



**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL
ECUADOR**

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍAS
APLICADAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA CNC CORTADORA
POR PLASMA PARA PLANCHAS DE ACERO DE HASTA 10mm DE
ESPESOR.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN
MECATRÓNICA.**

MAYA ALEJANDRA SUNTAXI ÁLAVA

DIRECTOR: ING. JOSÉ GUSTAVO BELTRÁN BENALCÁZAR, MSc

D.M. Quito

2017

DECLARACIÓN

Yo MAYA ALEJANDRA SUNTAXI ÁLAVA, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado, o calificación profesional; y, que he investigado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo a la Universidad Internacional del Ecuador, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



MAYA ALEJANDRA SUNTAXI ÁLAVA

C.I. 171793101-6

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por MAYA ALEJANDRA SUNTAXI ÁLAVA, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'J. Beltrán', is written over a horizontal line.

ING. JOSÉ GUSTAVO BELTRÁN BENALCÁZAR, MSc.

DIRECTOR DE PROYECTO

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I

MÁQUINAS DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO POR CORTE PLASMA .. 1

1.1 TEMA	1
1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	1
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
1.3 HIPÓTESIS	2
1.4 MARCO TEÓRICO	2
1.4.1 MÁQUINA CNC CORTADORA POR PLASMA	2
1.4.2 SISTEMA CNC	3
1.4.2.1 Composición Sistema CNC	3
1.4.2.2 Funcionamiento Sistema CNC.....	4
1.4.3 CÓDIGO G	5
1.4.4 PLASMA	6
1.4.5 CORTE POR PLASMA	6
1.4.5.1 Ventajas del Corte por Plasma	7
1.4.5.2 Desventajas del Corte por Plasma	9
1.4.6 TIPOS DE CORTE POR PLASMA.....	9
1.4.6.1 Corte por plasma por aire	9
1.4.6.2 Corte con inyección de oxígeno.....	10
1.4.6.3 Corte con doble Flujo	10
1.4.7 CORTE PLASMA CON AIRE COMPRIMIDO	11
1.4.8 ANTORCHA PARA CORTE POR PLASMA	12
1.4.8.1 Boquillas o Tobera.....	13
1.4.8.2 Piezas Consumibles	14
1.5 ESTADO DEL ARTE	14

CAPÍTULO II

ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LOS ELEMENTOS Y SISTEMAS QUE CONFORMAN LA MÁQUINA CNC CORTADORA POR PLASMA.....	17
2.1 QFD DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN CALIDAD	17
2.1.1 CASA DE LA CALIDAD	17
2.1.2 CASA DE LA CALIDAD MÁQUINA CNC CORTADORA POR PLASMA	18
2.1.2.1 Voz del Usuario	20
2.1.2.2 Voz del Ingeniero.....	20
2.1.2.3 Evaluación Competitiva	21
2.1.2.4 Prioridad y Correlación Resultado Casa de Calidad	22
2.2 ANÁLISIS FUNCIONAL.....	23
2.2.1 MÓDULO 1	27
2.2.2 MÓDULO 2	28
2.2.3 MÓDULO 3	33
2.3 MATRIZ MORFOLÓGICA	33
2.4 MÉTODO DE SELECCIÓN: MATRIZ DE RESIDUOS PONDERADOS.....	36
2.4.1 EVALUACIÓN DE LOS PESOS ESPECÍFICOS DE LAS DISTINTAS SOLUCIONES PARA CADA CRITERIO	37
2.4.2 TABLA DE PRIORIDADES	39
CAPÍTULO III	
DISEÑO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS Y SISTEMAS	41
3.1 DISEÑO MECÁNICO	41
3.1.1 DISEÑO EJE Z	42
3.1.1.1 Selección de Rodamientos Lineales	43
3.1.1.1.1 Carga Estática	43
3.1.1.1.2 Carga dinámica.....	48
3.1.1.2 Selección y Cálculo Tornillo de Potencia	49
3.1.1.2.1 Torque Tornillo de Potencia	51
3.1.1.2.1.1 Torque de Subida.....	51
3.1.1.2.1.2 Torque de bajada	52
3.1.1.2.1.3 Eficiencia durante la elevación de la carga.	53

3.1.1.2.2 Esfuerzos producidos en el Tornillo de Potencia	54
3.1.1.3 Recopilación de resultados del análisis y selección de elementos del Eje Z.....	56
3.1.2 DISEÑO EJE Y	56
3.1.2.1 Selección de Rodamientos Lineales	57
3.1.2.1.1 Carga Estática	57
3.1.2.1.2 Carga dinámica.....	60
3.1.2.2 Dimensionamiento y Selección del mecanismo de Piñón – Cremallera .	61
3.1.2.2.1 Fuerza tangencial teórica.....	62
3.1.2.2.2 Fuerza tangencial corregida.....	63
3.1.2.2.3 Análisis de fuerzas	65
3.1.2.2.4 Diseño a flexión para el mecanismo piñón – cremallera.....	67
3.1.2.2.5 Factor de seguridad	69
3.1.2.3 Recopilación de resultados del análisis y selección de elementos del Eje Y	72
3.1.2.4 Análisis estructural del pórtico	72
3.1.2.4.1 Análisis matemático estructura del pórtico	72
3.1.2.4.2 Análisis computacional estructura del pórtico.....	75
3.1.2.5 Diagramas de Fuerza Cortante y Momento Flector.	78
3.1.2.5.1 Diagrama de fuerza cortante.....	78
3.1.2.5.2 Diagrama de Momento Flector.....	79
3.1.3 DISEÑO EJE X	80
3.1.3.1 Selección de Rodamientos Lineales	81
3.1.3.1.1 Carga Estática	81
3.1.3.1.2 Carga dinámica.....	83
3.1.3.2 Dimensionamiento y Selección Piñón – Cremallera.....	84
3.1.3.2.1 Fuerza tangencial teórica.....	84
3.1.3.2.2 Fuerza tangencial corregida.....	85
3.1.3.2.3 Análisis de fuerzas	86
3.3.2.2.4 Diseño a flexión para el mecanismo piñón – cremallera.....	88
3.1.3.2.5 Factor de seguridad S_f contra la falla por fatiga por flexión.	89

3.1.3.3 Recopilación de resultados del análisis y selección de elementos del Eje X	90
3.1.3.4 Análisis estructural del Soporte Planchas de corte	91
3.1.3.4.1 Análisis matemático estructura soporte planchas de corte	91
3.1.3.4.2 Análisis computacional para la estructura de soporte planchas de corte.	94
3.1.3.5 Diagramas de Fuerza Cortante y Momento Flector.	96
3.1.3.5.1 Diagrama de Fuerzas Cortantes.	97
3.1.3.5.2 Diagrama de Momento Flector.....	97
3.1.3.6 Dimensionamiento y validación de rejilla de corte.	98
3.1.3.7 Análisis estructural Soporte Bandeja de Agua	100
3.1.3.7.1 Análisis matemático estructura soporte bandeja de agua	103
3.1.3.7.2 Análisis computacional para la estructura de soporte planchas de corte.	100
3.1.3.8 Diagramas de Fuerza Cortante y Momento Flector.	101
3.1.3.8.1 Diagrama de Fuerzas Cortantes.	102
3.1.3.8.2 Diagrama de Momento Flector.....	103
3.1.3.9 Selección de apoyos regulables.	107
3.2 DISEÑO ELECTROMECAÁNICO.....	108
3.2.1 SELECCIÓN DEL MOTOR PARA EJE Z ALTURA DE LA ANTORCHA	108
3.2.2 SELECCIÓN DEL MOTOR EJE Y PARA EL DESPLAZAMIENTO DE LA ANTORCHA	117
3.2.3 SELECCIÓN DEL MOTOR EJE X PARA EL DESPLAZAMIENTO DE PÓRTICO	123
3.2.4 SELECCIÓN DE DRIVERS PARA LOS MOTORES PASO A PASO.	127
3.2.5 SELECCIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN	129
3.2.6 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR Y THC	131
3.2.7 SELECCIÓN DE LOS SENSORES DE POSICIONAMIENTO	133
3.2.8 SELECCIÓN ELEMENTOS ELÉCTRICOS OPERATIVOS Y DE FUERZA	135
3.2.8.1 Parámetros a considerar para la selección de luces indicadoras.....	135
3.2.8.2 Parámetros a considerar para la selección de pulsadores.....	136
3.2.8.3 Parámetros a considerar para dimensionar y seleccionar un contactor	137

3.3 DISEÑO CABINA DE CONTROL	139
3.4 SELECCIÓN SOFTWARE CAM CNC CORTADORA PLASMA	143
3.5 SELECCIÓN SOFTWARE HMI CNC CORTADORA PLASMA.....	144
CAPÍTULO IV	
PROCESO CONSTRUCTIVO Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	146
4.1 PROCESO CONSTRUCTIVO MÁQUINA CNC CORTADORA POR PLASMA. 146	
4.1.1 CONSTRUCCIÓN EJE X.....	146
4.1.2 CONSTRUCCIÓN EJE Y	149
4.1.3 CONSTRUCCIÓN EJE Z	151
4.1.4 ENSAMBLAJE DE LA MÁQUINA	153
4.1.5 CONSTRUCCIÓN CABINA DE CONTROL	155
4.2 PRUEBAS DE CORTE: PLANCHA DE ACERO AL CARBONO 1mm.....	157
4.3 RESULTADOS PRUEBAS DE CORTE	160
4.3.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS CIRCUNFERENCIA DE 20mm.....	160
4.3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS CIRCUNFERENCIA DE 50mm.....	163
4.3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS CIRCUNFERENCIA DE 75mm.....	164
4.3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS CIRCUNFERENCIA DE 100mm.....	166
4.3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS CIRCUNFERENCIA DE 150mm.....	168
4.3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS GENERALES PRUEBAS DE CORTE	170
4.4 PRUEBAS FUNCIONAMIENTO DE DISPOSITIVOS SEGURIDAD	172
4.4.1 SENSORES POSICIÓN A – EJE X.....	173
4.4.2 SENSORES POSICIÓN B - EJE Y	175
4.4.3 SENSORES POSICIÓN C – EJE Z.....	176
4.4.4 ACTIVACIÓN BOTÓN DE PARO	177
4.4.5 ACTIVACIÓN DEL SENSOR - PULSADOR DE PROTECCIÓN PARA LA ANTORCHA.....	178
4.5 CÁLCULO DE COSTOS DE LA MÁQUINA	180
CONCLUSIONES	183
RECOMENDACIONES.....	185
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	186

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Selección de gases para el proceso plasma dual gas, [6].	10
Tabla 1.2. Valores recomendados Corte Plasma aire comprimido, [6].	12
Tabla 1.3. Características Técnicas Máquinas CNC Plasma.	16
Tabla 2. 1. Prioridad parámetros de diseño.	22
Tabla 2. 2. Alternativas de Solución Módulo 1 Software.	27
Tabla 2. 3. Alternativas de Solución Módulo 2 Control Electrónico.	29
Tabla 2. 4. Alternativas de Solución Módulo 2 Motores.	29
Tabla 2. 5. Alternativas de Solución Módulo 2 Transmisión de Motor.	30
Tabla 2. 6. Alternativas de Solución Módulo 2 Sistema de Reducción de Fricción.	31
Tabla 2. 7. Alternativas de Solución Módulo 2 Sistema de contención de polvo/humo.	32
Tabla 2. 8. Matriz Morfológica CNC plasma cortadora	34
Tabla 2. 9. Evaluación del peso específico de cada criterio.	37
Tabla 2. 10. Evaluación del criterio de fiabilidad.	37
Tabla 2. 11. Evaluación del criterio de precisión.	38
Tabla 2. 12. Evaluación del criterio de costo.	38
Tabla 2. 13. Evaluación del criterio de velocidad.	38
Tabla 2. 14. Evaluación del criterio de mantenibilidad.	39
Tabla 2. 15. Prioridades Matriz de Residuos Ponderados.	39
Tabla 3. 1. Factor de contacto rodamientos lineales, [8].	44
Tabla 3. 2. Peso componentes Eje Z - cálculo carga máxima rodamientos.	45
Tabla 3. 3. Coeficiente de seguridad estático Rodamientos Lineales.	48
Tabla 3. 4. Características Técnicas Tornillo de Potencia, [8].	49
Tabla 3. 5. Peso elementos Eje Z - cálculo carga máxima tornillo de potencia.	50
Tabla 3. 6. Recopilación de resultados Eje Z.	56
Tabla 3. 7. Peso componentes Eje Z - cálculo carga máxima rodamientos Eje Y.	58
Tabla 3. 8. Peso componentes Eje Z - cálculo fuerza tangencial selección cremallera.	62
Tabla 3. 9. Coeficiente Seguridad Cremallera, [11].	64
Tabla 3. 10. Características técnicas piñón Eje Y, [11].	65

Tabla 3. 11. Recopilación resultados Eje Y.....	72
Tabla 3. 12. Peso de elementos extra en pórtico - Eje Y.....	76
Tabla 3. 13. Porcentaje de Error Pórtico Simulación - Análisis Matemático.	77
Tabla 3. 14. Propiedades Mecánicas ASTM A500.	77
Tabla 3. 15. Peso elementos Eje Z y Y - cálculo rodamientos Eje X.	81
Tabla 3. 16. Peso elementos Eje Y y Z - cálculo piñón cremallera.	84
Tabla 3. 17. Características técnicas piñón Eje X.	86
Tabla 3. 18. Recopilación resultados Eje X.	90
Tabla 3. 19. Porcentaje de error estructura soporte de planchas.	95
Tabla 3. 20. Propiedades Mecánicas ASTM A500.	96
Tabla 3. 21. Selección del número de placas.	99
Tabla 3. 22. Factor de seguridad espesor de placas rejilla.....	99
Tabla 3. 23. Porcentaje error soporte bandeja de agua.	101
Tabla 3. 24. Requerimientos del actuador Eje Z.	109
Tabla 3. 25. Especificaciones Generales Motor paso a paso Eje Z, [19].	116
Tabla 3. 26. Requerimientos del actuador Eje Y.	117
Tabla 3. 28. Requerimientos del actuador Eje X.	124
Tabla 3. 29. Resultados Cálculo Motor Eje X.	124
Tabla 3. 30. Especificaciones Técnicas Motor Eje X.	126
Tabla 3. 31. Especificaciones Eléctricas Driver EM806, [19].	129
Tabla 3. 32. Parámetros eléctricos requeridos para fuente de alimentación.	129
Tabla 3. 33. Especificaciones Eléctricas Fuente de Alimentación RPS4810.	130
Tabla 3. 34. Especificaciones Técnicas Sensores Inductivos diámetro M12, [20].	135
Tabla 3. 35. Especificaciones Técnicas Luces Indicadoras AD16-22D/S.....	135
Tabla 3. 36. Especificaciones Técnicas Pulsadores NC.....	136
Tabla 3. 37. Especificaciones Técnicas pulsadores NA.	137
Tabla 3. 38. Especificaciones Técnicas pulsador de paro.	137
Tabla 3. 39. Especificaciones Técnicas Motor Nema 34, [22].	139
Tabla 3. 40. Especificaciones Técnicas Contactador, [22].	139
Tabla 4. 1. Detalle de cortes de prueba.	158
Tabla 4. 2. Especificaciones técnicas calibre digital Stainless.....	159

Tabla 4. 3. Resultado Pruebas de Circunferencia de 25mm.	160
Tabla 4. 4. Resultado pruebas de circunferencia 50mm.	163
Tabla 4. 5. Resultado pruebas de circunferencia 75mm.	165
Tabla 4. 6. Resultado de pruebas circunferencia 100mm.	166
Tabla 4. 7. Resultados Prueba circunferencia 150mm.	169
Tabla 4. 8. Rango Tolerancia.	171
Tabla 4. 9. Rango General de Repetibilidad.	171
Tabla 4. 10. Costo de elementos normalizados y suministros.	180
Tabla 4. 11. Costos de materiales.	181
Tabla 4. 12. Costo de mano de obra y maquinaria.	181
Tabla 4. 13. Costos Finales Máquina CNC Cortadora Plasma.	182

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama de bloques composición máquina CNC, [3].	4
Figura 1.2. Pasos para el desarrollo del corte plasma, [3].	7
Figura 1.3. Composición de una Antorcha Plasma, [6].	13
Figura 1.4. Tipo de Boquillas para Plasma, [6].	13
Figura 2. 1. Distribución Casa de la Calidad, [4].	18
Figura 2. 2. Casa de la Calidad Máquina CNC plasma.	19
Figura 2. 3. Evaluación competitiva.	22
Figura 2. 4. Análisis Funcional Nivel 0.	23
Figura 2. 5. Análisis Funcional Nivel 1.	24
Figura 2. 6. Análisis Funcional Nivel 2.	25
Figura 2. 7. Módulo 1 Nivel 2.	25
Figura 2. 8. Módulo 2 Nivel 1.	26
Figura 2. 9. Módulo 3 Nivel 2.	26
Figura 2. 10. Alternativa 1 Matriz Morfológica.	35
Figura 2. 11. Alternativa 2 Matriz Morfológica.	35
Figura 2. 12. Alternativa 3 Matriz Morfológica.	35
Figura 2. 13. Alternativa 4 Matriz Morfológica.	36
Figura 3. 1. Esquema General Máquina CNC Cortadora por Plasma.	41
Figura 3. 2. Esquema General y Elementos Eje Z.	43
Figura 3. 3. Coeficiente de Layout recirculaciones, [8].	45
Figura 3. 4. Estructura Principal - Elementos Eje Y.	57
Figura 3. 5. Transmisión piñón – cremallera partes, [9].	62
Figura 3. 6. Selección módulo piñón - cremallera Eje Y, [11].	65
Figura 3. 7. Simulación Inventor Desplazamiento Eje Y.	77
Figura 3. 8. Diagrama de cuerpo libre pórtico Eje Y.	78
Figura 3. 9. Diagrama de Fuerza Cortante Estructura Principal Eje Y.	79
Figura 3. 10. Diagrama Momento Flector Pórtico Eje Y.	79
Figura 3. 11. Estructura principal y elementos Eje X.	80

