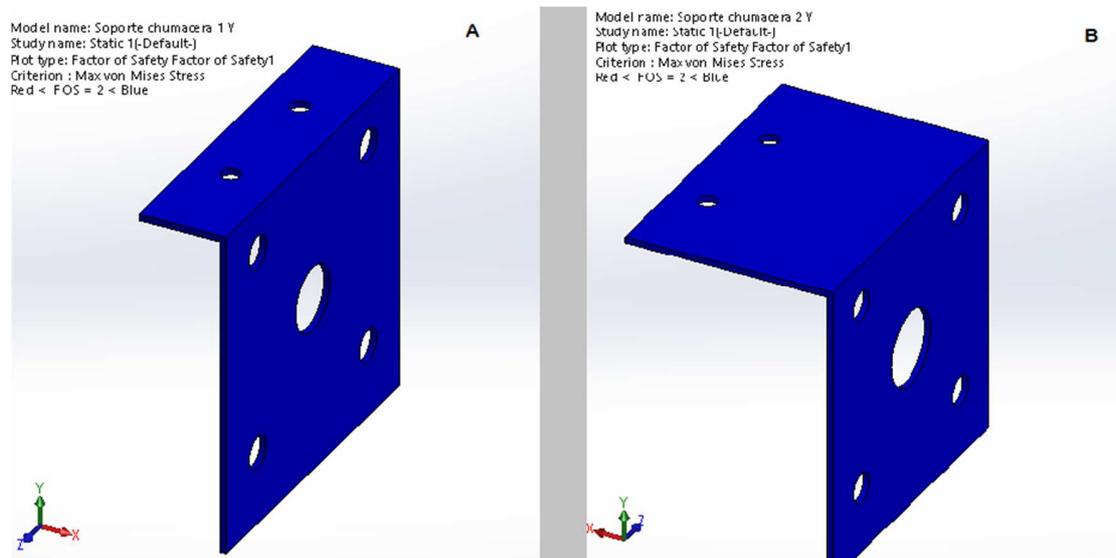


Figura 67.- Análisis del factor de seguridad de los soportes de las chumaceras A) de la parte frontal, B) de la parte posterior, del eje Y.

Como se puede apreciar en la Figura 67, el factor de seguridad no es menor a dos en ningún soporte para chumacera, por lo que se concluye que no fallarán, a continuación en la Figura 68 se presenta las reacciones generadas en los apoyos.

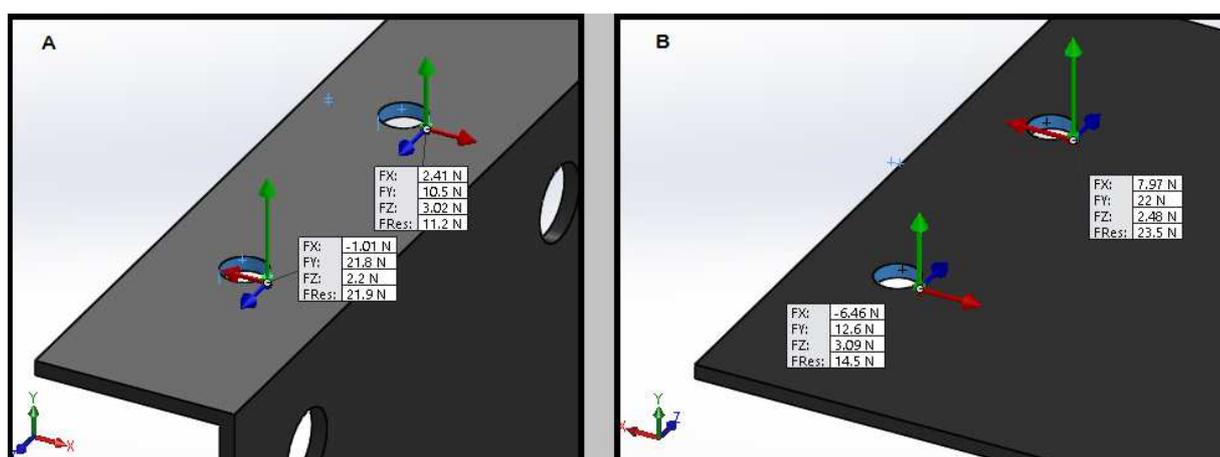


Figura 68.- Reacciones en los apoyos de los soportes de las chumaceras A) de la parte frontal, B) de la parte posterior, del eje Y.

3.4.2.3. Diseño de estructura

Como se mencionó anteriormente, la estructura fue diseñada con tubos cuadrados de 1 in (25.4 mm), debido a que las guías son de 20 mm de alto, y 1.5 mm de espesor. En esta sección se realizará un estudio de esfuerzos con todas las cargas que soporta la estructura para determinar si la misma falla. Entonces, en la Figura 69 se muestra el diagrama de cuerpo libre de la estructura sometida a todas las cargas de los paneles, la mesa, los sistemas de movimiento, el cajón y las tapas de la mesa.

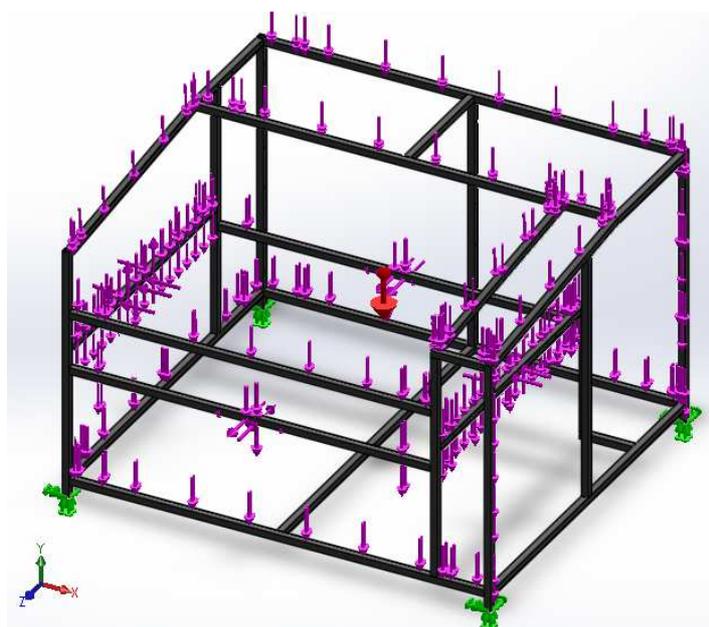


Figura 69.- Diagrama de cuerpo libre de la estructura.

A continuación en la Figura 70, se muestra el resultado del análisis de Von-Mises y en la Figura 71 el resultado del análisis del factor de seguridad.

Como se puede apreciar en la Figura 71 la estructura resiste los esfuerzos a la que es sometida, la estructura no falla ya que su factor de seguridad en todos los puntos es mayor a 2. Por lo tanto los tubos usados serán tubos cuadrados de 1 in y 1.5 mm de espesor.

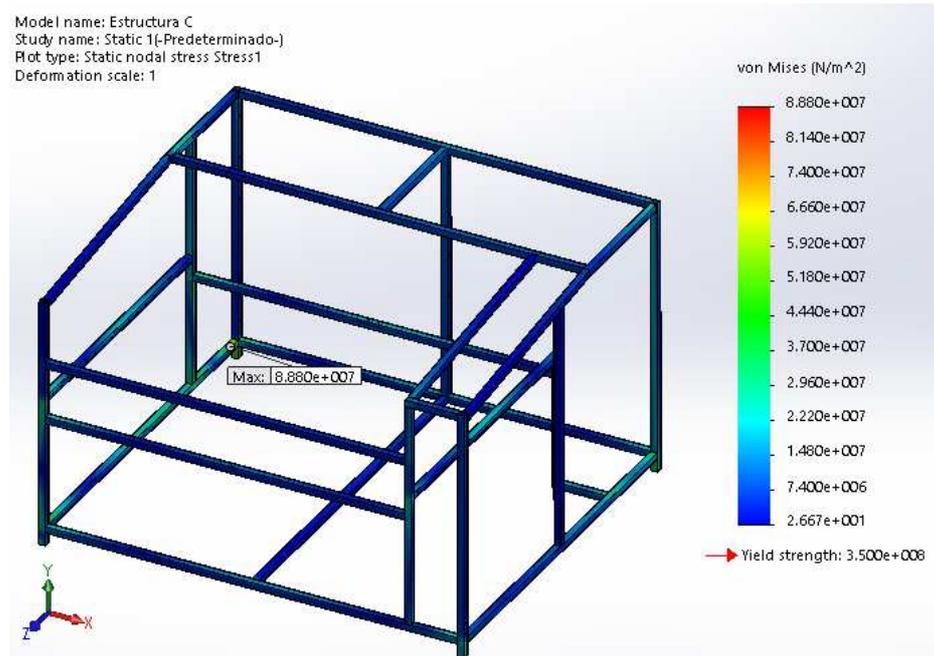


Figura 70.- Resultado del estudio de Von-Mises de la estructura.

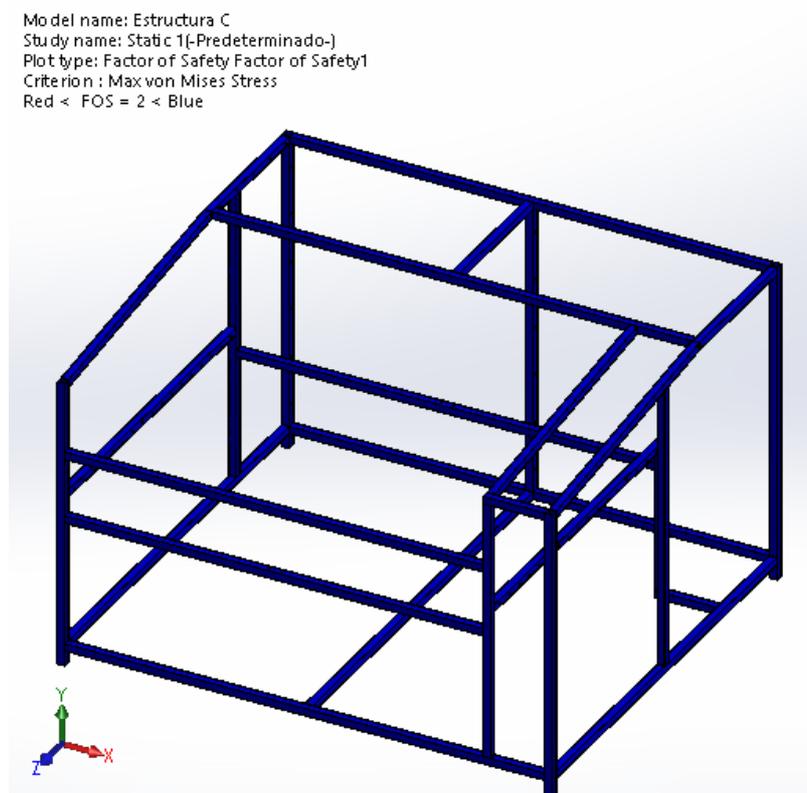


Figura 71.- Resultado del análisis del factor de seguridad de la estructura.

3.4.2.4. Diseño de paneles

En la Figura 34, se mostró el diseño de la estructura, para darle forma a la máquina, se procederá a ubicar paneles doblados en la mayoría de espacios. Estos paneles serán hechos de tol, la cual deberá tener un espesor suficiente para que no se deforme por el peso del propio, inicialmente se considera un espesor de 1 mm para el diseño. Entonces se debe realizar un análisis de deformación para determinar si el espesor seleccionado es el adecuado, este estudio se lo realizará a los paneles más grandes ya que son los que tienden a deformarse más porque son más pesados.

A continuación, se realiza el análisis del panel que separa el área de corte con la cavidad donde se encuentra el tubo láser. En la Figura 72 se muestra el resultado del análisis de deformación.

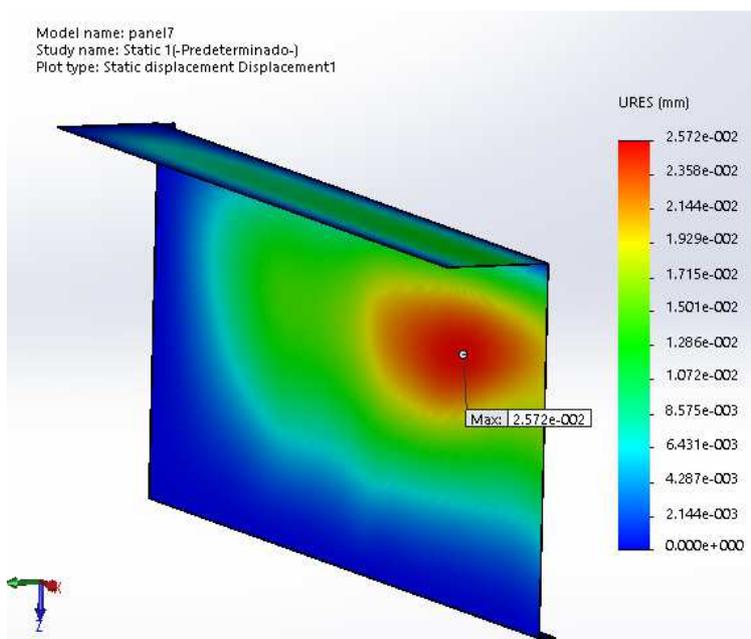


Figura 72.- Análisis de deformación del panel interior que separa el área de corte del tubo láser.

Como se puede observar, la deformación no supera los 25 μm , y es imperceptible, así que se concluye que esta tapa no se deforma de manera significativa.

Ahora, se realiza el análisis de los paneles de la parte posterior de la máquina, los que cubren el tubo láser. En la Figura 73 se muestran los resultados del análisis de deformación.

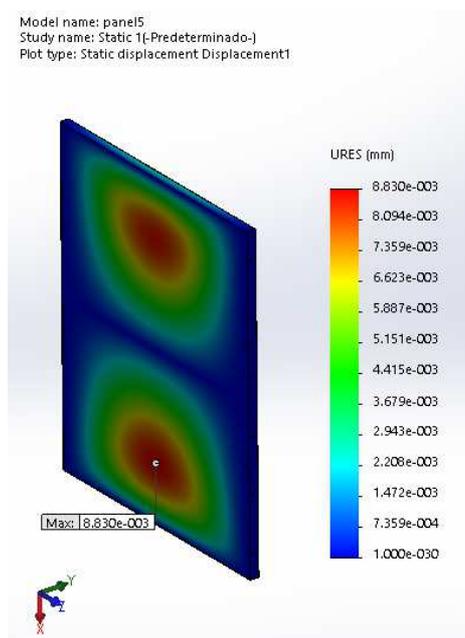


Figura 73.- Análisis de deformación del panel e la parte posterior de la máquina.

Como se puede apreciar en la Figura 73, la deformación no supera los 8.8 μm , y es imperceptible, así que se concluye que esta tapa no se deforma de manera significativa.

A continuación, se realiza el análisis de la puerta derecha del armario eléctrico de la máquina. En la Figura 74 se muestran los resultados del análisis de deformación.

Como se puede observar, la deformación no supera los 8.7 μm , y es imperceptible, así que se concluye que esta tapa no se deforma de manera significativa. No se realizan más análisis de los paneles porque como se puede observar, a medida que el panel se reduce en tamaño, la deformación disminuye.

Finalmente, se realiza el análisis del cajón de la máquina, debido a que el cajón es de casi el doble de tamaño que cualquier otro panel de la máquina, se opta por usar una plancha de tol de mayor espesor para el diseño. Se selecciona un espesor de tol de 1.5 mm para el estudio de deformación. En la Figura 75 se muestra los resultados del análisis de deformación.

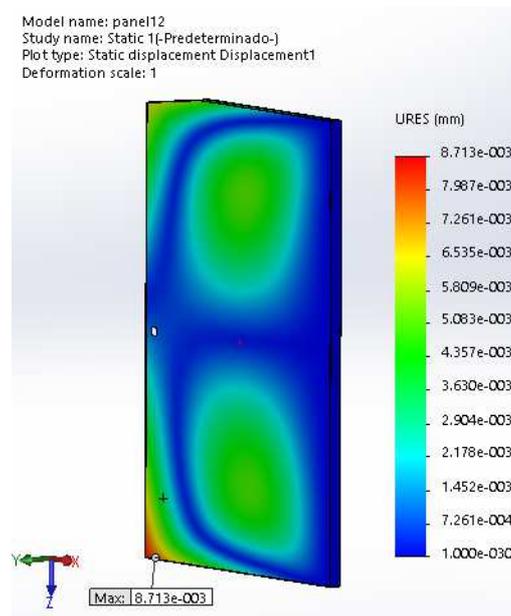


Figura 74.- Análisis de deformación de la puerta derecha del armario eléctrico de la máquina.

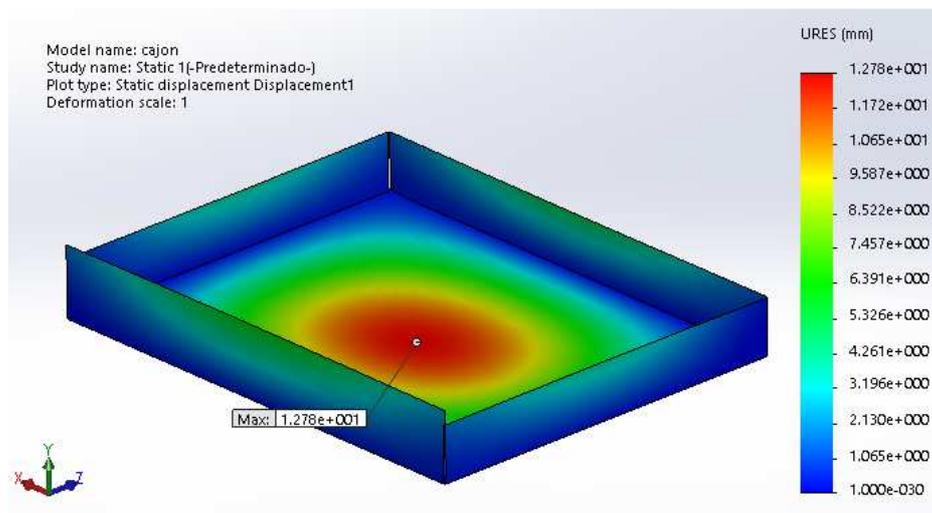


Figura 75.- Análisis de deformación del cajón de la máquina.

Como se puede apreciar la deformación máxima es de 12.78 mm, lo que es una deformación considerable, se podría aumentar el espesor del tol para disminuir esta deformación pero, como la zona de mayor deformación del cajón está ubicada en una parte no visible de la máquina, se opta por mantener el espesor de la plancha de tol siempre y

cuando la pieza no falle, por lo que a continuación se realiza un análisis del factor de seguridad usando el criterio de falla de Von-Mises. Los resultados del análisis se muestran en la Figura 76.

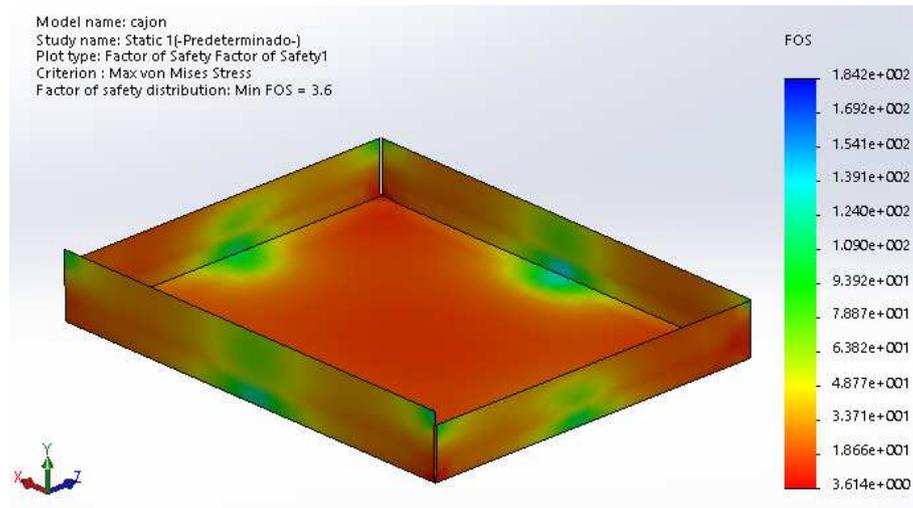


Figura 76.- Análisis del factor de seguridad del cajón de la máquina.

Como se observa en la Figura 76, el factor de seguridad mínimo es de 3.6 por lo que se concluye que la deformación máxima de 12.78 mm en el cajón es aceptable ya que este no se romperá ni se deformará plásticamente.

De los análisis anteriores se concluye que la plancha de tol usada para la construcción de todos los paneles y puertas debe ser de 1 mm de espesor, incluso se puede optar por usar planchas de 0.8 mm en los paneles más pequeños ya que la deformación no es significativa. Mientras que la plancha de tol usada para la construcción del cajón debe ser una plancha de tol de 1.5 mm de espesor.

3.4.2.5. Diseño de la mesa de trabajo

Para el diseño de la mesa, se tomarán en cuenta algunas consideraciones expuestas a continuación:

- Primero, la mesa debe ser diseñada de tal forma que el rayo láser esté en contacto el menor tiempo posible con el metal, para de esta manera no calentar el mismo y causar daño a la pieza de trabajo

- Toda la superficie de la mesa debe estar al mismo nivel.
- La mesa debe ser fácil de nivelar.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, se decide que para que la mesa sea fácil de nivelar, esta debe estar apoyada en 4 resortes, uno en cada esquina, para que de esta manera se pueda regular la altura de la mesa. Además, la mesa debe ser construida con perfiles, para que de esta manera el contacto del el láser con la misma sea mínimo. Se opta por usar perfiles en C, debido a que se usaría menos material para la construcción.

En la Figura 77, se muestra el diseño de la mesa de trabajo.



Figura 77.- Mesa de trabajo.

Se realizará un estudio estático a la mesa de trabajo para determinar las reacciones en los apoyos y de esta manera saber la carga que soportan los resortes para su futuro diseño.

La mesa soportará una plancha de acrílico o madera de hasta 6 mm de espesor, lo que se necesita es determinar el peso de las planchas para determinar la carga que soporta la mesa. A continuación se muestran las ecuaciones usadas para dicho cálculo.

- Volumen

$$V = l * a * e \quad (3.6)$$

En donde:

- $V [mm^3]$: Volumen.

- l [mm]: Largo.
- a [mm]: Ancho.
- e [mm]: Espesor.
- Masa

$$m = \rho * V \quad (3.7)$$

En donde:

- m [kg]: Masa.
- ρ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$: Densidad.
- V [m³]: Volumen.
- Peso

$$W = m * g \quad (3.8)$$

En donde:

- W [N]: Peso.
- m [kg]: Masa.
- g $\left[\frac{m}{s^2}\right]$: Gravedad 9.81.

Aplicando la ecuación 3.6 para calcular el volumen de una plancha con las siguientes características:

Datos:

- $l = 1000$ [mm]; se toma este valor de la Tabla 2
- $a = 850$ [mm]; se toma este valor de la Tabla 2
- $e = 6$ [mm]; se toma este valor de la Tabla 2

$$V = 1000 * 850 * 6$$

$$V = 5.1 * 10^6 \text{ [mm}^3\text{]} = 5.1 * 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

A continuación se calculará el peso de una plancha sobre la mesa, se tiene que:

- Densidad de la madera MDF: $780 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$.
- Densidad del acrílico: $1180 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$.

Por lo tanto para calcular el peso de la plancha se usará la densidad del acrílico debido a que es mayor y resultará en un peso mayor.

Para el acrílico se tiene aplicando la ecuación 3.7 y 3.8:

Datos:

- $\rho = 1180 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$
- $V = 5.1 * 10^{-3} [m^3]$

$$m = 1180 * 5.1 * 10^{-3}$$

$$m = 6.018 [kg]$$

Datos:

- $m = 6.018 [kg]$
- $g = 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$

$$W = 6.018 * 9.81$$

$$W = 59.04 [N]$$

Ahora con el resultado obtenido anteriormente se realiza el estudio estático de la mesa. El diagrama de cuerpo libre de la mesa se muestra en la Figura 78. En la Figura 79 se muestra el resultado del análisis de Von-Mises. En la Figura 80 se muestra el resultado del análisis del factor de seguridad.

Como se puede observar, la mesa no falla ya que su factor de seguridad en todos los puntos es mayor a 2.

Se procede a determinar las reacciones en los apoyos, los resultados se muestran en la Figura 81.

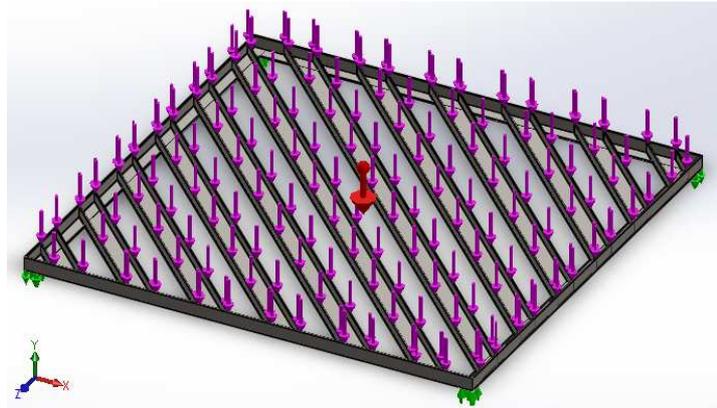


Figura 78.- Diagrama de cuerpo libre de la mesa de trabajo.

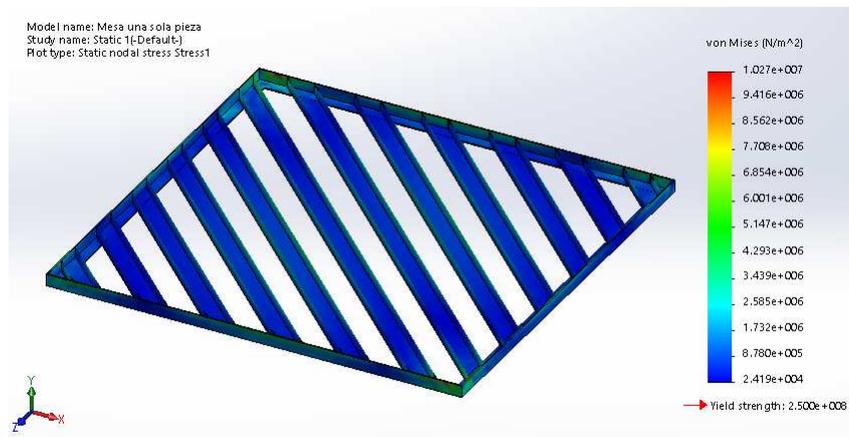


Figura 79.- Resultado del estudio de Von-Mises de la mesa de trabajo.

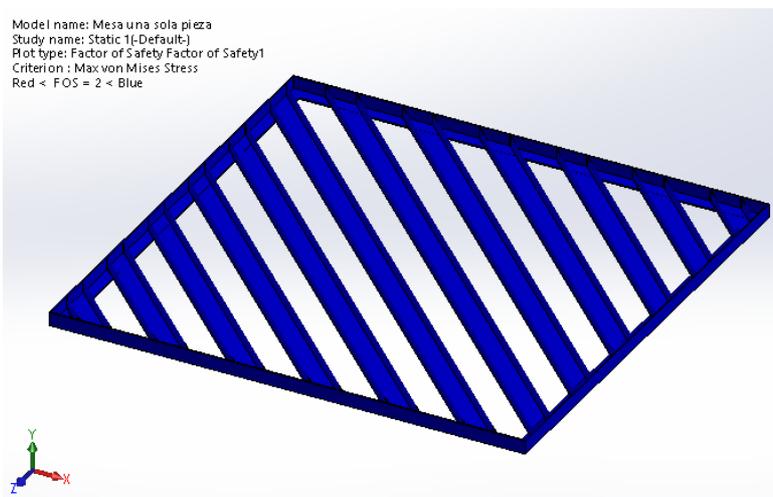


Figura 80.- Resultado del análisis de factor de seguridad de la mesa de trabajo.

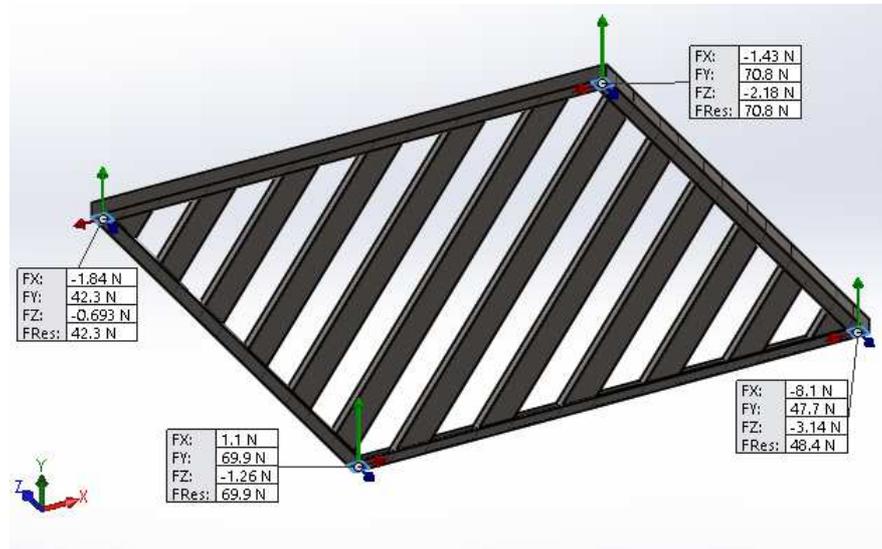


Figura 81.- Reacciones en los apoyos de la mesa de trabajo.

Ahora con los datos obtenidos anteriormente se procede a calcular los resortes, se usa la reacción de mayor valor para el cálculo, la cual es de 70.8 N. Se multiplica este valor por el factor de seguridad y se obtiene 141.6 N

3.4.2.6. Diseño de resortes

Para el diseño de los resortes, se tomar en cuenta la aplicación para la que estos son requeridos. Los resortes sirven para soportar la mesa y poder nivelarla de manera fácil apretando un perno que pasará en medio del resorte, por lo tanto el resorte será diseñado para servicio estático. Para el diseño del resorte se usarán las fórmulas y datos (constantes según el tipo de material) obtenidos del libro “Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley (8va edición)”, las cuales se muestran a continuación:

- Esfuerzo de fluencia a la tensión

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} \quad (3.9)$$

En donde:

- S_{ut} [MPa]: Esfuerzo de fluencia a la tensión.
- A [MPa. mm^m]: Constante para el cálculo, obtenida de la Figura 82.
- m [m]: Constante exponencial para el cálculo, obtenida de la Figura 82.
- d [mm]: Diámetro del alambre.

- Esfuerzo de fluencia a la torsión

$$S_{sy} = \%M \cdot S_{ut} \quad (3.10)$$

En donde:

- S_{sy} [MPa]: Esfuerzo de fluencia a la torsión.
- S_{ut} [MPa]: Esfuerzo de fluencia a la tensión.
- $\%M$: Porcentaje máximo de la resistencia a la tensión, obtenido de la Figura 84
- Índice del resorte obtenido en base a esfuerzos (relación entre el diámetro del alambre y el diámetro medio de la espira)

$$C = \frac{2\alpha - \beta}{4\beta} + \sqrt{\left(\frac{2\alpha - \beta}{4\beta}\right)^2 - \frac{3\alpha}{4\beta}} \quad (3.11)$$

En donde:

- C : Índice del resorte. Por recomendación del libro de Shigley $4 \leq C \leq 12$.
- α : Variable de diseño 1. Usada para simplificar el cálculo
- β : Variable de diseño 2. Usada para simplificar el cálculo
- Variable de diseño 1

$$\alpha = \frac{S_{sy}}{n_s} \quad (3.12)$$

En donde:

- α : Variable de diseño 1.
- S_{sy} [MPa]: Esfuerzo de fluencia a la torsión.
- n_s : Factor de seguridad. Por recomendación del libro de Shigley $n_s \geq 1.2$.
- Variable de diseño 2

$$\beta = \frac{8(1 + \xi)F_{max}}{\pi d^2} \quad (3.13)$$

En donde:

- β : Variable de diseño 2.
- F_{max} [N]: Carga máxima aplicada.
- d [mm]: Diámetro del alambre.
- ξ : Factor que limita el punto de operación del resorte al 75% inicial de la curva de deformación del resorte para que este siempre actúe de forma lineal.
- Índice del resorte

$$C = \frac{D}{d} \quad (3.14)$$

En donde:

- C : Índice del resorte. Por recomendación del libro de Shigley $4 \leq C \leq 12$.
- d [mm]: Diámetro del alambre.
- D [mm]: Diámetro medio de la espira.
- Diámetro externo del resorte

$$DE = D + d \quad (3.15)$$

En donde:

- DE [mm]: Diámetro externo.
- d [mm]: Diámetro del alambre.
- D [mm]: Diámetro medio de la espira.

- Diámetro interno del resorte

$$ID = D - d \quad (3.16)$$

En donde:

- ID [mm]: Diámetro interno.
- d [mm]: Diámetro del alambre.
- D [mm]: Diámetro medio de la espira.

- Número de espiras activas

$$N_a = \frac{Gd^4 y_{max}}{8D^3 F_{max}} \quad (3.17)$$

En donde:

- N_a : Número de espiras activas. Por recomendación del libro de Shigley $3 \leq N_a \leq 15$.
- G [N]: Módulo de elasticidad en torsión.
- y_{max} [mm]: Deformación máxima una vez aplicada la carga máxima.
- F_{max} [N]: Carga máxima aplicada.
- d [mm]: Diámetro del alambre.
- D [mm]: Diámetro medio de la espira.
- Números de espiras totales para resortes con extremos a escuadra y esmerilados

$$N_t = N_a + 2 \quad (3.18)$$

En donde:

- N_t : Números de espiras totales.
- N_a : Número de espiras activas.

- Longitud sólida para resortes con extremos a escuadra y esmerilados

$$l_s = dN_t \quad (3.19)$$

En donde:

- l_s [mm]: Longitud sólida.
- d [mm]: Diámetro del alambre.
- N_t : Números de espiras totales.

- Paso para resortes con extremos a escuadra y esmerilados

$$p = \frac{l_o - 2d}{N_a} \quad (3.20)$$

En donde:

- l_o [mm]: Longitud libre.
- d [mm]: Diámetro del alambre.
- N_a : Número de espiras activas.

- Longitud libre, criterio de pandeo

$$(l_o)_{cr} = \frac{2.63D}{\alpha_c} \quad (3.21)$$

En donde:

- $(l_o)_{cr}$ [mm]: Longitud libre, criterio de pandeo.
- D [mm]: Diámetro medio de la espira.
- α_c : Constante del tipo de apoyo del resorte, en este caso $\alpha_c = 0.5$.

Para el diseño de los resortes, se parten de los siguientes datos, algunos seleccionados de las tablas del libro de Shigley en la sección de diseño de resortes y otros planteados según los requerimientos. En la Figura 82 y la Figura 83, se muestran las características de los materiales comunes para fabricar resortes, mientras que en la Figura 84 se muestra el porcentaje máximo de la resistencia a la tensión.

Material	ASTM núm.	Exponente m	Diámetro, pulg	A_1 , kpsi · pulg ^{m}	Diámetro, mm	A_1 , MPa · mm ^{m}	Costo relativo del alambre
Alambre de piano*	A228	0.145	0.004-0.256	201	0.10-6.5	2 211	2.6
Alambre T y R en aceite [†]	A229	0.187	0.020-0.500	147	0.5-12.7	1 855	1.3
Alambre estirado duro [‡]	A227	0.190	0.028-0.500	140	0.7-12.7	1 783	1.0
Alambre al cromo vanadio [§]	A232	0.168	0.032-0.437	169	0.8-11.1	2 005	3.1
Alambre al cromo silicio [¶]	A401	0.108	0.063-0.375	202	1.6-9.5	1 974	4.0
Alambre inoxidable 302*	A313	0.146	0.013-0.10	169	0.3-2.5	1 867	7.6-11
		0.263	0.10-0.20	128	2.5-5	2 065	
		0.478	0.20-0.40	90	5-10	2 911	
Alambre de bronce fosforado**	B159	0	0.004-0.022	145	0.10-6	1 000	8.0
		0.028	0.022-0.075	121	0.6-2	913	
		0.064	0.075-0.30	110	2-7.5	932	

*La superficie es lisa, sin defectos y tiene un acabado brillante y lustroso.

[†]Tiene escamas ligeras debido al tratamiento térmico, que se deben remover antes del galvanizado.

[‡]La superficie es lisa y brillante sin marcas visibles.

[§]Alambre revenido de calidad aeronáutica; también se obtiene recocido.

[¶]Revenido a Rockwell C49, pero se puede obtener sin revenit.

[¶]Aceros inoxidables tipo 302.

**Temple CA510.

Figura 82.- Constantes A y m para estimar la resistencia de tensión mínima de alambres para fabricar resortes comunes.
Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Material	Límite elástico, porcentaje de S_{ut} tensión, torsión		Diámetro d , pulg	E		G	
				Mpsi	GPa	Mpsi	GPa
Alambre de piano A228	65-75	45-60	<0.032	29.5	203.4	12.0	82.7
			0.033-0.063	29.0	200	11.85	81.7
			0.064-0.125	28.5	196.5	11.75	81.0
			>0.125	28.0	193	11.6	80.0
Resorte estirado duro A227	60-70	45-55	<0.032	28.8	198.6	11.7	80.7
			0.033-0.063	28.7	197.9	11.6	80.0
			0.064-0.125	28.6	197.2	11.5	79.3
			>0.125	28.5	196.5	11.4	78.6
Templado en aceite A239	85-90	45-50		28.5	196.5	11.2	77.2
Resorte de válvula A230	85-90	50-60		29.5	203.4	11.2	77.2
Cromo vanadio A231	88-93	65-75		29.5	203.4	11.2	77.2
A232	88-93			29.5	203.4	11.2	77.2
Cromo silicio A401	85-93	65-75		29.5	203.4	11.2	77.2
Aceros inoxidables							
A313*	65-75	45-55		28	193	10	69.0
17-7PH	75-80	55-60		29.5	208.4	11	75.8
414	65-70	42-55		29	200	11.2	77.2
420	65-75	45-55		29	200	11.2	77.2
431	72-76	50-55		30	206	11.5	79.3
Bronce fosforado B159	75-80	45-50		15	103.4	6	41.4
Cobre al berilio B197	70	50		17	117.2	6.5	44.8
	75	50-55		19	131	7.3	50.3
Aleación Inconel X-750	65-70	40-45		31	213.7	11.2	77.2

*También incluye 302, 304 y 316.

Figura 83.- Propiedades mecánicas de algunos alambres para resorte.
Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

Material	Porcentaje máximo de la resistencia a la tensión	
	Antes de la remoción de la deformación (incluye K_W o K_B)	Después de la remoción de la deformación (incluye K_s)
Alambre de piano y acero al carbono estirado en frío	45	60-70
Acero al carbono templado y revenido y acero de baja aleación	50	65-75
Aceros inoxidables austeníticos	35	55-65
Aleaciones no ferrosas	35	55-65

Figura 84.- Esfuerzos de torsión máximos permisibles de resortes helicoidales de compresión en aplicaciones estáticas.

Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008)

A continuación se presentan los datos que se tiene:

Datos:

- $F_{max} = 141.6 [N]$; carga máxima que soporta el resorte.
- $y_{max} = 10 [mm]$; deformación máxima que debe tener el resorte cuando está sometido a la carga máxima.
- $l_0 = 57 [mm]$; longitud libre que debe tener el resorte.
- Material del resorte acero ASTM A227 (alambre estirado duro), basándose en el costo relativo (el más barato) presentado en la Figura 82.
- $m = 0.190 [m]$; presentado en la Figura 82.
- $A = 1783 [MPa \cdot mm^m]$; presentado en la Figura 82.
- $\xi = 0.15$; seleccionado por recomendación del libro de Shigley.
- $n_s = 2$; factor de seguridad seleccionado para el diseño.
- $\%M = 0.45$; obtenido de la Figura 82.

Primero se aplica la ecuación 3.21, despejando D , para obtener el diámetro medio de espira mínimo que debe tener el resorte para que no se pandee.

Datos:

- $(l_0)_{cr} = 57 [mm]$
- $\alpha_c = 0.5$

$$57 = \frac{2.63D}{0.5}$$

$$D = 10.84 \text{ [mm]}$$

Ahora se procede a hallar los esfuerzos de fluencia a la tensión y a la torsión aplicando las ecuaciones 3.9 y 3.10.

Datos:

- $A = 1783 \text{ [MPa.mm}^m\text{]}$
- $m = 0.190 \text{ [m]}$

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m}$$

$$S_{ut} = \frac{1783}{d^{0.19}}$$

Datos:

- $S_{ut} = \frac{1783}{d^{0.19}}$
- $\%M = 0.45$

$$S_{sy} = 0.45 \frac{1783}{d^{0.19}}$$

$$S_{sy} = \frac{802.35}{d^{0.19}}$$

Se aplican las ecuaciones 3.12 y 3.13 para hallar las variables de diseño 1 y 2.

Datos:

- $S_{sy} = \frac{802.35}{d^{0.19}}$
- $n_s = 2$

$$\alpha = \frac{\frac{802.35}{d^{0.19}}}{2}$$

$$\alpha = \frac{401.175}{d^{0.19}}$$

Datos:

- $\xi = 0.15$
- $F_{max} = 141.6 [N]$

$$\beta = \frac{8(1 + 0.15)141.6}{\pi d^2}$$

$$\beta = \frac{414.67}{d^2}$$

Se determina el índice del resorte aplicando la ecuación 3.14.

Datos:

- $D = 10.84 [mm]$

$$C = \frac{10.84}{d}$$

Se reemplazan los valores anteriores en la ecuación 3.11 y despejando d se obtiene:

Datos:

- $C = \frac{10.84}{d}$
- $\beta = \frac{414.67}{d^2}$
- $\alpha = \frac{401.175}{d^{0.19}}$

$$\frac{10.84}{d} = \frac{2 \frac{401.175}{d^{0.19}} - \frac{414.67}{d^2}}{4 \frac{414.67}{d^2}} + \sqrt{\left(\frac{2 \frac{401.175}{d^{0.19}} - \frac{414.67}{d^2}}{4 \frac{414.67}{d^2}} \right)^2 - \frac{3 \frac{401.175}{d^{0.19}}}{4 \frac{414.67}{d^2}}}$$

$$d = 2.645 [mm]$$

Basándose en la Tabla A-28, del libro de Shigley, donde se muestran los calibres comerciales de alambres para resortes, se selecciona un cable de acero ASTM A227 calibre 12, que tiene una sección de 2.68 mm.

Se procede a calcular el número de espiras activas con la ecuación 3.17.

Datos:

- $F_{max} = 141.6 [N]$
- $y_{max} = 10 [mm]$
- $G = 79.3 * 10^3 [MPa]$; obtenido de la Figura 83.
- $D = 10.84 [mm]$
- $d = 2.68 [mm]$

$$N_a = \frac{79.3 * 10^3 * 2.68^4 * 10}{8 * 10.48^3 * 141.6}$$

$$N_a = 31.37 [vueltas]$$

Como se puede observar, el valor de $N_a > 15$, lo cual no es recomendable según el libro de Shigley. Por lo que se limitará el número de espiras activas a 8, que es un valor medio, y se procederá a hallar el nuevo diámetro medio de espiras. Despejando D de la ecuación 3.17 se tiene:

Datos:

- $F_{max} = 141.6 [N]$
- $y_{max} = 10 [mm]$
- $G = 79.3 * 10^3 [MPa]$; obtenido de la Figura 83.
- $N_a = 8 [vueltas]$
- $d = 2.68 [mm]$

$$D = \sqrt[3]{\frac{79.3 * 10^3 * 2.68^4 * 10}{8 * 8 * 141.6}}$$

$$D = 16.53 [mm]$$

Ahora se comprueba que el índice del resorte esté dentro del intervalo recomendado aplicando la ecuación 3.14.

- $D = 16.53 [mm]$
- $d = 2.68 [mm]$

$$C = \frac{16.53}{2.68}$$

$$C = 6.17$$

Como se puede apreciar, el valor de C está entre los intervalos recomendados.

Continuando con los cálculos aplicando las ecuaciones 3.15 y 3.16 para determinar los diámetros externo e interno de los resortes.

Datos:

- $D = 16.53 [mm]$
- $d = 2.68 [mm]$

$$DE = 16.53 + 2.68$$

$$DE = 19.21 [mm]$$

$$ID = 16.53 - 2.68$$

$$ID = 13.85 [mm]$$

Finalmente se aplican las ecuaciones 3.18, 3.19 y 3.20 para determinar el número de espiras totales, la longitud sólida y el paso del resorte.

Datos:

- $N_a = 8 [vueltas]$

$$N_t = 8 + 2$$

$$N_t = 10 [vueltas]$$

Datos:

- $N_t = 10 [vueltas]$
- $d = 2.68 [mm]$

$$l_s = 2.68 * 10$$

$$l_s = 26.8 [mm]$$

Datos:

- $l_o = 57 [mm]$
- $d = 2.68 [mm]$
- $N_a = 8 [vueltas]$

$$p = \frac{57 - 2 * 2.68}{8}$$

$$p = 6.45 [mm]$$

Resumiendo, para nivelar la mesa, se deben adquirir 4 resortes con las siguientes características:

- Tipo de alambre: alambre de acero ASTM A227
- Terminación de los resortes: a escuadra y esmerilado
- Diámetro del alambre: $d = 2.68 [mm]$; calibre 12
- Diámetro interno: $ID = 13.85 [mm]$
- Número de espiras totales: $N_t = 10$; contando con las espiras de las terminaciones.
- Longitud libre: $l_o = 57 [mm]$
- Paso del resorte: $p = 6.45 [mm]$; paso válido entre espiras activas (8 en total)

3.4.2.7. Diseño del sistema de refrigeración

Como se menciona en la selección del sistema de refrigeración, se opta por diseñar un sistema de bajo costo que simule las condiciones de refrigeración del chiller industrial. Para esto se consideran dos puntos primordiales, que son el sistema de enfriamiento del agua destilada y el circuito de la misma cuyo componente principal es una bomba.

3.4.2.7.1. Diseño sistema de convección forzada

El sistema de enfriamiento de un chiller es un sistema de transferencia de calor por convección forzada, en el cual el agua destilada será refrigerada por el aire conducido por un ventilador. Para empezar con el diseño de este sistema, se selecciona un ventilador

comercial a 110V, de 1300RPM, como se muestra en la Figura 85, cuyo diámetro de aspas es 250mm o su equivalente en pulgadas 9.843in. Este ventilador es utilizado principalmente en sistemas de refrigeración de frigoríficos.



Figura 85.- Ventilador comercial seleccionado.

Con esta información, nos dirigimos a la ecuación 3.22 para calcular la velocidad con la que el ventilador impulsa el aire.

$$V_{aire} = \frac{\phi_{aspa} * RPM * \pi}{720} \quad (3.22)$$

Reemplazando los datos y calculando el valor se tiene:

$$V_{aire} = \frac{9.843 * 1300 * \pi}{720}$$

$$V_{aire} = 17.018 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Esta velocidad nos ayuda para determinar la longitud del ducto, que en este caso es de cobre, para el modelo de convección forzada que se muestra en la Figura 86 el cual conduce agua a través de ducto y es enfriado con aire.

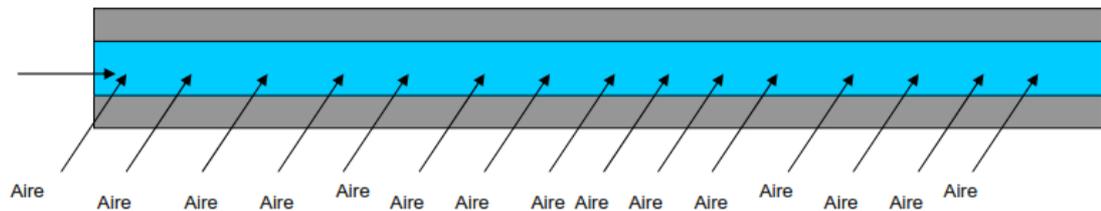


Figura 86.- Modelo de convección forzada en un ducto.

Dentro de este modelo tenemos los siguientes datos:

- Agua destilada
 - Caudal: 5 l/min. (Caudal requerido por el tubo de gas de láser)
 - Temperatura: 28°C (Temperatura máxima a la que trabaja el láser)
 - Velocidad: 1.3 m/s
- Ducto
 - Cobre
 - Diámetro interior: 9mm
 - Diámetro exterior: 10mm
- Aire
 - Temperatura: 15°C
 - Velocidad: 17.018 m/s

Para obtener la longitud del ducto, necesitamos además ciertas propiedades físicas y químicas, tanto del agua, como el aire y del cobre, que se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9.
Propiedades físicas de varios materiales.

PROPIEDAD	AGUA DESTILADA	AIRE	COBRE
Viscosidad Cinemática (m ² /s)	1.003 X 10 ⁻⁶	1.5 X 10 ⁻⁵	no aplica
Viscosidad Dinámica (kg/m.s)	1.003 X 10 ⁻³	1.5 X 10 ⁻⁵	no aplica
Conductividad Térmica (W/m.K)	0.58	0.026	385
Calor Específico (J/Kg.K)	4186.8	1012	390

Fuente: (Miliarium, 2008)

Primeramente se obtiene el número de Reynolds y el número de Prandlt de la ecuación 3.23 y la ecuación 3.24, respectivamente.

$$Re = \frac{V * d}{\nu} \quad (3.23)$$

Donde:

- V: Velocidad del agua.
- d: Diámetro interior del ducto.
- ν : Viscosidad Cinemática del agua.

$$Pr = \frac{\mu * c}{K} \quad (3.24)$$

Donde:

- μ : Viscosidad Dinámica del agua.
- c: Calor Específico del agua.
- K: Conductividad Térmica del agua.

Para calcular el número de Reynolds reemplazando los valores correspondientes, se tiene:

$$Re = \frac{1.3 * 0.009}{1.003 \times 10^{-6}}$$

$$Re = 11665.005$$

Igualmente para el número de Prandlt se tiene:

$$Pr = \frac{1.003 \times 10^{-3} * 4186.8}{0.58}$$

$$Pr = 7.24$$

Una vez calculados los dos números adimensionales, se procede a calcular el número adimensional de Nusselt para el agua, con la ecuación 3.25.

$$Nusselt_{agua} = 0.023(Re)^{0.8} * (Pr)^{0.3} \quad (3.25)$$

$$Nusselt_{agua} = 0.023(11665.005)^{0.8} * (7.24)^{0.3}$$

$$Nusselt_{agua} = 4.498$$

A continuación se obtiene el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua, con la ecuación 3.26.

$$h_i = \frac{Nusselt * K}{d} \quad (3.26)$$

Donde:

- h_i : Coeficiente de transferencia de calor por convección del agua.
- K : Conductividad térmica del agua.
- d : Diámetro interno del ducto

Reemplazando valores en esta ecuación se tiene:

$$h_i = \frac{4.498 * 0.58}{0.009}$$

$$h_i = 289.87 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ K} \right]$$

Una vez calculado el coeficiente para el agua, se sigue el mismo procedimiento para calcular el coeficiente para el aire, la ecuación para el número de Reynolds varía para el aire, y es la ecuación 3.27 presentada a continuación.

$$Re = \rho * V_{aire} * \frac{d}{\mu} \quad (3.27)$$

Donde:

- Re : Numero de Reynolds.
- ρ : Densidad del aire = 1.2 Kg/m³.
- d : Diámetro exterior del ducto.
- μ : Viscosidad Dinámica del aire.

Reemplazando valores en la ecuación 3.27, se obtiene:

$$Re = 1.2 * 17.018 * \frac{0.01}{1.8 \times 10^{-5}}$$

$$Re = 11345.33$$

Igualmente calculamos el número de Prandtl para el aire, tomando la ecuación 3.24.

$$Pr = \frac{1.5 \times 10^{-5} * 1012}{0.026}$$

$$Pr = 0.584$$

A continuación se obtiene el número adimensional de Nusselt, con la ecuación 3.28.

$$Nusselt = 0.3 + \frac{0.62(Re)^{0.5}(Pr)^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{0.5}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} * \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (3.28)$$

$$Nusselt = 0.3 + \frac{0.62(11345.33)^{0.5}(0.584)^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{0.584}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} * \left[1 + \left(\frac{11345.33}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$$

$$Nusselt = 53.177$$

Con estos valores obtenidos, se procede a encontrar el coeficiente de transferencia de calor por convección del aire, con la ecuación 3.29.

$$h_e = \frac{Nusselt * K}{d} \quad (3.29)$$

Donde:

- h_e : Coeficiente de transferencia de calor por convección del aire.
- K : Conductividad térmica del aire.
- d : Diámetro exterior del ducto.

Reemplazando valores, se tiene:

$$h_e = \frac{53.177 * 0.026}{0.01}$$

$$h_e = 138.26 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ K} \right]$$

El chiller industrial usado para los tubos de 80W, genera una capacidad calorífica de 50W/°C, dato que es la base para calcular la longitud del ducto. Basados en la ecuación 3.30, se determina el coeficiente global de transferencia de calor.

$$Q_{TOTAL} = U * A_i * (T_{agua} - T_{aire}) \quad (3.30)$$

Donde:

- Q_{total} : Calor cedido por el agua al aire (50W)
- A_i : Sección interior del ducto.
- U : Coeficiente global de transferencia de calor.

Despejando U y reemplazando los valores obtenidos y los datos, se tiene:

$$U = \frac{Q_{TOTAL}}{A_i * (T_{agua} - T_{aire})}$$

$$U = \frac{50}{6.36 \times 10^{-5} * (301.15 - 288.15)}$$

$$U = 60474.117 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right]$$

Con el coeficiente global de transferencia de calor calculado, con ayuda de la ecuación 3.31, determinamos la longitud de la tubería de cobre, que deberá constar dentro del condensador para obtener la refrigeración deseada.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi * K_{cobre} * L} + \frac{1}{h_e A_e}} \quad (3.31)$$

Donde:

- h_i : Coeficiente de transferencia de calor por convección del agua.
- A_i : Área interior de la pared del ducto.
- K_{cobre} : Conductividad térmica del cobre.
- L : Longitud del ducto.
- h_e : Coeficiente de transferencia de calor por convección del aire.
- A_e : Área exterior de la pared del ducto.
- r_e : radio exterior del ducto.
- r_i : radio interior del ducto.
- U : Coeficiente global de transferencia de calor.

Tomando en cuenta que tanto A_i como A_e , dependen de L , despejando, se tiene:

$$L = U * \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{h_i r_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{K_{\text{cobre}}} + \frac{1}{h_e r_e} \right)$$

Reemplazando los valores correspondientes:

$$L = 60474.1117 * \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{289.87 * 9} + \frac{\ln\left(\frac{5}{4.5}\right)}{385} + \frac{1}{138.26 * 10} \right)$$

$$L = 13.28 [m]$$

La longitud del ducto de cobre se la aproxima a 14m, con esto se selecciona el intercambiador de calor. Además el depósito de agua que debe ser de 9 litros, cantidad especificada igualmente en el chiller industrial. El sistema de refrigeración se muestra en la Figura 87.



Figura 87.- Sistema de refrigeración implementado.

3.4.2.7.2. Diseño de bomba de agua

Una vez seleccionado el intercambiador de calor, se procede a calcular la bomba de agua, para que el líquido recircule por todo el circuito, con un caudal de 5 l/min. Para esto se tiene 3 diferentes tuberías por las que circula el agua destilada, se presentan a continuación los datos de cada tubería.

- Tubería de plástico
 - Diámetro interior: 5mm
 - Velocidad: 4.24 m/s
 - Coeficiente de fricción de Hazen-Williams. $C = 150$
 - Longitud: 2m

- Tubería de cobre
 - Diámetro interior: 9mm
 - Velocidad: 1.3 m/s
 - Coeficiente de fricción de Hazen-Williams. $C = 130$
 - Longitud: 14m

- Tubería de cristal
 - Diámetro interior: 10mm
 - Diámetro exterior: 20mm

- Velocidad: 0.35 m/s
- Coeficiente de fricción de Hazen-Williams. $C = 140$
- Longitud: 1m

Con estos datos, se calculan las pérdidas dentro del circuito, por el método de Hazen-Williams. En primero lugar se obtienen las pérdidas por flujo turbulento con la ecuación 3.32.

$$J = 10.679 * (C)^{-1.85} * (\varnothing)^{-4.87} * (Q)^{1.85} \quad (3.32)$$

Donde:

- J: Pérdidas por flujo turbulento.
- C: Coeficiente de fricción de Hazen-Williams.
- \varnothing : Diámetro de tubería [m].
- Q: Caudal [m³/s]

Tomando en cuenta que se debe calcular las pérdidas para cada una de las 3 tuberías, se tiene:

$$J_{Cu} = 10.679 * (130)^{-1.85} * (0.009)^{-4.87} * (8.33 \times 10^{-5})^{1.85}$$

$$J_{Cu} = 0.342$$

$$J_{plastico} = 10.679 * (150)^{-1.85} * (0.005)^{-4.87} * (8.33 \times 10^{-5})^{1.85}$$

$$J_{plastico} = 4.56$$

$$J_{cristal} = 10.679 * (140)^{-1.85} * (0.01)^{-4.87} * (8.33 \times 10^{-5})^{1.85}$$

$$J_{cristal} = 0.178$$

Con las pérdidas por flujo turbulento, hallamos las pérdidas por fricción de cada una de las tuberías, siguiendo la ecuación 3.33.

$$H_f = J * L \quad (3.33)$$

Donde:

- H_f : Pérdidas por fricción.
- L : Longitud de la tubería.

Igualmente para cada una de las tuberías se tiene:

$$H_{f_{Cu}} = J_{Cu} * L_{Cu}$$

$$H_{f_{Cu}} = 0.342 * 14$$

$$H_{f_{Cu}} = 4.788 [m]$$

$$H_{f_{plastico}} = J_{plastico} * L_{plastico}$$

$$H_{f_{plastico}} = 4.56 * 2$$

$$H_{f_{plastico}} = 9.12 [m]$$

$$H_{f_{cristal}} = J_{cristal} * L_{cristal}$$

$$H_{f_{cristal}} = 0.178 * 1$$

$$H_{f_{cristal}} = 0.178 [m]$$

La pérdida total por fricción se obtiene con la sumatoria de las pérdidas por fricción de cada tubería.

$$H_{f_{total}} = H_{f_{Cu}} + H_{f_{plastico}} + H_{f_{cristal}}$$

$$H_{f_{total}} = 4.788 + 9.12 + 0.178$$

$$H_{f_{total}} = 14.086 [m]$$

A continuación, se debe calcular, el número de Reynolds y la rugosidad relativa para de acuerdo al diagrama de Moody hallar el coeficiente de fricción, para posteriormente encontrar las perdidas por singularidades. Para el número de Reynolds se sigue la ecuación 3.34. Mientras que para la rugosidad relativa la ecuación 3.35.

$$Re = \frac{V * \phi}{\mu} \quad (3.34)$$

Donde:

- V : Velocidad del agua [m/s]

- \emptyset : Diámetro de tubería [m].
- μ : Viscosidad cinemática del agua. ($1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

Para las 3 diferentes tuberías se tiene:

$$Re_{Cu} = \frac{1.3 * 0.009}{1.007 \times 10^{-6}}$$

$$Re_{Cu} = 1.16 \times 10^4$$

$$Re_{plastico} = \frac{4.24 * 0.005}{1.007 \times 10^{-6}}$$

$$Re_{plastico} = 2.1 \times 10^4$$

$$Re_{cristal} = \frac{0.35 * 0.01}{1.007 \times 10^{-6}}$$

$$Re_{cristal} = 3.47 \times 10^3$$

La rugosidad relativa:

$$R_{rel} = \frac{\varepsilon}{\emptyset * 1000} \quad (3.35)$$

Donde:

- R_{rel} : Rugosidad relativa.
- ε : Coeficiente de rugosidad de Manning del material.
- \emptyset : Diámetro de tubería.

Los coeficientes de rugosidad de cada material, se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10.
Coeficientes de rugosidad de Manning para tuberías.

Material	Coeficiente de rugosidad
Cobre	0.011
Plástico	0.008
Cristal	0.01

Fuente: (Miliarium, 2008)

Calculando la rugosidad relativa para cada tubería, se tiene:

$$R_{relCu} = \frac{0.011}{0.009 * 1000}$$

$$R_{relCu} = 0.00122$$

$$R_{relplastico} = \frac{0.008}{0.005 * 1000}$$

$$R_{relplastico} = 0.0016$$

$$R_{relcristal} = \frac{0.01}{0.01 * 1000}$$

$$R_{relcristal} = 0.001$$

Una vez calculados, el número de Reynolds y la rugosidad relativa para cada material, se observa el diagrama de Moody, ingresando primeramente a derecha con la rugosidad relativa, seleccionando una curva lo más cercana al valor calculado.

Posteriormente, se ingresa desde la parte inferior con el número de Reynolds, logrando una intercepción entre la curva de rugosidad y la recta de Reynolds, para salir a mano izquierda y determinar el coeficiente de fricción (f).

En la Figura 88, se muestra en color rojo como se encuentra el coeficiente para el cobre, así mismo en color verde para el plástico y en color azul para el cristal. Para las tres tuberías, la gráfica de rugosidad se selecciona en el valor de 0.001 por ser la más aproximada.

Además, en la Figura 88 se observa la obtención del coeficiente de fricción para cada material, llegando al valor aproximado, se tiene:

- $f_{Cu} = 0.032$
- $f_{plastico} = 0.028$
- $f_{cristal} = 0.042$

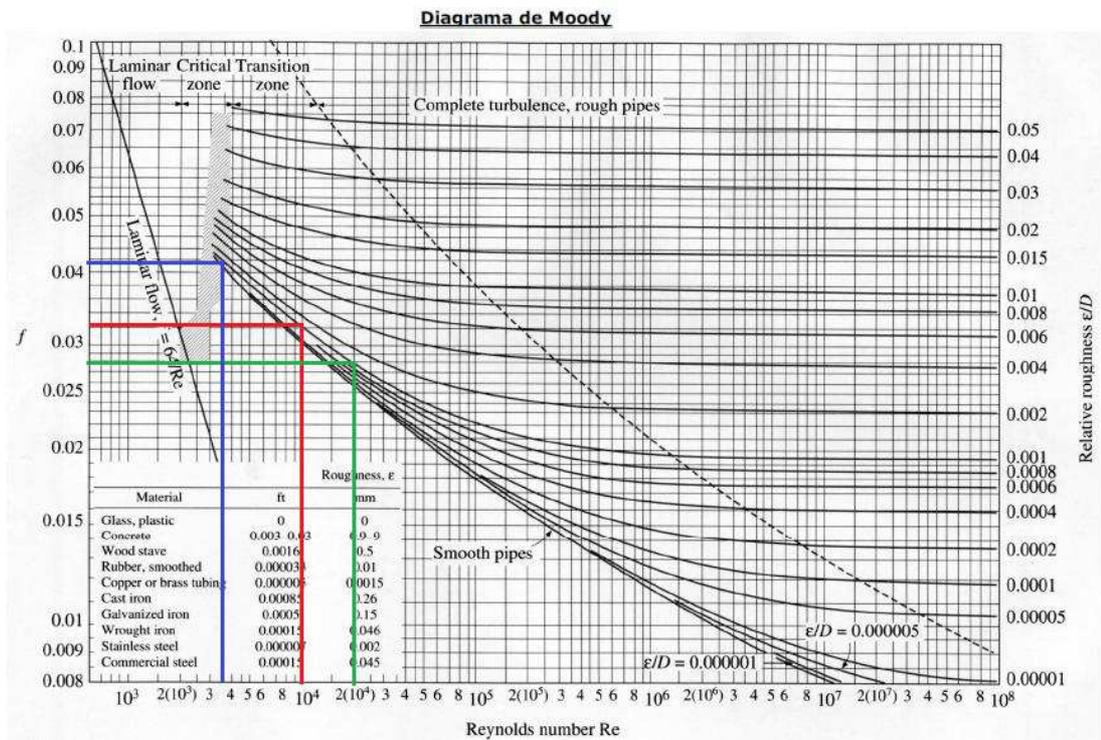


Figura 88.- Diagrama de Moody.
Fuente: (Mott, 2006)

En la Tabla 11, se muestran los coeficientes de pérdida por singularidades, necesarios para calcular las pérdidas por singularidades.

Tabla 11.
Coefficientes de pérdida por singularidades

Singularidad	Cantidad	Coefficiente	Valor total
Entrada	1	0.5	0.5
Salida	1	1	1
T (cristal)	2	1.2	2.4
Codo (Cu)	2	1.3	2.6

Fuente: (Mott, 2006)

La ecuación 3.36 indica el cálculo de las pérdidas por singularidades.

$$H_s = \frac{\sum K * V^2}{2g} * \frac{L}{\phi} * f \tag{3.36}$$

Donde:

- H_s : Pérdidas por singularidades.
- K : Coeficiente de pérdida de cada singularidad.
- \varnothing : Diámetro de tubería.
- g : Gravedad.
- V : Velocidad del agua.
- L : Longitud de tubería.
- f : Factor de fricción del diagrama de Moody.

Las pérdidas por singularidades se calculan para cada una de las tuberías y se tiene:

$$H_{S_{Cu}} = \frac{4.1 * 1.3^2}{2 * 9.8} * \frac{14}{0.009} * 0.032$$

$$H_{S_{Cu}} = 17.597 [m]$$

$$H_{S_{plastico}} = \frac{1.5 * 4.24^2}{2 * 9.8} * \frac{4}{0.005} * 0.028$$

$$H_{S_{plastico}} = 30.82 [m]$$

$$H_{S_{cristal}} = \frac{3.9 * 0.35^2}{2 * 9.8} * \frac{1}{0.01} * 0.042$$

$$H_{S_{cristal}} = 0.102 [m]$$

La pérdida por singularidades es la sumatoria de cada pérdida individual, y es:

$$H_{S_{total}} = H_{S_{Cu}} + H_{S_{plastico}} + H_{S_{cristal}}$$

$$H_{S_{total}} = 17.597 + 30.82 + 0.102$$

$$H_{S_{total}} = 48.52 [m]$$

La pérdida por diferencia de altura (H_g), viene dada desde la ubicación de la bomba, que es a nivel del suelo, hacia la ubicación del tubo, es decir a una altura de 1m.

Las pérdidas totales son la sumatoria de las pérdidas específicas, mostrada en la ecuación 3.37.

$$H_{Total} = H_f + H_s + H_g \quad (3.37)$$

$$H_{Total} = 14.086 + 48.52 + 1$$

$$H_{Total} = 63.6 [m]$$

Para calcular la potencia necesaria de la bomba, acudimos a la ecuación de Bernoulli (ecuación 3.38), para calcular la pérdida total de la bomba.

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + H_B = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_{total} \quad (3.38)$$

Donde:

- P: Presión del sistema en el punto seleccionado.
- ρ : Densidad del agua.
- g: Gravedad.
- V: Velocidad del fluido en el punto seleccionado.
- Z: Altura del punto de estudio respecto a un nivel de referencia.
- H_B : Perdidas de la bomba.

En este sistema tanto el punto 1 como el punto 2, no están cerrados a presión, además la velocidad en estos puntos puede ser considerada como estacionaria. También la altura en donde se encuentra la bomba es 0m pues este es el nivel de referencia, por estas razones, la ecuación 3.38 queda de la siguiente manera.

$$H_B = Z_2 + H_{total}$$

Reemplazando los valores correspondientes, se tiene:

$$H_B = 1 + 63.6$$

$$H_B = 64.6 [m]$$

Esta medida se la considera como metros de agua, una medida de presión dentro de sistemas de recirculación de agua, por lo tanto, el valor transformado a una unidad de presión conocida es:

$$H_B = 633.49 \text{ [kPa]}$$

Por lo tanto, con la ecuación 3.39 obtenemos la potencia nominal de la bomba.

$$P = Q * H_B \quad (3.39)$$

Donde:

- P: Potencia de la bomba
- Q: Caudal necesario
- H_B: Presión a la que trabaja.

Reemplazando estos datos, se tiene:

$$P = 8.33 \times 10^{-5} * 633.49 \times 10^3$$

$$P = 52.77 \text{ [W]}$$

Aplicando un factor de seguridad de 1.5, la potencia de la bomba requerida es:

$$P = 79.15 \text{ [W]}$$

3.4.3. Diseño de tornillos, guías y selección de acoples

A continuación se usarán fórmulas obtenidas de los catálogos de los fabricantes de tornillos de bola, guías lineales y acoples para obtener las principales características de los mismos. Primero se enlistarán las principales fórmulas para el cálculo de las características de los tornillos de bola.

- Eficiencia para transmisión común (convertir movimiento rotatorio en lineal)

$$\eta_1 = \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\alpha + \beta)} \quad (3.40)$$

En donde:

- η_1 : Eficiencia mecánica del tornillo de bolas.
- α [*grados*]: Ángulo de la hélice.
- β [*grados*]: Ángulo de fricción.
- Ángulo del diente del tornillo

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{l}{\pi D_m} \quad (3.41)$$

En donde:

- α [*grados*]: Ángulo del diente del tornillo.
- l [*mm*]: Paso del tornillo.
- D_m [*mm*]: Diámetro primitivo del tornillo.
- Diámetro primitivo

$$D_m = D - 2 \left(\frac{l}{\pi} \right) \quad (3.42)$$

En donde:

- D_m [*mm*]: Diámetro primitivo del tornillo.
- l [*mm*]: Paso del tornillo.
- D [*mm*]: Diámetro externo del tornillo.
- Ángulo de fricción

$$\beta = \tan^{-1} \mu \quad (3.43)$$

En donde:

- β [*grados*]: Ángulo de fricción.
- μ : Coeficiente de fricción (0.003~0.01).
- Número promedio de rpm (velocidad promedio)

$$n_{av} = \sum_{i=1}^m n_i \frac{t_i}{100} \quad (3.44)$$

En donde:

- n_{av} [*rpm*]: Velocidad promedio.
- n_i [*rpm*]: Velocidad.

- t_i : Porcentaje de tiempo a la velocidad n_i
- Velocidad de avance promedio

$$V_e = l * n_{av} \quad (3.45)$$

En donde:

- $V_e \left[\frac{mm}{min} \right]$: Velocidad de avance promedio.
- $n_{av} [rpm]$: Velocidad promedio.
- $l [mm]$: Paso del tornillo.
- Carga de operación promedio a velocidad constante

$$F_{bm} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^n F_{bi}^3 \frac{t_i}{100} f_{pi}^3} \quad (3.46)$$

En donde:

- $F_{bm} [kgf]$: Carga de operación promedio.
- $F_{bi} [kgf]$: Carga axial de trabajo.
- t_i : Porcentaje de tiempo con la carga F_{bi} .
- f_{pi} : Factor de operación.
 - 1.1~1.2 cuando funciona a bajo impacto.
 - 1.3~1.8 cuando funciona en condiciones normales.
 - 2.0~3.0 cuando se tiene alto impacto y vibración.
- Fuerza axial resultante para nuez simple sin precarga

$$F_a = F_{bm} \quad (3.47)$$

En donde:

- $F_a [kgf]$: Fuerza axial resultante.
- $F_{bm} [kgf]$: Carga de operación promedio.