Figura 3. 12. Selección módulo piñón - cremallera Eje X, [11].	86
Figura 3. 13. Resultado de Simulación - Desplazamiento.	95
Figura 3. 14. Diagrama Cuerpo Libre Estructura Soporte Planchas.	96
Figura 3. 15. Diagrama de Fuerzas Cortantes Estructura Soporte Plancha.	97
Figura 3. 16. Diagrama Momento Flector Estructura Soporte Planchas.	98
Figura 3. 17. Resultado simulación inventor desplazamiento bandeja de agua.	101
Figura 3. 18. Diagrama Cuerpo Libre Estructura Soporte Bandeja de Agua.	102
Figura 3. 19. Diagrama Fuerza Cortante Estructura Soporte Bandeja de Agua.	102
Figura 3. 20. Diagrama Momento Flector Estructura Soporte Bandeja de Agua.	107
Figura 3. 21. Curva Característica Torque/Velocidad motor 57HS22 según cálculos realizados para Eje Z, [19].	116
Figura 3. 22. Curva Característica Torque/Velocidad motor 57HS22 según cálculos realizados para Eje Y, [19].	123
Figura 3. 23. Curva Característica Torque/Velocidad motor 86HS85, [19].	127
Figura 3. 24. Driver EM806, [19].	128
Figura 3. 25. Control de Altur THC MP3600, [19].	132
Figura 3. 26. Funcionamiento Sensor Inductivo, [20].	134
Figura 3. 27. Luces Piloto Marca Steck, [22].	136
Figura 3. 28. Medidas en mm cabina de control parte inferior.	141
Figura 3. 29. Forma cabina de control parte inferior.	141
Figura 3. 30. Medidas cabina de control parte superior.	142
Figura 3. 31. Cabina de control estructura completa.	142
Figura 3. 32. Software CAM SheetCam (pantalla principal).	143
Figura 3. 33. Software HMI CommandCNC (pantalla principal).	144
Figura 3. 34. Descripción software HMI.	145
Figura 4. 1. Diagrama de construcción Eje X.	147
Figura 4. 2. Estructura principal mesa de corte (Eje X).	147
Figura 4. 3. Instalación soporte rejillas de corte.	148
Figura 4. 4. Instalación rejillas de corte	148
Figura 4. 5. Instalación cremallera - guías lineales - bandejas de agua.	149
Figura 4. 6. Diagrama de construcción Eje Y.	150

Figura 4. 7. Estructura principal Eje Y.	151
Figura 4. 8. Diagrama de construcción Eje Z.	152
Figura 4. 9. Instalación chumaceras - tornillo de potencia.....	152
Figura 4. 10. Instalación guías lineales - soporte antorcha.....	152
Figura 4. 11. Instalación motor paso a paso.....	153
Figura 4. 12. Diagrama de ensamblaje total máquina CNC cortadora por plasma.	154
Figura 4. 13. Ensamblaje total CNC cortadora plasma.....	154
Figura 4. 14. Diagrama de construcción cabina de control.....	155
Figura 4. 15. Cabina de control elementos de potencia.	156
Figura 4. 16. Cabina de control elementos de control.	156
Figura 4. 17. Cabina de control.....	157
Figura 4. 18. Cortes de Prueba.....	159
Figura 4. 19. Campana de Gauss Resultado Circunferencia de 20mm.....	162
Figura 4. 20. Campana de Gauss Resultado Circunferencia 50mm.....	164
Figura 4. 21. Campana de Gauss Resultado Circunferencia 75mm.....	166
Figura 4. 22. Campana de Gauss Resultado Circunferencia 100mm.....	168
Figura 4. 23. Campana de Gauss Resultado Circunferencia 150mm.....	170
Figura 4. 24. Corte complejo CNC cortadora por plasma.....	172
Figura 4. 25. Disposición elementos de seguridad máquina CNC cortadora por plasma.	172
Figura 4. 26. Posicion de sensor Eje X.	173
Figura 4. 27. Señal de activación.....	173
Figura 4. 28. Activación HMI restricción sensor delantero seguridad Eje X.....	174
Figura 4. 29. Activación HMI restricción sensor trasero seguridad Eje X.....	174
Figura 4. 30. Posición de sensor Eje Y.	175
Figura 4. 31. Señal mecánica de activación sensor Eje Y.....	175
Figura 4. 32. Activación HMI restricción sensor seguridad Eje Y parte izquierda.	176
Figura 4. 33. Posicionamiento y activación sensor Eje Z.	177
Figura 4. 35. Señal de activación E-STOP.....	178
Figura 4. 36. Alerta desactivación antorcha.	179

ABREVIATURAS

CNC	Control Numérico Computarizado.
HMI	Interfaz Hombre Máquina.
CAD	Diseño Asistido por Computadora.
CAM	Manufactura Asistida por Computadora.
QFD	Despliegue de la Función de la Calidad.

RESUMEN

El presente proyecto tiene como propósito diseñar y construir una máquina CNC cortadora plasma además de dimensionar, definir y seleccionar todos los elementos mecánicos y electrónicos para su funcionamiento. Adicionalmente, validar los cálculos matemáticos realizados mediante software de simulación. Finalmente, para la realización de la conexión eléctrica y la construcción del sistema CNC.

En el primer capítulo se realiza una breve revisión de algunos temas relacionados con la realización de este proyecto en lo que concierne a sistemas CNC, plasma, antorchas de corte automático e integración CAD-CAM.

En el segundo capítulo se presenta la selección y análisis de elementos y componentes de la máquina, definiendo la estructura funcional del sistema además de plantear y seleccionar las soluciones o alternativas en base a ciertos criterios de evaluación.

En el tercer capítulo se efectúa el diseño a detalle donde se realiza el dimensionamiento y selección de los diferentes componentes mecánicos obteniendo finalmente los planos constructivos de la máquina. Además, se desarrolla el diseño electrónico donde de igual forma se seleccionan y establecen los diferentes componentes electrónicos hasta conformar el diagrama de conexionado de los mismos.

Finalmente, en el cuarto capítulo se detalla el proceso de construcción de la máquina, las pruebas de funcionamiento y los resultados obtenidos los cuales deben cumplir con los objetivos propuestos.

Como resultado del análisis, selección y dimensionamiento realizado en los capítulos anteriores, la máquina cumple con los objetivos planteados con una tolerancia de 0,2378 mm en los cortes en planchas desde 0,5 a 20mm, además de un rango de repetibilidad de 0.4916 con un porcentaje de repetibilidad de 7,.8%.

ABSTRACT

The purpose of this project is to design and build a CNC plasma cutting machine in addition to dimensioning, defining and selecting all mechanical and electronic elements for its operation. Additionally, validate the mathematical calculations made using simulation software. Finally for the realization of the electrical connection and the construction of the CNC system.

In the first chapter a brief review of some issues related to the realization of this project is made in regards to CNC systems, plasma, cutting torches and CAD-CAM integration.

The second chapter presents the selection and analysis of elements and components of the machine, defining the functional structure of the system as well as proposing and selecting solutions or alternatives based on certain evaluation criteria.

In the third chapter the design is done in detail where the sizing and selection of the different mechanical components is carried out, finally obtaining the constructive drawings of the machine. In addition, the electronic design is developed where, in the same way, different electronic components are selected and established to form the wiring diagram of the same.

Finally, the fourth chapter details the process of constructing the machine, the functional tests and the results obtained which are solved with the proposed objectives.

As a result of the analysis, selection and sizing done in previous chapters, the machine meets the objectives with a tolerance of 0.2378 millimeter in cuts in the planes from 0,5 to 20mm, in addition to a repetition range of 0.4916 with a percentage of repeatability of 72,8%.

INTRODUCCIÓN

Los avances tecnológicos en el campo de la microelectrónica y mecánica están haciendo posible el desarrollo de máquinas CNC de una rapidez y potencia sin precedentes. El número creciente de funciones integradas en las máquinas simplifica incluso los procesos de mecanizado más complejos. Al mismo tiempo, estos productos ofrecen una mayor facilidad de manejo, no solo en lo que respecta a la programación, sino también durante otras operaciones, como la instalación y el mantenimiento.

Al contar con todas estas ventajas las máquinas CNC están ganando fama y campo en el sector industrial; una de las máquinas CNC más utilizadas en la industria es la cortadora plasma por su limpieza en el corte y versatilidad.

En el Ecuador la industria del corte de metales está innovándose y optando por nuevas tecnologías, incrementando los requisitos de calidad y productividad concluyendo en una búsqueda constante de máquinas de mejor calidad de corte, mayor productividad y reducción de los costos operativos siendo indiscutiblemente una prioridad a nivel industrial; por lo que las empresas que prestan servicios buscan opciones que satisfagan dichos requerimientos dando como uno de los resultado la inversión en máquinas CNC de corte por plasma.

Estas máquinas tienen un alto rango de aplicación; actualmente, existen sistemas de alta definición disponibles para espesores entre 0,5mm y 32mm en acero de carbono. La inversión de este tipo de cortadoras CNC es relativamente alto, debido a la tecnología empleada en su construcción, por lo que se plantea en este proyecto de titulación la construcción y diseño de una cortadora plasma de hasta 10mm de espesor.

CAPÍTULO I

MÁQUINAS DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO POR CORTE PLASMA

1.1 TEMA

Diseño y construcción de una máquina CNC cortadora por plasma para planchas de acero de hasta 10mm de espesor.

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir una máquina CNC cortadora por plasma para planchas de acero de hasta 10mm de espesor.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar y documentar las características y funcionamiento de una máquina de corte por plasma CNC.
- Realizar el estudio y selección de alternativas de los diferentes sistemas que componen la máquina CNC.
- Diseñar y construir un sistema mecánico que permita un desplazamiento a través de los Ejes x, y, z.
- Diseñar la estructura de la máquina para un área de trabajo de 1,22 x 2,44 metros.
- Implementar un sistema electrónico y de control para los mecanismos de movimiento.
- Seleccionar un software para el diseño de figuras y formas geométricas que sea amigable con el usuario.
- Implementar una HMI que informe sobre el estado y ejecución del proceso en el cual esté trabajando la máquina.

- Garantizar la seguridad del operario al usar la máquina CNC cortadora por plasma.

1.3 HIPÓTESIS

La máquina CNC cortadora por plasma es capaz de cortar planchas de acero de hasta 10mm de espesor empleando boquillas intercambiables para distintos espesores, produciendo los cortes en las piezas con una precisión final de +/- 1mm.

1.4 MARCO TEÓRICO

1.4.1 MÁQUINA CNC CORTADORA POR PLASMA

Las máquinas CNC cortadora por plasma son utilizadas por empresas a nivel industrial, por la potencia del plasma y el control y precisión de la tecnología CNC; requeridos y utilizados principalmente en el corte de planchas de acero o de cualquier material metálico conductor. Las ventajas de este sistema es que el plasma corta con precisión materiales delgados (de 1 milímetros) y gruesos (de hasta 32 milímetros), aunque se debe tener ciertas precauciones en cuanto a las piezas a cortar debido a su tamaño, ya que si las piezas son muy pequeñas estas se deforman debido a las elevadas temperaturas.

En cuanto a las protecciones en la utilización de este tipo de máquinas se debe utilizar protecciones para los ojos debido a la emisión de radiación ultravioleta por el arco de corte del plasma y para las vías respiratorias debido a la emisión de gases en el corte, además de la utilización de guantes por las altas temperaturas para manipular las piezas a manufacturar. Uno de los problemas más grandes del corte de plasma independientemente del tipo de gas utilizado para el corte es el humo que se produce al cortar cualquier material conductor; por lo que todas estas máquinas deben tener

ventilación o extractor de gases como requisito indispensable para el operador previniendo cualquier tipo de enfermedad por la inhalación de gases nocivos. [1]

1.4.2 SISTEMA CNC

1.4.2.1 Composición Sistema CNC

Se define al término control numérico computarizado CNC como “un sistema que permite controlar y monitorear en todo momento los movimientos y la posición de una máquina herramienta mediante la utilización de una serie de dispositivos electrónicos y mecánicos.” [2]

Todas las máquinas CNC trabajan en conjunto con una serie de motores ya sea servomotores y/o motores a paso, así como componentes de accionamiento para desplazar los Ejes de la máquina de manera controlada y ejecutar los movimientos programados. Una máquina CNC consiste de seis elementos principales:

- Dispositivo de entrada: se encarga de administrar y transmitir la información del software de diseño utilizado CAD/CAM hacia la unidad de control.
- Unidad de control o controlador: se encarga de interpretar el código utilizado y enviar la información recibida del software CAD/CAM hacia los actuadores.
- Máquina herramienta: herramienta funciona mediante energía que se utiliza con un propósito único para dar forma a piezas solidas principalmente metales.
- Sistema de accionamiento: Conjunto de elementos que tiene como objetivo mover o participar en el movimiento del sistema CNC.

- Dispositivo de realimentación: recibe la información del proceso que se está realizando y la comprueba una y otra vez; en caso de detectar algún error realiza correcciones haciendo que el proceso llegue a un estado final preestablecido.
- Monitor o Interfaz Hombre Máquina HMI: facilitador de comunicación entre la máquina y el operador.

La Figura 1.1 muestra un diagrama de bloques de la composición de los elementos de una máquina CNC:

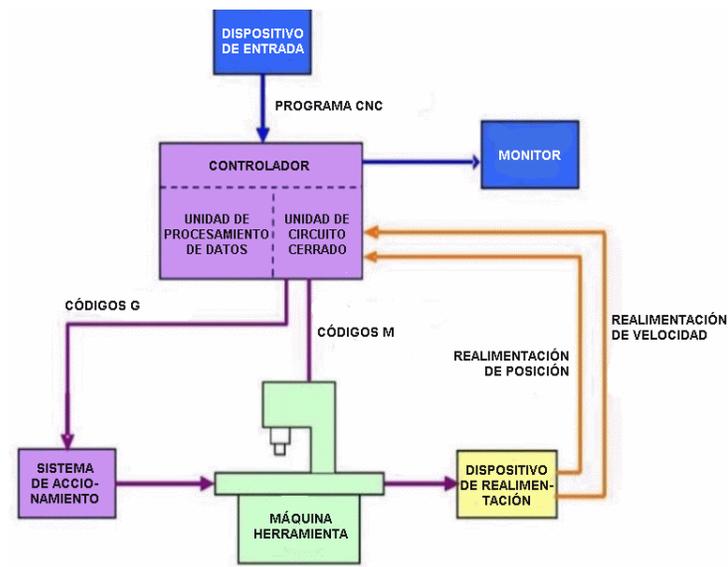


Figura 1.1. Diagrama de bloques composición máquina CNC, [3].

1.4.2.2 Funcionamiento Sistema CNC

El funcionamiento de una máquina CNC se basa en instrucciones que recibe en forma de códigos G y códigos M, los cuales por medio de un software se convierten en comandos de activación poniendo en marcha el sistema de accionamiento.

Un elemento de gran importancia en la máquina CNC es el controlador ya que es el sistema que se encarga de interpretar el programa compuesto por los códigos G o M y

activar las funciones apropiadas de la máquina para impulsar el movimiento de los Ejes y seguir las instrucciones programadas. Otras funciones importantes que realiza el controlador es determinar si existen errores en el programa y alertar al usuario para que los corrija.

1.4.3 CÓDIGO G

“Lenguaje de programación vectorial usado en máquinas de control numérico el cual posee múltiples implementaciones” [3]:

- Permite describir y accionar operaciones simples, así como entidades geométricas de cualquier clase.
- Permite accionar parámetros de maquinado como velocidades y avance de la herramienta.
- Permite accionar o desactivar los elementos eléctricos que constituyen la máquina.

El código G está constituido de instrucciones Generales (son también conocidas como funciones preparatorias, controlan el desplazamiento en los Ejes X–Y–Z de la herramienta sobre la superficie de trabajo) y Misceláneas (estas instrucciones están dirigidas a la máquina de trabajo como arrancar, detenerse, etc. Así como también están relacionados con el refrigerante de la máquina) de ahí su nombre de código G y M.

En la actualidad existe una estandarización del código G y M por la ISO, a la cual se acogen múltiples fabricantes industriales, permitiendo que los usuarios se adapten de mejor manera a cualquier tipo de máquina CNC. El código estándar de programación por la ISO es el ISO – 6983.

Muchos de los programas en los cuales se realiza la programación en código G tienen simulación incluida la cual da al usuario una vista previa en tiempo real de su trabajo permitiendo determinar errores en la programación y corregirlos.

1.4.4 PLASMA

El plasma tiene características propias que no se dan en sólidos, líquidos o gases; convirtiéndose en el cuarto estado de la materia.