- Vida útil en revoluciones para nuez simple

$$L = \left(\frac{C}{F_a}\right)^3 * 10^6 \quad (3.48)$$

En donde:

- L [revoluciones]: Vida útil.
- C [kgf]: Índice de carga dinámica.
- F_a [kgf]: Fuerza axial resultante.

- Vida útil en horas

$$L_h = \frac{L}{n_{av} * 60} \quad (3.49)$$

En donde:

- L_h [horas]: Vida útil.
- n_{av} [rpm]: Velocidad promedio.
- L [revoluciones]: Vida útil.

- Vida útil en distancia recorrida

$$L_d = \frac{L_h * l * n_{av} * 60}{10^6} \quad (3.50)$$

En donde:

- L_d [km]: Vida útil.
- l [mm]: Paso del tornillo.
- L_h [horas]: Vida útil.
- n_{av} [rpm]: Velocidad promedio.

- Par motor para transmisión común (convertir movimiento rotatorio en lineal)

$$T_a = \frac{F_a * l}{2\pi\eta_1} \quad (3.51)$$

En donde:

- T_a [kgf.mm]: Par motor.

- l [mm]: Paso del tornillo.
- F_a [kgf]: Fuerza axial resultante.
- η_1 : Eficiencia mecánica
- Torque del motor que genera el movimiento

$$T_M = T_a + T_b + T_d \quad (3.52)$$

En donde:

- T_M [kgf. mm]: Torque del motor.
- T_a [kgf. mm]: Par motor.
- T_b [kgf. mm]: Par de fricción de los rodamientos.
- T_d [kgf. mm]: Par de precarga.
- Torque máximo del motor

$$T_{max} = T_M * F.S. \quad (3.53)$$

En donde:

- T_{max} [kgf. mm]: Toque máximo del motor.
- T_M [kgf. mm]: Torque del motor.
- $F.S.$: Factor de seguridad
- Potencia Motora

$$P_d = \frac{T_{max} * N_{max}}{974} \quad (3.54)$$

En donde:

- P_d [W]: Potencia motora.
- T_{max} [kgf. mm]: Torque máximo.
- N_{max} [rpm]: Velocidad de rotación máxima.

Para el cálculo del par de fricción de los rodamientos se acude a catálogos de fabricantes en donde se muestra la ecuación necesaria para dicho cálculo.

- Par de fricción del rodamiento

$$T_b = 0.5 * \mu * P * d \quad (3.55)$$

En donde:

- T_b [kgf.mm]: Par de fricción del rodamiento.
- μ : Coeficiente de fricción del rodamiento.
- P [kgf]: Índice de carga dinámica del rodamiento.
- d [mm]: Diámetro del rodamiento.

En la Figura 89 se muestran las características de los rodamientos seleccionados y en la Figura 90 el coeficiente de fricción por el tipo de rodamiento, en este caso son rodamientos de bola de doble fila.

Unit No.	Shaft Dia		Dimensions (in) (mm)									Load Rating Lb (kg)		Weight kg			
	in	mm	D	Bi	Be	r	n	m	G	ds	w	Dynamic	Static				
UC201	1/2	12												0.21			
201-8		15	1.8504	1.2205	0.629	0.039	0.500	0.7205	0.177	#10-32	1.142	2230	1390	0.20			
UC202-10	5/8	17	47	31.0	16	1	12.7	18.3	5	5×0.8	29	1010	630	0.19			
UC203														0.18			
UC204	3/4	20	47	31.0	16	1	12.7	18.3	5	6×1	29	1010	630	0.16			
204-12		25									1/4-28				0.16		
UC205														0.19			
205-14	7/8	15/16	2.0472	1.3386	0.669	0.059	0.563	0.7756	0.197	1/4-28	1.339	2420	1560	0.22			
205-15			52	34.1	17	1.5	14.3	19.7	5.5			6×1	34	1100	710	0.20	
205-16			1														0.19
UC206														0.31			
206-18	1 1/8	30	2.4409	1.5000	0.748	0.059	0.626	0.8740	0.197	1/4-28	1.591	3390	2250	0.34			
206-19			62	38.1	19	1.5	15.9	22.2	6			6×1	40.4	1540	1020	0.32	
206-20			1 1/4														0.30
UC207														0.46			
207-20	1 1/4	35	2.8346	1.6890	0.787	0.079	0.689	1.0000	0.236	5/16-24	1.866	4470	3090	0.52			
207-21			72	42.9	20	2	17.5	25.4	7			8×1	47.4	2030	1400	0.50	
207-22			1 3/8														0.48
207-23			1 7/16														0.46
UC208														0.63			
208-24	1 1/2	40	3.1496	1.9370	0.827	0.079	0.748	1.1890	0.315	5/16-24	2.075	5070	3530	0.68			
208-25			80	49.2	21	2	19.0	30.2	8			8×1	52.7	2300	1600	0.64	

Figura 89.- Características de los rodamientos tipo UC.

Fuente: (NBR, 2014)

Para las guías es necesario calcular la vida útil, las fórmulas para estos cálculos se obtienen del catálogo del fabricante de las guías y se muestran a continuación.

Bearing type	Coefficient of friction μ
Deep groove ball bearings	0,0015
Angular contact ball bearings	
- single row	0,0020
- double row	0,0024
- four-point contact	0,0024
Self-aligning ball bearings	0,0010
Cylindrical roller bearings	
- with a cage, when $F_a \approx 0$	0,0011
- full complement, when $F_a \approx 0$	0,0020
Needle roller bearings with a cage	0,0020
Tapered roller bearings	0,0018
Spherical roller bearings	0,0018
CARB toroidal roller bearings with a cage	0,0016
Thrust ball bearings	0,0013
Cylindrical roller thrust bearings	0,0050
Needle roller thrust bearings	0,0050
Spherical roller thrust bearings	0,0018

Figura 90.- Coeficiente de fricción según el tipo de rodamiento.
Fuente: (NBR, 2014)

Para las guías es necesario calcular la vida útil, las fórmulas para estos cálculos se obtienen del catálogo del fabricante de las guías y se muestran a continuación.

- Vida útil de la guía en distancia recorrida

$$L = \left(\frac{C}{P * f_w} \right)^3 * 50 [km] \quad (3.56)$$

En donde:

- $L [km]$: Vida útil en distancia recorrida.
- $C [kgf]$: Índice de carga dinámica.
- $P [kgf]$: Carga Soportada.
- f_w : Factor de carga

Los factores de carga se muestran en la Figura 91.

Loading Condition	Service Speed	f_w
No impacts & vibration	$V \leq 15 \text{ m/min}$	1 - 1.2
Small impacts	$15 \text{ m/min} < V \leq 60 \text{ m/min}$	1.2 - 1.5
Normal load	$60 \text{ m/min} < V \leq 120 \text{ m/min}$	1.5 - 2.0
With impacts & vibration	$V > 120 \text{ m/min}$	2.0 - 3.5

Figura 91.- Factores de carga para guías lineales.
Fuente: (Hiwin, Linear Guideway Technical Information)

- Vida útil de la guía en horas

$$L_h = \frac{L * 10^3}{V_e * 60} \quad (3.57)$$

En donde:

- L_h [horas]: Vida útil en horas.
- L [km]: Vida útil en distancia recorrida.
- V_e $\left[\frac{m}{min}\right]$: Velocidad de avance.

3.4.3.1. Tornillo de bola y guía del eje X

Para calcular la eficiencia del tornillo se inicia calculando el diámetro primitivo del tornillo, luego se calcula el ángulo del diente y el ángulo de fricción.

Aplicando la ecuación 3.42 se tiene:

Datos:

- $l = 5$ [mm]; se toma este valor de la Figura 30
- $D = 20$ [mm]; se toma este valor de la Figura 30

$$D_m = 20 - 2 \left(\frac{5}{\pi} \right)$$

$$D_m = 16.82 \text{ [mm]}$$

Aplicando la ecuación 3.41 se tiene:

Datos:

- $l = 5 \text{ [mm]}$
- $D_m = 16.82 \text{ [mm]}$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{5}{\pi * 16.82}$$

$$\alpha = 5.41^\circ$$

Aplicando la ecuación 3.43 se tiene:

Datos:

- $\mu = 0.003$; el coeficiente de fricción está entre 0.003 y 0.01, se toma el menor valor debido a que los tornillos están sin precarga.

$$\beta = \tan^{-1} 0.003$$

$$\beta = 0.17^\circ$$

Aplicando la ecuación 3.40 se tiene:

Datos:

- $\alpha = 5.41^\circ$
- $\beta = 0.17^\circ$

$$\eta_1 = \frac{\tan(5.41)}{\tan(5.41 + 0.17)}$$

$$\eta_1 = 0.979$$

Ahora se calcularán los valores promedios de carga y velocidades, aplicando la ecuación 3.44 para calcular la velocidad promedio se tiene:

Datos:

- $n_i = 200 \text{ [rpm]}$; se usará el valor máximo de revoluciones a las que funcionará la máquina para de este modo obtener la vida útil mínima de los tornillos.

- $t_i = 100$; se asumirá que velocidad máxima estará aplicada el 100% del tiempo de operación de la máquina para de este modo obtener la vida útil mínima de los tornillos.

$$n_{av} = 200 * \frac{100}{100}$$

$$n_{av} = 200 [rpm]$$

Aplicando la ecuación 3.45 para calcular la velocidad de avance se tiene:

Datos:

- $n_{av} = 200 [rpm]$
- $l = 5 [mm]$

$$V_e = 5 * 200$$

$$V_e = 1000 \left[\frac{mm}{min} \right] = 1 \left[\frac{m}{min} \right]$$

Aplicando la ecuación 3.46 para calcular la carga promedio se tiene:

Datos:

- $F_{bi} = 1.07 [N] = 0.1091 [kgf]$; la carga axial aplicada será constante y será el peso del ensamble del cabezal, calculado anteriormente (reacción R1), sobre el tornillo.
- $t_i =$; la carga axial será aplicada el 100% del tiempo
- $f_{pi} = 1.3$; Se toma este factor porque la máquina opera en condiciones normales de impacto y vibración

$$F_{bm} = \sqrt[3]{0.1091^3 * \frac{100}{100} * 1.3^3}$$

$$F_{bm} = 0.1418 [kgf] = 1.391 [N]$$

Aplicando la ecuación 3.47 para calcular la fuerza axial resultante se tiene:

Datos:

- $F_{bm} = 0.1418 [kgf] = 1.391 [N]$
 $F_a = 0.1418 [kgf] = 1.391 [N]$

Ahora se calculará la vida útil del tornillo. Aplicando la ecuación 3.48 para calcular la vida útil en revoluciones se tiene:

Datos:

- $C = 1130 [kgf]$; se toma este valor de la Figura 30
- $F_a = 0.1418 [kgf]$

$$L = \left(\frac{1130}{0.1418} \right)^3 * 10^6$$

$$L = 5.06 * 10^{17} [revoluciones]$$

Aplicando la ecuación 3.49 para calcular la vida útil en horas se tiene:

Datos:

- $n_{av} = 200 [rpm]$
- $L = 5.06 * 10^{17} [revoluciones]$

$$L_h = \frac{5.06 * 10^{17}}{200 * 60}$$

$$L_h = 4.22 * 10^{13} [horas]$$

Aplicando la ecuación 3.50 para calcular la vida útil en distancia recorrida se tiene:

Datos:

- $l = 5 [mm]$
- $L_h = 4.22 * 10^{13} [horas]$
- $n_{av} = 200 [rpm]$

$$L_d = \frac{4.22 * 10^{13} * 5 * 200 * 60}{10^6}$$

$$L_d = 2.53 * 10^{18} [km]$$

Se calculan los valores de torque y potencia. Aplicando la ecuación 3.51 para calcular el par motor se tiene:

Datos:

- $l = 5 [mm]$
- $F_a = 0.1418 [kgf]$
- $\eta_1 = 0.979$

$$T_a = \frac{0.1418 * 5}{2\pi * 0.979}$$

$$T_a = 0.1153 [kgf \cdot mm]$$

Aplicando la ecuación 3.55 para calcular el par de fricción de los rodamientos se tiene:

Datos:

- $\mu = 0.0024$; se obtiene de la Figura 90
- $P = 1010 [kgf]$; se obtiene de la Figura 89
- $d = 20 [mm]$; se obtiene de la Figura 89

$$T_b = 0.5 * 0.0024 * 1010 * 20$$

$$T_b = 24.24 [kgf \cdot mm]$$

El par obtenido anteriormente equivale al par de fricción máximo, es decir el par que existiría si el rodamiento soportara su máxima carga estática.

Aplicando la ecuación 3.52 para calcular el torque del motor se tiene:

Datos:

- $T_a = 0.1153 [kgf \cdot mm]$
- $T_b = 24.24 [kgf \cdot mm]$
- $T_d = 0$

$$T_M = 0.1153 + 24.24$$

$$T_M = 24.35 [kgf \cdot mm]$$

Aplicando la ecuación 3.53 para calcular el torque máximo del motor se tiene:

Datos:

- $T_M = 24.35 \text{ [kgf} \cdot \text{mm]}$
- $F.S. = 2$

$$T_{max} = 24.35 * 2$$

$$T_{max} = 48.71 \text{ [kgf} \cdot \text{mm]} = 0.478 \text{ [N} \cdot \text{m]}$$

Aplicando la ecuación 3.54 para calcular la potencia motora se tiene:

Datos:

- $T_{max} = 48.71 \text{ [kgf} \cdot \text{mm]}$
- $N_{max} = 800 \text{ [rpm]}$

$$P_d = \frac{48.71 * 800}{974}$$

$$P_d = 40.01 \text{ [W]}$$

Ahora se procede a calcular la vida útil de la guía. Aplicando la ecuación 3.56 para calcular la vida útil de la guía en distancia recorrida se tiene:

Datos:

- $C = 17750 \text{ [N]}$; se obtiene de la Figura 31
- $P = 2.679 \text{ [N]}$; la carga aplicada será el peso del ensamble del cabezal, calculado anteriormente (reacción R2), sobre la guía.
- $f_w = 1.2$; se obtiene de la Figura 91, debido a que la velocidad de avance es $1 \left[\frac{\text{m}}{\text{min}} \right]$

$$L = \left(\frac{17750}{2.679 * 1.2} \right)^3 * 50$$

$$L = 8.42 * 10^{12} \text{ [km]}$$

Aplicando la ecuación 3.57 para calcular la vida útil de la guía en horas se tiene:

Datos:

- $L = 8.42 * 10^{12} [km]$
- $V_e = 1 \left[\frac{m}{min} \right]$; es la velocidad de avance del tornillo de bolas calculada anteriormente.

$$L_h = \frac{8.42 * 10^{12} * 10^3}{1 * 60}$$

$$L_h = 1.4 * 10^{14} [horas]$$

3.4.3.2. Tornillo de bola y guías del eje Y

Dado a que las guías y los tornillos de bolas del eje X y Y son los mismos pero de longitud diferente, se tiene que los siguientes valores son los mismos para ambos casos:

- Eficiencia: $\eta_1 = 0.979$
- Valor promedio de velocidad: $n_{av} = 200 [rpm]$
- Velocidad de avance: $V_e = 1000 \left[\frac{mm}{min} \right] = 1 \left[\frac{m}{min} \right]$
- Par de fricción de los rodamientos: $T_b = 24.24 [kgf \cdot mm]$

Una vez identificados los valores iguales se continúan los cálculos para el tornillo sin fin. Aplicando la ecuación 3.46 para calcular la carga promedio se tiene:

Datos:

- $F_{bi} = 28.5 [N] = 2.91 [kgf]$; la carga axial aplicada será constante y será la carga calculada anteriormente (reacción R3), sobre el tornillo.
- $t_i =$; la carga axial será aplicada el 100% del tiempo
- $f_{pi} = 1.3$; Se toma este factor porque la máquina opera en condiciones normales de impacto y vibración

$$F_{bm} = \sqrt[3]{2.91^3 * \frac{100}{100} * 1.3^3}$$

$$F_{bm} = 3.783 [kgf] = 37.11 [N]$$

Aplicando la ecuación 3.47 para calcular la fuerza axial resultante se tiene:

Datos:

- $F_{bm} = 3.783 \text{ [kgf]} = 37.11 \text{ [N]}$
- $$F_a = 3.783 \text{ [kgf]} = 37.11 \text{ [N]}$$

Ahora se calculará la vida útil del tornillo. Aplicando la ecuación 3.48 para calcular la vida útil en revoluciones se tiene:

Datos:

- $C = 1130 \text{ [kgf]}$; se toma este valor de la Figura 30
- $F_a = 3.783 \text{ [kgf]}$

$$L = \left(\frac{1130}{3.783} \right)^3 * 10^6$$

$$L = 2.67 * 10^{13} \text{ [revoluciones]}$$

Aplicando la ecuación 3.49 para calcular la vida útil en horas se tiene:

Datos:

- $n_{av} = 200 \text{ [rpm]}$
- $L = 2.67 * 10^{13} \text{ [revoluciones]}$

$$L_h = \frac{2.67 * 10^{13}}{200 * 60}$$

$$L_h = 2.23 * 10^9 \text{ [horas]}$$

Aplicando la ecuación 3.50 para calcular la vida útil en distancia recorrida se tiene:

Datos:

- $l = 5 \text{ [mm]}$
- $L_h = 2.23 * 10^9 \text{ [horas]}$
- $n_{av} = 200 \text{ [rpm]}$

$$L_d = \frac{2.23 * 10^9 * 5 * 200 * 60}{10^6}$$

$$L_d = 1.34 * 10^9 \text{ [km]}$$

Se calculan los valores de torque y potencia. Aplicando la ecuación 3.51 para calcular el par motor se tiene:

Datos:

- $l = 5 [mm]$
- $F_a = 3.783 [kgf]$
- $\eta_1 = 0.979$

$$T_a = \frac{3.783 * 5}{2\pi * 0.979}$$

$$T_a = 3.075 [kgf. mm]$$

Aplicando la ecuación 3.52 para calcular el torque del motor se tiene:

Datos:

- $T_a = 3.075 [kgf. mm]$
- $T_b = 24.24 [kgf. mm]$
- $T_d = 0$

$$T_M = 3.075 + 24.24$$

$$T_M = 27.31 [kgf. mm]$$

Aplicando la ecuación 3.53 para calcular el torque máximo del motor se tiene:

Datos:

- $T_M = 27.31 [kgf. mm]$
- $F.S. = 2$

$$T_{max} = 27.31 * 2$$

$$T_{max} = 54.63 [kgf. mm] = 0.536 [N. m]$$

Aplicando la ecuación 3.54 para calcular la potencia motora se tiene:

Datos:

- $T_{max} = 54.63 [kgf. mm]$
- $N_{max} = 800 [rpm]$

$$P_d = \frac{54.63 * 800}{974}$$

$$P_d = 44.87 [W]$$

Ahora se procede a calcular la vida útil de la guía del lado izquierdo de la máquina. Aplicando la ecuación 3.56 para calcular la vida útil de la guía izquierda en distancia recorrida se tiene:

Datos:

- $C = 17750 [N]$; se obtiene de la Figura 31
- $P = 91.25 [N]$; la carga aplicada será el la reacción resultante calculada anteriormente (reacción R4), sobre la guía.
- $f_w = 1.2$; se obtiene de la Figura 91, debido a que la velocidad de avance es $1 \left[\frac{m}{min} \right]$

$$L = \left(\frac{17750}{91.25 * 1.2} \right)^3 * 50$$

$$L = 2.13 * 10^8 [km]$$

Aplicando la ecuación 3.57 para calcular la vida útil de la guía izquierda en horas se tiene:

Datos:

- $L = 2.13 * 10^8 [km]$
- $V_e = 1 \left[\frac{m}{min} \right]$; es la velocidad de avance del tornillo de bolas calculada anteriormente.

$$L_h = \frac{2.13 * 10^8 * 10^3}{1 * 60}$$

$$L_h = 3.55 * 10^9 [horas]$$

Finalmente se procede a calcular la vida útil de la guía del lado derecho de la máquina. Aplicando la ecuación 3.56 para calcular la vida útil de la guía derecha en distancia recorrida se tiene:

Datos:

- $C = 17750 [N]$; se obtiene de la Figura 31
- $P = 69.79 [N]$; la carga aplicada será el la reacción resultante calculada anteriormente (reacción R5), sobre la guía.
- $f_w = 1.2$; se obtiene de la Figura 91, debido a que la velocidad de avance es $1 \left[\frac{m}{min} \right]$

$$L = \left(\frac{17750}{69.79 * 1.2} \right)^3 * 50$$

$$L = 4.76 * 10^8 [km]$$

Aplicando la ecuación 3.57 para calcular la vida útil de la guía derecha en horas se tiene:

Datos:

- $L = 4.76 * 10^8 [km]$
- $V_e = 1 \left[\frac{m}{min} \right]$; es la velocidad de avance del tornillo de bolas calculada anteriormente.

$$L_h = \frac{4.76 * 10^8 * 10^3}{1 * 60}$$

$$L_h = 7.93 * 10^9 [horas]$$

3.4.3.3. Selección de acoples

Como ya se explicó anteriormente, el acople que más conviene para esta aplicación es un acople de quijadas de goma por su capacidad de corregir la desalineación axial y paralela de manera ligera y la desalineación angular de manera moderada, aparte de su capacidad para absorber impactos y su bajo costo. Para seleccionar los acoples, se debe tomar en cuenta dos parámetros, el primero es el torque que es capaz de transmitir el acople y el segundo es el máximo agujero que se puede taladrar en la manzana.

Basándose en los datos previamente obtenidos, se selecciona el acople L/AL070 mostrado en la Figura 92, aunque se tiene que el máximo agujero permitido es de 19 mm y el tornillo de bolas es 20 mm de diámetro, se selecciona este acople porque el torque que debe transmitir es bajo, siendo este 0.536 N-m en el tornillo que más carga soporta.

Size	Max Bore		Spider Material							
	in	mm	SOX (NBR) Torque		Urethane Torque		Hytrel Torque		Bronze Torque	
			in-lbs	Nm	in-lbs	Nm	in-lbs	Nm	in-lbs	Nm
L035	0.375	9	3.5	0.4	—	—	—	—	—	—
L/AL050	0.625	16	26.3	3.0	39	4.5	50	5.60	50	5.60
L/AL070	0.750	19	43.2	4.9	65	7.3	114	12.90	114	12.90
L/AL075	0.875	22	90.0	10.2	135	15.3	227	25.60	227	25.60
L/AL090	1.000	25	144.0	16.3	216	24.4	401	45.30	401	45.30
L/AL095	1.125	28	194.0	21.9	291	32.9	561	63.40	561	63.40
L/AL099	1.188	30	318.0	35.9	477	53.9	792	89.50	792	89.50
L/AL100	1.375	35	417.0	47.1	626	70.7	1,134	128.00	1,134	128.00
L/AL110	1.625	42	792.0	89.5	1,188	134.0	2,268	256.00	2,268	256.00
L150	1.875	48	1,240.0	140.0	1,860	210.0	3,708	419.00	3,706	419.00
AL150	1.875	48	1,450.0	163.8	—	—	—	—	—	—
L190	2.125	55	1,728.0	195.0	2,592	293.0	4,680	529.00	4,680	529.00
L225	2.625	65	2,340.0	264.0	3,510	397.0	6,228	704.00	6,228	704.00
L276	2.875	73	4,716.0	533.0	—	—	—	—	12,500	1 412.00

Figura 92.- Tipos de acoples de quijadas de goma.
Fuente: (Lovejoy, 2015)

Se selecciona como tipo de goma la SOX (NBR) debido a su bajo costo, resistencia a aceites y porque es el de menor torque, ya que la aplicación no requiere gran transmisión de torque.

3.5. DISEÑO ELECTRÓNICO

3.5.1. Selección de elementos electrónicos.

En la parte de alternativas de diseño, se analizaron varias opciones, entre ellas el tipo de motor a utilizar. Se decidió que la mejor opción son los motores a pasos, debido a su bajo costo, alto torque y facilidad de control, ya que con los motores a pasos se puede realizar un control en lazo abierto, sin necesidad de retroalimentación para saber la posición del mismo debido a que su movimiento por pulso está definido en las características del motor. El único problema que se tiene con los motores a pasos es que debido a su principio de generación de movimiento, estos funcionan a velocidades

relativamente bajas. La velocidad nominal a la que estos funcionan tiene una relación directa con el voltaje nominal, esto se explicará con el siguiente ejemplo:

Supongamos que tenemos un motor a pasos con las siguientes características:

- Corriente nominal: $I = 5 \left[\frac{A}{phase} \right]$
- Inductancia en el devanado: $L_W = 5 [mH]$
- Resistencia en el devanado: $R_W = 0.5 [\Omega]$
- Torque máximo: $T = 330 [oz. in]$

Como se sabe, en un motor eléctrico el torque es directamente proporcional a la corriente, es decir, que cuando se tenga una corriente nominal de 5 A en el devanado, el torque será el máximo. Ahora bien, si se tiene una corriente nominal de 5 A, esto quiere decir que el voltaje nominal en este caso será de 2.5 V, esto se deduce aplicando la ley de Ohm mostrada en la ecuación 3.24.

$$V = I * R \quad (3.58)$$

En donde:

- $V [V]$: Voltaje
- $I [A]$: Corriente
- $R [\Omega]$: Resistencia Eléctrica

Como se sabe, el giro del motor a pasos se debe a que se energizan las dos bobinas del motor de cierta forma induciendo un movimiento rotor de imán permanente, el cual se desplaza cierto número de grados manteniendo esa posición una vez concluido el desplazamiento, para que de otro paso, se debe cambiar la polaridad del devanado, mediante un puente H generalmente, esto produce un cambio en el flujo de corriente, y debido a la naturaleza de la inductancia en el devanado, la corriente sufre una oposición al cambio de flujo tomándole cierto tiempo en alcanzar su valor máximo, este tiempo se puede calcular de la siguiente manera:

Supóngase un circuito RL básico como el mostrado en la Figura 93.

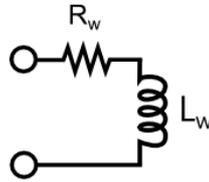


Figura 93.- Circuito RL básico.
Fuente: (Selene Co., 2011)

Si se aplica un voltaje V a los terminales abiertos del circuito se obtiene mediante la ley de voltajes de Kirchhoff o segunda ley de Kirchhoff la ecuación presentada a continuación:

$$iR_w + L_w \frac{di}{dt} = v$$

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación anterior se tiene:

$$IR_w + sIL_w = V$$

$$H = \frac{I}{V} = \frac{1}{sL_w + R_w}$$

Realizando un análisis de tiempo de respuesta con el voltaje nominal aplicado a los terminales, se tiene el resultado mostrado en la Figura 94.

Como se puede observar en el siguiente gráfico, toma 16 milisegundos en alcanzar un 98% de la corriente máxima, lo que implica que para poder obtener siempre el torque máximo en el motor, si este da 200 pasos por vuelta, al girar una vuelta completa este se demora 3.2 segundos lo que nos da una velocidad de rotación de 18.75 rpm. Esta velocidad de rotación es demasiado lenta para aplicaciones de maquinado CNC, ya que implica que una pieza pequeña se demoraría horas en procesar, por lo tanto para mejorar el tiempo de respuesta de la función de transferencia antes mostrada, se debe aplicar un controlador P, lo que se traduce en un incremento en el voltaje de alimentación. En la Figura 95 se muestra la respuesta de la función de transferencia a diferentes valores de voltaje V .

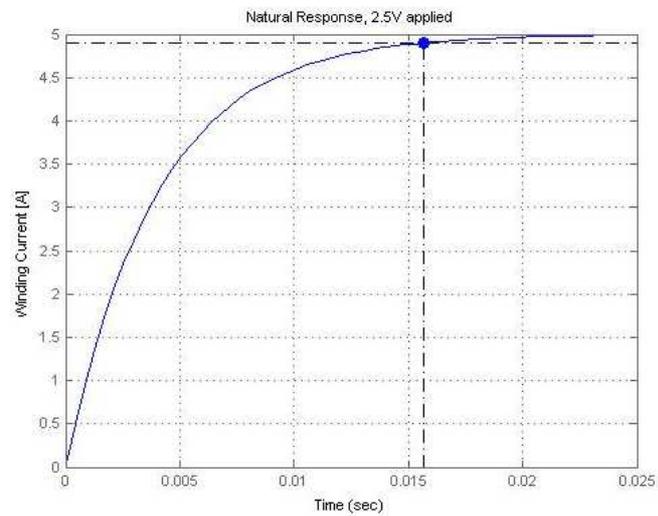


Figura 94.- Respuesta natural a una entrada escalón con amplitud 5.
Fuente: (Selene Co., 2011)

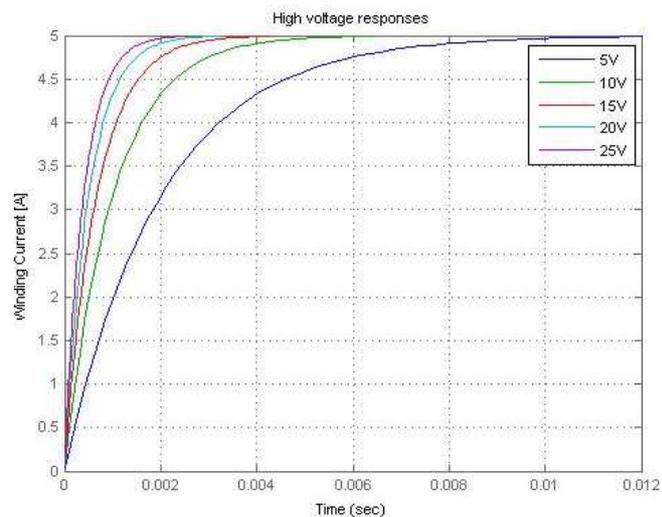


Figura 95.- Respuesta a una entrada escalón con amplitud 5 para diferentes valores de voltaje.
Fuente: (Selene Co., 2011)

En Figura 95 se ve una mejora significativa en el tiempo de respuesta, lo que implica que con un voltaje de entrada de 24 V, se tiene una velocidad máxima de 150 rpm con torque máximo. Sin embargo, al energizar el motor con un voltaje mayor al nominal la corriente tiende a aumentar, por lo que el driver debe tener incorporado un limitador de corriente que establezca la misma.

Operar en estas condiciones acarrea ventajas y desventajas expuestas a continuación:

- Ventajas
 - Mejor tiempo de respuesta, lo que implica la posibilidad de operar a mayores velocidades.
 - Mejor torque de operación en altas velocidades.
- Desventajas
 - El aumento de voltaje hará que el motor gire rígidamente (golpeteando), lo que se traduce en aumento de vibración si la velocidad es excesiva.
 - Posibilidad de entrar en resonancia o saltar un paso si la velocidad es excesiva.
 - Incremento en la temperatura del devanado lo que aumenta la temperatura del motor.
 - Si la relación torque-corriente-velocidad no es adecuado para un voltaje definido el motor producirá un ruido molesto al moverse y especialmente cuando este entra en estado de reposo ya que el motor siempre se encuentra energizado para mantener la posición.

Las desventajas son minimizadas al momento de seleccionar adecuadamente el motor y al establecer adecuadamente los parámetros de operación.

Es por esto que al momento de seleccionar un motor a pasos no se debe tomar en cuenta el voltaje nominal de este, ya que el motor puede ser energizado a voltajes superiores al nominal. Los voltajes más comunes a los que los motores a pasos funcionan son 12 V, 24 V, 36 V, 48 V, 64 V e incluso 80 V.

Entonces, para poder seleccionar adecuadamente un motor a pasos, se debe recurrir al catálogo del fabricante, y comparar las curvas de torque-velocidad de los motores para así poder encontrar un motor que opere a la velocidad requerida manteniendo el torque necesario.

3.5.1.1. Selección de tarjeta de control

Antes de seleccionar el motor debemos seleccionar, la tarjeta de control y la fuente del mismo. En el mercado existen varias tarjetas de control con diferentes tipos de comunicaciones con el computador, las tarjetas de control que funcionan con puerto paralelo serán descartadas de la selección debido a que el puerto paralelo se encuentra en desuso en la actualidad, lo ideal es una tarjeta que funcione con comunicación serial con puertos USB para una fácil comunicación con el computador. También se debe buscar que la tarjeta de control tenga varias entradas y salidas para por medio de ellas controlar la temperatura, corriente del láser y home de la mesa, principalmente. Una salida PWM es esencial para controlar la potencia del láser, por lo que la tarjeta debe incluir una salida PWM. Por todo lo expuesto anteriormente se selecciona la tarjeta de control E-Cut 3 Axis Motion Card mostrada en la Figura 96, que cuenta con salida para tres motores a pasos, 16 puertos de entrada, 8 puertos de salida, 1 puerto de salida PWM de hasta 10 V, comunicación USB y Ethernet, salida de 5 V y 2 puertos de entrada para una fuente de 12V-24V.

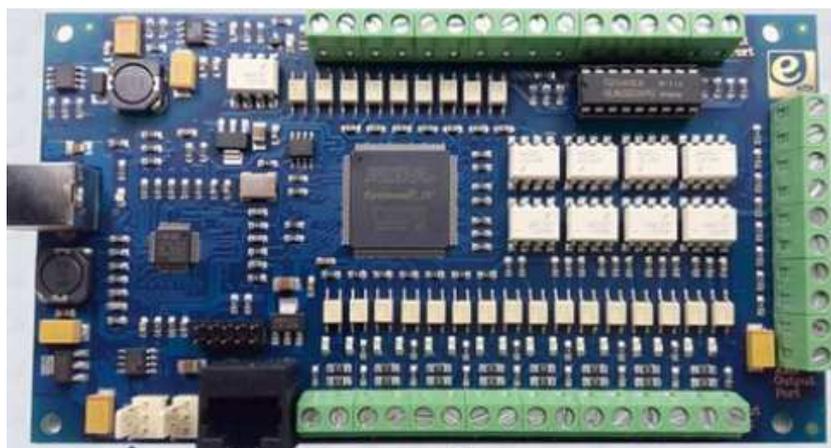


Figura 96.- e-Cut 3 Axis Motion Card.

3.5.1.2. Selección de Fuente de alimentación

La fuente de alimentación se elige basándose en dos parámetros, el primero es que brinde voltaje de alimentación a los componentes de control, como tarjeta y drivers, y el segundo es que tenga la potencia necesaria para poder alimentar a los motores a pasos.

Debido a que aún no se seleccionan los motores a pasos, se tomará como factor determinante el hecho de que pueda alimentar a la tarjeta de control. Por lo tanto la fuente de alimentación de la tarjeta debe ser una fuente de 24 V, al momento de adquirir la tarjeta de control se adquiere también la fuente con el mismo proveedor, la fuente tiene las siguientes características:

- Voltaje de entrada AC 110 V / 220 V variable con switch.
- Protección contra corto circuito, sobrecarga, sobre voltaje, y exceso de temperatura.
- Refrigeración interna por ventilador DC.
- Frecuencia de trabajo de 25 kHz.
- Voltaje de salida DC 24 V.
- Potencia de salida 250 W.