El término plasma que se relaciona con máquinas cortadoras, fue descubierto en 1928 por Irving Langmuir, y se refiere a “un estado de la materia compuesto de átomos ionizados y electrones libre interactuando entre sí con una altísima conducción electromagnética y una alta densidad de energía por lo que sus partículas responden fuertemente a las interacciones electromagnéticas de largo alcance” [4], lo que permite que el plasma tenga varias aplicaciones en diferente tipo de industrias:

- Tecnología médica: Limpieza y esterilización de implantes.
- Procesadores de Caucho: Eliminación de lubricantes antes de pegar o unir químicamente.
- Industria electrónica y fabricación de semiconductores: se emplea para limpiar y desengrasar superficies metálicas antes de soldar, imprimir circuitos o recubrir y para la extracción de materiales indeseables o el agregado de otros.
- Microscopia Electrónica: se utiliza para limpiar los inyectores del microscopio, rejillas y porta muestras.
- Industria Metalmeccánica: para realizar cortes en metales, aluminios o acero inoxidable además realizar soldadura de arco eléctrico bajo protección por gas (TIG, MIG/MAG).

1.4.5 CORTE POR PLASMA

El corte por plasma consiste en aplicar calor localizado en un material conductor que se quiere cortar, elevando la temperatura del mismo hasta que este se diluya o derrita haciendo un corte con gran exactitud.

Los pasos que intervienen en el corte por plasma para su funcionamiento son los siguientes: se envía un gas inerte (nitrógeno, argón u oxígeno) presurizado a alta

velocidad por una boquilla, este al tener internamente un electrodo cargado negativamente al momento de tocar la punta del metal a cortar forma un arco eléctrico, el cual posteriormente logra el corte del metal.

La temperatura y velocidad del plasma será directamente proporcional a la presión de salida del gas, que el usuario puede controlar de acuerdo a sus requerimientos.

En la Figura 1.2 se puede observar los pasos descritos anteriormente para el desarrollo de corte por plasma.

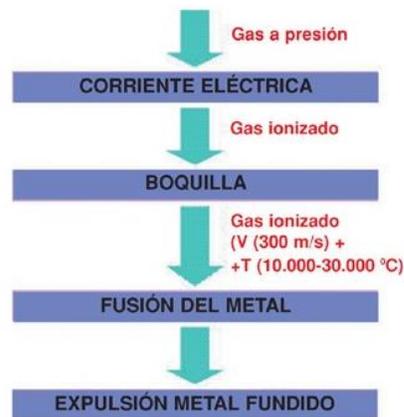


Figura 1.2. Pasos para el desarrollo del corte plasma, [3].

1.4.5.1 Ventajas del Corte por Plasma

Comparando el corte por plasma con otros métodos de corte similares utilizados en la industria como el oxicorte, se puede mencionar las siguientes ventajas:

- **Calidad de Corte.**
 - Bajo riesgo de deformación debido a la inmediata compactación calorífica de la zona de corte.
 - Pequeña zona afectada por el calor (depende del diámetro de la boquilla utilizada que va entre 0,5mm a 2,5mm según el material que se vaya a cortar).

- **Trabajo Previo.**
 - Poca o ninguna preparación en el material a cortar.
 - Tolera y puede cortar materiales con pintura, suciedad, óxido y/o aceite.
 - Reducidas exigencias a la composición del material y al entorno al trabajo.

- **Velocidad de corte.**
 - Rápida en amplia gama de espesores (mientras más delgado sea el espesor del material más rápido será el corte).
 - Velocidades de corte más elevadas que con láser en materiales de medio y gran espesor.

- **Flexibilidad.**
 - Corta una amplia gama de espesores (dependiendo de la corriente utilizada).
 - Puede cortar cualquier material conductor.

- **Acabado posterior.**
 - Una vez terminado el corte no se requiere pulir o esmerilar ya que el corte no deja rebabas; en el caso de requerir un acabado de mejor calidad el trabajo es mínimo.

- **Mantenimiento.**
 - Muchos componentes eléctricos que se encuentran en la máquina de corte CNC pueden ser cambiados o reparados de manera inmediata ya que en el mercado local ecuatoriano existen diversos repuestos de diferentes marcas con las mismas especificaciones técnicas.
 - Cualquier daño que exista en la máquina puede ser reparado de manera inmediata por un técnico calificado sin la necesidad de personal extranjero o profesionales de empresas específicas.

- **Costos**

- En comparación con el oxicorte el costo por metro cortado es mayor pero el oxicorte tiene mayores costos ocultos (elementos a reemplazar, mayor seguridad, menor eficiencia, mayor desgaste del material a cortar, etc.).
- En comparación con el láser, el plasma tiene menor costo de inversión y el corte láser tiene un elevado consumo de gas para producir el corte, lo que eleva el costo de corte.
- En comparación con corte por agua el plasma tiene un menor costo por corte y el corte por agua demanda más inversión y mantenimiento.

1.4.5.2 Desventajas del Corte por Plasma

- Rango limitado de espesores de chapa (actualmente de 0,5mm a 160mm).
- Vía de corte mayor al láser debido al diámetro de las boquillas entre 0,5 a 2,5mm.
- Requiere reemplazos periódicos del electrodo y la boquilla de la antorcha dependiendo de las perforaciones realizadas lo que se suma al costo de operación de la máquina. Estos dos elementos pueden ejecutar entre 600 a 1000 perforaciones antes de realizar un cambio.
- El arco del plasma deja típicamente un bisel de 4 – 6 grados en el borde cortado, aunque este ángulo es casi invisible en materiales delgados, se nota en materiales gruesos.
- En comparación con la mayor parte de métodos de corte mecánicos, presenta mayores peligros en incendio, choque eléctrico, luz intensa, humo y gases, además de ruido intenso.

1.4.6 TIPOS DE CORTE POR PLASMA

1.4.6.1 Corte por plasma por aire

El oxígeno del aire aumenta las velocidades de corte en un 25% en relación con el corte tradicional por plasma seco, sin embargo, también conlleva una superficie de corte muy oxidada y una rápida erosión del electrodo que está dentro de la boquilla.

1.4.6.2 Corte con inyección de oxígeno

En 1983 se desarrolla una nueva técnica que implica la utilización de oxígeno como gas de corte y la introducción de agua por la punta de la boquilla. Este proceso denominado “corte por plasma con inyección de oxígeno” ayuda a solucionar los problemas del rápido deterioro de los electrodos y la oxidación del metal [6].

1.4.6.3 Corte con doble Flujo

Son aquellos que permiten utilizar un gas plasma diferente del gas de protección, la selección del gas se realiza en función del tipo de metal a cortar y su espesor, para conseguir características específicas en el corte. La Tabla 1.1 muestra las posibilidades a utilizar.

El gas de protección debe ser seleccionado de acuerdo con el gas plasma de forma tal que la combinación ofrezca capacidad de refrigeración sin pérdida de rendimiento del proceso.

Tabla 1.1. Selección de gases para el proceso plasma dual gas, [6].

Material	Gas Utilizado	Espesores de Corte
Acero al Carbono	Plasma: Oxígeno. Protección: Oxígeno.	Solo espesores menores a 6mm.
	Plasma: Oxígeno. Protección: Aire.	Espesores de 0,5 a 38mm.
	Plasma: Aire. Protección: Aire.	Espesores de 0,5 a 38mm.

Acero Inoxidable.	Plasma: H35 material no ferroso (35% hidrógeno – 65% nitrógeno). Protección: Nitrógeno.	Solo espesores mayores a 10mm.
	Plasma: H35 Protección: Nitrógeno.	Solo espesores mayores a 10mm.
	Plasma: F5 material no ferroso (95% nitrógeno – 5% hidrógeno) Protección: Nitrógeno.	Solo espesores menores a 10mm.
	Plasma: Nitrógeno. Protección: Nitrógeno.	Espesores de 0,5 a 38mm.
Aluminio	Plasma: H35. Protección: Nitrógeno.	Solo espesores mayores a 12mm.

1.4.7 CORTE PLASMA CON AIRE COMPRIMIDO

Como se mencionó anteriormente existen varias opciones en cuanto a los gases utilizados en el corte con plasma, pero debido a muchos factores como bajo costo, fácil adquisición y versatilidad en el corte de cualquier tipo de material, el aire comprimido es el más requerido.

El proceso de funcionamiento del corte plasma por aire comprimido es el mismo utilizado con todos los gases, aunque se puede tener algunos riesgos relacionados con la calidad de corte debido a que no todos los compresores entregan la calidad de aire y caudal requeridos para que el proceso funcione correctamente.

Para reducir el error que puede tener este proceso muchas empresas dedicadas al desarrollo de corte plasma con aire comprimido han realizado una serie de estudios en las cuales se puede determinar de una manera exacta los valores de las variables a modificar por el operador como espesor del material, diámetro de la boquilla, presión de O₂ en el soplete y velocidad de corte; para que el corte a realizarse tenga una precisión

alta y similar a gases de mayor costo y eficiencia. La Tabla 1.2 muestra los valores que se deben tener en cuenta al momento de corte con aire comprimido, cabe recalcar que estos valores pueden cambiar dependiendo de las especificaciones técnicas del plasma o del compresor a usar.

Tabla 1.2. Valores recomendados Corte Plasma aire comprimido, [6].

Espesor del material (mm)	Diámetro boquilla (mm)	Presiones O₂, en el soplete (bar)	Velocidad de corte (m/h)
5	0,6	1,5	20
8	0,8	1,5	17
10	1	1,5	15
15	1	2	12
20	1	2,5	11,5
25	1,5	2,5	10
30	1,5	2,5	9,5

1.4.8 ANTORCHA PARA CORTE POR PLASMA

Una antorcha de plasma está compuesta por ocho elementos los cuales se visualizan en la Figura 1.3.

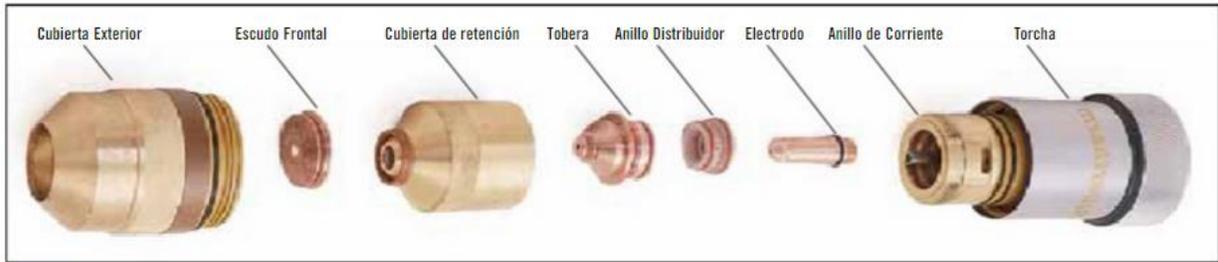


Figura 1.3. Composición de una Antorcha Plasma, [6].

1.4.8.1 Boquillas o Tobera

Las boquillas utilizadas en el plasma sirven para focalizar el arco eléctrico generado por el gas y el electrodo negativo, mientras más grande sea la apertura final de la boquilla menos definido y más ancho será el arco eléctrico que pase por ahí, y mientras más pequeño sea el orificio final de la boquilla más definido será su arco eléctrico generando gran precisión en el corte.

En la Figura 1.4 se observa los tipos de boquillas que se encuentran en el mercado, cada uno sirve para determinada función según los requerimientos de usuario.



Figura 1.4. Tipo de Boquillas para Plasma, [6].

1.4.8.2 Piezas Consumibles

La antorcha plasma tiene dos piezas consumibles, el electrodo y la boquilla, las cuales deben ser cambiadas cada cierto tiempo antes de que el proceso falle o pierda la calidad deseada, estas piezas deben ser removidas en conjunto ya que al no hacerlo el corte no cumpliría con la eficiencia deseada, el desempeño de una depende de la otra.

Su duración está relacionada directamente con el número de perforaciones realizadas (a mayor número de perforaciones, menos horas de vida), el largo de cada corte, la eficiencia de la refrigeración del electrodo y el control de flujo de gases.

1.5 ESTADO DEL ARTE

El corte por plasma surge en la década de 1960 como una alternativa para el corte de hojas de metal y empezó a tener notoriedad en la década de 1980 debido a que producía cortes precisos y limpios, lo contrario a los sistemas tradicionales en aquella época, sistemas en los cuales la mano de obra de operarios era indispensable y con ello los errores propios de precisión y eficiencia. Las primeras cortadoras de plasma fueron de grandes tamaños, lentas y costosas, además de poco precisas y fiables por lo que no eran muy utilizados en la industria. Fue hasta la década de 1990 que surgieron las máquinas CNC de corte por plasma que presentaban una mayor flexibilidad para cortar en el plano horizontal diversas formas basadas en un conjunto de instrucciones que se programaban desde una computadora. Este tipo de tecnología CNC ha tenido gran apogeo y desarrollo desde hace 10 o 15 años, en los cuales sus avances han contribuido a mejorar el rendimiento del corte plasma.

En la actualidad hay varias empresas que desarrollan y realizan investigaciones para el mejoramiento de estas máquinas CNC's cortadoras de plasma, la empresa Hypertherm Inc., dedicada a la investigación de plasma y sus métodos de corte en el estado de New Hampshire en los Estados Unidos; desarrolló la tecnología de corte plasma de alta definición, patentada como HyDefinition, la cual "logra incrementar la densidad de energía

del arco utilizado como herramienta de corte, y alcanzar grandes aumentos en la velocidad y simultáneamente en la calidad del corte” [6]; años después la misma empresa patentó una nueva tecnología llamada HyPerformance Plasma, cuyo objetivo era mejorar el desempeño del plasma de alta definición. Varios puntos fueron modificados de la tecnología HyDefinition para dar paso a la nueva tecnología HyPerformance entre ellos: la necesidad de eliminar la susceptibilidad del proceso a las variaciones de precisión de entrada de los gases. También se buscó disminuir la influencia del operador en la selección de las variables evitando así reducir la productividad y calidad de corte. Por otro lado, se intentó aumentar sensiblemente la vida útil de los consumibles garantizando la correcta refrigeración del electrodo. Y, por último, se intentó incrementar la velocidad de corte del sistema. Todos estos factores tienen dos objetivos; el primero es conseguir un desempeño mejor (velocidad, costo y calidad), y el segundo es lograr la consistencia en el tiempo de trabajo [6].

Varias empresas han adoptado la tecnología HyPerformance o a su vez la tecnología HyDefinition, tecnologías de alta gama en cuanto a CNC cortadoras plasma, fomentando el desarrollo competitivo no solo en la parte mecánica sino de manera paralela en cuanto al plasma y el software que maneja el equipo.

Diversas investigaciones realizadas en numerosas universidades e industrias multinacionales, como hypertherm [6], Motocono, la Universidad de Autónoma de Madrid, etc.; han demostrado que una operación de corte CNC depende no solo de la máquina sino de la habilidad del operador de la misma, un programador experto o experimentado podría producir cortes de mayor calidad que un operador menos atento o con menos experiencia; por lo que se requiere que las máquinas CNC cortadora plasma tengan software más eficientes que sean capaces de analizar las características de los dibujos de las piezas, tales como orificios, características externas, forma, tipo de material y espesor; insertar los mejores puntos de entrada y salida, velocidad de corte, corriente y gases, y establecer todos los parámetros de corte que antes eran controladas por el operador de la máquina; permitiendo de esta forma que los errores de ejecución por parte de mano de obra humana sean mínimos; dejando a un lado la necesidad de un operador experimentado o no.

En América Latina los países con mayor producción de máquinas – herramientas, entre las que se encuentra la CNC cortadora plasma; son Brasil mayor productor de América Latina con \$1157 millones, luego aparecen México con \$166 millones y Argentina con \$31.8 millones [7]. La diferencia en el campo de la producción de máquinas entre Brasil y México es mucho más notoria, ya que Brasil ha sido un tradicional productor de maquinaria, mientras México apenas comienza a maquilar algunos equipos para el trabajo del metal (su tradición ha sido importadora, por la cercanía geográfica con Estados Unidos).

Debido a la experiencia de estos fabricantes se toma como referencia sus características técnicas para la fabricación de la máquina CNC cortadora plasma realizada para este proyecto de titulación. En la Tabla 1.3 se observa las velocidades de corte y posicionamiento utilizadas por algunas máquinas CNC plasma, las cuales pueden ayudar a determinar la velocidad promedio que se aspiraría a llegar en la construcción de la máquina CNC del presente proyecto. La velocidad máxima de corte depende del grosor de plancha a cortar por ello en este caso no es relevante, pero se puede determinar según la velocidad de posicionamiento cuál de estas máquinas tiene el mejor desarrollo tecnológico siendo Motocono la primera con una velocidad de 40,000 mm/min.

Tabla 1.3. Características Técnicas Máquinas CNC Plasma.

Máquina CNC cortadora plasma.	Velocidad máxima de posicionamiento.	Velocidad máxima de corte.
Motocono	40.000 mm/min	8.000 mm/min
Finecutter MonoBlock	15.000 mm/min	10.000 mm/min
Hugong Welder	8.000 mm/min	4.000 mm/min
Microstep MicroCup-P	25.000 mm/min	10.000 mm/min
Haco Kompakt	30.000 mm/min	15.000 mm/min
PROMEDIO	23.600 mm/min	9.400 mm/min

CAPÍTULO II

ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA LOS ELEMENTOS Y SISTEMAS QUE CONFORMAN LA MÁQUINA CNC CORTADORA POR PLASMA

2.1 QFD DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN CALIDAD

El QFD es un método de gestión de calidad que se utiliza para determinar y dar respuesta de una manera eficiente a los requerimientos y expectativas del cliente en el desarrollo del producto o en el caso de este proyecto de titulación de la empresa auspiciante; esto significa incluir y alinear lo que la empresa auspiciante quiere con lo que el autor del proyecto puede producir.