3.5.1.3. Selección de motores a pasos

Ahora, se procede a la selección del motor a pasos, una vez comparados los diferentes tipos de motores del catálogo del fabricante, en la Figura 97, se muestra la curva torque-velocidad de un motor Nema 23 que mejor se adapta a los requerimientos de la aplicación. Los requerimientos son un torque de 0.536 N.m para una velocidad máxima de 200 rpm, con un voltaje de alimentación proveído por la fuente de 24 V.

A continuación se muestran algunas de las características de los motores Nema 23 y en la Figura 98 las características del motor seleccionado.

- 2 fases.
- 200 pasos para completar 1 vuelta.
- Ángulo de paso 1.8°.
- Precisión del paso $\pm 2\%$.
- Temperatura de operación -20°C a +40°C.
- Tipo de aislamiento clase B, 130°C.
- Aislamiento de voltaje nominal 340 VDC.
- Resistencia de aislamiento 100 MΩ.

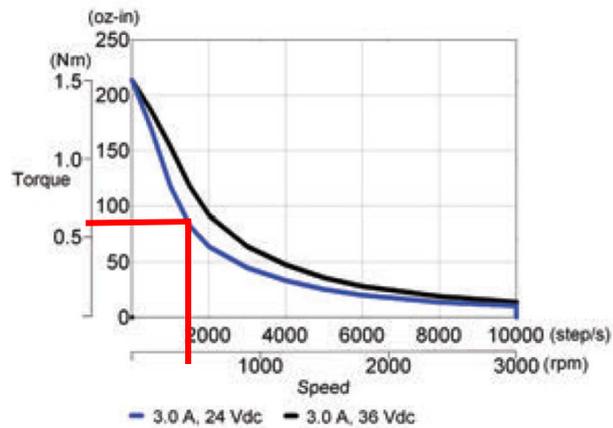


Figura 97.- Curva Torque-Velocidad de rotación para motores NEMA23 de corriente máxima de 3 A.

Fuente: (Kollmorgen)

Motor Model Number	Config.		Holding Torque (2 phases on) oz-in (Nm) +/-10%	Rated Current/Phase Amps DC	Phase Resistance Ohms +/-10%	Phase Inductance mH Typical	Detent Torque oz-in (Nm)	Thermal Resistance Mounted °C/Watt	Rotor Inertia oz-in-s ² (kg-m ² x 10 ⁻³)	Weight lb (kg)	Shaft Loading*	
	Parallel	Series									Radial Force lb (N)	Axial Force lb (N)
Short Stack	T2HxxHK	•	74 (0.52)	5.3	0.19	0.63	2.0 (0.014)	6.14	0.00154 (0.0109)	1.1 (0.50)	15 (67)	25 (111)
	T2HxxHJ	•		4.0	0.28	1.0						
	T2HxxLH	•		2.7	0.64	2.5						
	T2HxxLD	•		1.1	3.6	16						
1 Stack	T21xxHK	•	180 (1.27)	5.4	0.23	1.1	3.0 (0.021)	4.64	0.0034 (0.024)	1.5 (0.68)	15 (67)	25 (111)
	T21xxHJ	•		4.1	0.33	1.8						
	T21xxLC	•		0.4	42.9	209						
	T21xxLH	•		2.7	0.85	4.6						
	T21xxLE	•		1.4	3.0	16						
2 Stack	T22xxHK	•	280 (1.98)	6.6	0.20	0.85	6.0 (0.042)	3.69	0.0056 (0.040)	2.2 (1.0)	15 (67)	25 (111)
	T22xxHJ	•		4.1	0.49	2.5						
	T22xxLC	•		0.46	41.4	209						
	T22xxLH	•		3.3	0.75	3.4						
	T22xxLE	•		1.5	2.9	17						
	T22xxLF	•		2.5	1.8	7.1						
3 Stack	T23xxHK	•	380 (2.68)	6.0	0.28	1.5	7.0 (0.049)	3.04	0.0084 (0.059)	3.3 (1.5)	15 (67)	25 (111)
	T23xxHJ	•		3.8	0.64	3.9						
	T23xxLC	•		0.67	23.5	136						
	T23xxLH	•		3.0	1.0	6.2						
	T23xxLF	•		1.8	2.8	17						
	T23xxLE	•		1.5	4.1	24						

Figura 98.- Características de los tipos de motores Nema 23.

Fuente: (Kollmorgen)

Ahora se debe ver si la fuente es capaz de proveer la potencia necesaria para que los motores a pasos funcionen. Se aplica la ecuación 3.59 para determinar la potencia en corriente continua.

$$P = V * I \quad (3.59)$$

En donde:

- $V [V]$: Voltaje
- $I [A]$: Corriente
- $P [W]$: Potencia Eléctrica

Datos:

- $V = 24 [V]$; es el voltaje proveído por la fuente.
- $I = 3 [A]$; es la corriente máxima a la que el motor operará.

$$P = 24 * 3$$

$$P = 72 [W]$$

Al resultado anterior se multiplica por dos, debido a que son dos motores y se obtiene:

$$P = 144 [W]$$

La fuente de alimentación entrega 250 W, debido a que fue inicialmente empleada para 3 ejes de movimiento, como la potencia requerida por los motores es menor a la máxima potencia entregada por la fuente, la fuente seleccionada anteriormente sirve para la aplicación.

3.5.1.4. Selección de drivers de los motores

Una vez seleccionados los motores, se procede a seleccionar los drivers que sirvan para controlar estos motores. Lo que básicamente se busca en los drivers de los motores a pasos es que funcionen con una corriente máxima de 3 A, que funcionen a 24 V, debido a que la tarjeta de control y la fuente funcionan a 24 V, por lo que se selecciona el driver

ST330, al momento de adquirir la tarjeta de control y la fuente, se adquiere también el driver con el mismo proveedor. El driver posee las siguientes características:

- Corriente máxima de 3.0 A/phase.
- Posibilidad de conFigurar el tipo de pasos (paso completo, medio paso, ocho y dieciséis pasos).
- Posibilidad de conFigurar el torque (100%, 50%, 20% del valor nominal).
- Porcentaje del modo de decaimiento de corriente en las conmutaciones del puente H (0%, 25%, 50% y 100%).

En la Figura 99 se muestran las especificaciones del driver.

characteristics	Min	Typ	Max	Unit
Input voltage	12	24	34	V
Output current			3.5	A
VM Input current	7	10	16	mA
Pulse-frequency	0		100	KHz
Insulation resistance	500			M Ω

Figura 99.- Especificaciones del driver ST330.
Fuente: (ST330 Stepper Motor Driver Manual)

3.5.2. Diseño de placa de control de temperatura y corriente

Para el correcto funcionamiento del láser y para evitar posibles daños al tubo de CO₂, se debe tener en cuenta los parámetros de funcionamiento descritos en el manual de usuario del tubo láser de la compañía SDZLaser. Ahí se especifica que el tubo debe tener recirculación constante de agua destilada que no debe exceder los 30 °C y se recomienda que la temperatura mínima este alrededor de los 20 °C. Además la corriente máxima del láser a máximo PWM no debe exceder los 25 mA y se recomienda una corriente de 22mA a máximo PWM, la cual puede ser limitada con un potenciómetro de precisión que se encuentra en la fuente del láser.

Por lo tanto, es necesario el diseño de una placa de control que se encargue de monitorear estos valores de corriente y temperatura, y que en caso de que alguno de estos

se exceda de su límite, genere alarmas y bloquee la fuente del láser para evitar posibles daños al tubo.

Para realizar este control y monitoreo se opta por diseñar una placa controlada por medio de un Arduino Nano (basado en el AVR ATmega328), debido a que se considera que es más que suficiente para la aplicación dado a que posee entradas y salidas más que suficientes, ocupa poco espacio y presenta facilidad de montaje. El Arduino Nano presenta las siguientes características:

• Microcontrolador (AVR)	Atmel ATmega328
• Voltaje de operación	5V
• Voltaje recomendado de las entradas	7-12V
• Voltaje máximo de las entradas	6-20V
• I/O Digitales	14 (6 de PWM)
• I/O Análogas	8
• Corriente DC por cada I/O	40mA
• Memoria Flash	32 KB
• SRAM	2 KB
• EEPROM	1 KB
• Frecuencia del reloj	16 MHz
• Dimensiones	45 x 18 mm
• Peso	5 g

3.5.2.1. Etapa de adquisición de datos de corriente

Para poder medir la corriente del tubo, se conectará al cátodo del láser un amperímetro digital con 0.1 mA de resolución. Para poder determinar si la corriente excede los 25 mA, se comparará el voltaje que se genera en la resistencia Shunt del amperímetro con un voltaje de referencia. El voltaje que se genera en la resistencia Shunt, es de un valor muy pequeño, en el orden de los mV, por lo tanto este necesita ser amplificado. Para determinar las resistencias y por ende la ganancia del amplificador, es necesario conocer el valor de

la resistencia Shunt, por lo que se realiza una medición de voltaje con un multímetro al tener una lectura en el amperímetro de 22 mA. Aplicando la ley de Ohm, descrita en la ecuación 3.58, se tiene:

Datos:

- $V = 1 [mV]$; es el voltaje medido con un multímetro en la resistencia Shunt del amperímetro digital.
- $I = 22 [mA]$; es la corriente registrada en el amperímetro digital.

$$R_{Shunt} = \frac{1}{22}$$

$$R_{Shunt} = 0.0455 [\Omega]$$

A continuación, en la Figura 100, se presenta el circuito de amplificación del voltaje usando un amplificador operacional de instrumentación MCP6002 conectado en modo diferencial, de tal manera que compare el voltaje de la resistencia Shunt del amperímetro.

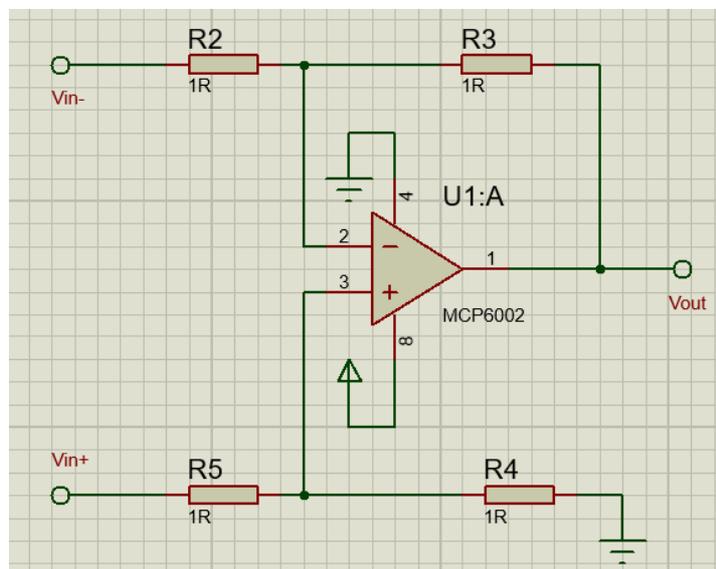


Figura 100.- Circuito de amplificación diferencial de voltaje.

Para poder determinar los valores de las resistencias R2, R3, R4 y R5, se aplicará la fórmula de amplificación diferencial descrita a continuación en la ecuación 3.60:

$$V_{out} = \frac{R3}{R2} (V_{in+} - V_{in-}) \quad (3.60)$$

Para $R2 = R5$ y $R3 = R4$

En donde:

- V_{in+} [mV]: Voltaje en la entrada no inversora
- V_{in-} [mV]: Voltaje en la entrada inversora
- $R2, R3, R4, R5$ [Ω]: Resistencias eléctricas para determinar la ganancia

Aplicando la ecuación 3.58 y 3.60 se tiene:

Datos:

- $R_{shunt} = 0.0455$ [Ω]; es la resistencia Shunt del amperímetro digital.
- $I = 25$ [mA]; es el valor máximo de corriente permisible en el tubo del láser.
- $V_{out} = 4$ [V]: es el valor que se quiere tener en la salida del amplificador con una corriente de 25 mA.
- $R2 = 100$ [Ω]: Resistencia tomada a priori para el cálculo de la otra resistencia.

$$V = 25 * 0.0455$$

$$V = 1.1375 \text{ [mV]} = (V_{in+} - V_{in-})$$

$$4000 = \frac{R3}{R2} * 1.1375$$

$$R3 = \frac{4000 * 100}{1.1375}$$

$$R3 = 351.648 \text{ [k}\Omega\text{]}$$

Ahora se procede al diseño de una etapa de comparación con un amplificador operacional LM193, la etapa de comparación contará con un potenciómetro de precisión de 10k en la entrada no inversora, el cual será configurado de tal manera que se obtenga en la entrada el voltaje a comparar, en este caso 4 V. A la salida del comparador se colocará una resistencia push up de tal forma que se evite el fenómeno de incertidumbre que ocurre cuando la salida del comparador sea cero, de esta manera se evita que el controlador, lea basura que interfiera con la programación. El circuito del comparador se presenta en la Figura 101.

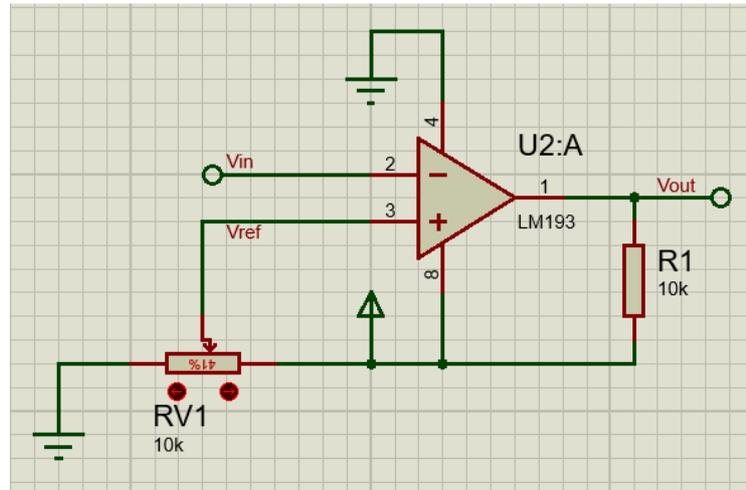


Figura 101.- Circuito de comparación de voltaje.

Se aplicará un divisor de tensión, descrito en la ecuación 3.61, para determinar el valor al cual deberá ser configurado el potenciómetro de precisión, obteniendo lo siguiente:

$$V_{out} = \frac{R1}{RT} V_T \quad (3.61)$$

En donde:

- V_T [V]: Voltaje de entrada o total
- V_{out} [V]: Voltaje de salida o voltaje en la resistencia a medir
- $R1$ [Ω]: Resistencia total del circuito
- $R1$ [Ω]: Resistencia en la que se desea calcular la tensión

Datos:

- $V_{out} = 4$ [V]; es el voltaje que debe existir entre el terminal que va a Vcc del potenciómetro de precisión y su terminal del medio.
- $V_T = 5$ [V]; es el voltaje que debe existir entre el terminal que va a Vcc y el que va a tierra del potenciómetro de precisión.
- $R = 10$ [$k\Omega$]; es la resistencia total del potenciómetro de precisión.

$$4 = \frac{R1}{10} \cdot 5$$

$$R1 = 8 [k\Omega]$$

Entonces, el circuito total de comparación y amplificación diferencial de voltaje se muestra a continuación en la Figura 102.

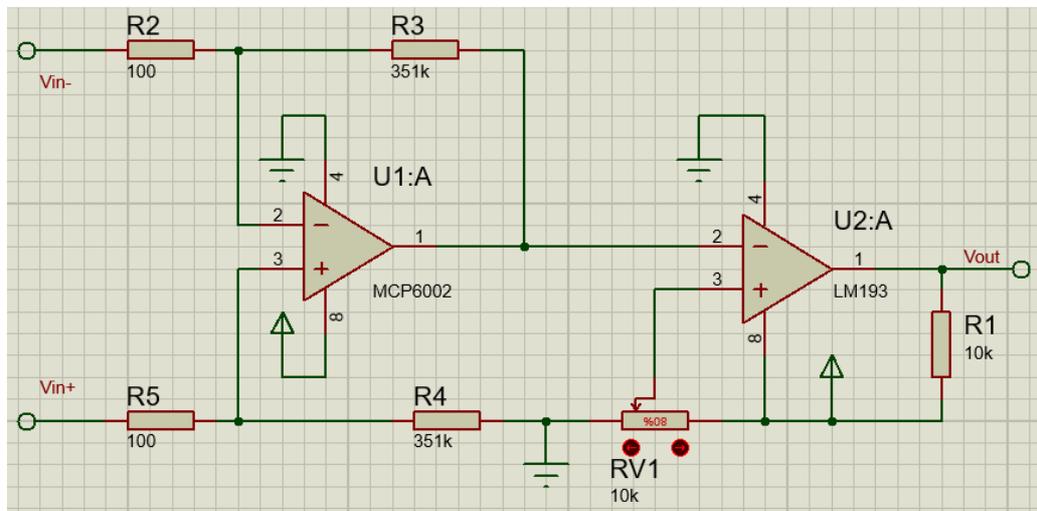


Figura 102.- Circuito de amplificación diferencial y comparación de voltaje.

3.5.2.2. Etapa de adquisición de datos de temperatura

Para la etapa de control de temperatura se necesita un sensor que sea sumergible, dado a que la temperatura a medir es la del agua destilada en el tanque. Se opta por utilizar el sensor digital de temperatura Dallas DS18B20, el cual viene con un recubrimiento de acero inoxidable que lo hace sumergible. Este sensor de temperatura es de fácil programación debido a que el dato de temperatura se recibe como un tren de pulsos de 16 bits de los cuales entre 9 y 12 bits son los que proporcionan el dato, dependiendo de la resolución programada, esta característica de los sensores digitales hace que estos no requieran un circuito de acople o amplificación. Al momento de programar el sensor, se usará una librería prediseñada para Arduino para facilitar la lectura de datos.

Por lo tanto, el cable de datos del sensor se conectará directo a una entrada del controlador y los de energización a la entrada de 5 y 0 V. La relación entre temperatura y salida digital del sensor de temperatura digital DS18B20 se muestran en la Figura 103.

2^3	2^2	2^1	2^0	2^{-1}	2^{-2}	2^{-3}	2^{-4}	LSB
MSb			(unit = °C)		LSb			
S	S	S	S	S	2^6	2^5	2^4	MSB

TEMPERATURE	DIGITAL OUTPUT (Binary)	DIGITAL OUTPUT (Hex)
+125°C	0000 0111 1101 0000	07D0h
+85°C	0000 0101 0101 0000	0550h*
+25.0625°C	0000 0001 1001 0001	0191h
+10.125°C	0000 0000 1010 0010	00A2h
+0.5°C	0000 0000 0000 1000	0008h
0°C	0000 0000 0000 0000	0000h
-0.5°C	1111 1111 1111 1000	FFF8h
-10.125°C	1111 1111 0101 1110	FF5Eh
-25.0625°C	1111 1110 0110 1111	FF6Fh
-55°C	1111 1100 1001 0000	FC90h

*The power on reset register value is +85°C.

Figura 103.- Relación entre la temperatura y la salida digital del sensor DS18B20.
Fuente: (Dallas Semiconductor, 2015)

3.5.2.3. Etapa de salidas a relés

Para poder prender y apagar el ventilador de la refrigeración y las luces pilotos de alarmas e indicadores se necesitan varias salidas a relés, en total se requieren 6 salidas de estas salidas. Si se intenta accionar la bobina de control de un relé directamente con el Arduino, se notará que ningún relé se activa, esto debido a que la corriente que suministra el Arduino para la activación del relé es insuficiente. Por lo tanto se opta por usar un transistor NPN 2N2222A conectado con emisor común para que funcione como interruptor (en corte y saturación). Lo que se hará será calcular la corriente que necesita la base del transistor para entrar en saturación y calcular la resistencia que debe tener la base para que esto ocurra y de esta manera poder disparar el relé. Las ecuaciones usadas para dicho propósito se muestran a continuación:

- Factor de amplificación (ganancia) del transistor en emisor común

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (3.62)$$

En donde:

- β : Factor de amplificación (ganancia) del transistor en emisor común
- I_C [mA]: Corriente del colector
- I_B [mA]: Corriente de la base

- Corriente de la base del transistor

$$I_B = \frac{(V_{CC} - V_{BE})}{R_B} \quad (3.63)$$

En donde:

- I_B [mA]: Corriente de la base
- V_{CC} [V]: Voltaje de polarización
- V_{BE} [V]: Voltaje de base-emisor
- R_B [Ω]: Resistencia de la base

Ahora bien, se procede a calcular la corriente del colector usando la ecuación 3.59 obteniendo los siguientes resultados:

Datos:

- $V = 5$ [V]; es el voltaje de activación de la bobina del relé, con el cual se polarizará al transistor.
- $P = 0.4$ [W]; es la potencia nominal de trabajo del relé obtenido del datasheet del relé modelo LRD-S-105D.

$$I = \frac{0.4}{5}$$

$$I = 80 \text{ [mA]} = I_C$$

El resultado anterior viene a ser la corriente existente en el colector del transistor, aplicando la ecuación 3.62 se procede a obtener el valor de la corriente de la base.

Datos:

- $I_C = 80 [mA]$; es la corriente del colector.
- $\beta = 75$; es el factor de amplificación del transistor (ganancia) obtenido del datasheet del transistor 2N2222A.

$$I_B = \frac{80}{75}$$

$$I_B = 1.07 [mA]$$

Finalmente se aplicará la ecuación 3.63 para determinar el valor de la resistencia de la base.

Datos:

- $I_B = 1.07 [mA]$; es la corriente de la base.
- $V_{CC} = 5 [V]$; es el voltaje de polarización del transistor.
- $V_{BE} = 0.7 [V]$; es el voltaje que existe entre las zonas P y N del transistor de germanio al ser polarizado.

$$R_B = \frac{(5 - 0.7)}{1.07}$$

$$R_B = 4.01 [k\Omega]$$

Del resultado anterior se puede concluir que la resistencia máxima para que se garantice la saturación del transistor debe ser de 4 k Ω , sin embargo, este es el valor umbral, es decir, si el transistor se calienta y su ganancia cambia, o si recibe interferencia, es posible que esta resistencia no garantice que el transistor trabaje en corte-saturación, por lo que se opta por usar una resistencia de 1 k Ω en la base para garantizar el funcionamiento como interruptor.

3.5.2.4. Diseño de la tarjeta PCB

Ahora bien, se procede con el diseño de la tarjeta la cual se realizará en el software Proteus 8. Primero se hace un diseño completo de la placa en el ISIS (herramienta de Proteus para el diseño de circuitos) ubicando los componentes y conectando los pines que deben unirse, se reemplazará el Arduino por dos regletas de pines para facilitar el diseño del PCB (Printed Circuit Board). A continuación, en la Figura 104, se muestra el diseño de los circuitos en ISIS.

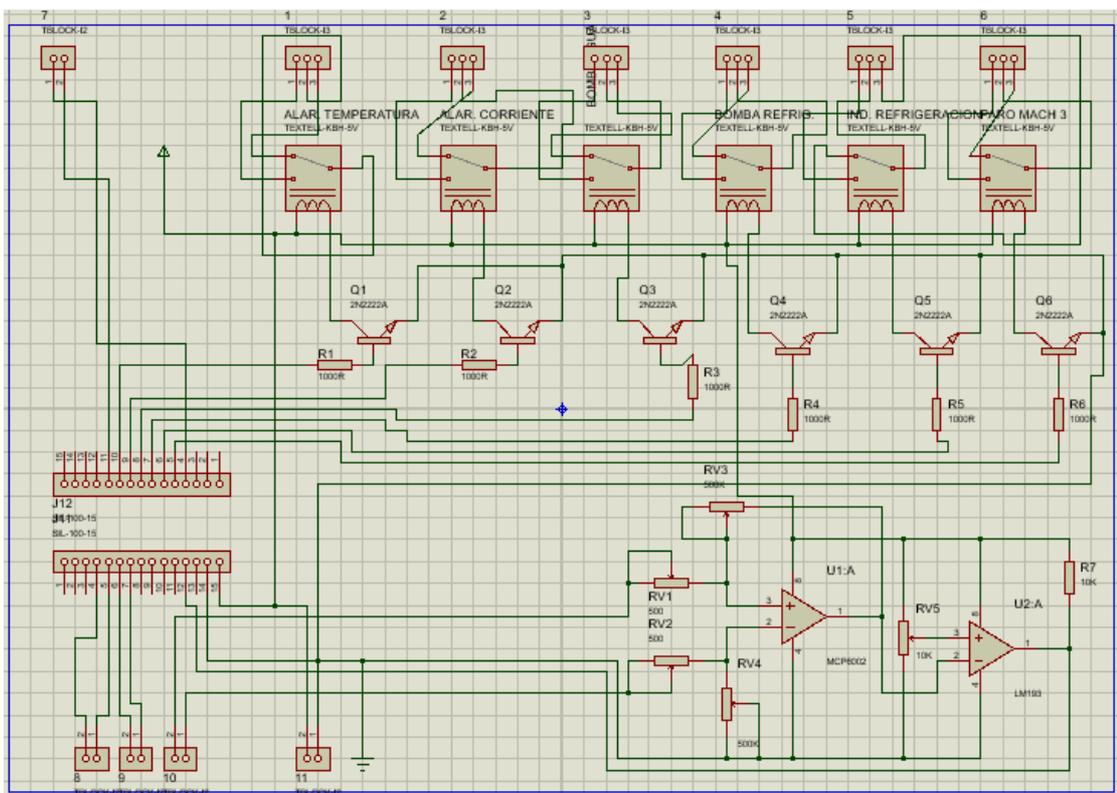


Figura 104.- Diseño de los circuitos de la placa en ISIS.

Una vez armado los circuitos se procede al diseño del PCB (Printed Circuit Board), para esto se usará el complemento de Proteus, ARES, el cual nos permite diseñar la placa con debido a que posee una base de datos con las dimensiones de los elementos seleccionados y nos permite configurar los parámetros de la tarjeta. En ARES se ubican los componentes de la tarjeta en un espacio creado con las medidas de la placa, una vez allí se deben determinar varios parámetros que influyen en el diseño, dichos parámetros son la holgura mínima que debe existir entre las pistas, la sección transversal y el ancho

de pista. Todos estos parámetros se determinan usando las recomendaciones en la norma IPC-2221, referente al diseño de circuitos impresos.

Primeramente, para hallar la holgura entre pistas, se recurre a la Figura 105, donde se presenta el espacio mínimo que debe existir entre caminos dependiendo del voltaje.

Clearances for Electrical Conductors			
Voltage (DC or Peak AC)	Internal	External (<3050m)	External (>3050m)
0-15V	0.05mm	0.1mm	0.1mm
16-30V	0.05mm	0.1mm	0.1mm
31-50V	0.1mm	0.6mm	0.6mm
51-100V	0.1mm	0.6mm	1.5mm
101-150V	0.2mm	0.6mm	3.2mm
151-170V	0.2mm	1.25mm	3.2mm
171-250V	0.2mm	1.25mm	6.4mm
251-300V	0.2mm	1.25mm	12.5mm
301-500V	0.25mm	2.5mm	12.5mm

Figura 105.- Holguras mínimas recomendadas para circuitos impresos.

Fuente: (Jones, 2004)

De la Figura 105 se concluye que la holgura ideal para la aplicación es de 0.6 mm, tomando en cuenta que el voltaje que circulará en los relés es de 110 V. Ahora bien, para el diseño, los valores de holgura, ancho y sección de pista, están medidos en mils o thou. Esta unidad de medida es equivalente a 1/1000 in, por lo tanto se deben transformar los valores obtenidos a mils. Entonces la holgura será de aproximadamente 24 mils.

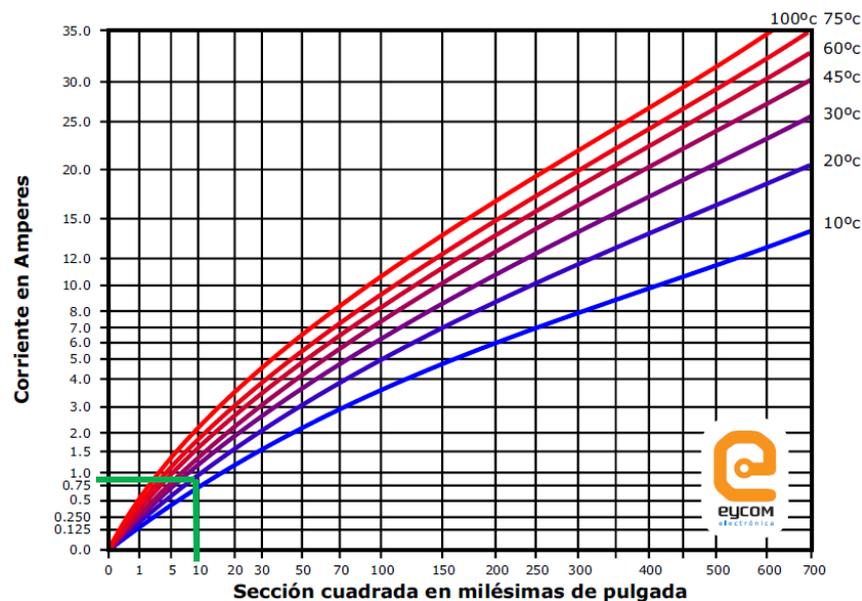


Figura 106.- Gráfica Corriente vs. Sección transversal para el diseño de circuitos impresos.

Fuente: (IPC2221, 2003)

Gracias a la Figura 106 se determina la sección transversal de las pistas. Se considera la corriente máxima que circulará por el circuito al momento de seleccionar la sección de las pistas. A las salidas de los relés se considerará la mayor carga que es el ventilador. Entonces aplicando la ecuación 3.59, se tiene:

Datos:

- $V = 110 [V]$; es el voltaje al que funciona el ventilador.
- $P = 45 [W]$; potencia consumida por el ventilador.

$$I = \frac{45}{110}$$

$$I = 409.1 [mA]$$

Ahora se analizará la corriente que circula en el Arduino, aplicando la ecuación 3.59 se tiene:

Datos:

- $V = 5 [V]$
- $I = 40 [mA] = 0.04 [A]$

$$P = 5 * 0.04$$

$$P = 0.2 [W]$$

El resultado anterior representa la potencia consumida por cada salida del Arduino, se multiplica la potencia obtenida por 22, debido a que son 22 salidas en total y se obtiene:

$$P = 0.2 * 22$$

$$P = 4.4 [W]$$

Volviendo a usar la ecuación 3.59 esta vez para determinar la corriente a la entrada del Arduino se obtiene

Datos:

- $V = 5 [V]$; es el voltaje al que funciona el Arduino.
- $P = 4.4 [W]$; potencia consumida por el Arduino.

$$I = \frac{4.4}{5}$$

$$I = 880 \text{ [mA]}$$

Entonces la corriente a considerar es la que circula por la alimentación del Arduino que será de 880 mA.

Tomando en cuenta una variación de temperatura de 20 °C en el trabajo, debido al calentamiento de las resistencias y bobinas de los relés, se tiene que la sección transversal de las pistas es de aproximadamente 10 mils². Del mismo modo, se procede a determinar el ancho de pista usando la Figura 107.

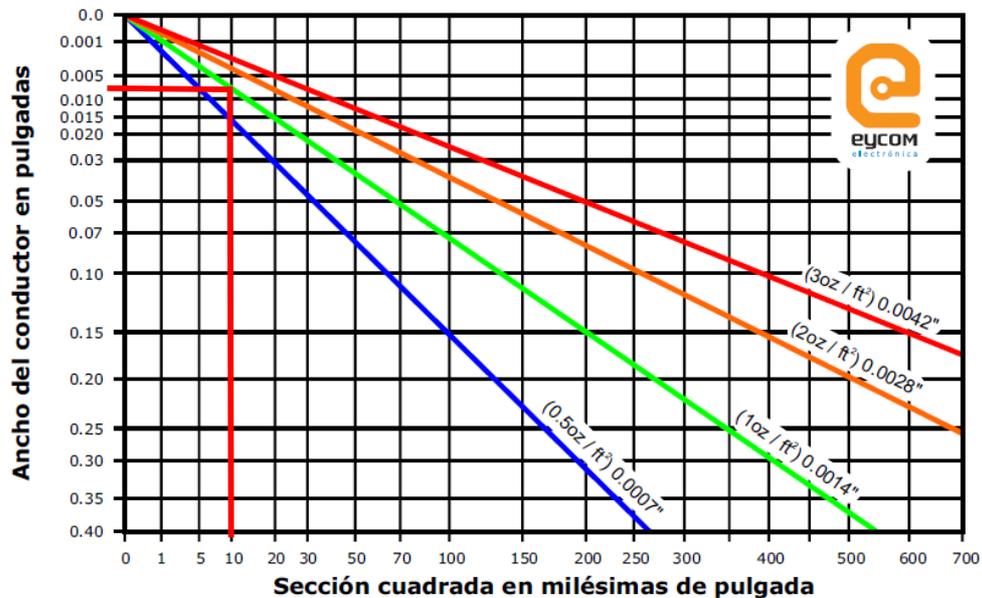


Figura 107.- Gráfica Ancho de pista vs. Sección transversal para el diseño de circuitos impresos.
Fuente: (IPC2221, 2003)

Con un espesor de cobre de 0.0014 in (1 oz/ft²) y una sección de 10 mils², se determina que el ancho de pista recomendado debe ser de aproximadamente 0.008 in como mínimo para el diseño de la placa, esto equivale a 8 mils.

Ahora se procede con el diseño, se tomará como holgura 25 mils y como ancho de pista 12 mils, por seguridad siempre se debe tomar valores superiores a los mínimos

determinados. En la Figura 108 se presenta el diseño PCB de la tarjeta completo, incluido ruteo.

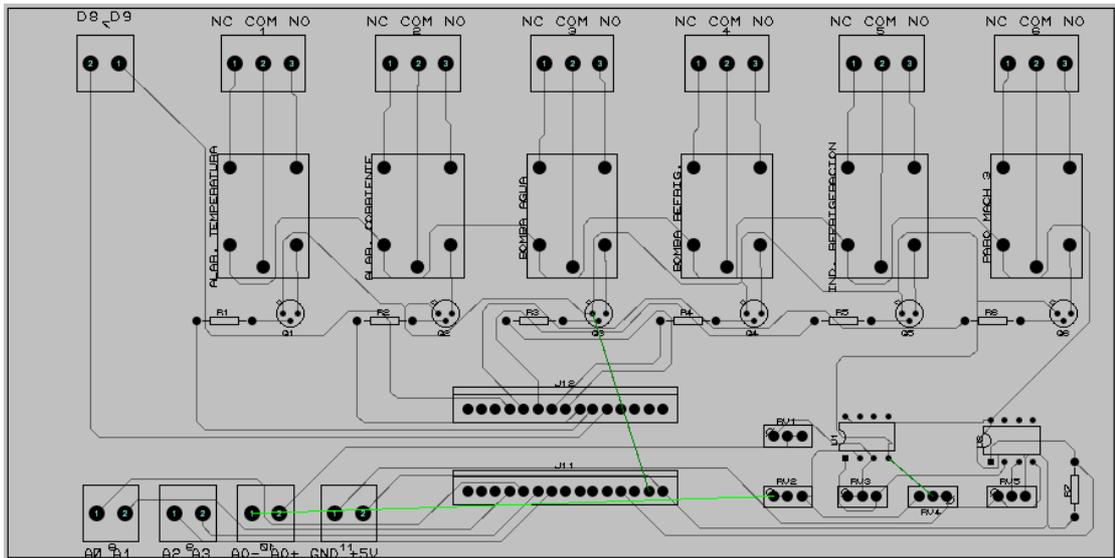


Figura 108.- Diseño PCB de la tarjeta de control en ARES.

Finalmente, en la Figura 109, se presenta un modelo en 3D de la tarjeta de control, donde se puede ver la disposición de los elementos de una manera más clara.

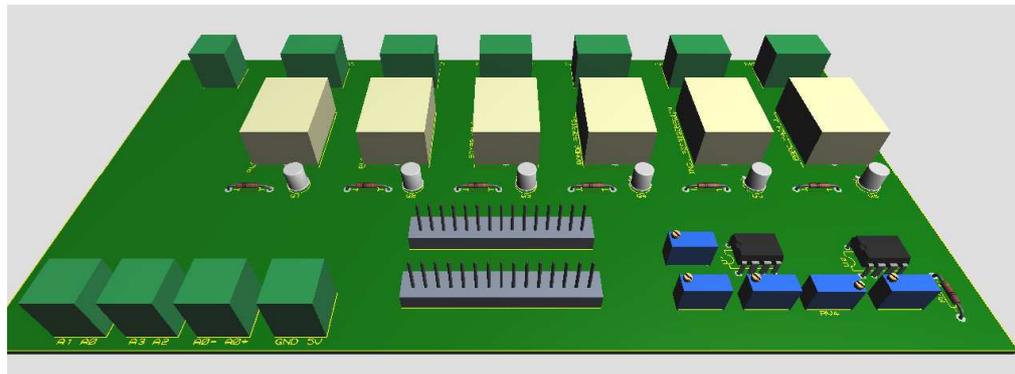


Figura 109.- Modelo en 3D de la tarjeta de control.

3.5.3. Diseño del armario de control y del panel de controles e indicadores

Al momento de diseñar la estructura de la máquina, se pensó en dejar un espacio libre al lado derecho de la misma, la finalidad de este espacio es albergar el armario de control de la máquina, el cual contendrá todos los elementos eléctricos y electrónicos

seleccionados anteriormente, los cuales son necesarios para el funcionamiento automático de la máquina.

También se dejó un panel en el lado derecho de la máquina, el cual tendrá montado en él, todos los elementos básicos necesarios para poder encender, parar y monitorear la máquina cuando esta opere.

3.5.3.1. Diseño del armario de control

Primeramente, se procederá a diseñar el armario de control, determinando la ubicación de los elementos que van en el mismo. Se tiene que tomar en cuenta que la fuente del láser, no puede estar cerca de los elementos electrónicos de control, esto debido a que a la salida de la fuente se tiene un voltaje de media tensión de aproximadamente 18kV. Si la fuente se encontrara montada en la misma placa que los demás elementos, podría causar interferencia en las tarjetas, haciendo que la máquina funcione deficientemente si recibe ruido.

Por otro lado, todos los demás componentes electrónicos, como la fuente de 110V, la tarjeta E-Cut, los drivers y la placa del Arduino, deberán ser ubicadas cerca una de la otra para de esta manera ahorrar cable y facilitar la conexión.

A continuación, en la Figura 110, se tiene un modelo CAD del espacio para el armario de control y la placa que soportará los elementos electrónicos.

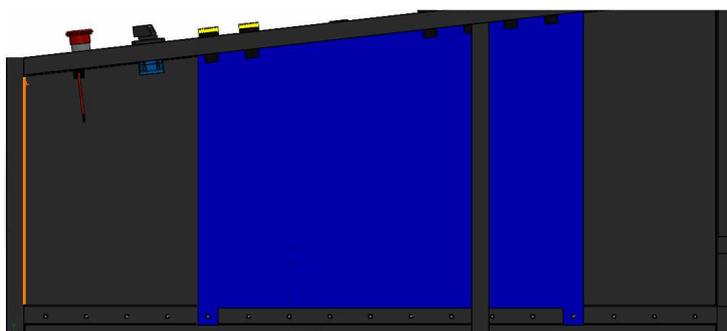


Figura 110.- Espacio destinado para el armario de control.

Se debe ubicar la fuente del láser cerca del tubo. En la parte de abajo del láser, existe un perfil cuadrado, la fuente será ubicada ahí, de esta manera está lejos de los componentes

electrónicos y cerca del tubo de CO₂. En la Figura 111, se observa la ubicación de la fuente en el interior de la máquina.

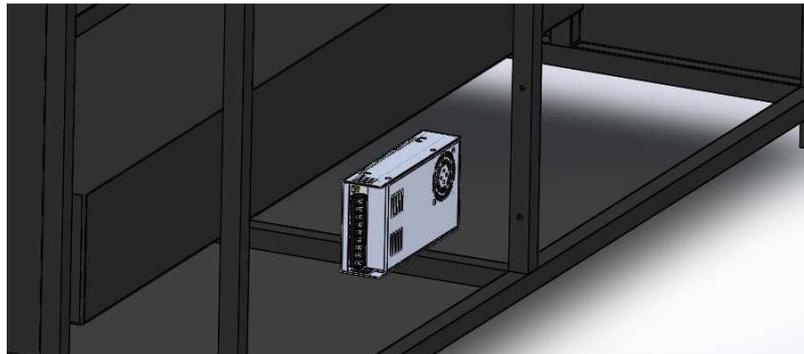


Figura 111.- Ubicación de la fuente del láser en el interior de la máquina.

Ahora se procede a ubicar los demás componentes electrónicos en la placa de soporte, se ubican los drivers de los motores justo debajo de la tarjeta de control debido a que se facilita la conexión, ya que las salidas de los pines para los drivers están en la parte inferior de la tarjeta. El Arduino se encuentra en la parte derecha, debajo de la fuente de control, ya que de esta manera queda más cerca de la refrigeración y de la fuente del láser, lo que facilita las conexiones de la tarjeta de este.

En la Figura Figura 112 se muestra la ubicación de los elementos electrónicos en el armario.

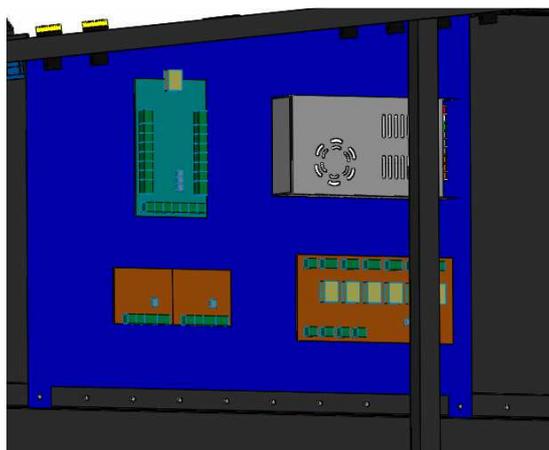


Figura 112.- Ubicación de los elementos electrónicos en el armario de control.

Adicionalmente de estos elementos, se debe ubicar las protecciones. Se colocará una regleta DIN con 3 porta fusibles como se muestra en la Figura 113.

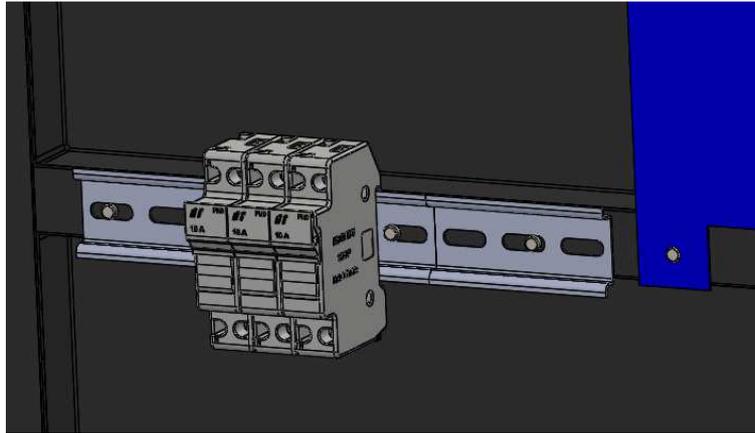


Figura 113.- Ubicación de los porta fusibles en el armario de control.

Ahora se deben ubicar canaletas para el cableado, las canaletas seleccionadas son modelo Dexon DXN10051, las cuales son de 20x12 mm de sección transversal. En la Figura 114, se muestra la ubicación de las canaletas en el armario de control, las cuales albergarán el cableado para mantener los cables organizados.

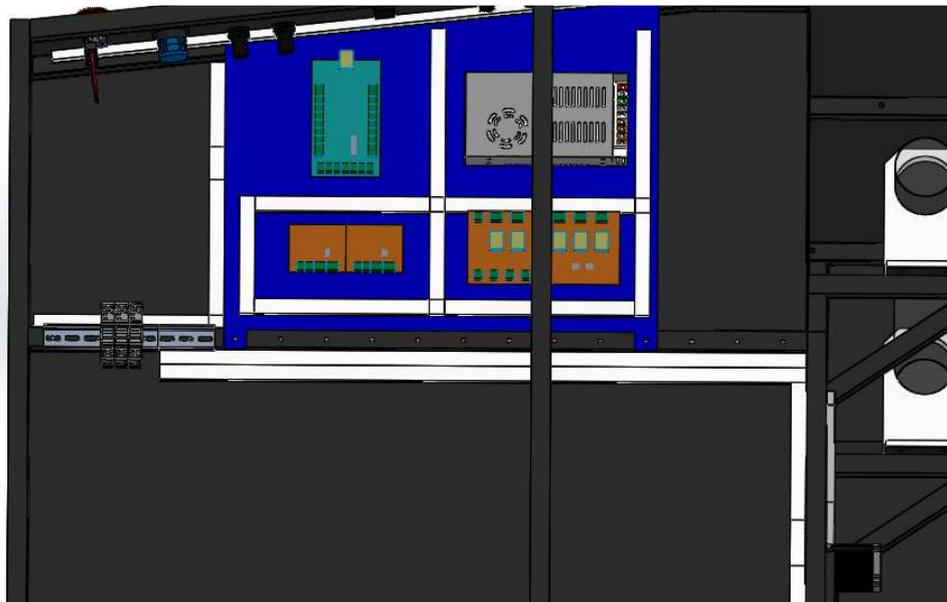


Figura 114.- Ubicación de las canaletas en el armario.

3.5.3.2. Diseño del panel de controles e indicadores

Básicamente el HMI (interfaz humano máquina) de la máquina será el software de control MACH3, donde el usuario podrá controlar, y programar el robot cartesiano y el láser, además de monitorear el estado del proceso. Sin embargo el software no presenta toda la información que el usuario necesita. Por lo tanto, se opta por diseñar un panel de controles e indicadores en una de las placas de la máquina.

Para el diseño se siguen las recomendaciones de la guía ergonómica para el diseño de interfaces de supervisión, aunque esta guía está enfocada principalmente en el diseño de sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), se tiene una buena referencia de cómo debe ser la arquitectura, distribución y colores de los indicadores para que el panel sea una interfaz amigable, intuitiva y de fácil entendimiento para el operario.

Se ha separado el panel de controles e indicadores principalmente en dos zonas las cuales se muestran en la Figura 115.

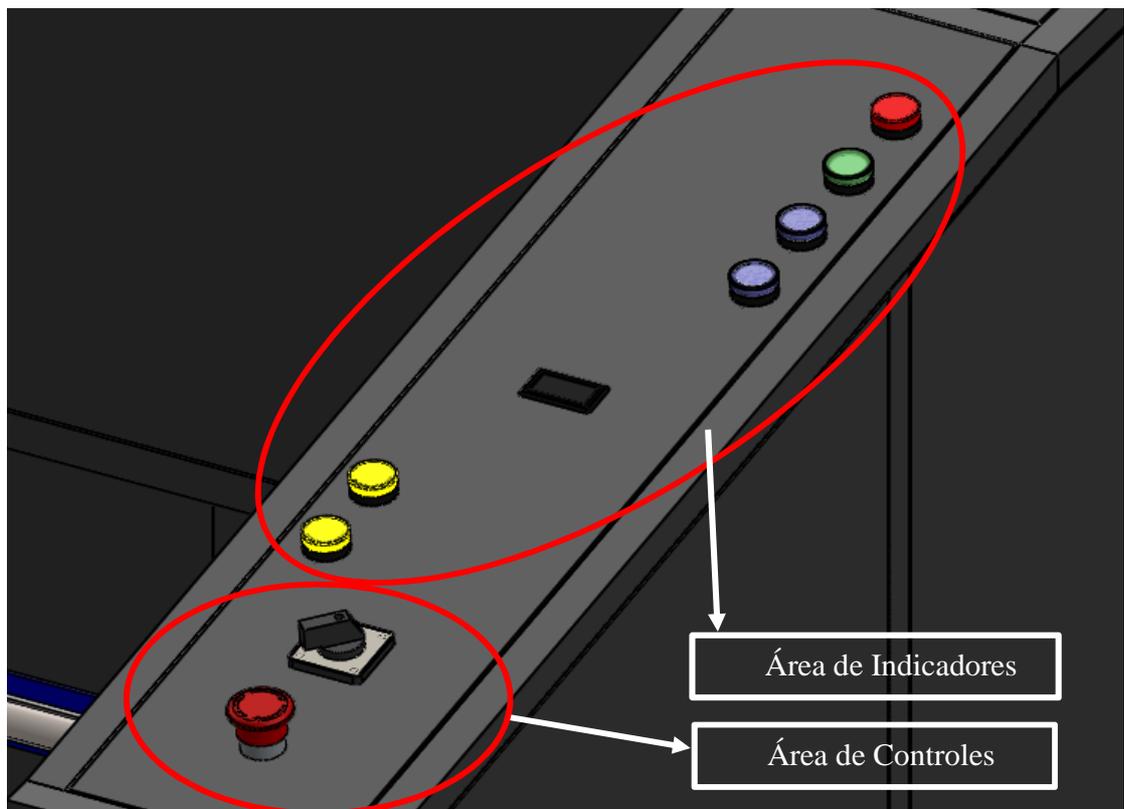


Figura 115.- Panel de controles e indicadores.

El área de controles se encuentra en la parte inferior del panel debido a que de esta manera es de fácil acceso para el usuario, por esta misma razón es que el primer botón, de abajo hacia arriba, es el paro de emergencia. El paro de emergencia es el botón más importante de toda máquina y toda HMI, debe estar ubicado de tal forma que sea de fácil acceso para disminuir el tiempo de reacción del operario ante una situación de peligro y como se muestra en la Figura 115, se encuentra ubicado en una zona donde va a estar el usuario la mayor parte del tiempo, cerca de la mesa y del computador.

El interruptor de encendido se encuentra sobre el paro de emergencia, es visible para determinar con facilidad si la máquina está encendida o apagada.

El área de indicadores se encuentra subdividida en 3 zonas, como se muestra en la Figura 116.

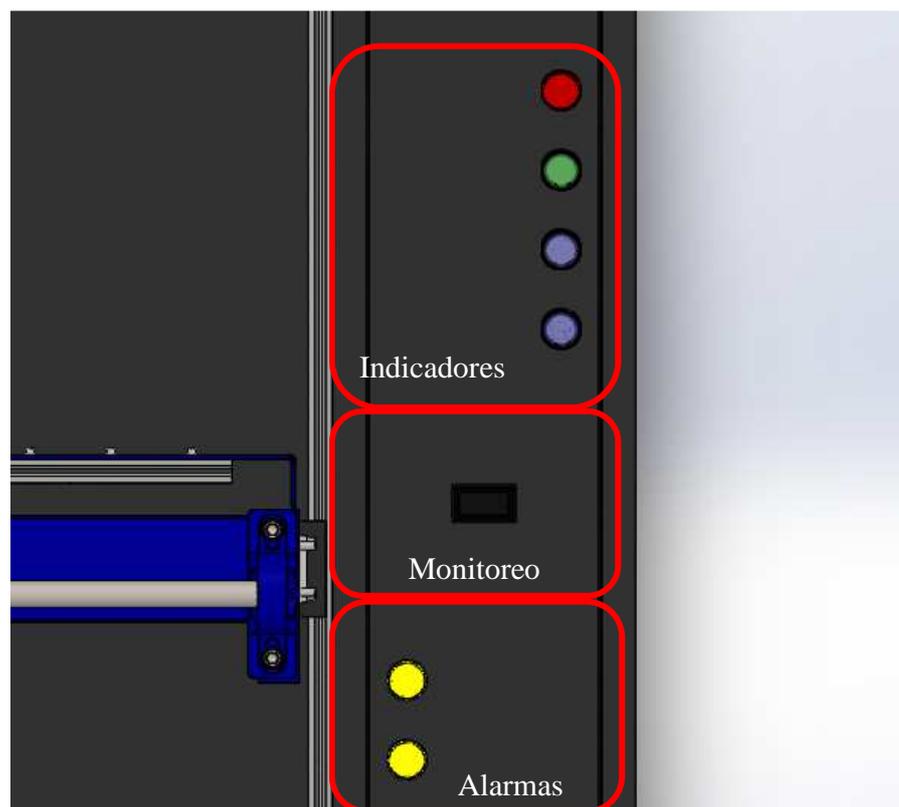


Figura 116.- Área de indicadores del panel.

Las alarmas, viendo de abajo hacia arriba, son las primeras luces pilotos con las que el usuario se encuentra, están en esta posición debido a que después del botón de paro de

emergencia, son la segunda cosa más importante de una interfaz y deben estar en una zona donde se detecte rápidamente que una alarma está activada. La finalidad de las alarmas es alertar al usuario que algo fuera de lo normal está ocurriendo con el proceso. En el caso de la cortadora láser se tienen dos alarmas, la primera alerta al usuario que existe una temperatura elevada en el tubo y para evitar que este sufra daños, se pausará automáticamente el programa de MACH3 y se bloqueará la fuente del láser.

La segunda alarma alerta al usuario que existe exceso de corriente en la línea de alimentación del tubo, de la misma forma que la alarma anterior, se parará el programa y bloqueará la fuente para evitar daños al tubo. La guía GEDIS recomienda que el color de las luces pilotos de las alarmas sean específicamente de color amarillo para no confundirse con otros indicadores.

Después de la zona de alarmas se tiene la zona de monitoreo, donde se encuentra el amperímetro y el usuario puede ver en tiempo real la corriente que circula por la línea del tubo láser. El amperímetro provee al usuario información extra del estado del láser, debido a que viendo la magnitud de corriente que circula por el tubo, se puede determinar si el láser está apagado, prendido o en un valor específico de PWM. Es importante que el usuario se cerciore que el valor marcado en el amperímetro muestre una corriente de 0 antes de manipular las piezas que se encuentren en el área de trabajo.

Finalmente se tiene la zona de indicadores, en esta zona se encuentran las luces piloto cuya finalidad es dar información general al usuario sobre el estado de la máquina. En esta zona se tiene los indicadores de refrigeración, fuente láser, encendido de la máquina y paro de emergencia.

La guía GEDIS recomienda el uso de luces piloto de color rojo para alarmas críticas y paro de emergencia, el color verde para el indicador de encendido de máquina y el color azul para indicadores que proporcionen información general, como es el caso de las luces piloto de la fuente del láser y la refrigeración, las cuales muestran si las mismas se encuentran en funcionamiento o bloqueadas. De esta manera, si un indicador no funciona se puede determinar rápidamente cual podría ser el posible problema que se tiene y repararlo con prontitud.

3.5.4. Caída de tensión, selección de cables y protecciones

Para determinar el calibre de los cables a usar, es necesario considerar la caída de voltaje que debe existir en las líneas. Para determinar la caída de tensión máxima admisible en la línea se usa la ecuación mostrada a continuación:

- Caída de tensión máxima admisible

$$\Delta V = \frac{V * \% \Delta V}{100} \quad (3.64)$$

En donde:

- ΔV : Caída de tensión máxima admisible en la línea [V]
- V : Tensión nominal en la línea [V]
- $\% \Delta V$: Porcentaje de caída de tensión permitida en la línea

Una vez obtenido el valor de caída de tensión máxima admisible, se procede a calcular el área transversal del cable a utilizar, para dicho cálculo se usa la siguiente ecuación:

- Área transversal del cable conductor, cálculo para circuitos monofásicos

$$A = \frac{2 * \rho * I * L}{\Delta V} \quad (3.65)$$

En donde:

- A : Área transversal del cable conductor [mm²]
- ρ : Resistividad del cable conductor [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]
- I : Intensidad de corriente en la línea [A]
- L : Longitud total del conductor, desde la alimentación al nodo más lejano del circuito [m]
- ΔV : Caída de tensión máxima admisible en la línea [V]

Una vez determinada el área transversal del cable, se determina el calibre del mismo basado en la Figura 117.

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

Figura 117.- Área transversal y diámetros de cable según el calibre AWG.
Fuente: (Electro Cables C.A.)

3.5.4.1. Caída de tensión en el circuito de potencia

Para poder obtener la caída de tensión del circuito de potencia se debe determinar los elementos que pertenecen al mismo. El circuito de potencia está conformado por todas las cargas existentes desde el tomacorriente hasta la fuente de 24V que alimenta la tarjeta de control, drivers y motores. En total existen 5 luces pilotos de 110 V y 20 mA, la fuente de 230 W, la bomba de recirculación de agua de 80 W y el ventilador de la refrigeración de 45 W como cargas al circuito. Todas las cargas se encuentran conectadas en paralelo en el mismo circuito, por lo que las cargas se deben sumar, entonces usando la ecuación 3.59 para calcular la potencia de las luces se tiene:

Datos:

- $V = 110 [V]$
- $I = 20 [mA] = 0.02 [A]$

$$P = 110 * 0.02$$

$$P = 2.2 [W]$$

El resultado anterior representa la potencia consumida por un foco, se multiplica la potencia obtenida por 5, debido a que son 5 luces piloto y se obtiene:

$$P = 2.2 * 5$$

$$P = 11 [W]$$

A la potencia anterior se le debe sumar la potencia consumida por la fuente, la bomba y el ventilador para obtener la carga total, entonces:

$$P = 11 + 230 + 80 + 45$$

$$P = 366 [W]$$

Ahora se procede a definir una caída de tensión. La caída de tensión no debe superar el 5% desde la toma de voltaje hasta el punto más alejado del circuito, si esta caída de tensión supera este rango es posible que la fuente se apague súbitamente si hay variaciones de voltaje en la línea o que los motores no funcionen a la velocidad deseada. Como se tiene diferentes etapas, etapa de potencia, etapa de control, etapa de motores en el circuito se establecerá que cada etapa deberá tener una caída de tensión máxima del 1%, de esta manera, aplicando la ecuación 3.64 para calcular la caída de tensión admisible en la etapa de potencia, se tiene:

Datos:

- $V = 110 [V]$
- $\% \Delta V = 1\%$

$$\Delta V = \frac{110 * 1}{100}$$

$$\Delta V = 1.1 [V]$$

La longitud total del circuito, considerando que se usará una extensión de 10 m, el cual será conectado al toma corrientes más cercano será:

Datos:

- $L1 = 10 [m]$; longitud total de la extensión.
- $L2 = 5.5 [m]$; distancia desde el punto final de la extensión hasta la fuente pasando por las 5 luces piloto.

$$L = L1 + L2$$

$$L = 10 + 5.5$$

$$L = 15.5 [m]$$

De la ecuación 3.59 se despeja la variable I para obtener la corriente total que pasa por el circuito y se obtiene:

Datos:

- $V = 110 [V]$
- $P = 366 [W]$

$$I = \frac{366}{110}$$

$$I = 3.33 [A]$$

Ahora, aplicando la ecuación 3.65 con la información obtenida anteriormente para determinar la sección del cable se tiene:

Datos:

- $L = 15.5 [m]$; longitud total del circuito.
- $\Delta V = 1.1 [V]$; caída de tensión máxima admisible.
- $I = 3.33 [A]$; corriente total del circuito.
- $\rho = 0.01724 \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right]$; resistividad del Cu a 20 °C.

$$A = \frac{2 * 0.01724 * 3.33 * 15.5}{1.1}$$

$$A = 1.62 [mm^2]$$

Por lo tanto, basándose en la información presentada en la Figura 117, se elige un conductor de calibre AWG 14 para las conexiones del circuito de potencia de 110V. Una vez seleccionado el calibre del cable, se despeja la variable ΔV de la ecuación 3.65, para obtener la caída de tensión real, entonces se tiene:

Datos:

- $L = 15.5 [m]$; longitud total del circuito.
- $A = 2.08 [mm^2]$; sección del conductor AWG calibre 14.
- $I = 3.33 [A]$; corriente total del circuito.
- $\rho = 0.01724 \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right]$; resistividad del Cu a 20 °C.

$$\Delta V = \frac{2 * 0.01724 * 3.33 * 15.5}{2.08}$$

$$\Delta V = 0.86 [V]$$

Para determinar el porcentaje de caída de tensión real de la ecuación 3.64 se despeja la variable $\% \Delta V$ y se obtiene:

Datos:

- $V = 110 [V]$
- $\Delta V = 0.86 [V]$

$$\% \Delta V = \frac{100 * 0.86}{110}$$

$$\% \Delta V = 0.78\%$$

3.5.4.2. Caída de tensión en los circuitos de control

Para poder obtener la caída de tensión del circuito de control se debe determinar los elementos que pertenecen al mismo. El circuito de control está conformado por todas las cargas existentes desde la fuente de 24V hasta las tarjetas de control. En total existen 2 cargas, la tarjeta E-cut y la del Arduino. La tarjeta del Arduino está conectada a la fuente de 5 V que tiene la tarjeta E-cut, por lo tanto se debe sumar la carga de la tarjeta del Arduino a la carga de las salidas de la tarjeta de control, entonces usando la ecuación 3.59 para calcular la potencia de la tarjeta del Arduino se tiene:

Datos:

- $V = 5 [V]$
- $I = 40 [mA] = 0.04 [A]$

$$P = 5 * 0.04$$

$$P = 0.2 [W]$$

El resultado anterior representa la potencia consumida por cada salida del Arduino, se multiplica la potencia obtenida por 22, debido a que son 22 salidas en total y se obtiene:

$$P = 0.2 * 22$$

$$P = 4.4 [W]$$

Del mismo modo se procede a calcular la potencia de la tarjeta e-Cut, se debe determinar la potencia consumida por cada pin. En el manual de usuario se especifica el voltaje provisto por cada salida y su corriente consumida, entonces usando la ecuación 3.59 para calcular la potencia en las entradas de propósito general se tiene:

Datos:

- $V = 24 [V]$
- $I = 500 [mA] = 0.5 [A]$
- *# total de pines = 6*

$$P = 24 * 0.5 * 6$$

$$P = 72 [W]$$

Ahora, usando la ecuación 3.59 para calcular la potencia en las salidas de propósito general se tiene:

Datos:

- $V = 5 [V]$
- $I = 7 [mA] = 0.007 [A]$
- *# total de pines = 15*

$$P = 5 * 0.007 * 15$$

$$P = 0.52 [W]$$

Se procede a calcular la potencia en las salidas a los drivers usando la ecuación 3.59 y se tiene:

Datos:

- $V = 5 [V]$
- $I = 30 [mA] = 0.03 [A]$
- # total de pines = 6

$$P = 5 * 0.03 * 6$$

$$P = 0.9 [W]$$

Ahora, usando la ecuación 3.59 para calcular la potencia en la salida de PWM se tiene:

Datos:

- $V = 5 [V]$
- $I = 6 [mA] = 0.006 [A]$

$$P = 5 * 0.006$$

$$P = 0.03 [W]$$

Se suman todas las potencias calculadas para obtener la carga total, entonces:

$$P = 4.4 + 72 + 0.52 + 0.9 + 0.03$$

$$P = 77.85 [W]$$

Como se definió anteriormente, cada etapa deberá tener una caída de tensión máxima del 1%, de esta manera, aplicando la ecuación 3.64 para calcular la caída de tensión admisible en el circuito control, se tiene:

Datos:

- $V = 24 [V]$
- $\% \Delta V = 1\%$

$$\Delta V = \frac{24 * 1}{100}$$

$$\Delta V = 0.24 [V]$$

La longitud total del circuito será:

Datos:

- $L1 = 1 [m]$; distancia de la fuente a la tarjeta e-Cut.

- $L2 = 0.5 [m]$; distancia de la tarjeta e-Cut a la tarjeta del Arduino.

$$L = L1 + L2$$

$$L = 1 + 0.5$$

$$L = 1.5 [m]$$

De la ecuación 3.59 se despeja la variable I para obtener la corriente total que pasa por el circuito y se obtiene:

Datos:

- $V = 24 [V]$
- $P = 77.85 [W]$

$$I = \frac{77.85}{24}$$

$$I = 3.24 [A]$$

Ahora, aplicando la ecuación 3.65 con la información obtenida anteriormente para determinar la sección del cable se tiene:

Datos:

- $L = 1.5 [m]$; longitud total del circuito.
- $\Delta V = 0.24 [V]$; caída de tensión máxima admisible.
- $I = 3.24 [A]$; corriente total del circuito.
- $\rho = 0.01724 \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right]$; resistividad del Cu a 20 °C.

$$A = \frac{2 * 0.01724 * 3.24 * 1.5}{0.24}$$

$$A = 0.698 [mm^2]$$

Por lo tanto, basándose en la información presentada en la Figura 117, se elige un conductor de calibre AWG 18 para las conexiones del circuito de control. Una vez seleccionado el calibre del cable, se despeja la variable ΔV de la ecuación 3.65, para obtener la caída de tensión real, entonces se tiene:

Datos:

- $L = 1.5 [m]$; longitud total del circuito.
- $A = 0.82 [mm^2]$; sección del conductor AWG calibre 18.
- $I = 3.24 [A]$; corriente total del circuito.
- $\rho = 0.01724 \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right]$; resistividad del Cu a 20 °C.

$$\Delta V = \frac{2 * 0.01724 * 3.24 * 1.5}{0.82}$$

$$\Delta V = 0.204 [V]$$

Para determinar el porcentaje de caída de tensión real de la ecuación 3.64 se despeja la variable $\% \Delta V$ y se obtiene:

Datos:

- $V = 24 [V]$
- $\Delta V = 0.204 [V]$

$$\% \Delta V = \frac{100 * 0.204}{24}$$

$$\% \Delta V = 0.85\%$$

3.5.4.3. Caída de tensión en los circuitos de motores

Para poder obtener la caída de tensión en el circuito de los motores se deben determinar los elementos que conforman este. El circuito de los motores está conformado por un driver y un motor, existen dos circuitos, el del motor del eje X y el del motor del eje Y. Para poder determinar el diámetro del cable, se debe elegir el circuito con mayor longitud, por lo que se usará el circuito del motor del eje X para determinar el calibre del cable. Primero se determina la potencia que consumen las cargas que son el motor y el driver. Entonces se tiene que para el motor la potencia es 72 W, esto fue calculado anteriormente al momento de seleccionar la fuente de alimentación, mientras que para el driver, basándonos en la información obtenida en la Figura 99, se obtiene aplicando la ecuación 3.59:

Datos:

- $V = 24 [V]$
- $I = 16 [mA] = 0.016 [A]$

$$P = 24 * 0.016$$

$$P = 0.384 [W]$$

Sumando la potencia del motor y la del driver se obtiene la carga total, entonces:

$$P = 0.384 + 72$$

$$P = 72.384 [W]$$

Como se definió anteriormente, cada etapa deberá tener una caída de tensión máxima del 1%, de esta manera, aplicando la ecuación 3.64 para calcular la caída de tensión admisible en el circuito del motor del eje X, se tiene:

Datos:

- $V = 24 [V]$
- $\% \Delta V = 1\%$

$$\Delta V = \frac{24 * 1}{100}$$

$$\Delta V = 0.24 [V]$$

La longitud total del circuito será:

Datos:

- $L1 = 0.07 [m]$; distancia desde de la fuente hasta el driver.
- $L2 = 2.5 [m]$; distancia desde el driver hasta el motor del eje X.

$$L = L1 + L2$$

$$L = 2.5 + 0.07$$

$$L = 2.57 [m]$$

De la ecuación 3.59 se despeja la variable I para obtener la corriente total que pasa por el circuito y se obtiene:

Datos:

- $V = 24 [V]$
- $P = 72.384 [W]$

$$I = \frac{72.384}{24}$$

$$I = 3.016 [A]$$

Ahora, aplicando la ecuación 3.65 con la información obtenida anteriormente para determinar la sección del cable se tiene:

Datos:

- $L = 2.57 [m]$; longitud total del circuito.
- $\Delta V = 0.24 [V]$; caída de tensión máxima admisible.
- $I = 3.016 [A]$; corriente total del circuito.
- $\rho = 0.01724 \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right]$; resistividad del Cu a 20 °C.

$$A = \frac{2 * 0.01724 * 3.016 * 2.57}{0.24}$$

$$A = 1.11 [mm^2]$$

Por lo tanto, basándose en la información presentada en la Figura 117, se elige un conductor de calibre AWG 16 para las conexiones de los circuitos de los motores. Una vez seleccionado el calibre del cable, se despeja la variable ΔV de la ecuación 3.65, para obtener la caída de tensión real en el motor del eje X, entonces se tiene:

Datos:

- $L = 2.57 [m]$; longitud total del circuito.
- $A = 1.31 [mm^2]$; sección del conductor AWG calibre 16.
- $I = 3.016 [A]$; corriente total del circuito.
- $\rho = 0.01724 \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right]$; resistividad del Cu a 20 °C.

$$\Delta V = \frac{2 * 0.01724 * 3.016 * 2.57}{1.31}$$

$$\Delta V = 0.204 [V]$$

Para determinar el porcentaje de caída de tensión real en el motor del eje X, de la ecuación 3.64 se despeja la variable $\% \Delta V$ y se obtiene:

Datos:

- $V = 24 [V]$
- $\Delta V = 0.204 [V]$

$$\% \Delta V = \frac{100 * 0.204}{24}$$

$$\% \Delta V = 0.85\%$$

Ahora, para obtener la caída de tensión real en el motor del eje Y, se considera la misma carga eléctrica debido a que el circuito lo conforman un motor y un driver del mismo modelo. Se calcula la longitud total del cable desde la fuente al motor.

Datos:

- $L1 = 0.07 [m]$; distancia desde de la fuente hasta el driver.
- $L2 = 1.5 [m]$; distancia desde el driver hasta el motor del eje Y.

$$L = L1 + L2$$

$$L = 1.5 + 0.07$$

$$L = 1.57 [m]$$

Se despeja la variable ΔV de la ecuación 3.65. Entonces se tiene:

Datos:

- $L = 1.57 [m]$; longitud total del circuito.
- $A = 1.31 [mm^2]$; sección del conductor AWG calibre 16.
- $I = 3.016 [A]$; corriente total del circuito.
- $\rho = 0.01724 \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right]$; resistividad del Cu a 20 °C.

$$\Delta V = \frac{2 * 0.01724 * 3.016 * 1.57}{1.31}$$

$$\Delta V = 0.125[V]$$

Para determinar el porcentaje de caída de tensión real en el motor del eje Y, de la ecuación 3.64 se despeja la variable $\% \Delta V$ y se obtiene:

Datos:

- $V = 24 [V]$
- $\Delta V = 0.125 [V]$

$$\% \Delta V = \frac{100 * 0.125}{24}$$

$$\% \Delta V = 0.52\%$$

3.5.4.4. Caída de tensión en el circuito del láser

Para poder obtener la caída de tensión del circuito del láser se debe determinar los elementos que pertenecen al mismo. El circuito del láser está conformado únicamente por la fuente generadora del láser y la luz piloto que indica que el láser está energizado, a la salida de la fuente se encuentra el tubo donde se amplifica el láser, este posee dos cables especiales, de cobre estañado AWM 3239 calibre AWG 22, que soportan media tensión, por lo que no es necesario calcular la sección del cable ni la caída de tensión porque el proveedor del láser ya proporciona estos cables. En la fuente se especifica que la potencia de la fuente láser es de 80 W y la luz piloto tiene una potencia de 4.4 W, por lo que la potencia total del circuito será de 84.4W.