Este método permite focalizar el diseño, de la máquina a construirse, en las prioridades de la empresa encontrando respuestas innovadoras a sus necesidades de una manera óptima y rápida, asegurando de esta forma la satisfacción del cliente.

El objetivo principal de un QFD es responder de una manera precisa a las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es el nivel de calidad que desea el cliente para el producto final?
- ¿Qué funciones específicas debe cumplir el producto? ¿cuáles son las funciones primordiales que requiere el cliente?
- Basados en los recursos disponibles en la empresa ¿Cómo se puede proveer al cliente lo que espera?

2.1.1 CASA DE LA CALIDAD

Es un método gráfico utilizado en el QFD para definir la relación entre los deseos del cliente con las capacidades del contratista para encontrar las interrelaciones entre las diferentes áreas del proyecto.

La casa de la calidad también permite en su matriz de desarrollo analizar a la competencia y descubrir los nichos de mercado no explorados, dando como resultado un producto con mejores características.

En la Figura 2.1 se puede observar cómo están distribuidas las matrices que componen la casa de la calidad.

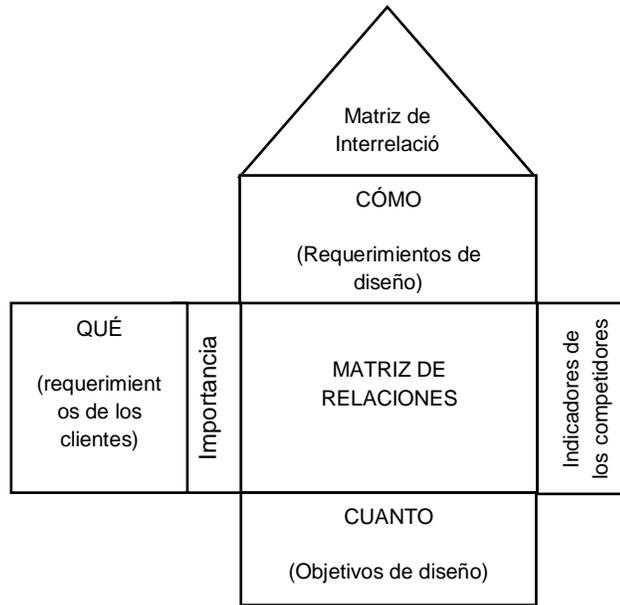


Figura 2. 1. Distribución Casa de la Calidad, [4].

2.1.2 CASA DE LA CALIDAD MÁQUINA CNC CORTADORA POR PLASMA

Para el desarrollo del análisis y selección de alternativas de la máquina CNC cortador por plasma se desarrolló un diagrama de la casa de la calidad el cual, como se indicó en párrafos anteriores, contiene la relación entre los requerimientos del cliente y las capacidades de soluciones potenciales. A continuación, en la Figura 2.2 se observa la casa de la calidad de la máquina CNC cortadora por plasma.

		<table border="1" style="margin: auto;"> <tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td></td><td>2</td><td>7</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td></td><td>5</td><td>8</td><td>8</td><td>1</td><td></td><td></td></tr> <tr><td></td><td>8</td><td>9</td><td>9</td><td>3</td><td>1</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td>10</td><td>8</td><td>9</td><td>3</td><td>10</td><td>9</td><td></td></tr> </table>											1							2	7						5	8	8	1				8	9	9	3	1			10	10	8	9	3	10	9											
				1																																																						
			2	7																																																						
		5	8	8	1																																																					
	8	9	9	3	1																																																					
10	10	8	9	3	10	9																																																				
IMPORTANCIA PARA EL CLIENTE		1,26	1,926	1,44	1	1,74	1,22	1	<small>ENTRENAMIENTO COMPETITIVA</small>																																																	
Requerimientos del cliente		Prioridad	Diseño mecánico.	Análisis y selección de elementos existentes en el mercado.	Diseño electrónico y de control.	Potencia del Plasma.	Desempeño eficiente del Software.	Software Intuitivo.	Alertas programadas en el HMI.	Cortadora Plasma CNC Tesis (*).	CNC Cortadora Plasma Motocono (A).	Cortadora Plasma Artesanal (B).	Objetivos	Índice de mejora	Factor de Venta	Importancia	Ponderación	Ponderada %																																								
Resistencia Estructural y Robustez de la máquina.	5	9								9	5	2	4	1,333	1,2	4	6,4	10%																																								
Desempeño Eficiente/Presición en movimientos.	5	9	3	9	1	9	1			3	5	3	5	1,667	1,5	5	12,5	19%																																								
Reducción en el desperdicio de material.	4			9	3	9	9			3	5	2	5	1,667	1,5	5	12,5	19%																																								
Cortes en plancha de acero hasta 10mm.	5		9	3	9					5	5	5	5	1	1,2	5	6	9%																																								
Tolerancia de corte de +/-1mm.	5	9	1	9	9	9				4	5	4	5	1,25	1,5	5	9,38	14%																																								
Amigable con el usuario.	4	3	9	1		3	9	9		5	5	5	4	0,8	1,5	4	4,8	7%																																								
Area de trabajo de 1,22 x 2,44.	5	9								5	5	5	5	1	1,2	5	6	9%																																								
Brinde seguridad al operador.	5	1	9	9		9	9	9		4	5	4	5	1,25	1,5	5	9,38	14%																																								
																	67	100%																																								

Valores objetivo		Sistema mecanico cartesiano.	Componentes de la máquina CNC.	Sistema electrónico y de control.	Acoplamiento de plasma. ***	Selección de software.	Selección de HMI.	Visualización del Estado del proceso.	
	5	A	A*	A	A	A	A	A	
	4	*		*	*	*	*	*	
	3							B	
	2	B	B	B		B			
1				B		B			
Incidencia		332	172	360	188	352	253	128	1785
Incidencia %		19%	10%	20%	11%	20%	14%	7%	100%

Figura 2. 2. Casa de la Calidad Máquina CNC plasma.

2.1.2.1 Voz del Usuario

El cliente requiere que la máquina CNC cortadora por plasma posea las siguientes características:

- Resistencia estructural y robustez de la máquina.
- Optimización del área útil de corte mediante software CAD.
- Capacidad de corte de hasta 10 mm espesor en planchas de acero ASTM A36.
- Tolerancia de corte de +/-1mm.
- Interfaz Humano Máquina (HMI).
- Área de trabajo de 1,22 x 2,44 m capaz de cortar planchas enteras estándar.
- Seguridad para el operador y para la máquina.

2.1.2.2 Voz del Ingeniero

Analiza la matriz que relaciona los requerimientos del cliente con los requerimientos del diseño, necesarios para el desempeño eficiente de la máquina, procediendo a traducirlos en especificaciones técnicas para la construcción.

- La máquina debe estar diseñada para soportar pesos de 235kg +/- 5, con un factor de seguridad en cargas estáticas y dinámicas de 50%.
- El software CAD/CAM debe tener un desempeño eficiente, optimizando el área de corte controlando la mayoría de variables en el corte de planchas y ser intuitivo para el operador.
- El plasma debe poseer una potencia adecuada para cortes de plancha de hasta 10mm.
- Base de datos con velocidades, corriente específica y presión de aire para la adecuada precisión del corte.
- Diseño mecánico, electrónico y de control con sustentación.

- Alertas programadas en el HMI además de poseer sensores y seguridades mecánicas respectivas.

Por otro lado, la opción con el puntaje más alto en cuanto a correlación de alternativas es el análisis y selección de alternativas existentes en el mercado, lo que indica que al solucionar esta opción se resolvería de manera efectiva cualquier problema que se pueda presentar en el proyecto.

2.1.2.3 Evaluación Competitiva

Para la evaluación de competencias se evaluó y comparó dos máquinas CNC cortadoras por plasma, una artesanal y otra máquina fabricada por una empresa española Motocono; para realizar la comparación se obtuvo las características específicas mecánicas y eléctricas de las dos máquinas, las fichas técnicas de las dos máquinas se encuentran en Anexos A, además de observar su funcionamiento y escuchar opiniones de operarios e ingenieros encargados de su mantenimiento y funcionamiento.

Con estas comparaciones se pretende realizar una acción correctiva al diseño y ejecución de la máquina a realizarse antes de su producción para hacerla más competitiva.

Se determinó que para que la máquina a desarrollarse sea igual de competitiva que sus adversarios se debe poner más énfasis en la resistencia estructural y robustez de la máquina, el desempeño eficiente / precisión de la máquina en cuanto a movimientos, la reducción en el desperdicio del material, la tolerancia de corte de +/- 1mm y por último que brinde seguridad al operador. En la Figura 2.3 se muestra de manera detallada las características más destacadas mencionadas en la Figura 2.2 casa de la calidad selección evaluación competitiva y su comparación con la competencia.

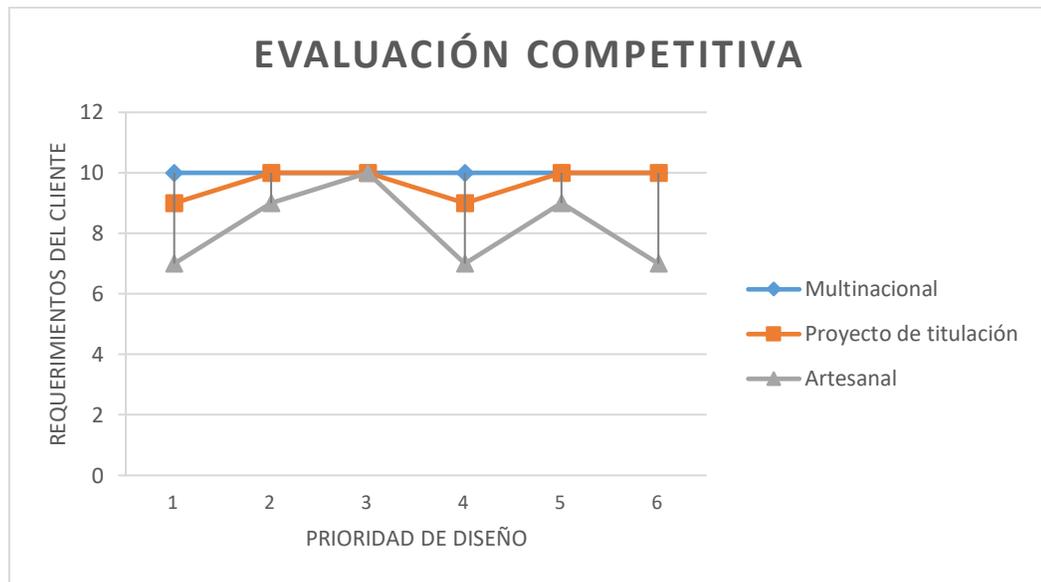


Figura 2. 3. Evaluación competitiva.

2.1.2.4 Prioridad y Correlación Resultado Casa de Calidad

Como resultado de la casa de la calidad se determinó el porcentaje de cada uno de los parámetros de diseño señalando su prioridad. En la Tabla 2.1 a continuación se observa el detalle de cada parámetro.

Tabla 2. 1. Prioridad parámetros de diseño.

Prioridad	Parámetros de Diseño	Porcentaje
1	Diseño Electrónico y de Control	20%
2	Desempeño Eficiente del Software	20%
3	Diseño Mecánico	19%
4	Software Intuitivo	14%
5	Potencia del Plasma	11%
6	Análisis y Selección de elementos existentes en el mercado	10%
7	Alertas programadas en el HMI	7%
		100%

Este método también permite determinar la correlación existente entre dichos parámetros de diseño, como resultado se determina una relación importante entre dos parámetros que son:

Diseño electrónico y control – Diseño Mecánico.

Esta correlación determina que la máquina funcionará perfectamente si el diseño electrónico / control y mecánico funcionan en armonía ya que, si uno falla el otro igual, ninguno de los dos puede funcionar perfectamente si el otro no lo hace.

2.2 ANÁLISIS FUNCIONAL

Para el análisis se descompone al sistema a realizar en varias partes funcionales; considerando a dicho sistema como un conjunto de elementos que interactúan entre sí, los cuales están interconectados y cuyas conexiones y funciones responden al objetivo por el cual fue construida la máquina.

El Nivel 0, representa en forma general el proceso en el cual una plancha de cualquier espesor es cortada para conseguir una forma geométrica requerida por el cliente o usuario; para que la máquina pueda cumplir esta función es necesario 3 elementos principales: plancha de acero, energía eléctrica y señales de control. En la Figura 2.4 se observa el resultado del Nivel 0.

NIVEL 0

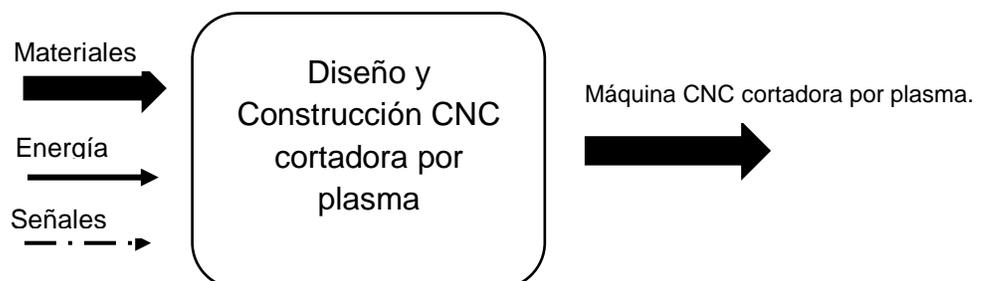


Figura 2. 4. Análisis Funcional Nivel 0.

El Nivel 1 representa a todos los procesos involucrados en la realización de la máquina CNC de corte por plasma, incluyendo los elementos que intervienen dividiéndolos en módulos específicos. La Figura 2.5 detalla la representación de cada uno de los módulos.

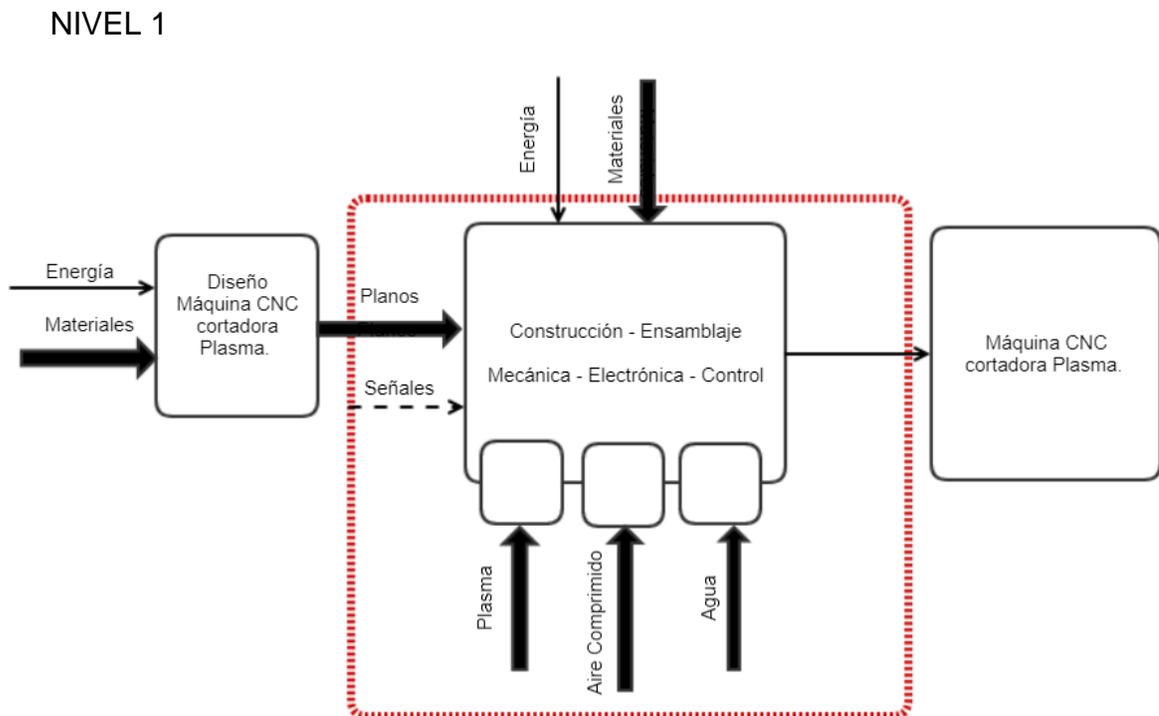


Figura 2. 5. Análisis Funcional Nivel 1.

En el Nivel 2 se muestra de forma más detallada cada uno de los procesos que en el Nivel 1 no fueron especificados a detalle. El recuadro entrecortado en el nivel anterior indica que esa parte del proceso debe ser más detallada y que en ella se producen varios procesos por especificar en construcción mecánica, ensamblaje electrónico y de control; de la misma manera estos procesos necesitan elementos, piezas y partes las cuales se debe detallar y seleccionar según su funcionamiento. La Figura 2.6 muestra de manera minuciosa cada uno de los procesos que se desarrollan.