Como se definió anteriormente, cada etapa deberá tener una caída de tensión máxima del 1%, de esta manera, aplicando la ecuación 3.64 para calcular la caída de tensión admisible en el circuito del motor del eje X, se tiene:

Datos:

- $V = 220 [V]$
- $\% \Delta V = 1\%$

$$\Delta V = \frac{220 * 1}{100}$$

$$\Delta V = 2.2 [V]$$

La longitud total del circuito será la distancia que existe entre la toma de 220 V y la fuente del láser, siendo esta longitud de 20 m.

De la ecuación 3.59 se despeja la variable I para obtener la corriente total que pasa por el circuito y se obtiene:

Datos:

- $V = 220 [V]$
- $P = 84.4 [W]$

$$I = \frac{84.4}{220}$$

$$I = 0.384 [A]$$

Ahora, aplicando la ecuación 3.65 con la información obtenida anteriormente para determinar la sección del cable se tiene:

Datos:

- $L = 20 [m]$; longitud total del circuito.
- $\Delta V = 2.2 [V]$; caída de tensión máxima admisible.
- $I = 0.384 [A]$; corriente total del circuito.
- $\rho = 0.01724 \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right]$; resistividad del Cu a 20 °C.

$$A = \frac{2 * 0.01724 * 0.384 * 20}{2.2}$$

$$A = 0.12 [mm^2]$$

Por lo tanto, basándose en la información presentada en Figura 117, el conductor adecuado para la aplicación sería uno tripolar de calibre AWG 26. Basándose en la información que presenta el fabricante de cables General Cable, el conductor tripolar de menor sección es de calibre AWG 18, por lo que selecciona este cable para la conexión

de la fuente del láser. Una vez seleccionado el calibre del cable, se despeja la variable ΔV de la ecuación 3.65, para obtener la caída de tensión real, entonces se tiene:

Datos:

- $L = 20 [m]$; longitud total del circuito.
- $A = 0.823 [mm^2]$; sección del conductor AWG calibre 18.
- $I = 0.384 [A]$; corriente total del circuito.
- $\rho = 0.01724 \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right]$; resistividad del Cu a 20 °C.

$$\Delta V = \frac{2 * 0.01724 * 0.384 * 20}{0.823}$$

$$\Delta V = 0.32 [V]$$

Para determinar el porcentaje de caída de tensión real de la ecuación 3.64 se despeja la variable $\% \Delta V$ y se obtiene:

Datos:

- $V = 220 [V]$
- $\Delta V = 0.31 [V]$

$$\% \Delta V = \frac{100 * 0.32}{220}$$

$$\% \Delta V = 0.15\%$$

3.5.4.5. Cálculo de protecciones

Las protecciones se deben calcular en base a la corriente máxima que circula por los circuitos. Se protegerá con fusibles la entrada de 110 V del circuito de la fuente de control (la de 24 V) y refrigeración, y la entrada de 220 V de la fuente del Láser.

El valor de corriente que soportan los fusibles antes de abrirse, debería ser el 25% de la corriente máxima del circuito, se toma este porcentaje considerando fluctuaciones en las líneas de alimentación, sobre picos de corriente causados por arranque y cambio de giros de motores, bombas, etc.

Para calcular las protecciones se usará la ecuación 3.66 que se muestra a continuación:

- Cálculo de fusibles

$$I_F = \frac{I * 25}{100} + I \quad (3.66)$$

En donde:

- I_F [mm²]: Corriente que soportará el fusible antes de fallar.
- I [A]: Intensidad de corriente máxima en el circuito.

Primero se procederá a calcular el fusible para la fuente de control y refrigeración, aplicando la ecuación 3.66 se tiene:

Datos:

- $I = 3.33$ [A]; corriente obtenida en el cálculo de caída de tensión en el circuito de potencia.

$$I_F = \frac{3.33 * 25}{100} + 3.33$$

$$I_F = 4.16 \text{ [A]} \cong 5 \text{ [A]}$$

Por lo tanto el fusible que protegerá la fuente de control será un fusible de 4 A.

Finalmente, se procede a calcular los fusibles para la fuente del láser, aplicando la ecuación 3.66 se obtiene:

Datos:

- $I = 0.384$ [A]; corriente obtenida en el cálculo de caída de tensión en el circuito del láser.

$$I_F = \frac{0.384 * 25}{100} + 0.38$$

$$I_F = 0.48 \text{ [A]} \cong 1 \text{ [A]}$$

Por lo tanto los fusibles que protegerán la fuente del láser serán dos fusibles de 1 A, uno por cada fase.

3.6. PROGRAMACIÓN Y SOFTWARE DE CONTROL

Como se mencionó anteriormente, se usará un Arduino Nano para el control de la temperatura y corriente. En cambio, para el control del láser y los motores, se usará el software MACH3. En esta sección se hablara de la programación del Arduino y de las configuraciones que se deben hacer en MACH3 para que la máquina funcione correctamente.

3.6.1. Programación Arduino

Para programar el Arduino se debe saber claramente lo que se necesita, Básicamente el programa debe realizar las siguientes acciones:

- Si la temperatura es menor a 22 °C se debe apagar el ventilador de refrigeración y la luz piloto que le corresponde.
- Si la temperatura está entre 22 y 28 °C se debe encender el ventilador y la luz piloto que le corresponde.
- Si la temperatura excede los 28 °C se debe encender la alarma correspondiente, se debe parar el programa de MACH3 y bloquear la fuente del láser.
- Si la corriente excede los 25 mA se debe encender la alarma correspondiente, se debe parar el programa de MACH3 y bloquear la fuente del láser.
- Si los valores de corriente y temperatura excedieron los valores límites y se encendieron las alarmas, una vez que estos valores disminuyan, se debe desbloquear la fuente y apagar la señal de paro al MACH3.

Una vez establecidas las acciones a programar, se inicia la programación incluyendo las librerías y definiendo los pines y variables a usar. En la Figura 118 se muestra el primer bloque de programación donde se incluye la las librerías del sensor de temperatura, se definen que pines ocupan las entradas y salidas de las variables y se declaran las variables del programa.

```

#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

#define paro_laser 2
#define al_temp 3
#define al_corr 4
#define ventilador 5
#define luz_refri 7
#define paro_mach 8
#define sensor 9
#define valoramp 12
int amperaje = 0;

OneWire ourWire(sensor);
DallasTemperature temperatura(&ourWire);
float Temp_agua;

```

Figura 118.- Primer bloque de programación, declaración de variables y librerías.

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  temperatura.begin();
  pinMode(al_temp, OUTPUT);
  pinMode(al_corr, OUTPUT);
  pinMode(ventilador, OUTPUT);
  pinMode(luz_refri, OUTPUT);
  pinMode(paro_mach, OUTPUT);
  pinMode(paro_laser, OUTPUT);
  pinMode(valoramp, INPUT);
}

```

Figura 119.- Segundo bloque de programación, función void setup().

En el segundo bloque de programación se establece cuáles son las entradas y salidas y se inicia la comunicación con el sensor de temperatura. En la Figura 119 se puede ver la función void setup().

En el tercer bloque de programación se inicia la adquisición de datos de temperatura y corriente, además se configura cuando se deben encender y apagar las luces piloto de las alarmas de temperatura y de corriente. En la Figura 120 se presenta el tercer bloque de programación.

```

void loop() {
  amperaje = digitalRead(valoramp);
  temperatura.requestTemperatures();
  Temp_agua = temperatura.getTempCByIndex(0);
  if (amperaje == HIGH){
    digitalWrite(al_corr, HIGH);
  }
  else{
    if(amperaje == LOW ){
      digitalWrite(al_corr, LOW);
    }
  }
  if (Temp_agua >= 28){
    digitalWrite(al_temp, HIGH);
  }
  else {
    if(Temp_agua < 28){
      digitalWrite(al_temp, LOW);
    }
  }
}

```

Figura 120.- Tercer bloque de programación, configuración de las luces piloto de las alarmas.

En el cuarto bloque de programación se realiza el control del ventilador, si la temperatura es mayor a 22 °C se enciende el ventilador y la luz piloto, si es menor se apaga, si sobrepasa los 28 °C se bloquea la fuente y para el programa y cuando el valor se reduce se desbloquea la fuente. En la Figura 121 se presenta el cuarto bloque de programación.

```

if (Temp_agua >= 22){
  digitalWrite(ventilador, HIGH);
  digitalWrite(luz_refri, HIGH);
}
else{
  if(Temp_agua < 22){
    digitalWrite(ventilador, LOW);
    digitalWrite(luz_refri, LOW);
  }
}
if (Temp_agua >= 28){
  digitalWrite(paro_mach, HIGH);
  delay(1000);
  digitalWrite(paro_laser, HIGH);
}
else{
  if (Temp_agua < 28){
    digitalWrite(paro_mach, LOW);
    digitalWrite(paro_laser, LOW);
  }
}
}

```

Figura 121.- Cuarto bloque de programación, control del ventilador y paro total si la temperatura sobrepasa el límite.

Finalmente en el quinto bloque se para el programa y bloquea la fuente si la corriente excede su valor. En la Figura 122 se presenta el tercer bloque de programación.

```
if (amperaje == HIGH){
  digitalWrite(paro_mach, HIGH);
  delay(1000);
  digitalWrite(paro_laser, HIGH);
}
else{
  if (amperaje == LOW){
    digitalWrite(paro_mach, LOW);
    digitalWrite(paro_laser, LOW);
  }
}
}
```

Figura 122.- Quinto bloque de programación, paro total si la corriente sobrepasa el límite.

3.6.2. Configuración del software MACH3

Antes de poner en marcha los motores y probar su funcionamiento, se debe configurar el programa MACH3 para lograr un desplazamiento preciso. Cada vez que se abra el programa, aparece la imagen mostrada en la Figura 123, en la cual se selecciona el puerto con el cual se desea comunicar, en este caso es el puerto e-CUT USB CNC Plug-In, que hace mención a la tarjeta e-Cut seleccionada para el control.

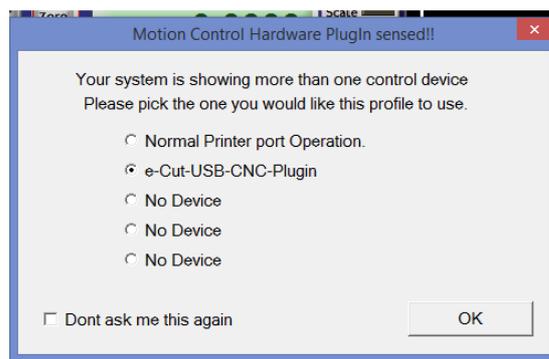


Figura 123.- Selección del puerto de control en MACH3.

Una vez seleccionada la tarjeta, selecciona en la barra de herramientas la opción de configuración, como se muestra en la Figura 124, donde se observan varias opciones de las cuales las principales se detallan a continuación.

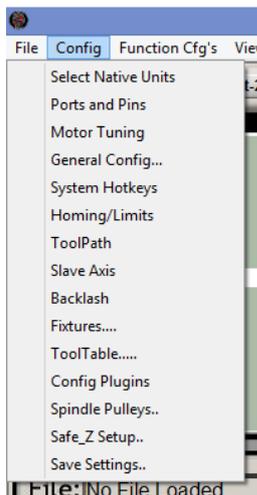


Figura 124.- Pestaña de configuración en MACH3

En la opción de “Select Native Units” se seleccionan las unidades en las cuales se desea trabajar, las dos opciones son en milímetros o en pulgadas. Por su parte en la opción “Ports and Pins” se pueden configurar las entradas y salidas de la tarjeta de control, de acuerdo a los requerimientos y necesidades. En la Figura 125, se observa la pestaña de salida de motores, en la cual se configuran los pines en los cuales serán conectados los drivers de los motores, se debe configurar tal y como se muestra.

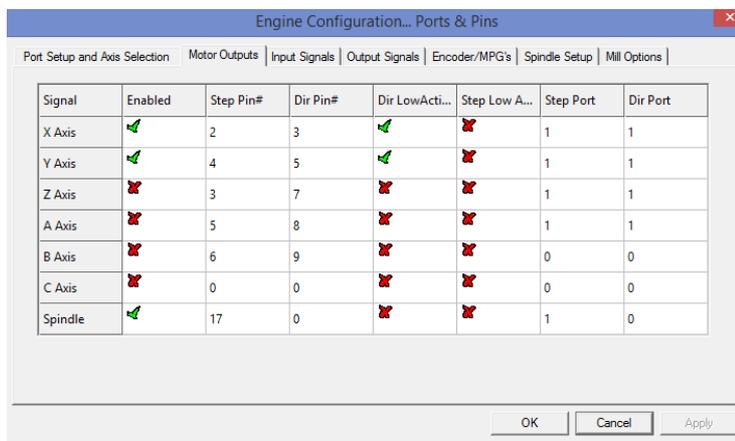
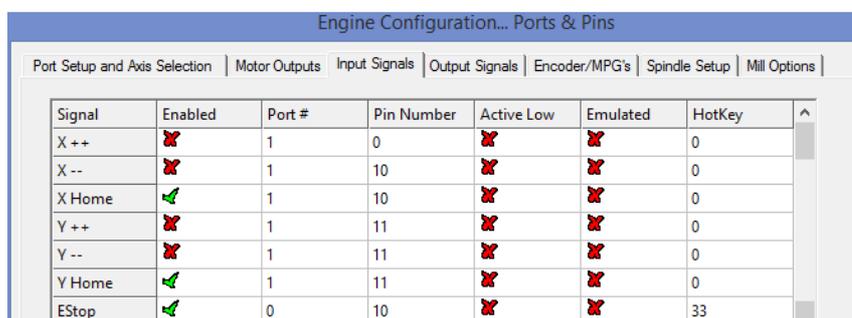


Figura 125.- Configuración de pines para motores MACH3.

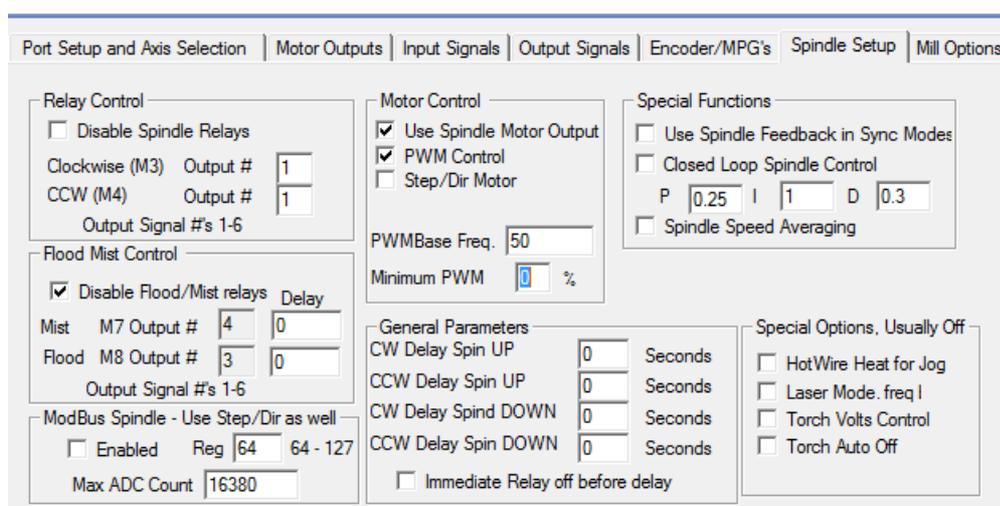
En la pestaña de señales de entrada, se configuran los pines de entrada de los fines de carrera que facilitan el punto de inicio o Home de la máquina, además de la entrada del pin de paro de emergencia, para que el programa lo procese como tal y pueda detener su funcionamiento, como se muestra en la Figura 126.



Signal	Enabled	Port #	Pin Number	Active Low	Emulated	HotKey
X ++	<input checked="" type="checkbox"/>	1	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
X --	<input checked="" type="checkbox"/>	1	10	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
X Home	<input checked="" type="checkbox"/>	1	10	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Y ++	<input checked="" type="checkbox"/>	1	11	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Y --	<input checked="" type="checkbox"/>	1	11	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
Y Home	<input checked="" type="checkbox"/>	1	11	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0
EStop	<input checked="" type="checkbox"/>	0	10	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	33

Figura 126.- Pines de cero de máquina y paro de emergencia.

Para la configuración del Spindle, que en este caso es una señal PWM que controla la potencia del láser, se observa en la Figura 127, como debe estar la configuración de este puerto, para que en el modo de programación en código G, se genere este PWM y se logre el control del láser.



Port Setup and Axis Selection | Motor Outputs | Input Signals | Output Signals | Encoder/MPG's | Spindle Setup | Mill Options

Relay Control
 Disable Spindle Relays
 Clockwise (M3) Output # 1
 CCW (M4) Output # 1
 Output Signal #'s 1-6

Flood Mist Control
 Disable Flood/Mist relays Delay
 Mist M7 Output # 4 0
 Flood M8 Output # 3 0
 Output Signal #'s 1-6

ModBus Spindle - Use Step/Dir as well
 Enabled Reg 64 64 - 127
 Max ADC Count 16380

Motor Control
 Use Spindle Motor Output
 PWM Control
 Step/Dir Motor
 PWMBase Freq. 50
 Minimum PWM 0 %

Special Functions
 Use Spindle Feedback in Sync Modes
 Closed Loop Spindle Control
 P 0.25 I 1 D 0.3
 Spindle Speed Averaging

General Parameters
 CW Delay Spin UP 0 Seconds
 CCW Delay Spin UP 0 Seconds
 CW Delay Spind DOWN 0 Seconds
 CCW Delay Spin DOWN 0 Seconds
 Immediate Relay off before delay

Special Options, Usually Off
 HotWire Heat for Jog
 Laser Mode. freq I
 Torch Volts Control
 Torch Auto Off

Figura 127.- Configuración del puerto para control de potencia de láser.

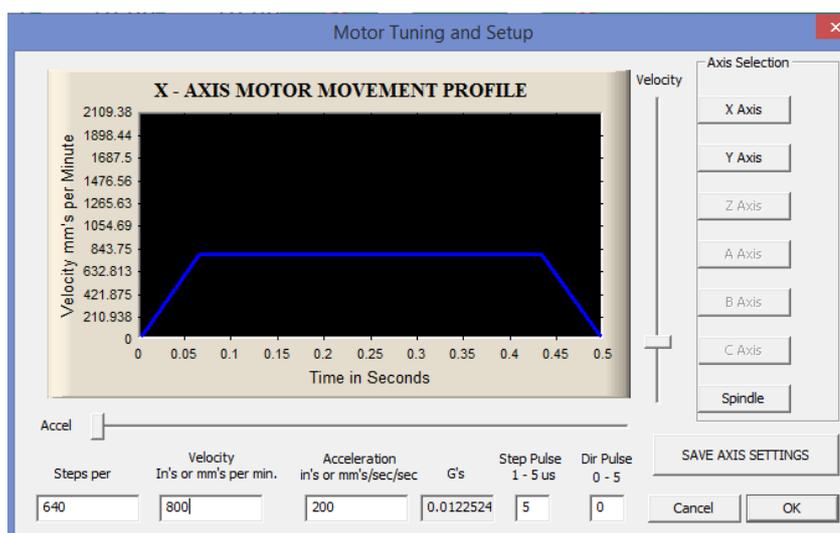


Figura 128.- Configuración de paso, velocidad y aceleración de motores.

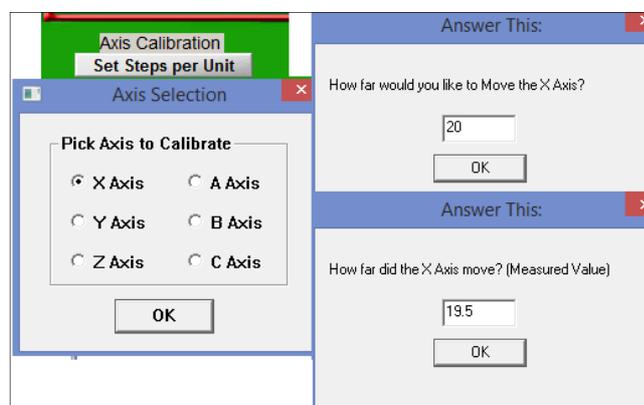


Figura 129.- Configuración práctica de desplazamiento de motores.

Por otra parte en la opción “Motor Tuning” de la pestaña de configuración, se selecciona, el paso, la velocidad y la aceleración de cada motor, como se muestra en la Figura 128, pero para ser más exactos en el paso y desplazamiento lineal de la herramienta, se realiza una configuración práctica en la pestaña de opciones del MACH3, en la cual se selecciona el eje que se desea configurar, posteriormente se indica un valor que debe desplazarse, seguido el programa pide medir la distancia real que se desplazó y con esto

calcula con exactitud el paso que debe tener la configuración de cada motor, como se muestra en la Figura 129. Es recomendable realizar esta configuración práctica porque de esta manera se obtiene una mayor precisión en los desplazamientos.

Otra de las opciones que se deben configurar son los límites de los ejes en cuanto a desplazamiento, como se observa en la Figura 130, se delimita el desplazamiento de los ejes tanto X como Y, para ahorrar el uso de fines de carrera.

Motor Home/SoftLimits								
Entries are in setup units.								
Axis	Reversed	Soft Max	Soft Min	Slow Zone	Home Off.	Home N...	Auto Zero	Speed %
X		1000	0.00	1.00	0.0000			100
Y		800	0.00	1.00	8.2500			100
Z		100.00	-100.00	1.00	0.0000			20
A		100.00	-100.00	1.00	0.0000			20
B		100.00	-100.00	1.00	0.0000			20
C		100.00	-100.00	1.00	0.0000			20

Figura 130.- Configuración de límites de ejes en MACH3.

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN

En el presente capítulo se describe de forma general, el procedimiento para la construcción y ensamblaje, tanto de sistemas mecánicos como eléctricos y electrónicos.

4.1. CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS MECÁNICOS

4.1.1. Construcción de Estructura

La estructura se elabora en su totalidad en tubo cuadrado de acero ASTM A500 de dimensiones transversales 25x25x1.5mm, realizado en su totalidad en el Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Los procesos realizados en la construcción de la estructura incluyen corte, soldado, perforado, limado, entre otros. En la Figura 131 se muestra la estructura finalizada.



Figura 131.- Estructura soldada

4.1.2. Construcción y Montaje de Paneles Exteriores

Loa paneles exteriores cuya función es proteger el interior de la máquina, además de mantenerla cerrada, se construyen de planchas de acero A36, para su construcción se realizaron, trazos, cortes, limado, dobléz. En la Figura 132 se evidencia el proceso de

construcción. Mientras que en la Figura 133 se muestra los paneles instalados en la estructura.



Figura 132.- Manufactura de Paneles exteriores



Figura 133.- Ubicación de paneles en la estructura

Para fijar estos paneles a la estructura, se los procede a soldar con electrodo revestido SMAW 6011, en las caras paralelas y coincidentes a los tubos de la estructura, como se indica en la Figura 134.



Figura 134.- Paneles soldados a la estructura

4.1.3. Construcción de marcos y soportes de ejes.

Para manufacturar el marco del eje Y, se utilizó un perfil en U de acero ASTM A36 de 80x40x2mm, el cual se procedió a cortar y soldar perpendicularmente para obtener el marco.

Asimismo para el marco del eje X el material seleccionado es una pletina del mismo acero del marco anterior, de 50x3mm, doblada y perforada para la sujeción de los elementos de sujeción de chumacera y acople con el marco del eje Y.

El resto de componentes, tales como bases de chumaceras, bases de motores, etc. Se fabrican de plancha metálica de 2mm de espesor. Todos estos componentes, llevan un recubrimiento de pintura azul y se los muestra a continuación en la Figura 135.



Figura 135.- Componentes mecánicos fabricados.

4.2. INSTALACIÓN DE COMPONENTES

4.2.1. Instalación de componentes mecánicos.

En primer lugar se indican los componentes mecánicos adquiridos, tales como tornillos de bolas, guías lineales y los componentes que completan su funcionamiento, se los observa en la Figura 136.



Figura 136.- Tornillos de bolas y guías lineales.

Para la instalación de guías lineales, se procede a ubicar la guía coincidentemente con las perforaciones realizadas en la estructura, y se comprueba si la guía está nivelada con respecto al nivel del suelo, como se muestra en la Figura 137.



Figura 137.- Instalación de guías lineales.

Una vez instaladas correctamente las guías, se instalan los marcos, tanto del eje X como del eje Y, para sostener y completar el mecanismo de movimiento en ambos ejes. En la Figura 138 se observa la instalación de los tornillos de bolas en el lugar designado, mientras que en la Figura 139 se muestra la instalación de los acoples de movimiento angular para corrección de ángulos descentrados en el eje.



Figura 138.- Tornillo de bolas instalado.

Además, en la Figura 139 se muestra la instalación del motor, en su base correspondiente, y su alineación tanto con el tornillo de bolas como con el acople de movimiento angular, para lograr el desplazamiento requerido en cada uno de los ejes.



Figura 139.- Acople LoveJoy instalado.

Con la instalación de todos los componentes mencionados, además del recubrimiento de pintura aplicado tanto a la estructura, paneles y componentes, en la Figura 140 se muestra la instalación de componentes mecánicos completa.



Figura 140.- Ejes de movimiento instalados.

Por último, parte de los componentes mecánicos, la mesa de trabajo es primordial para poder realizar el corte, en este caso la mesa es fabricada con perfiles en U para reducir lo

que más se pueda el contacto del metal con el material a cortar, como se muestra en la Figura 141.



Figura 141.- Mesa de trabajo.

4.2.2. Instalación de componentes eléctricos y electrónicos.

Finalizada la parte mecánica, se procede a instalar los componentes electrónicos que forman parte de la máquina, en este caso son fuentes de poder (Figura 143), tarjetas de control (Figura 144), drivers de motores (Figura 145), protección de circuitos (Figura 146), indicadores (Figura 147), etc., cuya instalación se la lleva a cabo en el lugar destinado para el armario eléctrico, como se indica en la Figura 142.

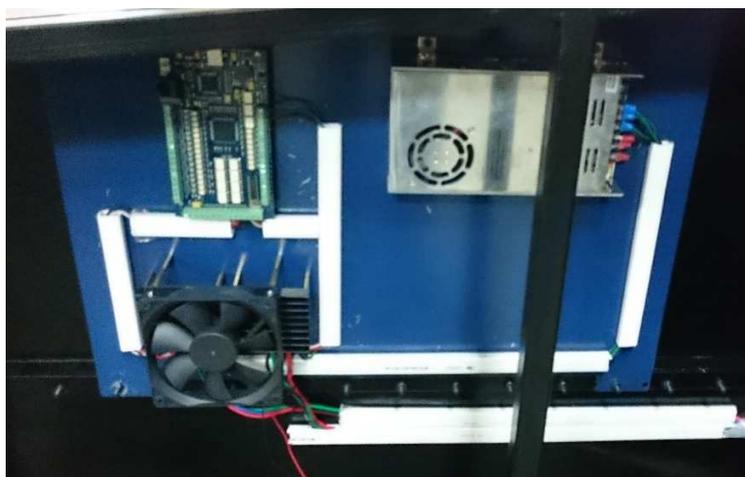


Figura 142.- Armario eléctrico en proceso de instalación.



Figura 143.- Fuente de poder para motores.



Figura 144.- Tarjetas de control.



Figura 145.- Ventilador y drivers de motores.

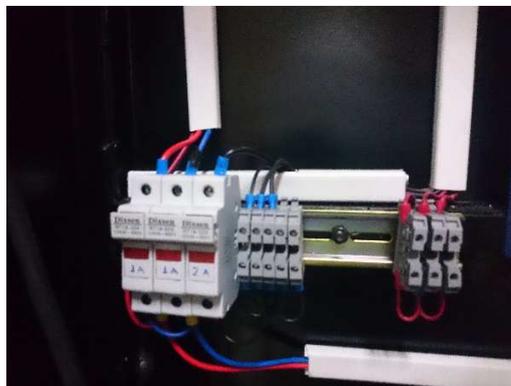


Figura 146.- Protección de circuitos.



Figura 147.- Panel de controles e indicadores de la máquina.

Cabe recalcar, que la garantía del tubo láser, exige la instalación de un amperímetro para mantener controlada la corriente del tubo en funcionamiento como se muestra en la Figura 148 y un sensor de temperatura del agua destilada que circula por el tubo, el que se observa en la Figura 149.



Figura 148.- Amperímetro digital.



Figura 149.- Sensor de temperatura instalado.

4.2.3. Instalación de componentes de corte láser.

Uno de los componentes principales del corte por láser, es la fuente de media tensión, que no se encuentra instalada en el armario eléctrico por generar ruido e interferencias con los demás componentes, por esto está ubicada en la parte posterior como se muestra en la Figura 150.



Figura 150.- Fuente de poder del tubo láser.

Para la instalación del tubo láser se inicia por instalar los soportes del tubo, como se muestra en la Figura 151, seguido de la instalación de los espejos en sus respectivos soportes mostrados en la Figura 152, y por último la ubicación del cabezal, para su posterior calibración.



Figura 151.- Soportes del tubo láser.



Figura 152.- Soportes y espejos instalados.

Una vez instalados los componentes tales como, espejos, tubo láser (Figura 153), fuente y cabezal, es necesario instalar el sistema de refrigeración que se muestra en la Figura 154, posterior a esto se debe comprobar que no existan burbujas de aire dentro del tubo láser como las que se observan en la Figura 155. Cuando no existan burbujas en el circuito de agua destilada para refrigeración, se puede encender por primera vez el tubo láser para verificar si existen fugas o un correcto funcionamiento que se indica en la Figura 156.

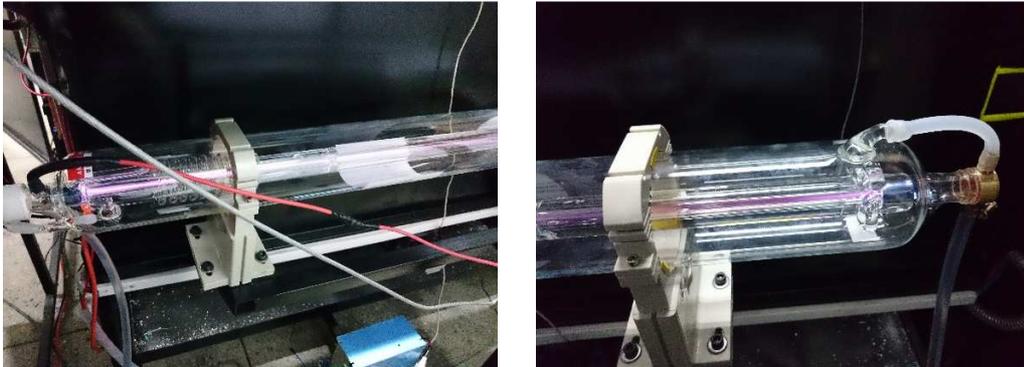


Figura 153.- Tubo láser instalado.



Figura 154.- Sistema de refrigeración.



Figura 155.- Burbujas presentes en el tubo.

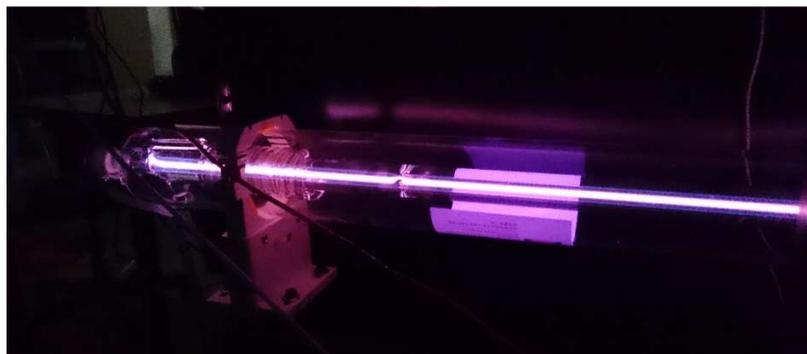


Figura 156.- Haz de luz generada en el tubo.

Finalizada la instalación, se procede a calibrar la dirección del haz de luz láser, para obtener un corte óptimo. Como se muestra en la Figura 157, se calibra los espejos con la ayuda de un pedazo de cartón y de cinta sobre los espejos, para seguir el haz invisible de luz y lograr que enfoque lo más centrado posible en los espejos.



Figura 157.- Calibración de haz de luz láser.

Una vez calibrado haz de luz láser, la máquina está lista para realizar pruebas de funcionamiento y determinar su capacidad de corte.

CAPITULO V

PRUEBAS Y RESULTADOS

En esta sección se muestra las pruebas realizadas, tanto en acrílico y en MDF, para determinar los parámetros óptimos y obtener un corte preciso y adecuado. Dentro de estos parámetros se incluye, la altura del cabezal con respecto a la pieza a cortar, la velocidad de avance, y la potencia del láser, en este caso el % de PWM necesario.

5.1. PRUEBAS Y RESULTADOS EN ACRÍLICO

Para obtener un corte óptimo en acrílico, se realizan las pruebas que determinen los parámetros correctos y que reduzcan en su mayor posibilidad el tiempo de trabajo y aumenten la precisión y acabado de las piezas.

5.1.1. Altura del Cabezal

Una parte importante para el corte por láser, es la altura que debe tener el cabezal con respecto a la pieza de trabajo, para esto, se tiene una pieza impresa en prototipado 3D, de galgas de medidas de 5mm hasta 40mm, con rangos de 5mm, para determinar esta altura de cabezal, como lo muestra la Figura 158.



Figura 158.- Galgas para fijar altura del cabezal de corte.

Para esta prueba, se realizan cortes de una línea sencilla, para determinar cuál de ellas es la de menor ancho, como se muestra en la Figura 159, de acuerdo a esto, se puede observar que la altura entre el cabezal de corte y la pieza debe estar entre 5mm y 10mm.

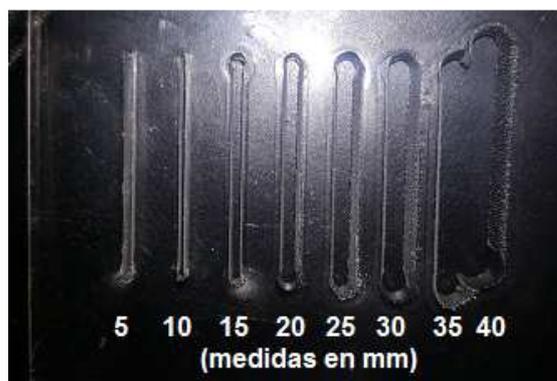


Figura 159.- Pruebas de altura de cabezal en acrílico.

Como se observa en la Figura 159, el corte más delgado se obtuvo con una altura de 10mm del cabezal con respecto a la pieza, esta vendría a ser la altura recomendada para el corte, pero en una segunda prueba se determinó que la altura óptima para el corte es de 8mm, como se puede ver en una comparación en la Figura 160, al lado izquierdo se tiene un corte con una altura de 8mm, mientras que al lado derecho se tiene el corte con altura de 10mm y se puede observar que con la altura de 8mm, el ancho del corte es un poco más delgado que con la altura de 10mm.



Figura 160.- Comparación de cortes con altura de cabezal.

5.1.2. Potencia Constante – Velocidad Variable.

La segunda prueba, se la realiza con el fin de determinar la velocidad de avance correcta para obtener un corte preciso y de las dimensiones reales que se requieren, en este caso se procede a fijar la potencia del láser en un 100% de PWM. Para realizar cortes con esta potencia e ir variando la velocidad de avance, como se muestra en la Figura 161, de derecha hacia izquierda se comienza con una velocidad de 800mm/min y se reduce de 100 en 100 mm/min, hasta 100mm/min y el último corte se lo realiza con 50mm/min.

Se puede observar que a menor velocidad mayor profundidad de corte, pero a su vez, a menor velocidad peor acabado, considerando un buen acabado y una profundidad promedio, se determina que la velocidad óptima utilizando el 100% de PWM es de 500mm/min, ya que se obtiene un buen acabado.

Partiendo de esta premisa, se procede a realizar varias pruebas y mediciones para determinar, con el PWM a su máxima potencia, las velocidades necesarias para obtener una profundidad establecida, como se muestra en la Tabla 12, con 7 diferentes velocidades, se obtienen diferentes profundidades. Estos cortes se observan en la Figura 162.

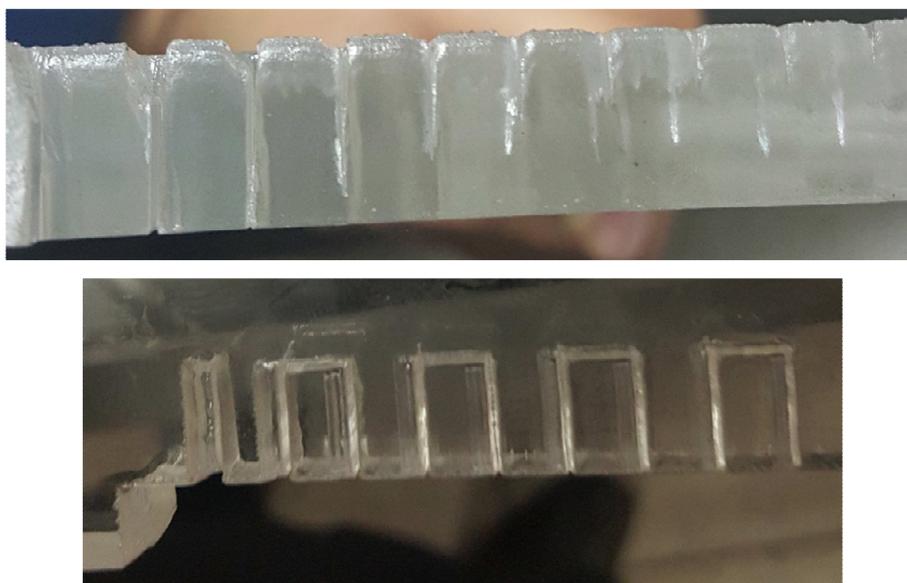


Figura 161.- Cortes en acrílico con potencia constante, velocidad variable (vista frontal y superior)



Figura 162.- Prueba de corte en acrílico (PWM constante – Velocidad variable)

Tabla 12.
Profundidad en acrílico, PWM constante y velocidades variables.

PWM Constante: 1000 = 100%				
Velocidad(mm/min)	Profundidad (mm)			Media
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	
800	2.45	2.6	2.5	2.517
700	3.6	3.7	3.4	3.567
600	4.2	4.3	4.1	4.200
500	5.25	5.1	5.4	5.250
400	5.5	5.7	5.8	5.667
300	7.6	7.5	7.3	7.467
200	9	9.25	9.1	9.117

Fuente: Propia.

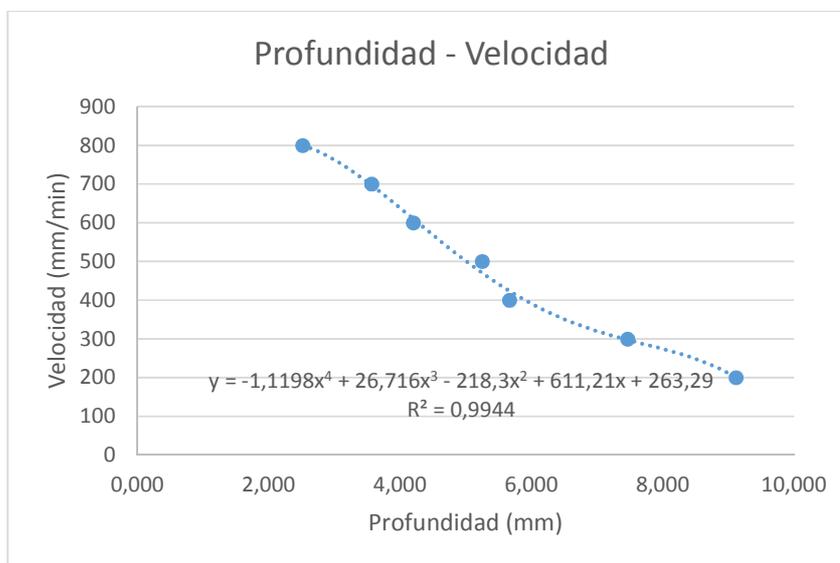


Figura 163.- Gráfico Profundidad-Velocidad para acrílico.

Con los datos obtenidos, se realiza una gráfica de dispersión, que nos permite agregar una línea de tendencia y obtener un modelo matemático para determinar los valores necesarios, como se muestra en la Figura 163. Se observa también el modelo matemático adquirido, en el cual el dato de entrada es la profundidad que necesito cortar y el dato que se obtiene es la velocidad de avance con la cual debe realizar el corte.

De acuerdo a los datos obtenidos en la Tabla 12 y al observar el acabado de cada uno de estos cortes, se determina que los parámetros de 100% PWM y velocidad variable, son aptos simplemente para cortar acrílico de espesores entre 5mm y 9mm

5.1.3. Velocidad Constante – Potencia Variable.

Una vez determinada una media, tanto de velocidad como de potencia, la cual se mencionó en el apartado anterior, obteniendo una velocidad de 500mm/min como la velocidad con la cual el acabado y el corte son mejores. Partiendo de esta velocidad, se realizan pruebas de corte, variando la potencia del láser, lo cual influye en la profundidad de corte.



Figura 164.- Prueba de corte en acrílico. (Velocidad constante – PWM variable)

En la Figura 164 se observan las 3 pruebas de corte realizadas con velocidad constante y potencia variable, cuyas medidas se las tabula en la Tabla 13.

Como se observa en esta tabla, con los parámetros establecidos, el espesor que máximo llega a cortar de acrílico son 4.85mm, con estos datos se realiza una gráfica de dispersión, para obtener una línea de tendencia y determinar el PWM requerido para una profundidad establecida hasta 5mm, como se muestra en la Figura 165. En esta figura se observa también el modelo matemático obtenido para determinar los parámetros de corte necesarios, en el cual el dato conocido es la profundidad y el dato que se obtiene es el PWM, cabe recalcar que el 100% de PWM es un valor de 1000 y a su vez el 10% de PWM

es un valor de 100. Estos valores se encuentran programados en el pos procesador para corte laser del programa MACH3.

Tabla 13.
Profundidad en acrílico, velocidad constante y PWM variable.

Velocidad Constante 500mm/min				
Profundidad (mm)				
PWM	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Media
1000	4.85	4.90	4.80	4.85
900	4.50	4.50	4.40	4.47
800	4.00	4.20	4.10	4.10
700	3.80	3.75	3.70	3.75
600	3.40	3.35	3.50	3.42
500	2.95	2.50	2.70	2.72
400	2.00	2.00	2.10	2.03
300	1.70	1.60	1.60	1.63
200	1.05	0.90	1.00	0.98
100	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Propia.

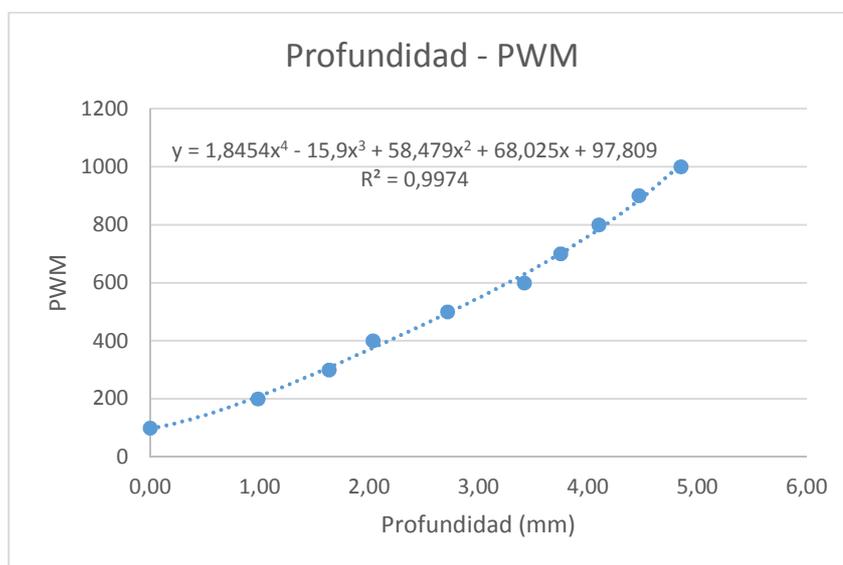


Figura 165.- Gráfico Profundidad-PWM para acrílico.

De acuerdo a los datos que se muestran en la Tabla 13, con una velocidad constante de 500mm/min y con la variación del PWM, se pueden llegar a cortar espesores de acrílico de hasta 5mm.

5.1.4. Resumen.

Una vez realizadas las pruebas necesarias para obtener los parámetros adecuados con los cuales se optimice el corte, en la Tabla 14, se presenta un resumen de parámetros para el acrílico.

Tabla 14.
Resumen de parámetros de corte para acrílico.

Parámetro		Especificación		
Altura de Cabezal		8mm		
Profundidad	Hasta 5mm	Velocidad	500mm/min	PWM
	De 5 a 9mm		Ver Figura 163	
				Ver Figura 165
				1000

Fuente: Propia

Para determinar de manera más fácil estos parámetros, se tiene un pequeño cálculo en Excel, cuya variable de entrada es la profundidad del acrílico que se desea cortar, como se muestra en la Figura 166.

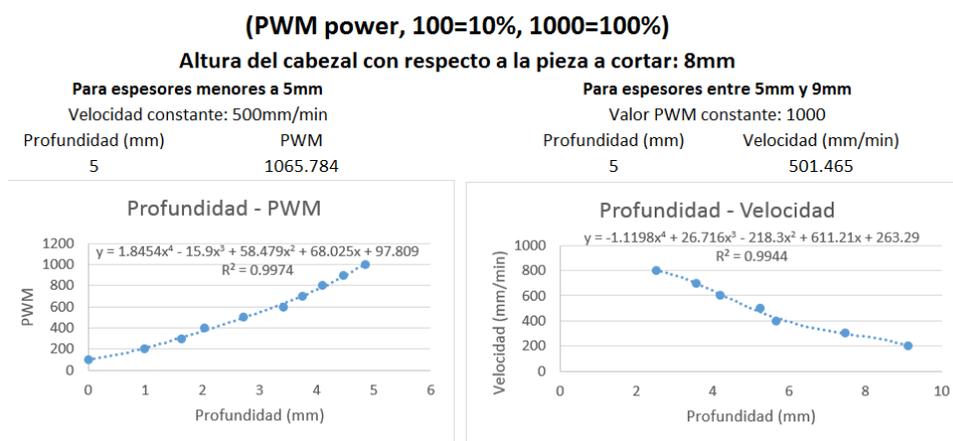


Figura 166.- Programa en Excel para determinar parámetros de corte en acrílico.

5.2. PRUEBAS Y RESULTADOS EN MDF.

Al igual que en el acrílico, se realizan las mismas pruebas de corte en MDF, para determinar los parámetros correctos y así obtener un corte a la profundidad deseada y que tenga un buen acabado.

5.2.1. Altura del Cabezal

En la Figura 158 se tienen las galgas para determinar la altura correcta del cabezal con respecto a la pieza a cortar, en este caso para el MDF, utilizando estas galgas se realizaron diferentes pruebas y el resultado se lo muestra en la Figura 167, dando como resultado que la altura del cabezal óptima para el corte en MDF está entre 5 y 10mm. Una prueba posterior reveló que la altura del cabezal para obtener un ancho de corte más delgado es de 8mm, lo cual se indica en la Figura 168.



Figura 167.- Pruebas de altura de cabezal en MDF (Medidas en mm)



Figura 168.- Corte con altura de cabezal de 8mm.

5.2.2. Potencia Constante – Velocidad Variable.

Para esta prueba, se determina una potencia de corte constante de 100% de PWM, que es con lo que se controla la potencia del láser. Definida esta potencia se procede a realizar cortes a diferentes velocidades, para determinar la velocidad de avance que genere un corte correcto. En la Figura 169, se muestran los cortes realizados a diferentes velocidades,

cuatro pruebas diferentes, que en sentido horario se muestran, como se va disminuyendo la velocidad de avance desde los 800mm/min hasta los 200mm/min, y se observa que mientras menos velocidad, el acabado es peor.

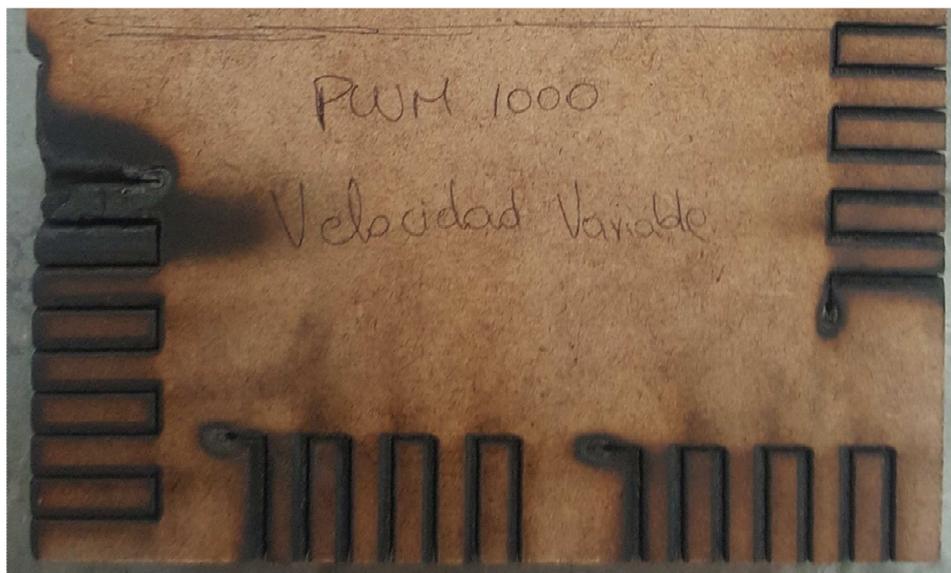


Figura 169.- Cortes en MDF con potencia constante y velocidad variable.

Una vez realizados estos cortes, se procede a medir la profundidad de cada uno de ellos, para determinar hasta que profundidad puede cortar el láser en este material, tomando en cuenta también el acabado superficial del corte, como se muestra en la Figura 170, las profundidades varían, mientras menor velocidad mayor es la profundidad. Las velocidades disminuyen de derecha a izquierda, desde 800mm/min hasta 200mm/min.



Figura 170.- Corte transversal para medir profundidades de corte laser en MDF.

Estas profundidades son medidas en mm y los datos se muestran en la Tabla 15, con la cual se realiza un gráfico de dispersión, para poder obtener una línea de tendencia y determinar los valores de velocidad de acuerdo a la profundidad requerida.

Tabla 15.
Profundidad en MDF, PWM constante y velocidad variable.

PWM Constante: 1000 = 100%				
Velocidad(mm/min)	Profundidad (mm)			Media
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	
800	3.70	4.30	3.70	3.90
700	4.50	5.00	4.70	4.73
600	5.10	5.90	5.60	5.53
500	5.65	6.40	5.90	5.98
400	5.90	6.70	6.60	6.40
300	8.50	8.70	8.00	8.40
200	9.20	9.00	8.50	8.90

Fuente: Propia.

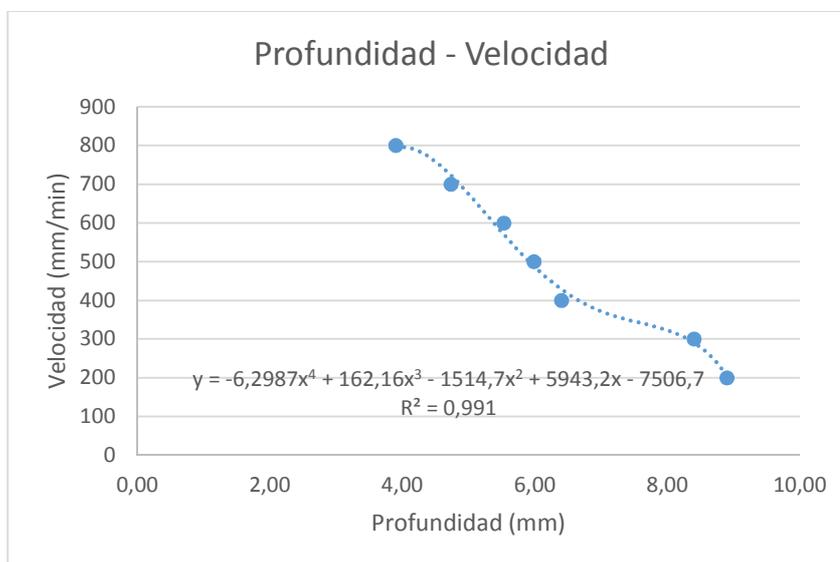


Figura 171.- Gráfica Profundidad-Velocidad para el MDF.

Comparando el acabado del corte de la Figura 169 y los datos de la Tabla 15, se concluye que con el PWM al 100% se pueden utilizar velocidades entre 800 y 500mm/min, y a su vez profundidades de hasta 6mm aproximadamente.

Con los datos obtenidos, se muestra el gráfico realizado en la Figura 171, que muestra además un modelo matemático que ayuda a determinar, ingresando la profundidad deseada, la velocidad con la que se debe realizar el corte.

5.2.3. Velocidad Constante – Potencia Variable.

Como se determinó en la prueba anterior, la velocidad media con la que se obtiene una mayor profundidad y un mejor acabado es de 500mm/min. Partiendo de esta velocidad de avance, se realizan pruebas variando la potencia del láser, es decir el PWM.

En la Figura 172, se observan 3 pruebas de corte con velocidad constante, y que en sentido horario, aumentan el porcentaje de PWM desde un 10% hasta el 100%, cabe indicar que un valor de 1000 corresponde a 100% de PWM y un valor de 100 corresponde a 10% de PWM.

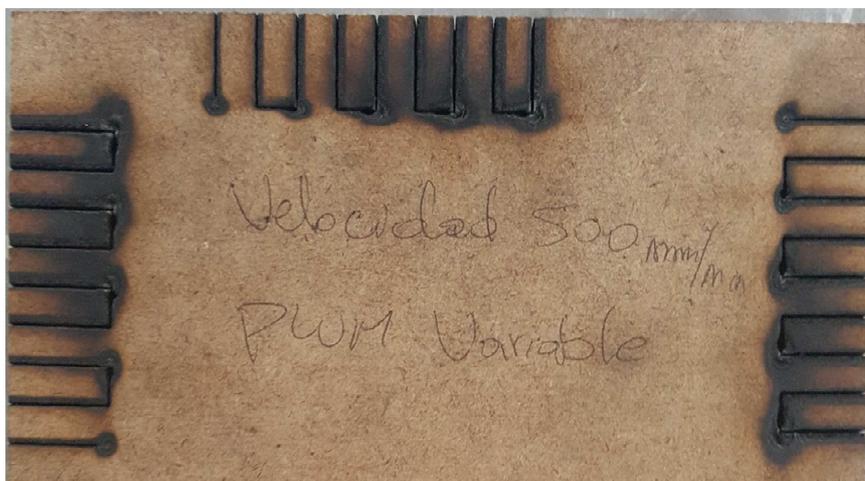


Figura 172.- Corte en MDF, velocidad constante y potencia variable.

Una vez realizados estos cortes, se procede a medir las profundidades obtenidas con cada una de las variaciones del PWM, estos datos se muestran en la Tabla 16. Con estos datos se realiza un gráfico de dispersión para obtener una línea de tendencia que describa el comportamiento del corte de acuerdo a la variación del PWM, la cual se muestra en la Figura 173.

Además se observa el modelo matemático correspondiente a esta gráfica, con el cual se puede obtener, introduciendo la profundidad de corte deseada y manteniendo la velocidad constante, el valor correspondiente de PWM.

Tabla 16.
Profundidad den MDF, velocidad constante y PWM variable.

Velocidad Constante 500mm/min				
Profundidad (mm)				
PWM	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Media
1000	5.40	5.10	5.20	5.23
900	4.10	4.40	4.15	4.22
800	3.70	3.50	3.80	3.67
700	3.50	3.20	3.60	3.43
600	2.70	2.75	3.10	2.85
500	2.05	1.95	2.70	2.23
400	1.30	1.80	1.40	1.50
300	0.70	0.90	1.10	0.90
200	0.50	0.70	0.70	0.63
100	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Propia

Como se observa en la Tabla 16, la profundidad máxima que se obtiene con estos parámetros es de 5mm, es decir que con los parámetros indicados se pueden cortar MDF de espesores de 5mm y menores.

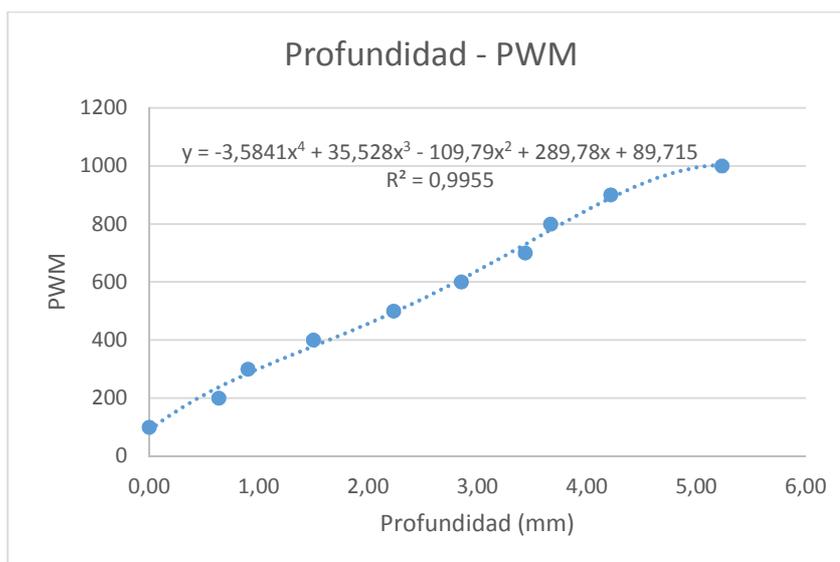


Figura 173.- Gráfica Profundidad-PWM para MDF.

5.2.4. Resumen

Una vez realizadas las pruebas correspondientes, para obtener los parámetros adecuados con los cuales se optimice el corte, en la Tabla 17, se presenta un resumen de parámetros de corte para el MDF.

Tabla 17.
Resumen de parámetros de corte para MDF.

Parámetro		Especificación		
Altura de Cabezal		8mm		
Profundidad	Hasta 5mm	Velocidad	500mm/min	Ver Figura 173
	De 5 a 9mm		Ver Figura 171	

Fuente: Propia

Para determinar de manera más sencilla los parámetros deseados, se tiene un programa sencillo en Excel, que solo con el dato de la profundidad deseada, se obtienen los datos de velocidad y PWM, de acuerdo al rango en el que se encuentre, como se muestra en la Figura 174.

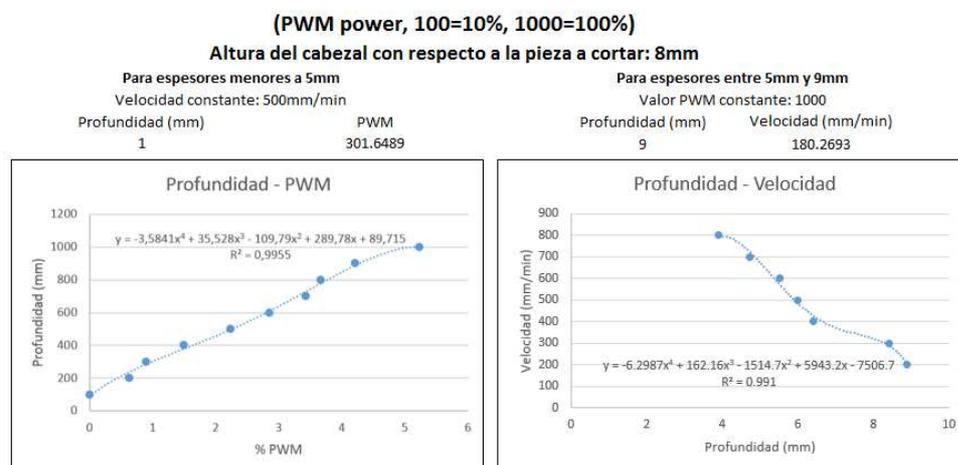


Figura 174.- Excel para determinar parámetros de corte de MDF.

5.3. CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS.

El control estadístico de procesos es una herramienta estadística, que permite verificar si un proceso está o no controlado estadísticamente. Para saber si este proceso está