NIVEL 2

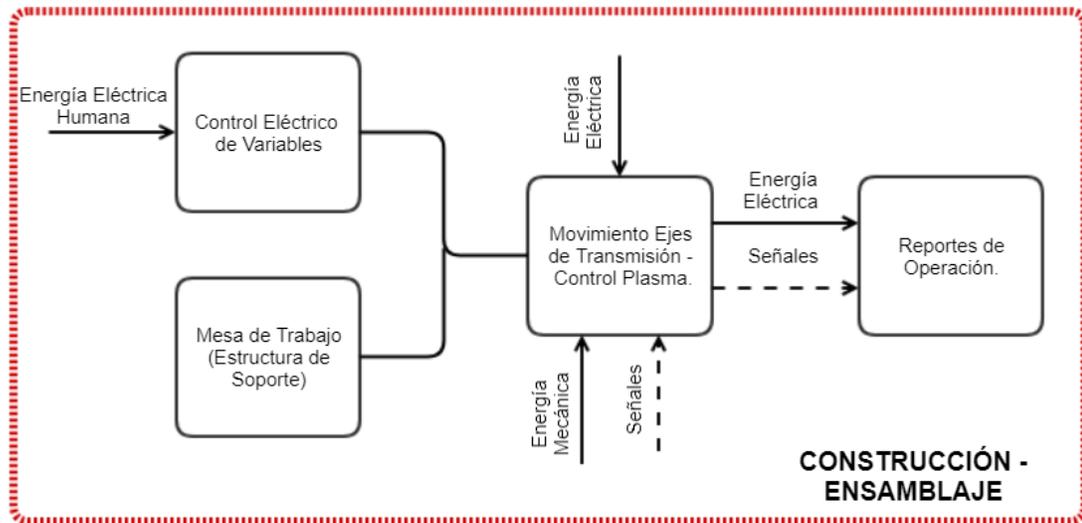


Figura 2. 6. Análisis Funcional Nivel 2.

La Figura 2.7 detalla el Módulo 1 del Nivel 2, el cual representa el control electrónico de variables de la máquina.

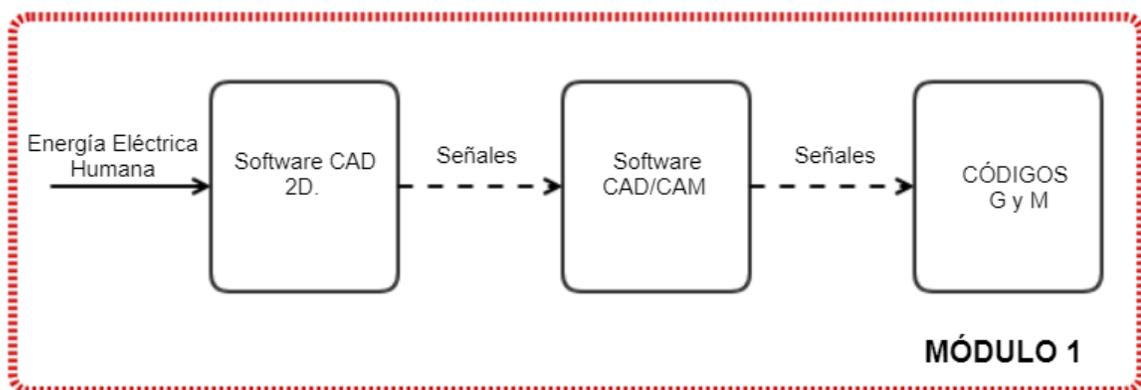


Figura 2. 7. Módulo 1 Nivel 2.

La Figura 2.8 representa el Módulo 2 del Nivel 2 que se refiere al movimiento de los Ejes de transmisión y control plasma.

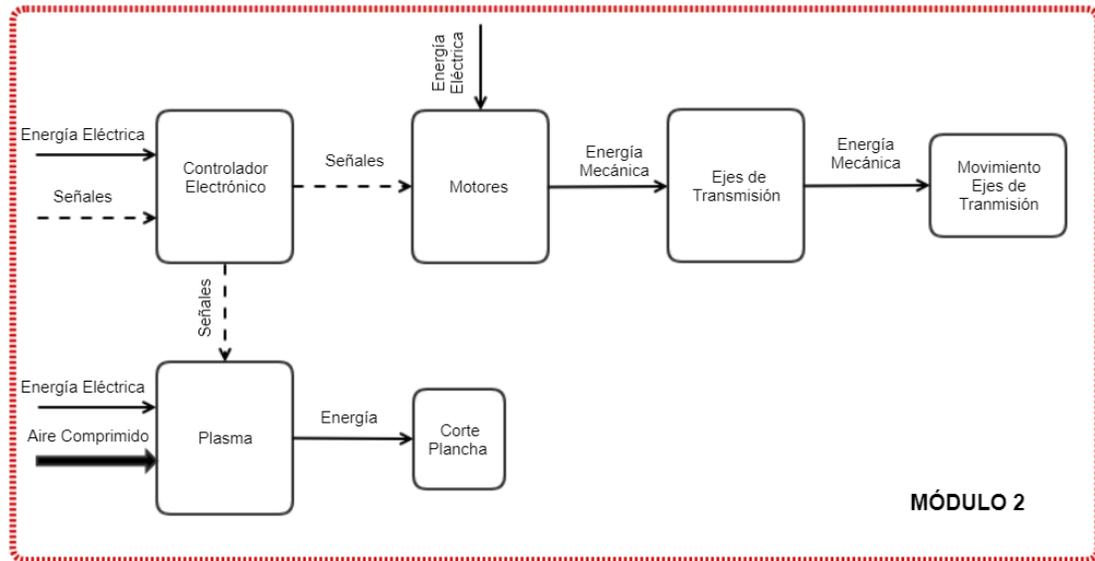


Figura 2. 8. Módulo 2 Nivel 1.

La Figura 2.9 detalla el Módulo 3 del Nivel 2 que representa los reportes de operación que generará la máquina.

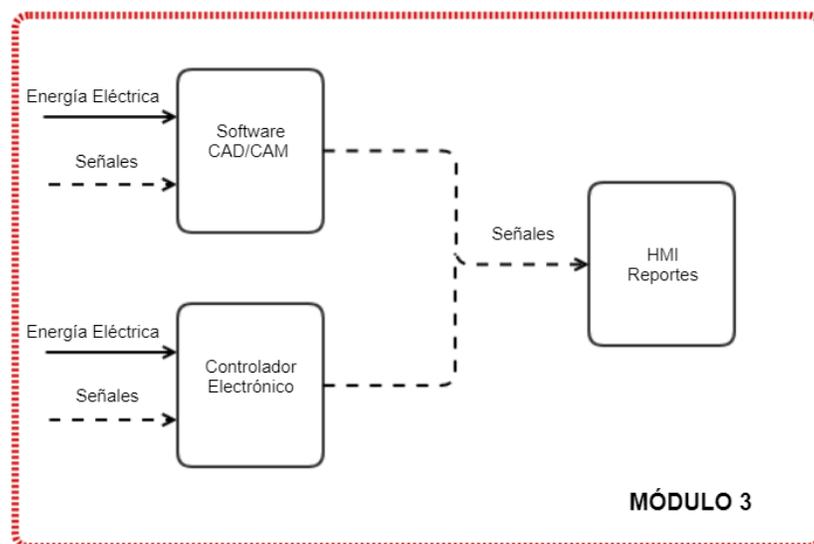


Figura 2. 9. Módulo 3 Nivel 2.

2.2.1 MÓDULO 1

El módulo 1 tiene como función principal determinar y crear la figura geométrica que se va a proceder a cortar en la máquina CNC cortadora por plasma; para cumplir con la realización de estas funciones este módulo requiere de los siguientes procesos:

- Diseño 2D de la figura geométrica a cortar.
- Generar los códigos G y M que serán enviados al controlador.
- Control de velocidad y altura del plasma; y control de velocidad de los motores de los Ejes.

La Tabla 2.2 contiene dos opciones que solucionan y dan respuesta a los requerimientos de módulo 1, en ella se encuentran las ventajas y desventajas de las dos soluciones para una mejor selección de las mismas.

Tabla 2. 2. Alternativas de Solución Módulo 1 Software.

Tipo de Software	Ventajas	Desventajas
Hypertherm	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Interfaces gráficas mejor diseñadas. ✓ Excelente compatibilidad con el hardware, independientemente de los elementos a usarse. ✓ Corrección automática de archivos CAD y notificación de error. ✓ Cálculo automático de costos de producción. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Elevados costos de adquisición. ✓ Imposibilidad de modificación. ✓ Restricciones en el uso (marcadas por la licencia). ✓ Discontinuación de una línea del software.

	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Exporta informes directamente a PDF, hoja de cálculo Excel o página web. 	
Software libre modificado	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bajo costo de adquisición y libre uso. ✓ Libertad de modificación y mejora. ✓ Aplicaciones para todas las plataformas (Linux, Windows, Mac). ✓ Importa archivos CAD en varios formatos. ✓ Notificaciones de error en archivos CAD. ✓ Cálculo de tiempos de trabajo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Interfaces poco amigables. ✓ Inexistencia de garantía por parte del autor. ✓ Fallas en la compatibilidad con el hardware.

2.2.2 MÓDULO 2

Tiene la función de entender los códigos G y M enviados desde el software CAD/CAM y generar las acciones necesarias por medio de los motores y los Ejes de movimiento.

- Controlador Electrónico.
- Motores.
- Transferencia de movimiento de los motores hacia los Ejes (transmisión).
- Sistema de reducción de fricción.
- Sistema de contención de polvo/humo.

Las Tablas 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7 contienen el análisis de las alternativas de solución del módulo 2 en cuanto a controlador electrónico, motores, transferencia de movimiento, sistema de reducción de fricción y sistemas de contención. Estas tablas proporcionan las

ventajas y desventajas de cada solución para una mejor selección de las opciones propuestas.

Tabla 2. 3. Alternativas de Solución Módulo 2 Control Electrónico.

Tipo de Controlador Electrónico.	Ventajas	Desventajas
Controladores Integrados	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ocupan menos espacio debido a que se encuentran integrados en un solo módulo. ✓ Bajo costo, económicas. ✓ Existen una amplia gama comercial que cubren suficientemente los requisitos normales. ✓ Pueden controlar motores de diferente naturaleza. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Si se necesita variar un elemento a las características deseadas por el usuario no es posible.
Controladores Modulares	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Gran variedad de modelos con excelente compatibilidad entre ellos. ✓ Puede encontrarse como elementos individuales dando al usuario más beneficios. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Utilizan mayor espacio y pueden llegar a ser redundantes. ✓ Tiene un costo elevado.

Tabla 2. 4. Alternativas de Solución Módulo 2 Motores.

Tipo de Motor	Ventajas	Desventajas
Motor Paso a Paso	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Bajo Costo. ✓ Fácil de configurar y mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Pierde torque mientras se eleva la velocidad.

	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Limitante rango de torque y RPM, dependiendo el modelo. ✓ Adecuado para varios tipos de cortes y funciones. ✓ Auto limitante, no se sobrecargará. ✓ Bajo desgaste de partes. ✓ Posee menor número de partes y elementos de conexión. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lazo abierto, sin detección de posicionamiento. ✓ Baja resolución (debido a sus engranajes).
Servomotores	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mantiene el torque a grandes velocidades (RPM). ✓ Cada modelo tiene una amplia gama de torque y velocidades RPM. ✓ Adecuado para varios tipos de cortes y funciones. ✓ Lazo cerrado. ✓ Alta resolución (debido a sus engranajes). 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alto Costo. ✓ Difícil de configurar y mantener. ✓ Posee un gran número de partes y elementos de conexión ✓ Requiere un circuito extra para proteger los motores y controladores de sobrecargas.

Tabla 2. 5. Alternativas de Solución Módulo 2 Transmisión de Motor.

Tipo de Transmisión	Ventajas	Desventajas
Piñón Cremallera	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Ofrece solidez y precisión en largos desplazamientos. ✓ Alta vida útil. ✓ Permite movilizar con altas velocidades grandes y pesados volúmenes con menos potencia. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alto Costo. ✓ Necesita lubricación constante. ✓ Necesitan un montaje preciso, la cremallera debe estar nivelada con la estructura base de manera precisa.

	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La precisión es de dos centésimas de milímetro. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Posee gran exactitud en sus movimientos depende del cálculo del paso diametral entre sus dientes. ✓ Deben protegerse de polvo o partículas que pueden trabar su movimiento.
Transmisión por correa de caucho.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Económico, bajo costo. ✓ Fácil montaje, no requiere gran exactitud ni muchos elementos extra. ✓ Sencillez de diseño. ✓ No requiere lubricación. ✓ Fácil y rápido acople y desacople. ✓ Rápido mantenimiento. ✓ Estables en distancias cortas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mantenimiento constante, cambio de correa directamente proporcional a la intensidad del uso de la máquina usualmente es necesario realizar una inspección completa cada tres o seis meses. ✓ Costos fijos por mantenimiento. ✓ Problemas de vibración en longitudes largas.

Tabla 2. 6. Alternativas de Solución Módulo 2 Sistema de Reducción de Fricción.

Tipo de Sistema de Reducción de Fricción	Ventaja	Desventaja
Rodamientos Lineales.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mínima generación de calor debido al rozamiento. ✓ Económicas con respecto a otras guías lineales de precisión. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mayor nivel de ruido. ✓ Requiere mayor espacio para el montaje.

	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Menor sensibilidad a la interrupción en la lubricación. ✓ Gran capacidad de carga portante por unidad de anchura del rodamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Elevada sensibilidad a las cargas de impacto.
Guías lineales de precisión prismáticas.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tolerancia de hasta una centésima de milímetro. ✓ Mejor distribución de la carga, aplicación de fuerza mínima debido a su ínfimo coeficiente de rozamiento. ✓ Superior vida útil bajo rigurosas condiciones de trabajo. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Elevado costo. ✓ Susceptible al polvo y ambientes de trabajo con suciedad. ✓ Necesitan mayor precisión en la estructura para trabajar de una manera adecuada. ✓ Necesitan constante lubricación en sus partes.

Tabla 2. 7. Alternativas de Solución Módulo 2 Sistema de contención de polvo/humo.

Tipo de sistema de contención polvo/humo.	Ventaja	Desventaja
Sistema basado en aspiración "mesas secas".	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Gran precisión en la extracción de humos, debido a su sistema de aspiración. ✓ Posee sistema de eliminación de escoria. ✓ No generan oxidación en los materiales a cortar. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Mayor inversión en infraestructura. ✓ Permisos de medio ambiente. ✓ Sistemas complejos de implementar. ✓ No es eficientes en la remoción de polvo y chispas.

Sistema basado en agua “mesas con agua”.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Menor inversión total, cuestan 60% menos que las mesas secas. ✓ Simples de instalar. ✓ Rápida atenuación de partículas de polvo y chispas. ✓ Sistemas de control sencillos. ✓ Posee sistema de eliminación de escoria. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Baja eficiencia en la extracción de humos. ✓ Difícil mantener el área de trabajo y piezas secas o limpias. ✓ Posible oxidación de las piezas. ✓ Afectan la calidad de la cara inferior de la superficie de corte.
--	--	--

2.2.3 MÓDULO 3

El módulo 3 cumple con la función de generar el reporte de operación del funcionamiento de la máquina en el momento de la realización del corte. Este reporte permitirá determinar el tiempo de trabajo de la máquina, el tiempo que se demora en cortar una pieza geométrica, cómo va evolucionando el corte y si existe algún problema.

La Tabla 2.2 expuesta anteriormente en la sección 2.2.1 contiene dos alternativas que solucionan y dan respuesta a los requerimientos de módulo 3, en ella se encuentran las ventajas y desventajas de las dos soluciones para una mejor selección de las mismas.

2.3 MATRIZ MORFOLÓGICA

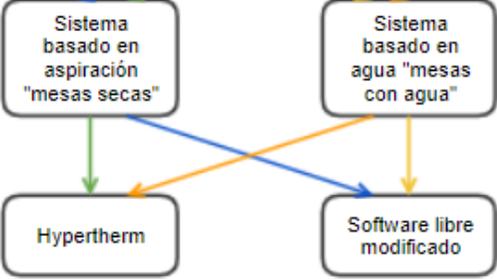
La matriz morfológica permite descomponer en varias opciones cada requerimiento de la máquina y determinar las diferentes combinaciones que pueden realizarse con las soluciones de cada uno de los módulos funcionales que conforman el sistema, finalmente las combinaciones realizadas son aquellas que muestren mayor compatibilidad entre sus

componentes. En la Tabla 2.8 se puede observar las posibles combinaciones de los elementos de la máquina a realizarse.

Posteriormente para determinar cuál de las opciones obtenidas de la matriz morfológica es la mejor y la que se emplea en el desarrollo del proyecto, se procede a ponderar cada una de las alternativas con sus elementos determinando la mejor de ellas. Esta ponderación se realiza mediante las exigencias de requerimiento por parte de la empresa y las opciones planteadas por el estudiante.

Tabla 2. 8. Matriz Morfológica CNC plasma cortadora

FUNCIÓN	COMPONENTE
Diseño en 2D de la pieza o figura geométrica, que se va a proceder a cortar en la máquina CNC plasma, generación de los códigos G y M que serán enviados al controlador.	
Controlador electrónico, envía los códigos G y M al elemento actuador.	
Elemento actuador, permite que los Ejes de transmisión realicen su trabajo.	
Transferencia de movimiento de los motores a los Ejes de la máquina.	
Sistema de reducción de fricción, permite que la transferencia de movimientos realiza su función con mayor precisión.	