controlado se realiza una carta de control que relaciona la media y la desviación estándar, llamada carta $\bar{X} - s$. Se toma como base esta carta de control, ya que las mediciones serán longitudes de corte, para determinar si el corte se realiza con precisión.

Las pruebas de corte se realizan con el siguiente modelo que se muestra en la Figura 175, en acrílico de 3mm de espesor, para obtener medidas en los dos ejes, tanto X como Y, además para determinar si las circunferencias las corta correctamente.

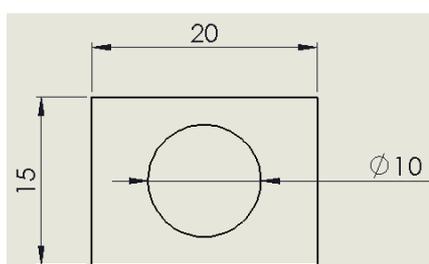


Figura 175.- Modelo para pruebas de corte.

Las tolerancias para estas dimensiones, se establecen en $\pm 0.2 \text{ mm}$.

5.3.1. Eje X

La medida para el Eje X, es de 20mm, es decir que las medidas obtenidas deben acercarse a este valor, estos datos se muestra en la Tabla 18.

En la Tabla 18 además se muestra el cálculo de la media y la desviación estándar, dos parámetros necesarios para continuar con la elaboración de las cartas de control. Con estos datos, se procede a calcular el promedio de la media ($\bar{\bar{X}}$) y el promedio de la desviación estándar (\bar{s}).

$$\bar{\bar{X}} = 20.014$$

$$\bar{s} = 0.047$$

En la Figura 176, se muestran las constantes para tablas de control utilizadas en la General Motors, para determinar si los procesos de fabricación de partes y piezas de vehículos son correctas.

En esta medición se tienen grupos de 5 mediciones cada uno, para lo cual las constantes son las siguientes:

- $A_3 = 1.427$ (Factor para límites de control de la Media)
- $c_4 = 0.94$ (Divisor para la estimación de la desviación estándar)
- $B_3 = 0$ (Factor para límites de control de la desviación estándar)
- $B_4 = 2.089$ (Factor para límites de control de la desviación estándar)

Tabla 18.
Medidas obtenidas del corte en eje X para cartas de control.

PRUEBA	EJE X (LONGITUD mm)					\bar{X} (Media)	s (Desviación Estándar)
	M1	M2	M3	M4	M5		
1	20.03	19.98	20.11	20.02	20.03	20.034	0.047
2	20.02	19.98	19.90	19.99	20.05	19.988	0.056
3	20.15	20.07	20.02	20.06	20.01	20.062	0.055
4	20.03	19.99	20.13	19.95	20.02	20.024	0.067
5	20.02	20.05	19.98	19.95	20.09	20.018	0.055
6	20.05	20.00	19.96	20.02	19.99	20.004	0.034
7	20.08	20.02	20.05	20.05	20.00	20.040	0.031
8	20.08	20.04	20.06	20.04	19.98	20.040	0.037
9	20.11	20.05	20.08	20.01	20.08	20.066	0.038
10	19.98	19.98	20.02	20.02	19.99	19.998	0.020
11	19.97	19.94	20.00	20.00	20.03	19.988	0.034
12	19.97	19.96	20.09	20.08	19.98	20.016	0.063
13	19.93	19.95	19.99	20.03	20.01	19.982	0.041
14	19.91	19.96	20.04	19.95	20.00	19.972	0.050
15	20.02	20.00	20.01	20.02	20.11	20.032	0.044
16	20.05	20.02	20.02	20.15	19.98	20.044	0.064
17	19.98	20.04	20.00	20.03	19.97	20.004	0.030
18	19.96	20.05	20.08	20.02	19.97	20.016	0.051
19	20.02	20.06	19.90	20.05	19.90	19.986	0.080
20	19.99	20.08	20.03	20.05	20.00	20.030	0.037
21	20.06	20.02	20.02	20.00	20.09	20.038	0.036
22	20.02	19.94	20.08	19.98	19.99	20.002	0.052
23	20.09	19.96	20.03	19.97	20.05	20.020	0.055
24	19.99	19.90	20.01	19.97	20.00	19.974	0.044
25	20.00	19.90	20.02	19.90	19.99	19.962	0.058

\bar{X} and s Charts*				
Subgroup Size	Chart for Averages (\bar{X})	Charts for Standard Deviations (s)		
	Factors for Control Limits	Divisors for Estimate of Standard Deviation	Factors for Control Limits	
n	A_3	c_4	B_3	B_4
2	2.659	0.7979	-	3.267
3	1.954	0.8862	-	2.568
4	1.628	0.9213	-	2.266
5	1.427	0.9400	-	2.089
6	1.287	0.9515	0.030	1.970
7	1.182	0.9594	0.118	1.882
8	1.099	0.9650	0.185	1.815
9	1.032	0.9693	0.239	1.761
10	0.975	0.9727	0.284	1.716

Figura 176.- Constantes para cartas de control $\bar{X} - s$

Con estas constantes, se procede a calcular los límites de control, tanto de la media como de la desviación estándar. Los límites de control superior e inferior para la media se los calcula con el modelo matemático mostrado en la ecuación 5.1 y 5.2 respectivamente. Mientras que los límites de control superior e inferior para la desviación estándar, se los obtiene gracias a las ecuaciones 5.3 y 5.4 respectivamente.

$$LCS_X = \bar{\bar{X}} + (A_3 * \bar{s}) \quad (5.1)$$

$$LCI_X = \bar{\bar{X}} - (A_3 * \bar{s}) \quad (5.2)$$

$$LCS_s = B_4 * \bar{s} \quad (5.3)$$

$$LCI_s = B_3 * \bar{s} \quad (5.4)$$

Reemplazando los valores de las constantes antes mencionadas y los valores del promedio de la media y el promedio de la desviación estándar, en estas 4 ecuaciones, obtenemos los límites de control, estos son:

$$LCS_X = 20.081$$

$$LCI_X = 19.946$$

$$LCS_s = 0.099$$

$$LCI_s = 0$$

Con los límites de control establecidos, se obtiene la gráfica de la carta de control, tanto para la media como se muestra en la Figura 177, como para la desviación estándar que se observa en la Figura 178.

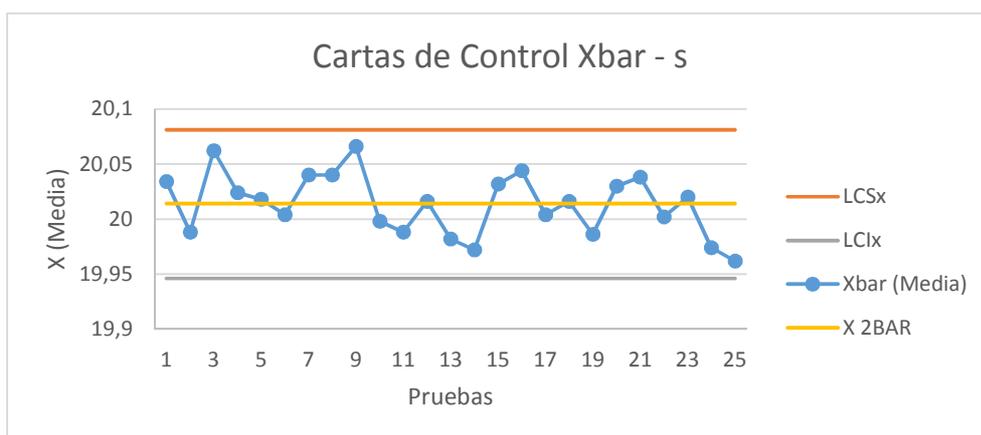


Figura 177.- Carta de control de Media en Eje X

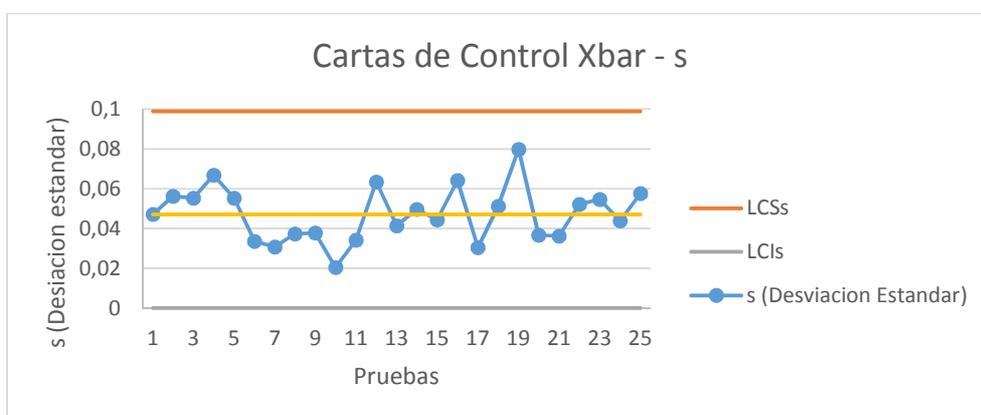


Figura 178.- Carta de Control de Desviación Estándar en Eje X

En ambas cartas de control, se observan que la línea de dispersión, es decir el comportamiento de la media y de la desviación estándar, se mantienen dentro de los límites de control respectivos para cada elemento, es decir, que el proceso está en control estadístico.

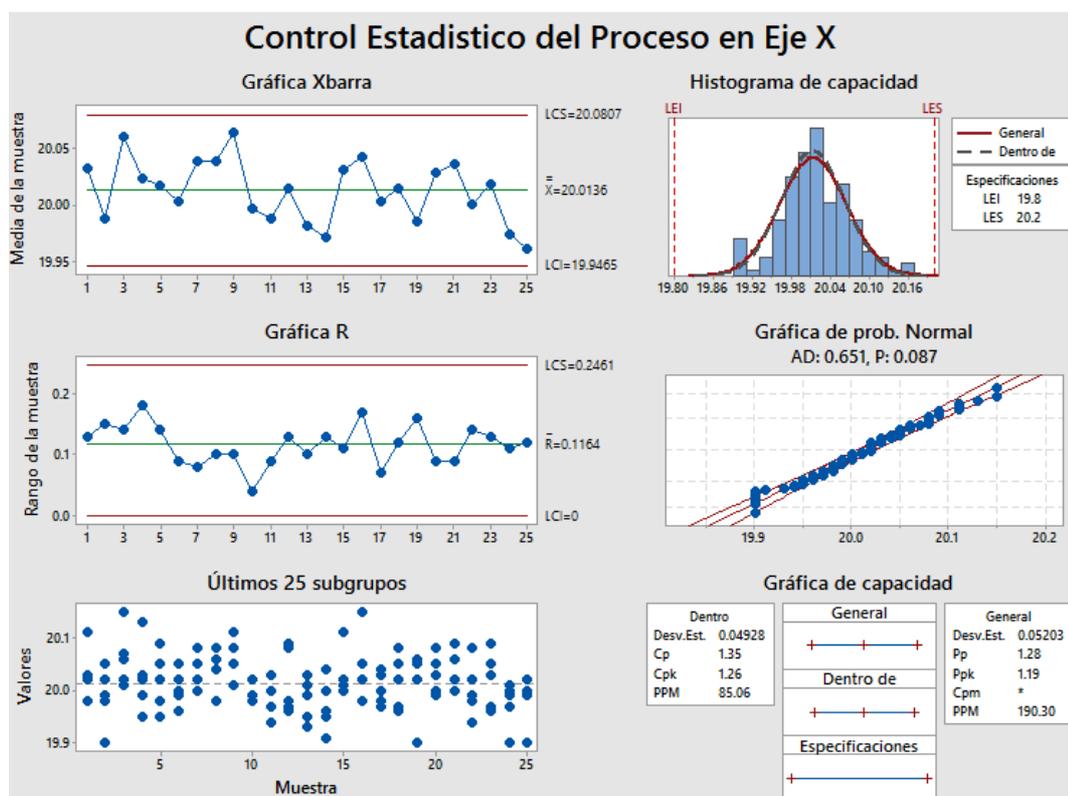


Figura 179.- Control Estadístico de Proceso en Eje X

En la Figura 179, se muestra un paquete de capacidad de control del proceso para el eje X, una vez demostrado que el proceso está bajo un control estadístico, los puntos del diagrama de dispersión de datos residuales forman una nube aleatoria y bastante horizontal, en la que no se observan tendencias ni desplazamientos. Ello también contribuye a considerar que el proceso está bajo control y se muestra estable.

En el histograma de capacidad se observa que los datos están dentro de los límites de especificación, lo que significa que el proceso cumple con las especificaciones, además que presenta una distribución aproximadamente normal, pues la curva se asemeja a una campana de Gauss.

En la gráfica de probabilidad normal, se observa un patrón de puntos que se aproximan a una línea recta, con excepción de los extremos, se puede considerar que el proceso tiene una distribución normal ya que es frecuente observar variabilidad en los extremos.

Además con los valores de Cp y Cpk también se puede concluir que el proceso cumple con las especificaciones requeridas, en el Eje X y que a largo plazo no presentará grandes cambios para cumplir con dichas especificaciones.

5.3.2. Eje Y.

La medida para el Eje Y, es de 15mm, es decir que las medidas obtenidas deben acercarse a este valor, estos datos se muestra en la Tabla 19.

En la Tabla 19 además se muestra el cálculo de la media y la desviación estándar, dos parámetros necesarios para continuar con la elaboración de las cartas de control. Con estos datos, se procede a calcular el promedio de la media ($\bar{\bar{X}}$) y el promedio de la desviación estándar (\bar{s}).

$$\bar{\bar{X}} = 15.025$$

$$\bar{s} = 0.042$$

En la Figura 176, se muestran las constantes para tablas de control utilizadas en la General Motors, para determinar si los procesos de fabricación de partes y piezas de vehículos son correctas.

En esta medición se tienen grupos de 5 mediciones cada uno, para lo cual las constantes son las siguientes:

- $A_3 = 1.427$ (Factor para límites de control de la Media)
- $c_4 = 0.94$ (Divisor para la estimación de la desviación estándar)
- $B_3 = 0$ (Factor para límites de control de la desviación estándar)
- $B_4 = 2.089$ (Factor para límites de control de la desviación estándar)

Con estas constantes, se procede a calcular los límites de control, tanto de la media como de la desviación estándar. Los límites de control superior e inferior para la media se los calcula con el modelo matemático mostrado en la ecuación 5.1 y 5.2 respectivamente. Mientras que los límites de control superior e inferior para la desviación estándar, se los obtiene gracias a las ecuaciones 5.3 y 5.4 respectivamente.

Tabla 19.
Medidas obtenidas del corte en eje X para cartas de control.

PRUEBA	EJE Y (LONGITUD mm)					\bar{X} (Media)	s (Desviación Estándar)
	M1	M2	M3	M4	M5		
1	15.07	15.07	15.02	14.97	15.06	15.038	0.0432
2	15.04	15.01	15.02	15.05	15.00	15.024	0.0207
3	15.10	15.00	15.09	15.08	15.01	15.056	0.0472
4	15.00	15.09	15.08	15.04	14.99	15.040	0.0453
5	15.09	15.03	15.06	15.08	15.01	15.054	0.0336
6	15.00	15.02	15.03	15.05	14.97	15.014	0.0305
7	15.09	15.08	15.05	15.06	15.06	15.068	0.0164
8	15.09	15.02	15.04	15.01	15.08	15.048	0.0356
9	15.06	15.03	15.09	14.98	14.97	15.026	0.0513
10	14.96	14.97	15.05	15.02	14.95	14.990	0.0430
11	14.96	15.02	15.06	14.90	14.99	14.986	0.0607
12	15.07	15.07	14.97	15.08	14.98	15.034	0.0541
13	15.05	15.06	15.05	15.07	15.08	15.062	0.0130
14	14.96	15.09	15.05	15.02	14.90	15.004	0.0750
15	15.03	15.04	15.00	15.00	14.94	15.002	0.0390
16	15.02	15.10	15.09	15.05	14.97	15.046	0.0532
17	15.08	15.00	15.03	14.92	15.05	15.016	0.0611
18	15.02	15.00	15.09	14.97	15.02	15.020	0.0442
19	15.05	15.09	15.03	15.04	15.08	15.058	0.0259
20	14.97	15.05	14.98	15.10	15.02	15.024	0.0532
21	14.94	14.97	14.96	15.00	14.99	14.972	0.0239
22	15.01	14.97	15.02	15.03	14.93	14.992	0.0415
23	14.97	15.05	14.94	14.90	15.01	14.974	0.0586
24	15.06	14.99	14.97	15.08	15.05	15.030	0.0474
25	15.08	15.00	15.05	15.07	14.99	15.038	0.0409

Reemplazando los valores de las constantes antes mencionadas y los valores del promedio de la media y el promedio de la desviación estándar, en estas 4 ecuaciones, obtenemos los límites de control, estos son:

$$LCS_x = 15.085$$

$$LCI_x = 14.964$$

$$LCS_s = 0.088$$

$$LCI_s = 0$$

Con los límites de control establecidos, se obtiene la gráfica de la carta de control, tanto para la media como se muestra en la Figura 180, como para la desviación estándar que se observa en la Figura 181.

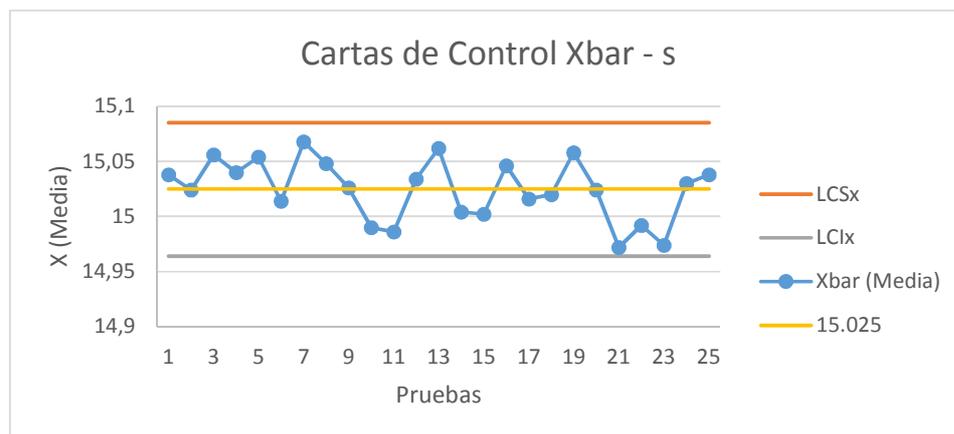


Figura 180.- Carta de control de Media en Eje Y

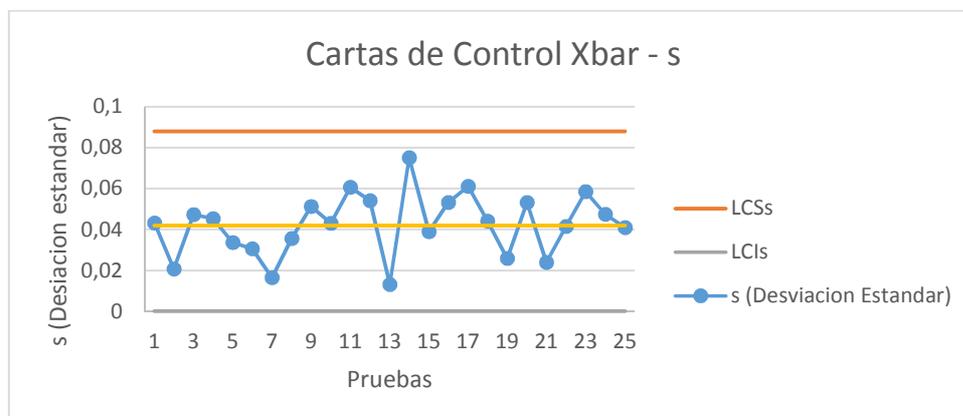


Figura 181.- Carta de Control de Desviación Estándar en Eje Y

En ambas cartas de control, se observan que la línea de dispersión, es decir el comportamiento de la media y de la desviación estándar, se mantienen dentro de los límites de control respectivos para cada elemento, es decir, que el proceso está en control estadístico en el Eje Y.

Al igual que en el eje X, para este eje se utiliza la herramienta de control de calidad para determinar variabilidad del proceso.

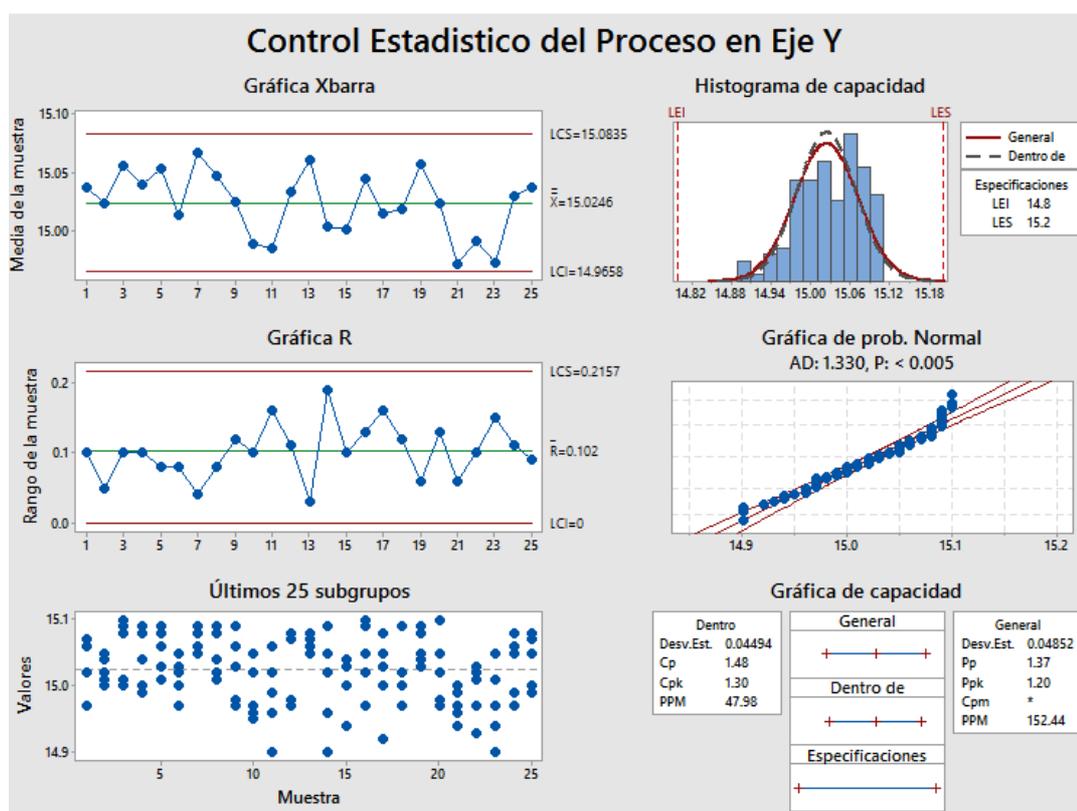


Figura 182.- Control Estadístico de Proceso en Eje Y.

En la Figura 182, se muestra un paquete de capacidad de control del proceso para el eje Y, igualmente demostrado que el proceso está bajo un control estadístico, los puntos del diagrama de dispersión de datos residuales forman una nube aleatoria pero con tendencia hacia arriba, esto significa que el proceso en el eje Y se mantiene bajo control pero no es tan estable como en el eje X.

En el histograma de capacidad se observa que los datos tienen una ligera tendencia a derecha, lo que no permite concluir que presente una distribución aproximadamente normal, pero que cumple con los límites de especificación, lo cual se verifica con los valores de Cp y Cpk.

Por su parte la gráfica de probabilidad normal, el patrón de puntos se aproxima, pero no con alta precisión, a una línea recta, presenta una alta variabilidad que a su vez muestra una distribución poco normal.

Debido a estas variaciones en el proceso, para mejorarlo, se recomienda una calibración en cuanto al movimiento de los ejes y de los parámetros de corte.

5.3.3. Circunferencias.

Como una prueba extra, se realizan circunferencias cuya medida es de 10mm de diámetro, es decir que las medidas obtenidas deben acercarse a este valor, estos datos se muestra en la Tabla 19.

En la Tabla 19 además se muestra el cálculo de la media y la desviación estándar, dos parámetros necesarios para continuar con la elaboración de las cartas de control. Con estos datos, se procede a calcular el promedio de la media ($\bar{\bar{X}}$) y el promedio de la desviación estándar (\bar{s}).

$$\bar{\bar{X}} = 9.978$$

$$\bar{s} = 0.045$$

En la Figura 176, se muestran las constantes para tablas de control utilizadas en la General Motors, para determinar si los procesos de fabricación de partes y piezas de vehículos son correctas.

En esta medición se tienen grupos de 5 mediciones cada uno, para lo cual las constantes son las siguientes:

- $A_3 = 1.427$ (Factor para límites de control de la Media)
- $c_4 = 0.94$ (Divisor para la estimación de la desviación estándar)
- $B_3 = 0$ (Factor para límites de control de la desviación estándar)
- $B_4 = 2.089$ (Factor para límites de control de la desviación estándar)

Con estas constantes, se procede a calcular los límites de control, tanto de la media como de la desviación estándar. Los límites de control superior e inferior para la media se los calcula con el modelo matemático mostrado en la ecuación 5.1 y 5.2 respectivamente. Mientras que los límites de control superior e inferior para la desviación estándar, se los obtiene gracias a las ecuaciones 5.3 y 5.4 respectivamente.

Tabla 20.
Medidas obtenidas del corte en circunferencias para cartas de control.

PRUEBA	DIAMETRO (mm)					\bar{X} (Media)	s (Desviación Estándar)
	M1	M2	M3	M4	M5		
1	9.90	9.94	10.04	9.95	9.97	9.960	0.051
2	9.90	9.95	9.94	10.04	10.01	9.968	0.056
3	9.97	9.99	9.95	9.98	10.00	9.978	0.019
4	10.02	9.96	10.03	9.93	10.06	10.000	0.053
5	9.96	10.05	10.10	9.92	9.97	10.000	0.073
6	9.99	10.01	9.93	9.91	9.92	9.952	0.045
7	10.03	9.99	9.95	10.01	9.93	9.982	0.041
8	10.04	9.93	9.99	9.95	10.02	9.986	0.046
9	9.91	9.99	10.03	9.93	10.02	9.976	0.054
10	9.92	9.98	10.01	9.92	9.95	9.956	0.039
11	9.96	9.98	10.02	9.97	9.99	9.984	0.023
12	10.05	9.95	10.02	10.06	10.02	10.020	0.043
13	9.95	9.93	9.90	9.93	9.96	9.934	0.023
14	9.95	9.93	9.98	10.01	9.91	9.956	0.040
15	9.90	9.98	9.99	9.97	10.03	9.974	0.047
16	9.93	9.93	10.03	9.93	10.04	9.972	0.058
17	10.01	9.92	10.01	10.03	9.92	9.978	0.054
18	9.91	9.91	9.91	10.04	9.95	9.944	0.056
19	9.99	9.95	10.03	10.02	10.06	10.010	0.042
20	9.93	9.93	10.04	10.07	9.97	9.988	0.064
21	9.95	9.92	9.99	9.95	9.92	9.946	0.029
22	9.99	9.94	10.04	9.99	9.93	9.978	0.044
23	10.03	9.95	9.94	9.96	10.03	9.982	0.044
24	10.05	9.97	9.98	10.02	10.05	10.014	0.038
25	10.01	9.93	9.95	10.02	9.98	9.978	0.038

Reemplazando los valores de las constantes antes mencionadas y los valores del promedio de la media y el promedio de la desviación estándar, en estas 4 ecuaciones, obtenemos los límites de control, estos son:

$$LCS_x = 10.041$$

$$LCI_x = 9.913$$

$$LCS_s = 0.094$$

$$LCI_s = 0$$

Con los límites de control establecidos, se obtiene la gráfica de la carta de control, tanto para la media como se muestra en la Figura 183, como para la desviación estándar que se observa en la Figura 184.

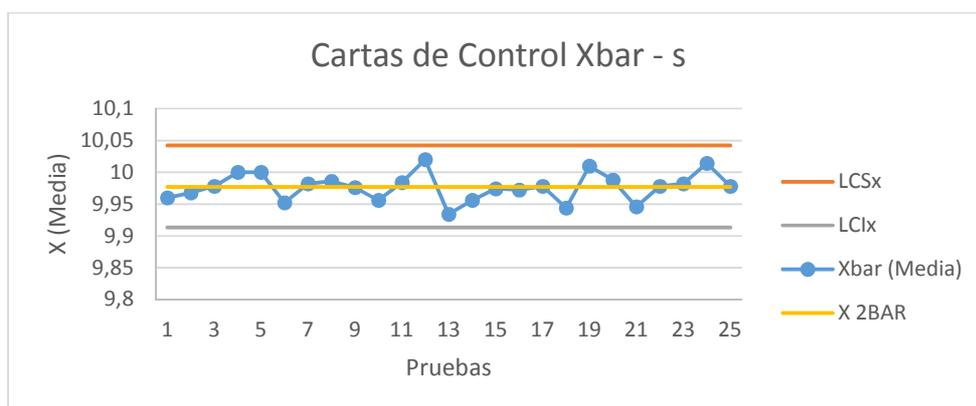


Figura 183.- Carta de control de Media en circunferencias

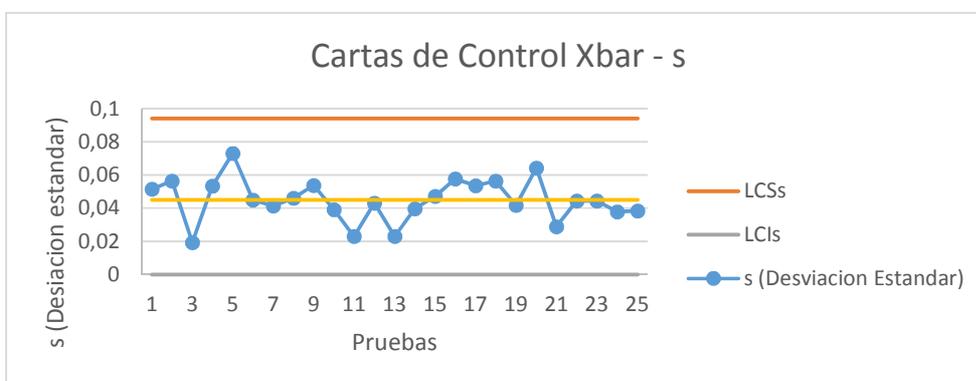


Figura 184.- Carta de Control de Desviación Estándar en circunferencias

En ambas cartas de control, se observan que la línea de dispersión, es decir el comportamiento de la media y de la desviación estándar, se mantienen dentro de los límites de control respectivos para cada elemento, es decir, que el proceso está en control estadístico cuando se maquinan circunferencias.

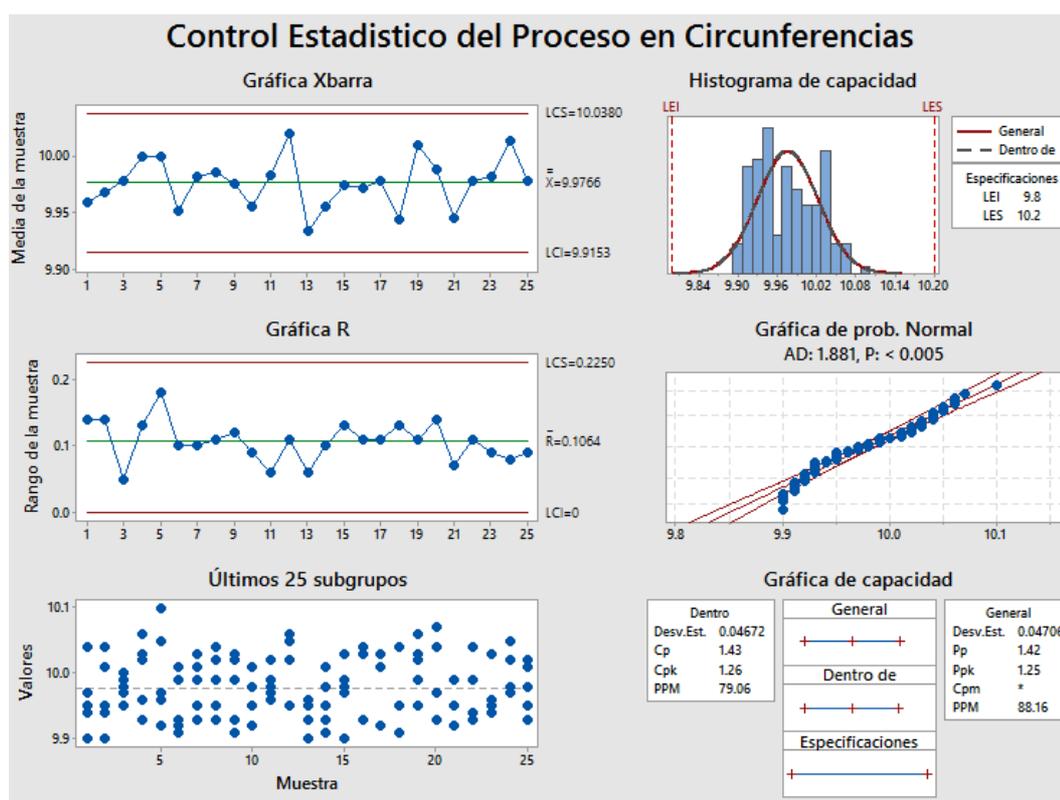


Figura 185.- Control Estadístico del Proceso en Circunferencias.

En la Figura 185, el paquete de capacidad de control del proceso para circunferencias, una vez demostrado que el proceso está bajo un control estadístico, muestra los puntos del diagrama de dispersión de datos residuales, forman una nube aleatoria, con una pequeña tendencia hacia abajo sin desplazamientos notables, es decir, el proceso se mantiene bajo control pero no presenta una gran estabilidad.

En el histograma de capacidad, se observa una distribución poco normal con una tendencia hacia izquierda, gracias a la variabilidad de los datos, que por su parte se

mantienen dentro de los límites de especificación y cumple con dichas especificaciones, corroborando esto con el C_p y C_{pk} .

Mientras que en la gráfica de probabilidad normal, el patrón de puntos no se aproxima demasiado a una línea recta, demuestra la alta variabilidad del corte en circunferencias.

En cuanto al maquinado de circunferencias, es recomendable mejorar el código de programación que realiza el corte, además de recalibrar el posicionamiento de cada uno de los ejes.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se exponen las conclusiones y recomendaciones obtenidas a partir del trabajo realizado. Además, se abordan los futuros posibles trabajos que se pueden plantear a partir con las dudas generadas y mejoras deseadas en la elaboración del proyecto.

6.1. CONCLUSIONES

Con la realización del presente proyecto, se han extraído las siguientes conclusiones:

- Se diseñó y construyó una plataforma CNC de corte por láser para MDF y acrílico, cuyo movimientos es producido por motores a pasos y transmitido, por medio de acoples de quijadas de goma, a tornillos de bola (ballscrew). La máquina CNC es capaz de posicionar el cabezal en las coordenadas requeridas, logrando un corte, en planchas de espesor de hasta 6mm, con una precisión en las dimensiones de 0.08mm.
- Por medio de pruebas realizadas, tales como, velocidad de corte, profundidad de corte y potencia de corte, con distintas variaciones, se ha logrado definir parámetros óptimos de corte, que incluyen, altura del cabezal con respecto al material a cortar, velocidad de corte respecto a potencia de corte y viceversa. Obteniendo como resultados que la altura del cabezal adecuada es de 8mm con respecto a la pieza y el espesor máximo de corte en MDF es 7mm, mientras que en acrílico es de 8mm, logrando un buen acabado superficial. Sobre estos espesores, no se logra un corte continuo y se tiene un acabado burdo. Adicionalmente, la mesa de trabajo tiene un área de corte efectiva de 950x800mm.
- Se logró controlar el robot cartesiano y la potencia del láser utilizando el software MACH3 por medio de la tarjeta e-Cut, que se comunica con los

motores por medio de los drivers ST330, mientras que el control de la potencia del láser se realiza directamente con la señal digital PWM hacia la fuente del láser. Además, la supervisión de niveles de corriente y temperatura se la realiza empleando un Arduino Nano, que facilita el bloqueo, tanto de la fuente del láser como del software MACH3, en caso de que algún valor exceda los límites establecidos, de 25mA para la corriente y 28°C en el caso de temperatura.

- Recurriendo a herramientas CAD/CAM/CAE y aplicando conocimientos adquiridos, para realizar estudios estáticos, térmicos, hidráulicos, entre otros, se han obtenido las dimensiones y capacidades de elementos utilizados para la construcción y correcto funcionamiento de los sistemas mecánicos del robot cartesiano. Del mismo modo, se manejan las herramientas antes mencionadas para el diseño de circuitos y componentes eléctricos y electrónicos, consiguiendo así las características de los elementos instalados en la máquina.
- Basados en el análisis estadístico, se puede aseverar que el proceso cumple con las especificaciones de corte establecidas en $\pm 0.2\text{mm}$, además presenta una distribución normal, es decir que el proceso a largo plazo, logrará mantener su estado de funcionamiento. Con lo cual se demuestra que el proceso está bajo un control estadístico riguroso.
- Es posible la construcción de este tipo de maquinaria en el país, llevándola a producciones en grandes cantidades, para aportar al cambio de la matriz productiva.

6.2. RECOMENDACIONES

- Previo a la manipulación de la máquina, se debe leer el manual de usuario de la misma, en donde se detallan todos los aspectos necesarios para la puesta en marcha de la máquina.
- Si se desean realizar cortes de mayor profundidad a los establecidos, se puede optar por comprar un tubo y su respectiva fuente de mayor potencia, de esta manera incrementar las capacidades de la máquina en cuanto a corte se refiere.

- Para mejorar el acabado, especialmente en las piezas de MDF, la bomba de aire puede ser reemplazada por una manguera conectada al circuito de aire comprimido, disminuyendo así la llama generada en el corte y precautelando la vida útil de los elementos cercanos a esta.
- El sistema de refrigeración instalado es adecuado para la aplicación, sin embargo, se puede usar un chiller industrial como el seleccionado en el capítulo 3, pues estos tienen un control de temperatura más preciso.
- La cortadora laser no posee sistema de extracción, por lo que se recomienda el uso de mascarillas. Si es posible, a corto plazo, diseñar e instalar un sistema de extracción para evitar acumulación de gases.
- La máquina no está exenta a las normas de seguridad del Laboratorio de Procesos de Manufactura, por lo que se recomienda seguirlas a cabalidad.

Bibliografía

- Aboites, V. (2000). *Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa*. Obtenido de El Láser: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/105/htm/ellas_er.htm
- Acryl. (s.f.). *Acryl*. Obtenido de ¿Qué es el acrílico?: <http://www.acryl.cl/Acrilico/acrilico.htm>
- ArtSoft USA. (06 de 11 de 2008). Mach3 CNC Controller Software Installation and Configuration. *Mach3 CNC Controller Software Installation and Configuration*. U.S.A.: The Mach Developer Network.
- Barrientos, A., & Peñin, L. (1996). *Fundamentos de Robótica*. Madrid.
- Barrientos, A., & Peñin, L. (1996). Morfología del Robot. En A. Barrientos, & L. Peñin, *Barrientos, A; Peñin, L.* (págs. 15-46).
- Barrientos, A., & Peñin, L. (2010). aegasd. En dfgsdfg, *sdfgsdfg* (pág. 234).
- Bogdan, I., & Kaufman, J. (2011). Laser Principles. *Curr Probl Dermatol Basel*.
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: McGraw Hill.
- Dahotre, N., & Harimkar, S. (2008). *Basics of Lasers*. New York: Springer Science.
- Dallas Semiconductor. (2015). *Datasheet DS18B20*.
- Deming, E. (2010). *LEANROOTS*. Obtenido de LEANROOTS: <http://leanroots.com/PDCA-Deming.html>
- Electro Cables C.A. (s.f.). *Catálogo Disensa Cables Eléctricos*.
- EnKon. (2013). *EnKon*. Obtenido de EnKon: <http://www.enkonsystems.com/>
- Eycom S.R.L. (2011). *Cálculo de Capacidad de corriente en pistas de circuitos impresos*. Buenos Aires, Argentina.
- Foth, H.-J. (s.f.). Principles of Lasers.
- Hiwin. (s.f.). *Ballscrew Technical Information*.
- Hiwin. (s.f.). *Linear Guideway Technical Information*.

- IPC2221. (2003). *Generic Standard on Printed Circuit Board Design*.
- Jiménez, R. (s.f.). *Universidad de Buenos Aires*. Obtenido de Control Numérico por Computadora (CNC): <http://materias.fi.uba.ar/7565/U4-control-numericopor-computadora.pdf>
- JinBo. (s.f.). *Catálogo de Tornillos de Bola*.
- Jones, D. (29 de 06 de 2004). *PCB Design Tutorial*. Obtenido de www.alternatezone.com: http://server.ibfriedrich.com/wiki/ibfwikien/images/d/da/PCB_Layout_Tutorial_e.pdf
- Kollmorgen. (s.f.). *Stepper Solutions Catalog*.
- Kuroda. (s.f.). *Ball Screw Catalogue*.
- Lovejoy. (2015). *Jaw Coupling Technical Information*.
- Melles Griot. (s.f.). *Melles Griot*. Obtenido de Basic Laser Principles: www.mellesgriot.com
- Microensamble.com. (s.f.). *Calculadora de ancho de pista*. Obtenido de [Microensamble.com](http://www.microensamble.com): http://www.microensamble.com/site/index.php?option=com_content&view=article&id=105:calculadora-de-ancho-de-pista&catid=62&Itemid=197
- Miliarium. (2008). *Miliarium. Ingeniería Civil y Medio Ambiente*. Obtenido de <http://www.miliarium.com/Prontuario/Tablas/Quimica/PropiedadesTermicas.asp>
- Ministerio de Ciencia y Tecnología. (2003). *Cálculo de las caídas de tensión*.
- Mott, R. (2006). *Mecánica de Fluidos*.
- NATIONAL INSTRUMENTS. (2015). *NATIONAL INSTRUMENTS*. Obtenido de [NATIONAL INSTRUMENTS: http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/203936](http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/203936)
- NBR. (2014). *Roller Bearings*. Obtenido de <http://www.nbr.eu/index.php?contentID=194>
- NSK Ltd. (s.f.). *Precision Machinery and Parts*.
- Paolini S.A. (s.f.). *Paolini*. Obtenido de Aplicaciones del Acrílico: http://www.paolini-sa.com/index.php?option=com_content&view=article&id=26&Itemid=40
- Power Transmission World. (2015). *Power Transmission World*. Obtenido de [Power Transmission World: http://www.powertransmissionworld.com](http://www.powertransmissionworld.com)

- Quilodrán Jopia, V., Pérez Moreno, R., & Lizana Marchant, C. (s.f.). *Acoplamientos Mecánicos*.
- Quilodrán, V. (2013). *INACAP*. Obtenido de INACAP: http://www.emagister.com/uploads_courses/Comunidad_Emagister_44744_44743.pdf
- Rabbit Laser USA. (2014). *Rabbit Laser USA*. Obtenido de Rabbit Laser USA: <http://www.rabbitlaserusa.com/manuals/cw5000manualfor2010model.pdf>
- Rolled Threads Unlimited. (2014). *Rolled Threads Unlimited*. Obtenido de Rolled Threads Unlimited: <http://www.rolledthreads.com/>
- Ruelas Gómez, R. (s.f.). *Cálculos de caída de tensión en baja tensión*.
- SDZ Láser. (2012). *SDZ Láser*. Obtenido de SDZ Láser: <http://www.sdzlaser.com/dx-laser-tube.html>
- SDZ Láser. (2012). *SDZ Láser*. Obtenido de SDZ Láser: <http://www.sdzlaser.com/laser-power-supply.html>
- SDZ Láser. (2012). *SDZ Láser*. Obtenido de SDZ Láser: <http://www.sdzlaser.com/optical-lens.html>
- Selene Co. (2011). *Stepper Motor Voltages Explained*. Obtenido de <http://www.selene.co>
- Siemens. (s.f.). *Siemens*. Obtenido de CAD / Diseño Asistido por Computadora: http://www.plm.automation.siemens.com/es_sa/plm/cad.shtml
- Simpson, E. (2012). The Basic Principles of Laser Technology, Uses and Safety Measures in Anaesthesia. *Anaesthesia Tutorial of the Week*.
- Son Robots. (2014). *Son Robots*. Obtenido de Son Robots: <http://sonrobots.com>
- ST330 Stepper Motor Driver Manual. (s.f.).
- Stoner, C. (08 de 07 de 2011). *Selene*. Obtenido de Stepper Motor Voltages Explained: <http://www.selene.co/Blog/2011/07/stepper-motor-voltages-explained/>
- Tablemac. (s.f.). *Tablemac*. Obtenido de Usos y Aplicaciones del MDF: <http://www.tablemac.com/tips/161-usos-y-aplicaciones-del-mdf-tablemac>
- TECHNOINC. (2015). *TECHNOINC*. Obtenido de TECHNOINC: <http://www.techno-isel.com/>
- Thyagarajan, K., & Ghatak, A. (2010). *Basic Optics*. New York: Springer Science.

- Ultra Plas S.A. (s.f.). *Acrílico y Policarbonato*. Obtenido de Propiedades del Acrílico:
<http://www.acrilico-y-policarbonato.com/acrilico-propiedades.html>
- Universidad Técnica Federico de Santa María. (s.f.). Obtenido de UTFSM:
http://www.fis.utfsm.cl/fis140/EI_Laser.pdf
- Verdeyen, J. (1995). Laser Excitation. En *Laser Electronics* (págs. 347-422). New Jersey:
Prentice Hall.
- Xiamen NBR. (2012). *Needle, Ball and Roller Bearings*.
- Ollero-Baturone, A. (2001) *ROBÓTICA. Manipuladores y robots móviles*. Sevilla:
Marcombo.
- JHG Ingeniería. “Transferencia de Calor a través de un ducto en corriente de aire”.
Modelación Casos Didácticos. (2013) p20-26.

ANEXO A: Planos Mecánicos.

ANEXO B: Planos Eléctricos

ANEXO C: Manual fuente Láser

ANEXO D: Manual Tubo Láser