<p>Controla los elementos tóxicos cuando se realiza el corte; no permite que gases, polvo o escorias circulen libremente por el lugar de trabajo.</p>	
<p>Detalla al operador como se está produciendo el corte, si existe errores, el tiempo de espera, la potencia del plasma, etc.</p>	

Alternativa 1 – Alternativa 2 – Alternativa 3 – Alternativa 4

Las Figuras 2.10, 2.11, 2.12 y 2.13 detallan cada una de las alternativas desarrolladas en la matriz morfológica, combinando las opciones propuestas en los módulos funcionales.

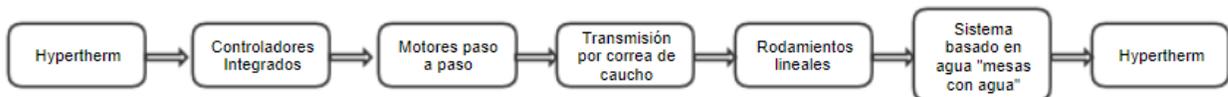


Figura 2. 10. Alternativa 1 Matriz Morfológica.

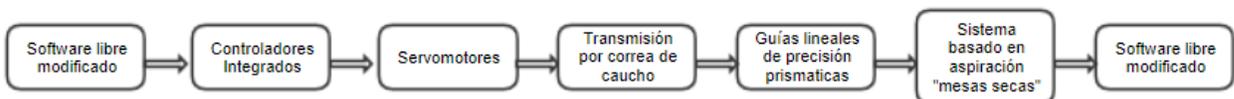


Figura 2. 11. Alternativa 2 Matriz Morfológica.

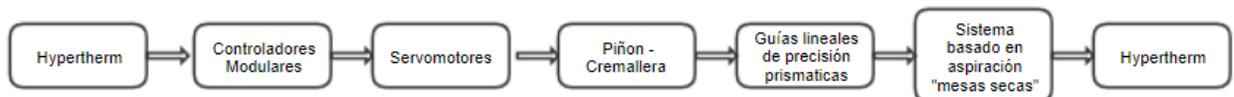


Figura 2. 12. Alternativa 3 Matriz Morfológica.

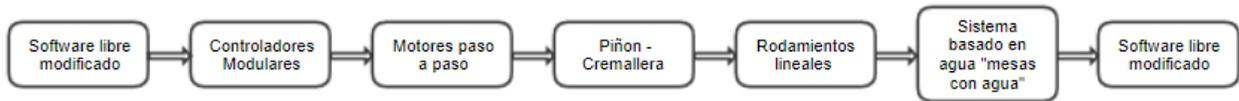


Figura 2. 13. Alternativa 4 Matriz Morfológica.

2.4 MÉTODO DE SELECCIÓN: MATRIZ DE RESIDUOS PONDERADOS

La matriz de residuos ponderados permite conocer mediante criterios específicos de evaluación cuál de las alternativas resultantes en la matriz morfológica es la adecuada para el proyecto.

Los principales criterios a evaluar para la máquina CNC cortadora plasma, son los siguientes:

- a. Fiabilidad: debido a que la máquina va a prestar servicios esta no debe presentar fallos ni errores en su producción.
- b. Precisión: la máquina debe contar con la resolución deseada para generar toda clase de figuras geométricas.
- c. Costo: debe estar en el presupuesto de la empresa y cumplir con los requerimientos impuestos.
- d. Velocidad: la máquina debe cumplir su trabajo a un tiempo que garantice un aceptable nivel de producción y sea acorde a la resolución deseada.
- e. Mantenibilidad: mecanismos y elementos existentes en el mercado.

En la Tabla 2.9 se realiza la evaluación del peso específico de cada criterio lo que permite determinar la prioridad de cada uno de ellos, como resultado la fiabilidad tiene la mayor ponderación 0,3333, seguido de la precisión y costo con una ponderación igual de 0,2333 y por último la velocidad y mantenibilidad con un valor igual a 0,1.

Tabla 2. 9. Evaluación del peso específico de cada criterio.

CRITERIOS	Fiabilidad	Precisión	Costo	Velocidad	Mantenibilidad	$\Sigma + 1$	Ponderación
Fiabilidad		1	1	1	1	5	0,3333
Precisión	0		0,5	1	1	3,5	0,2333
Costo	0	0,5		1	1	3,5	0,2333
Velocidad	0	0	0		0,5	1,5	0,1
Mantenibilidad	0	0	0	0,5		1,5	0,1
					TOTAL	15	1

Fiabilidad > Precisión = Costo > Velocidad = Mantenibilidad

2.4.1 EVALUACIÓN DE LOS PESOS ESPECÍFICOS DE LAS DISTINTAS SOLUCIONES PARA CADA CRITERIO

En las Tablas 2.10, 2.11, 2.12, 2.13 y 2.14 se evalúa cada uno de los criterios expuestos, según su prioridad, con cada una de las alternativas determinadas en la matriz morfológica. En la parte inferior de cada tabla se encuentra el resultado obtenido de cada criterio de evaluación según la ponderación más alta.

Tabla 2. 10. Evaluación del criterio de fiabilidad.

FIABILIDAD	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	$\Sigma + 1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	0	0	1,5	0,15
Alternativa 2	0,5		0,5	0,5	2,5	0,25
Alternativa 3	1	0,5		0,5	3	0,30
Alternativa 4	1	0,5	0,5		3	0,30

				TOTAL	10	1
--	--	--	--	--------------	-----------	----------

Alternativa 4 = Alternativa 3 > Alternativa 2 > Alternativa 1

Tabla 2. 11. Evaluación del criterio de precisión.

PRECISIÓN	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	$\Sigma + 1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	0	0,5	2	0,20
Alternativa 2	0,5		0	0,5	2	0,20
Alternativa 3	1	1		0,5	3,5	0,35
Alternativa 4	0,5	0,5	0,5		2,5	0,25
				TOTAL	10	1

Alternativa 3 > Alternativa 4 > Alternativa 2 = Alternativa 1

Tabla 2. 12. Evaluación del criterio de costo.

COSTO	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	$\Sigma + 1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	1	0,5	3	0,30
Alternativa 2	0,5		1	0,5	3	0,30
Alternativa 3	0	0		0,5	1,5	0,15
Alternativa 4	0,5	0,5	0,5		2,5	0,25
				TOTAL	10	1

Alternativa 1 = Alternativa 2 > Alternativa 4 > Alternativa 3

Tabla 2. 13. Evaluación del criterio de velocidad.

VELOCIDAD	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	$\Sigma + 1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	0	0,5	2	0,20
Alternativa 2	0,5		0	0,5	2	0,20

Alternativa 3	1	1		0,5	3,5	0,35
Alternativa 4	0,5	0,5	0,5		2,5	0,25
				TOTAL	10	1

Alternativa 3 > Alternativa 4 > Alternativa 2 = Alternativa 1

Tabla 2. 14. Evaluación del criterio de mantenibilidad.

MANTENIBILIDAD	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	$\Sigma + 1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	0,5	1	3	0,30
Alternativa 2	0,5		0,5	0,5	2,5	0,25
Alternativa 3	0,5	0,5		0	2	0,20
Alternativa 4	0	0,5	1		2,5	0,25
				TOTAL	10	1

Alternativa 1 > Alternativa 2 = Alternativa 3 > Alternativa 4

2.4.2 TABLA DE PRIORIDADES

La Tabla 2.15 indica cada uno de los criterios de ponderación junto con la alternativa evaluada. El resultado de la tabla de prioridades determina que la alternativa 4 es la mejor opción para el diseño y construcción de la máquina CNC cortadora por plasma.

Tabla 2. 15. Prioridades Matriz de Residuos Ponderados.

CONCLUSIÓN	Fiabilidad	Precisión	Costo	Velocidad	Mantenibilidad	Σ	Prioridad
Alternativa 1	0,050	0,046	0,07	0,02	0,03	0,216	4

Alternativa 2	0,083	0,046	0,07	0,02	0,025	0,244	3
Alternativa 3	0,100	0,081	0,03	0,035	0,020	0,266	2
Alternativa 4	0,100	0,058	0,06	0,025	0,025	0,27	1

La Alternativa 4 está constituida por: un software libre modificado, controladores modulares, motores paso a paso, transmisión piñón cremallera, rodamientos lineales, sistema basado en agua “mesas con agua” y HMI de software libre modificado.

CAPÍTULO III

DISEÑO Y SELECCIÓN DE EQUIPOS Y SISTEMAS

En base al resultado obtenido de la matriz de residuos ponderados, en el presente capítulo se dimensiona mediante cálculos matemáticos los diferentes elementos y mecanismos que componen la máquina tanto mecánica como electrónicamente. Con el resultado obtenido que justifique dichos elementos; se realiza los planos constructivos y electrónicos de la máquina, junto con el listado de materiales.

3.1 DISEÑO MECÁNICO

El diseño mecánico consta de tres partes fundamentales el diseño del Eje X, Eje Y y Eje Z, en la Figura 3.1 a continuación se observa el esquema general de la máquina con la representación de cada uno de estos Ejes.

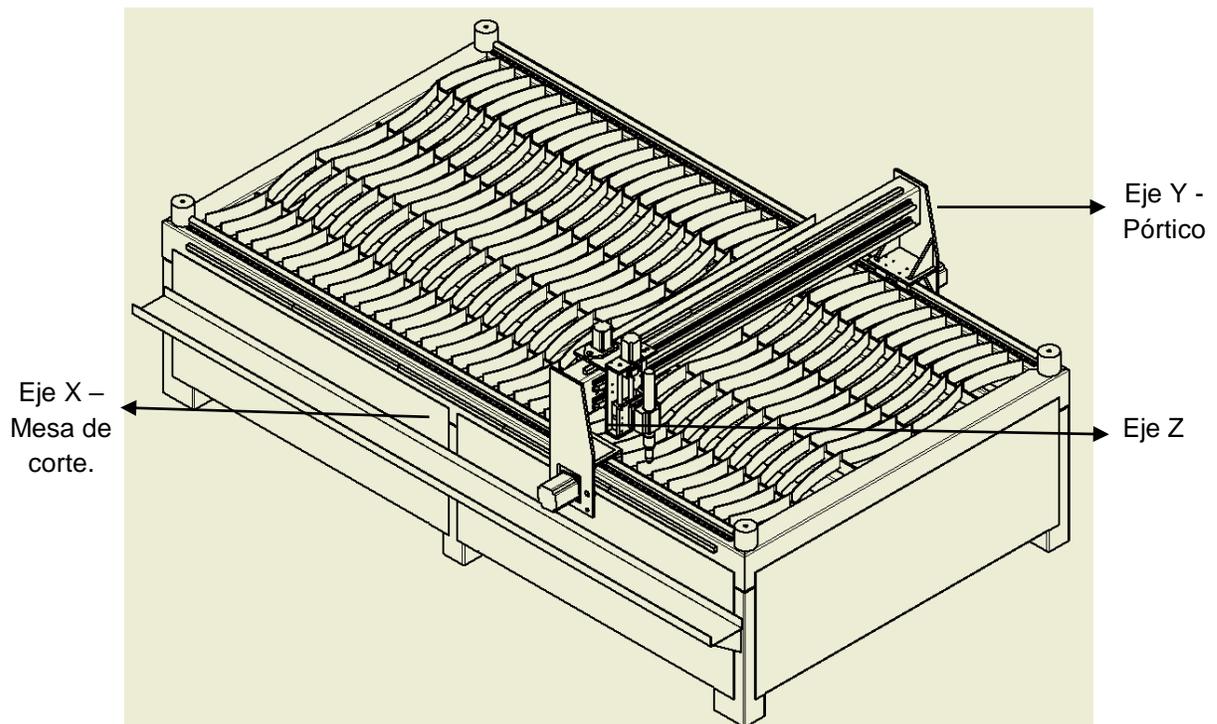


Figura 3. 1. Esquema General Máquina CNC Cortadora por Plasma.

Para comenzar con el diseño mecánico se deben tener en cuenta varios factores como:

- Área de trabajo útil de la máquina.
- Capacidad en el espesor de corte.
- Requerimientos de la empresa o usuario.
- Precisión deseada.

Una vez conocidos estos requisitos de diseño se inicia con el esquema de la máquina, comenzando con el Eje Z debido a que su peso interviene en el diseño del Eje Y, y posteriormente el peso del Eje Z y Eje Y ya diseñados interviene en el diseño de la mesa o en este caso Eje X. Por ello el orden es de gran importancia en el diseño: primero el Eje Z, segundo el Eje Y y tercero y último el Eje X el cual es el encargado de soportar no solo el peso de todos los Ejes sino el de las planchas que van a ser cortadas.

3.1.1 DISEÑO EJE Z

El Eje Z es el encargado del movimiento vertical de la máquina permitiendo la regulación de la altura de la antorcha de corte respecto a la pieza a cortar, esta altura será regulada mediante un controlador de altura eléctrico, ya que la calidad del corte depende de ella. El esquema general del Eje Z se detalla en la Figura 3.2.

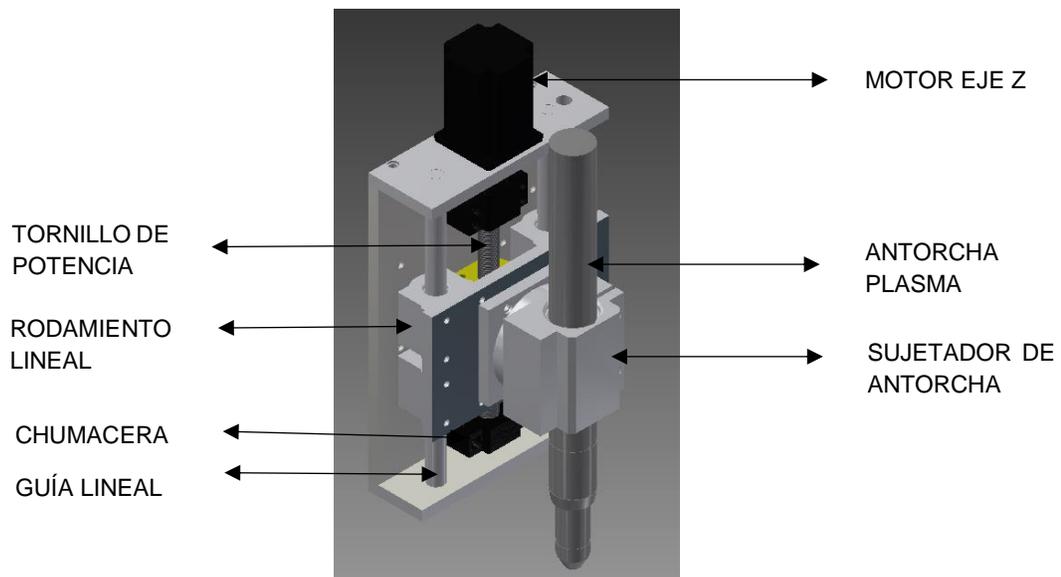


Figura 3. 2. Esquema General y Elementos Eje Z.

Como observa en la Figura 3.2, el Eje Z consiste de un sistema accionado por un motor paso a paso que mediante un acople gira a un tornillo de potencia que a su vez desplaza una placa donde se fija el sujetador de la antorcha plasma. La placa realiza el movimiento mediante dos guías lineales junto con sus respectivos rodamientos.

3.1.1.1 Selección de Rodamientos Lineales

La selección de las guías se realiza de acuerdo al tipo y magnitud de la carga que se requiera soportar. La capacidad de carga está definida por las condiciones de:

- Carga estática
- Carga dinámica

3.1.1.1.1 Carga Estática

El coeficiente de seguridad estático (a_s) o carga estática es el índice utilizado para evaluar la capacidad de un sistema de guiado lineal para absorber las cargas y/o los momentos

estáticos. Este índice se encuentra representado por (3.1) definida como coeficiente de seguridad estático presentado a continuación.

Es el cociente entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema en este caso la capacidad de carga estática dado por el fabricante y el valor esperado real a que se verá sometido en este caso la carga máxima aplicada. Evaluando la capacidad del sistema de guiado lineal.

$$a_s = fc \cdot fb \cdot \frac{C_0}{P} \quad (3.1)$$

Donde:

- a_s coeficiente de seguridad estático, adimensional;
- fc factor de contacto, adimensional;
- fb coeficiente de layout recirculaciones, adimensional;
- C_0 capacidad de carga estática, en N;
- P carga máxima aplicada, en N.

El Factor de contacto (fc) determina el desgaste que pueden tener los rodamientos lineales dependiendo del número de rodamientos que se colocan en las guías que transportan la carga, ya que la durabilidad podría verse afectada por la falta de uniformidad en la distribución de las cargas aplicadas sobre los rodamientos. En la Tabla 3.1 se observa el valor del factor de contacto dependiendo el número de rodamientos por cada Eje.

Tabla 3. 1. Factor de contacto rodamientos lineales, [8].

Número de casquillos por cada Eje	Fc
1	1,0
2	0,81
3	0,72

4	0,66
5	0,61

El Coeficiente de Layout de recirculaciones (f_b) permite aumentar la capacidad de carga estática C_0 en función de la posición de la carga (F) respecto a la posición de las bolas re circulantes; eso es posible gracias a una mejor distribución de la carga sobre los elementos rodantes. En la Figura 3.3 se observa el valor del coeficiente (f_b) dependiendo del número de recirculaciones y la posición de la carga.

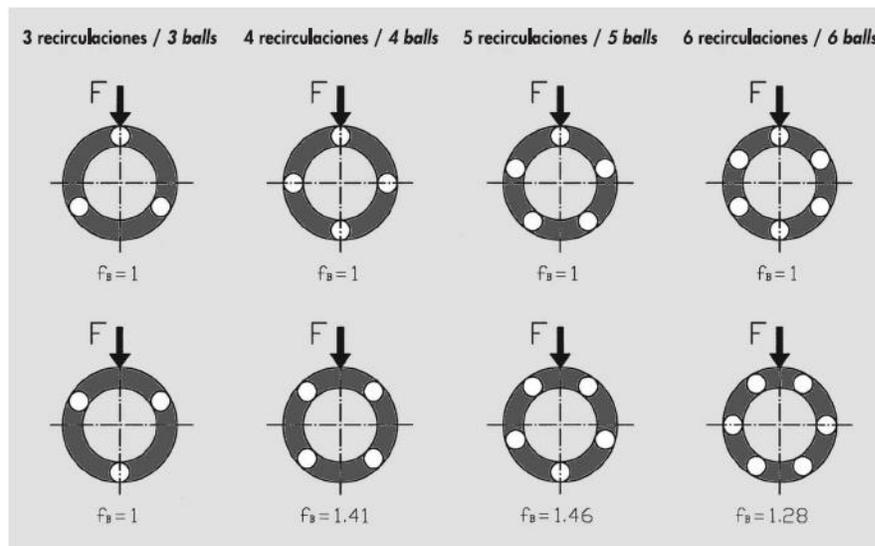


Figura 3. 3. Coeficiente de Layout recirculaciones, [8].

La Carga máxima aplicada (N) es el peso máximo real de los elementos que va a transportar los rodamientos lineales. En la Tabla 3.2 se observa el peso de cada uno de los elementos que intervienen en el cálculo de la carga máxima para la selección de los rodamientos requeridos.

Tabla 3. 2. Peso componentes Eje Z - cálculo carga máxima rodamientos.

Elemento	Material	Peso	Unidades
Antorcha	Varios	3,4	kg

Base Antorcha	Aluminio	0,19	kg
Soporte Antorcha	Aluminio	0,91	kg
Placa Base	Aluminio	0,52	kg
<i>TOTAL</i> ($\Sigma \times 2,5$)		10,04	kg

El factor de seguridad para los cálculos realizados es de 2,5, este valor se tomará de acuerdo con las normas de factor de seguridad para rodamientos en el catálogo técnico del fabricante [8].

Para determinar la carga máxima en Newton [N] se utiliza (3.2) representada a continuación. La aceleración promedio utilizada en esta ecuación es un dato experimental, con un valor de 0.6 m/s^2 , proporcionado por Hypertherm según pruebas realizadas en sus instalaciones en New Hampshire, Estados Unidos.

$$Fuerza = m \cdot a \quad (3.2)$$

Por lo tanto, reemplazando:

$$Fuerza = 10,04 \text{ kg} \cdot 0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 6,024 \text{ N}$$

A la fuerza resultante se sumará 400N adicionales los cuales simulan el peso y la tensión que realizan los cables que están conectados a la antorcha, incluyéndose como peso extra. A continuación, se explica la obtención del valor de 400N, donde se utiliza una variación de (3.2) colocando como valor de la masa el peso de los cables de alimentación de 27,21 kg y a la aceleración el valor de la gravedad de $9,8 \text{ m/s}^2$:

$$Fuerza \text{ de seguridad} = 27,21 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$Fuerza \text{ de seguridad} = 266,66 \text{ N}$$

Para la obtención del valor de factor de seguridad utilizado en el cálculo de la fuerza extra se basa en la ficha técnica del rodamiento, descrito en la Tabla 3.3. La fuerza extra se obtiene multiplicando la fuerza de seguridad y el factor de seguridad.

$$Fuerza\ extra = 266,66\ N \cdot 1,5 = 399,99\ N \approx 400\ N$$

Y la fuerza total resulta de sumar el cálculo de la fuerza resultante y la fuerza extra (peso cables antorcha).

$$Fuerza\ total = 6,024\ N + 400\ N = \mathbf{406,024\ N}$$

Al determinar todos los factores necesarios para deducir el coeficiente de seguridad estático se resuelve (3.1) antes mencionada. Por lo tanto, el coeficiente de seguridad estático (a_s), para rodamientos lineales del Eje Z, CNC plasma, resulta:

$$a_s = 0,81 \cdot 1 \cdot \frac{1200\ N}{406,024\ N}$$

$$\mathbf{a_s = 2,394\ para\ un\ rodamiento\ de\ 16\ mm.}$$

Se requiere que el a_s (coeficiente de seguridad estático) > 1 debido a la posibilidad de eventuales impactos y/o vibraciones, momentos de arranque y de parada y cargas accidentales, elementos que si no se tuvieran en cuenta podrían afectar la capacidad del sistema. En la Tabla 3.3 [8] se observa los valores mínimos que debe tener el coeficiente de seguridad estático dependiendo las condiciones de funcionamiento que este posea.

Tabla 3. 3. Coeficiente de seguridad estático Rodamientos Lineales.

Condiciones de Funcionamiento	a_s mínimos
Estático y pequeñas flexiones	1,0 a 2,0
Dinámico con ligeras flexiones	2,0 a 4,0
Dinámico con impactos, vibraciones y ligeras flexiones	3,0 a 5,0

3.1.1.1.2 Carga dinámica

Determina una vida útil nominal (L) de recorrido o desplazamiento del rodamiento. La vida útil se considera como el recorrido teórico sin la aparición de fatiga. La capacidad de carga dinámica de un sistema de guiado lineal del tipo eje casquillo está limitado por:

- Cargas y/o momentos aplicados.
- Flexiones del eje.
- Velocidades de funcionamiento.
- Ciclo de funcionamiento.

La relación que determina la carga dinámica o vida útil nominal del rodamiento está representada por (3.3).

$$L_h = \frac{\left(\frac{C}{P}\right)^3 \cdot 50 \cdot 10^3}{V_m \cdot 60} \quad (3.3)$$

Donde:

L_h vida útil nominal, en horas;

C capacidad carga dinámica, en N;

P carga equivalente aplicada, en N;

V_m velocidad máxima de posicionamiento, m/min.

Por lo tanto, reemplazando:

$$L_h = \frac{\left(\frac{2000 \text{ N}}{406,024 \text{ N}}\right)^3 \cdot 50 \cdot 10^3}{5,2 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot 60}$$

$$L_h = 19153,59 \text{ horas} \approx 2,18 \text{ años.}$$

Corroborando los cálculos realizados, con los datos del fabricante la vida útil máxima de los rodamientos lineales con bolas recirculantes es de 2 años aproximadamente.

3.1.1.2 Selección y Cálculo Tornillo de Potencia

Un tornillo de potencia es un dispositivo que se utiliza para transformar movimiento angular en movimiento lineal, con el fin de transmitir fuerza o potencia mecánica.

A continuación, se presentan las ecuaciones y cálculos utilizados en la selección del tornillo de potencia para el Eje Z.

Para mayor facilidad en la selección y adquisición del tornillo de potencia, se seleccionó características técnicas existentes en el mercado, en la Tabla 3.4 se observa los datos más relevantes:

Tabla 3. 4. Características Técnicas Tornillo de Potencia, [8].

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Diámetro Exterior (d)	16 mm
Diámetro de paso (dm)	13,6 mm

Diámetro de raíz (dr)	10 mm
Paso (p)	4,7 mm
Ángulo de la rosca (φ)	14,5
Coefficiente de Fricción (μ)	0,15
Número de entradas de rosca (n)	1

La carga que el tornillo debe levantar está dada por el peso de los elementos expuestos en la Tabla 3.5.

Tabla 3. 5. Peso elementos Eje Z - cálculo carga máxima tornillo de potencia.

Elemento	Material	Peso	Unidades
Antorcha	Varios	3,4	kg
Base Antorcha	Aluminio	0,19	kg
Soporte Antorcha	Aluminio	0,91	kg
Placa Base	Aluminio	0,52	kg
Rodamientos	Varios	0.72	kg
Tuerca	Acero	0.23	kg
Soporte Tuerca - Placa	Aluminio	0.20	kg
TOTAL ($\Sigma \times 2,5$)		15,43	kg

Para determinar la carga máxima en Newton [N] se utilizará (3.2) la cual multiplica la aceleración promedio de $0,6 \text{ m/s}^2$ con la carga máxima que soporta el tornillo.

$$Fuerza\ resultante = m \cdot a = 15,43\text{kg} \cdot \frac{0,6\text{m}}{\text{s}^2} = 9,255 \text{ N}$$

Al igual que en el caso de los rodamientos a la fuerza resultante se sumará 400N extra los cuales simulan el peso y la tensión que realizan los cables que están conectados a la

antorcha, incluyéndose como peso extra. La fuerza total se calcula mediante la multiplicación de la fuerza resultante y la fuerza extra (peso cables antorcha).

$$Fuerza\ total = 9,255\ N + 400\ N = \mathbf{409,255N}$$

3.1.1.2.1 Torque Tornillo de Potencia

Cuando se utiliza un tornillo de potencia, en este caso ACME, para ejercer una fuerza de traslación, se necesita conocer cuánto par torsional se debe aplicar a la tuerca del tornillo, para mover la carga [9]. De tal forma se determinan dos ecuaciones las cuales son el torque de subida representado por (3.4), el cual necesita el ángulo de avance representado por (3.5) y el torque de bajada representado por (3.6).

3.1.1.2.1.1 Torque de Subida

La ecuación (3.4) representa el torque de subida de una carga moviéndose en dirección vertical. Si la carga es horizontal, o con cierta inclinación, dicha ecuación todavía es válida si la carga va a avanzar “rosca arriba” por el tornillo.

$$T_s = \frac{F \cdot dm}{2} \cdot \left[\frac{\cos \varphi \cdot \tan \lambda + \mu}{\cos \varphi - \mu \cdot \tan \lambda} \right] \quad (3.4)$$

Donde:

T_s torque de subida, en Nm;

F fuerza total, en N;

dm diámetro de paso, en mm;

φ ángulo de rosca, en grados;

- λ ángulo de avance, en grados;
 μ coeficiente de fricción, adimensional.

Para determinar el torque de subida se debe calcular el ángulo de avance (λ), representada por (3.5).

$$\tan \lambda = \frac{l}{\pi \cdot dm} \quad (3.5)$$

El avance o paso del tornillo representado en (3.6) debe ser reemplazado en (3.5).

$$l = n \cdot p \quad (3.6)$$

$$l = 1 \cdot 4,7\text{mm} = \mathbf{4,7 \text{ mm}}$$

Reemplazando en (3.5) los valores obtenidos en (3.6), se tiene:

$$\tan \lambda = \frac{4,7 \text{ mm}}{\pi \cdot 13,6 \text{ mm}} = 0,11$$

$$\lambda = \mathbf{6,97}$$

Reemplazando en (3.4), se tiene:

$$T_s = \frac{409,255 \text{ N} \cdot 13,6 \text{ mm}}{2} \cdot \left[\frac{\cos 14,5 \cdot \tan 6,97 + 0,15}{\cos 14,5 - 0,15 \cdot \tan 6,97} \right]$$

$$T_s = \mathbf{747,06 \text{ Nmm} \rightarrow 0,747 \text{ Nm}}$$

3.1.1.2.1.2 Torque de bajada

Si la rotación del tornillo tiende a bajar la carga, la fuerza de fricción actuará arriba del plano, realizando cambios en el análisis del torque representado en (3.7).

$$T_b = \frac{F \cdot dm}{2} \cdot \left[\frac{\mu - \cos \varphi \cdot \tan \lambda}{\cos \varphi + \mu \cdot \tan \lambda} \right] \quad (3.7)$$

Donde:

- T_b torque de bajada, en Nm;
 F fuerza total, en N;
 dm diámetro de paso, en mm;
 φ ángulo de rosca, en grados;
 λ ángulo de avance, en grados;
 μ coeficiente de fricción.

$$T_s = \frac{409,255 \text{ N} \cdot 13,6 \text{ mm}}{2} \cdot \left[\frac{0,15 - \cos 14,5 \cdot \tan 6,97}{\cos 14,5 + 0,15 \cdot \tan 6,97} \right]$$

$$T_b = 120,56 \text{ Nmm} \rightarrow 0,120 \text{ Nm}$$

3.1.1.2.1.3 Eficiencia durante la elevación de la carga.

La eficiencia del tornillo durante la elevación de la carga está representado por (3.8) expuesta a continuación.

$$e = \frac{F \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot T_s} \quad (3.8)$$

Donde:

- e eficiencia del tornillo, en %;
 F fuerza total, en N;
 l paso del tornillo, en mm;
 T_s torque de subida, en Nmm.

Reemplazando:

$$e = \frac{409.255\text{N} \cdot 4.7\text{mm}}{2 \cdot \pi \cdot 747.06 \text{ Nmm}}$$

$$e = \mathbf{0.4097} \rightarrow \mathbf{40.97\%}$$

Las roscas Acme tiene ángulos del orden de 2 a 5 grados, para los cuales se obtiene eficiencias del orden del 18% a 45% [10]. Se pueden lograr eficiencias mayores con tornillos de bola, los cuales poseen un tren de balines que ruedan sobre el torillo y la tuerca; como la fricción es rodante, las pérdidas son mínimas.

La eficiencia obtenida de 40.97% está en un rango bueno para un tornillo de potencia de rosca Acme. Para mejorarla puede reducirse el coeficiente de fricción del tornillo y del cojinete mediante una adecuada lubricación. Además, como se mencionó anteriormente podría remplazarse el cojinete de contacto deslizante por un rodamiento axial de bolas o rodillos (cojinete de contacto rodante), el cual absorbe sólo una pequeña cantidad de energía.

3.1.1.2.2 Esfuerzos producidos en el Tornillo de Potencia

Se determina dos esfuerzos en el cuerpo del tornillo el esfuerzo cortante representado por (3.9) y el esfuerzo axial normal nominal representado por (3.10), con los cuales se establece el factor de seguridad del tornillo (3.11).

$$\tau = \frac{16 \cdot T_s}{\pi \cdot dr^3} \quad (3.9)$$

Donde:

τ esfuerzo cortante, en MPa;

T_s torque de bajada, en Nm;

dr diámetro de raíz, en m.

$$\tau = \frac{16 \cdot (0,747 \text{ Nm})}{\pi \cdot (0,01 \text{ m})^3}$$

$$\tau = \mathbf{3,80 \text{ MPa}}$$

El esfuerzo axial nominal (3.10) permite determinar el factor de seguridad para un tornillo de potencia, en donde el área utilizada es la de una circunferencia.

$$\sigma = -\frac{F}{A} = -\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot dr^2} \quad (3.10)$$

Donde:

σ esfuerzo axial nominal, en MPa;

F fuerza total, en N;

dr diámetro de raíz, en m.

$$\sigma = -\frac{4 \cdot 409,255 \text{ N}}{\pi \cdot (0,01 \text{ m})^2}$$

$$\sigma = \mathbf{-5,21 \text{ MPa}}$$

Al determinar los dos esfuerzos producidos en el tornillo se reemplaza en (3.11) obteniendo el factor de seguridad del mismo.

$$\frac{1}{N^2} = \left(\frac{\sigma}{S_y}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{S_{ys}}\right)^2 \quad (3.11)$$

Donde:

N factor de seguridad, adimensional;

σ esfuerzo axial nominal, en MPa;

S_y resistencia a la fluencia, en MPa;

τ esfuerzo cortante, en MPa;

S_{ys} resistencia a la fluencia corregido, en MPa;

$$\frac{1}{N^2} = \left(-\frac{5,21}{320}\right)^2 + \left(\frac{3,80}{0,577 \cdot 320}\right)^2$$

$$N = 38,10$$

El factor de seguridad obtenido de (3.11) es alto; sin embargo, deben preverse sobrecargas debido a la aplicación de cargas mayores a las de diseño; además, las cargas en el tornillo son variables y éste debe tener suficiente resistencia a la fatiga es por eso que el material seleccionado del fabricante es AISI 1020 [8].

3.1.1.3 Recopilación de resultados del análisis y selección de elementos del Eje Z.

En la Tabla 3.6 se encuentra el resultado de cada uno de los elementos dimensionados para el Eje Z, dichos elementos cumplen con todas las especificaciones técnicas requeridas por la máquina y el diseño de la misma.

Tabla 3. 6. Recopilación de resultados Eje Z.

Elemento	Diámetro	Material	Fabricante
Rodamientos Lineales	16mm	Aleación de Aluminio 6061	NBS
Tornillo de Potencia	16mm	Aleación de Aluminio 6061	NBS

3.1.2 DISEÑO EJE Y

El Eje Y de la máquina es el encargado del movimiento transversal de la antorcha de corte. Como se observa en la Figura 3.4, la estructura principal de este Eje consiste de

un pórtico que soporta el peso total del Eje Z y permite su desplazamiento mediante un sistema de rodamientos lineales, este movimiento es accionado mediante un sistema de piñón – cremallera.

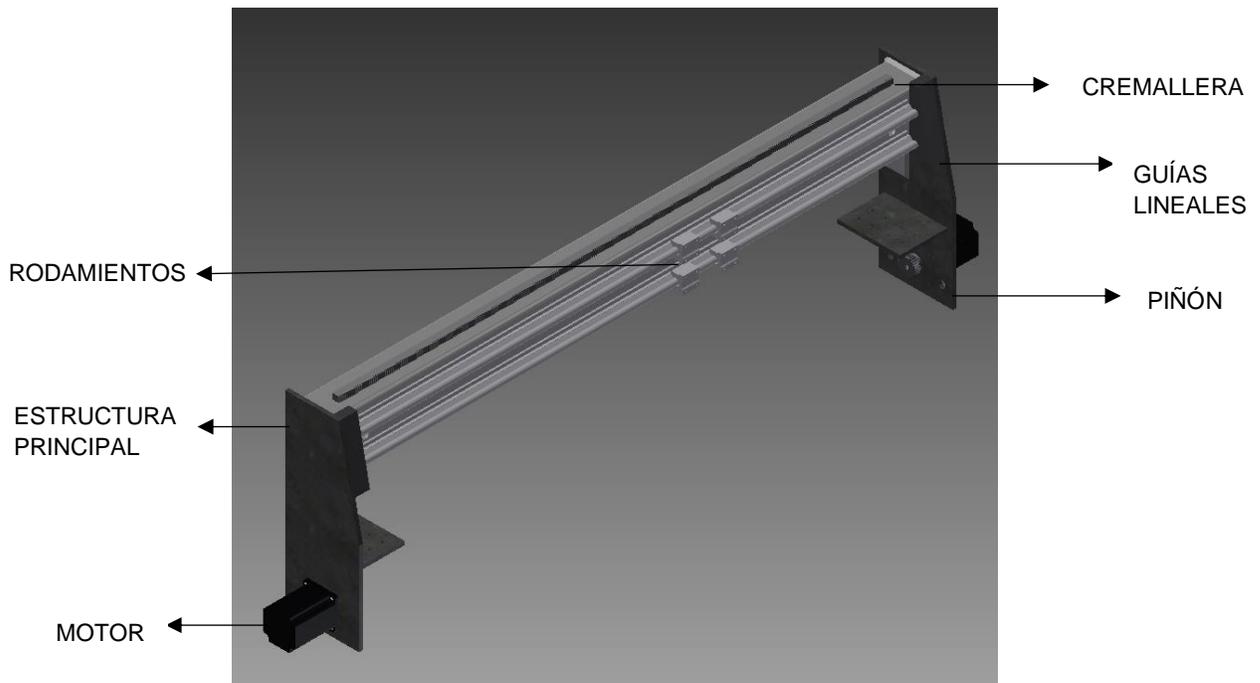


Figura 3. 4. Estructura Principal - Elementos Eje Y.

3.1.2.1 Selección de Rodamientos Lineales

Como en el caso del Eje Z, la selección de las guías se realiza de acuerdo al tipo y magnitud de la carga que se requiera soportar. La capacidad de carga está definida como se dijo anteriormente por las condiciones de:

- Carga estática
- Carga dinámica

3.1.2.1.1 Carga Estática

Los factores que intervienen en los cálculos de carga estática o a su vez coeficiente de seguridad estático (a_s) representado por (3.1) fueron detallados anteriormente, solo los factores cambiantes como la capacidad de carga estática propia del rodamiento (ficha técnica) y la carga máxima aplicada son detallados a continuación.

De forma análoga a la explicación dada en (3.1) se tiene:

$$a_s = f_c \cdot f_b \cdot \frac{C_0}{P}$$

La carga máxima aplicada (M) representada en la Tabla 3.7 muestra el peso de cada uno de los elementos que intervienen en el cálculo de la carga máxima para la selección de los rodamientos requeridos.

Tabla 3. 7. Peso componentes Eje Z - cálculo carga máxima rodamientos Eje Y.

Elemento	Material	Peso	Unidades
Antorcha	Varios	3,40	kg
Base Antorcha	Aluminio	0,19	kg
Soporte Antorcha	Aluminio	0,91	kg
Placa Base	Aluminio	0,52	kg
Rodamientos	Varios	0,72	kg
Tuerca	Acero	0,23	kg
Soporte Tuerca - Placa	Aluminio	0,20	kg
Guías	Aluminio	0,40	kg
Tornillo	Acero	0,45	kg
Placa Soporte Z-Y	Aluminio	1,30	kg
Base Superior	Aluminio	0,30	kg
Base Inferior	Aluminio	0,25	kg
Base Motor Y	Aluminio	0,20	kg

Motor z	Varios	1,00	kg
Motor Y	Varios	1,00	kg
<i>TOTAL</i> ($\Sigma \times 2,5$)		29,00	kg

El factor de seguridad para los cálculos realizados es de 2,5, este valor se tomará de acuerdo con las normas de factor de seguridad para rodamientos en el catálogo técnico del fabricante [8].

Para determinar la carga máxima en Newton [N] se utiliza (3.2) representada a continuación, donde la aceleración utilizada como se ha dicho en la sección 3.1.1.1.1 es de 0.6m/s^2 .

$$Fuerza = m \cdot a \quad (3.2)$$

$$Fuerza = 29,00 \text{ kg} \cdot 0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 17,40 \text{ N}$$

A la fuerza resultante se sumará 300N extra, los cálculos y su explicación se encuentran a continuación, como un factor de seguridad esta fuerza extra sumada es menor que la del Eje Z debido a que los rodamientos del Eje Y no soportan toda la tensión que realizan los cables de la antorcha como lo hacen los del Eje Z, además que el Eje Y tiene soportes estables que van directamente a la mesa.

A continuación, se explica la obtención del valor de 300N, donde el valor de la masa utilizada es el peso de los cables de alimentación con un valor de 20kg.

$$Fuerza \text{ de seguridad} = 20 \text{ kg} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 196 \text{ N}$$

El factor de seguridad determinado según la ficha técnica del rodamiento esta descrito en la Tabla 3.3; y es utilizado en la obtención de la fuerza extra que resulta de multiplicar la fuerza de seguridad y el factor de seguridad.

$$Fuerza\ extra = 196\ N \cdot 1,5 = 294\ N \approx 300\ N$$

La fuerza total es utilizada en el cálculo del coeficiente de seguridad y se obtiene sumando la fuerza resultante y la fuerza extra (peso cables antorcha).

$$Fuerza\ total = 17,40\ N + 300\ N = \mathbf{317,40\ N}$$

Coeficiente de seguridad estático (a_s), para rodamientos lineales Eje Z, CNC plasma; de forma análoga a (3.1):

$$a_s = f_c \cdot f_b \cdot \frac{C_0}{P}$$

$$a_s = 0,81 \cdot 1,41 \cdot \frac{910\ N}{317,40\ N}$$

$$\mathbf{a_s = 3.3\ para\ un\ rodamiento\ de\ 16\ mm.}$$

Se requiere que el a_s (coeficiente de seguridad estático) > 1 debido a la posibilidad de eventuales impactos y/o vibraciones, momentos de arranque y de parada y cargas accidentales, elementos que si no se tuvieran en cuenta podrían afectar la capacidad del sistema.

3.1.2.1.2 Carga dinámica

La vida útil (L) o a su vez carga dinámica se considera como el recorrido teórico sin la aparición de fatiga y se encuentra representada por (3.3).

$$L_h = \frac{\left(\frac{C}{P}\right)^3 \cdot 50 \cdot 10^3}{V_m \cdot 60} \quad (3.3)$$

Por lo tanto, reemplazando:

$$L_h = \frac{\left(\frac{2500 \text{ N}}{317,40 \text{ N}}\right)^3 \cdot 50 \cdot 10^3}{17,5 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot 60}$$

$$L_h = 23269,12 \text{ horas} \approx 2,65 \text{ años.}$$

La vida útil máxima del cojinete será aproximadamente dos años, logrando aumentarla o disminuirla según los cuidados recibidos como limpieza y lubricación en el manual de la máquina se puede observar el proceso de mantenimiento de dichos rodamientos.

3.1.2.2 Dimensionamiento y Selección del mecanismo de Piñón – Cremallera

El mecanismo de piñón – cremallera convierte un movimiento de rotación en un movimiento rectilíneo o viceversa, es generalmente el método más utilizado cuando se trata de mover elementos con distancias superiores a un metro.

La importancia del mecanismo de piñón – cremallera en el uso para máquinas CNC es su capacidad de proporcionar movimientos lineales de gran precisión.

Para el movimiento del Eje Y se decidió utilizar el mecanismo de transmisión de piñón / cremallera dentado recto debido a que no existen grandes cargas a transmitir y las velocidades de trabajo son relativamente bajas.

La Figura 3.5 muestra la configuración básica de una transmisión de piñón – cremallera.

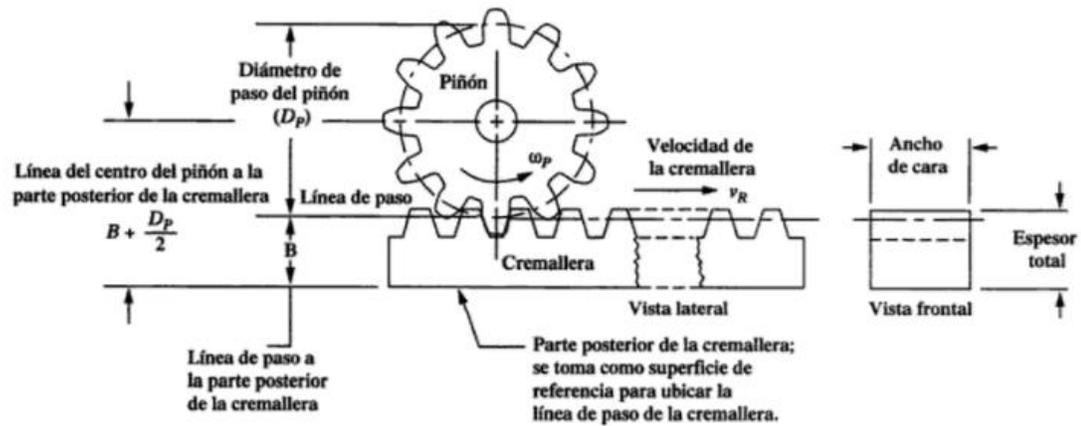


Figura 3. 5. Transmisión piñón – cremallera partes, [9].

3.1.2.2.1 Fuerza tangencial teórica

La fuerza tangencial teórica se encuentra representada por (3.12) expuesta a continuación.

$$F_{ht} = P \cdot (9,81 \cdot \mu + a) \quad (3.12)$$

Donde:

F_{ht} fuerza tangencial horizontal teórica, en N;

P masa a trasladar, en kg;

a aceleración lineal, en m/s^2 ;

μ coeficiente de rozamiento, adimensional.

En la Tabla 3.8 se observa el peso de los componentes que intervienen en el cálculo para la selección de la cremallera.

Tabla 3. 8. Peso componentes Eje Z - cálculo fuerza tangencial selección cremallera.

Elemento	Material	Peso	Unidades
----------	----------	------	----------

Antorcha	Varios	3,40	kg
Base Antorcha	Aluminio	0,19	kg
Soporte Antorcha	Aluminio	0,91	kg
Placa Base	Aluminio	0,52	kg
Rodamientos	Varios	0,72	kg
Tuerca	Acero	0,23	kg
Soporte Tuerca - Placa	Aluminio	0,20	kg
Guías	Aluminio	0,40	kg
Tornillo	Acero	0,45	kg
Placa Soporte Z-Y	Aluminio	1,30	kg
Base Superior	Aluminio	0,30	kg
Base Inferior	Aluminio	0,25	kg
Base Motor Y	Aluminio	0,20	kg
Motor z	Varios	1,00	kg
Motor Y	Varios	1,00	kg
<i>TOTAL</i>		14,50	kg

Reemplazando en (3.12), se tiene:

$$F_{ht} = 14,5 \text{ kg} \cdot \left(9,81 \cdot 0,15 + 0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

$$F_{ht} = 30,04 \text{ N}$$

3.1.2.2.2 Fuerza tangencial corregida

La fuerza tangencial corregida es aquella que posee un coeficiente de seguridad representada por (3.13).

$$F_{hc} = F_{ht} \cdot k \tag{3.13}$$

Donde:

F_{hc} fuerza tangencial corregida, en N;

F_{ht} fuerza tangencial horizontal teórica, en N;

k coeficiente de seguridad, adimensional.

A continuación, la Tabla 3.9 indica las opciones necesarias para la selección del coeficiente de seguridad más adecuado para cada aplicación que pueda tener la cremallera. Siendo decisión del diseñador la selección del coeficiente de seguridad adecuado.

Tabla 3. 9. Coeficiente Seguridad Cremallera, [11].

Tiempo de Trabajo	Tipo de Carga		
	Uniforme	Moderada	Pesada
Ocasional (1/2 hora)	1,5	1,8	2,3
Intermitente (3 horas)	1,8	2	2,5
8-10 horas	2	2,25	2,8
24 horas	2	2,5	3

En el cálculo de la fuerza tangencial horizontal corregida se optará por un coeficiente de seguridad de **2.25** basándose en la Tabla 3.9, tabla extraída del fabricante de la cremallera [11], debido al tiempo de trabajo que tendrá la máquina y el tipo de carga que soporta.

Reemplazando en (3.13), se tiene:

$$F_{hc} = 30,04 \text{ N} \cdot 2,25$$

$$F_{hc} = \mathbf{67,58 \text{ N}}$$

Con el resultado de la fuerza tangencial corregida se selecciona el módulo del mecanismo piñón cremallera con el cual se va a realizar los cálculos restantes, para esta selección también es necesario la velocidad lineal promedio la cual en este caso es de 0,25m/seg dato experimental propuesto por el fabricante del mecanismo según las condiciones dadas por el diseñador. La Figura 3.6 muestra la selección realizada del módulo obteniendo como resultado un valor de M1.5.

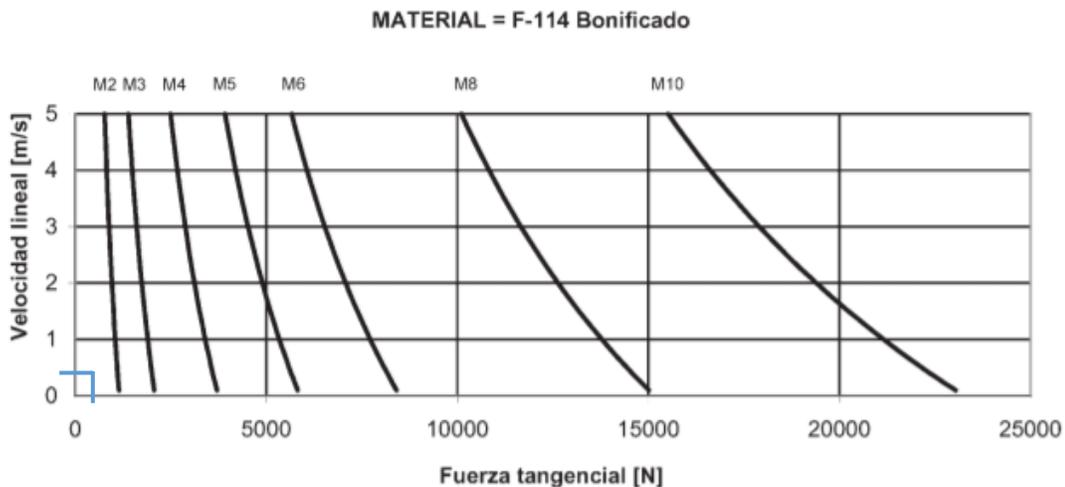


Figura 3. 6. Selección módulo piñón - cremallera Eje Y, [11].

3.1.2.2.3 Análisis de fuerzas

En el análisis de fuerzas para mayor facilidad en la selección y compra del piñón, se eligió uno con características técnicas existentes en el mercado, en la Tabla 3.10 se observa los datos más relevantes.

Tabla 3. 10. Características técnicas piñón Eje Y, [11].

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Diámetro Exterior $[De]$	42.8 mm
Diámetro Primitivo $[D]$	39.79 mm

Número de dientes $[Z]$	25mm
Módulo	1.5mm

El torque a vencer del piñón está representado por (3.14), reemplazando los valores de la Tabla 3.10 se tiene:

$$T = F_{hc} \cdot \left(\frac{D}{2}\right) \quad (3.14)$$

Donde:

- T torque a vencer, en Nm;
 F_{hc} fuerza tangencial corregida, en N;
 D diámetro primitivo, en mm.

$$T = 67,58 \text{ N} \cdot \left(\frac{39,79 \text{ mm}}{2}\right)$$

$$T = 1344,56 \text{ Nmm} \rightarrow 1,34 \text{ Nm}$$

El torque calculado nos permite saber la fuerza que en realidad transmite torque y potencia desde los dientes del piñón a los dientes del engranaje.

La velocidad angular representado por (3.15), se obtiene dividiendo la velocidad lineal por el diámetro primitivo:

$$\omega = \frac{2 \cdot V}{D} \quad (3.15)$$

Donde:

- ω velocidad angular, en rpm;
 V velocidad lineal, en m/min;

D diámetro primitivo, en m.

$$\omega = \frac{2 \cdot 15 \frac{\text{m}}{\text{min}}}{0,039 \text{ m}}$$

$$\omega = 753,96 \text{ rpm}$$

Para determinar la potencia transmitida, representado por (3.16), se requiere la fuerza tangencial corregida, velocidad angular y el diámetro primitivo dividido para una constante:

$$H = \frac{F_{hc} \cdot \pi \cdot \omega \cdot D}{60000} \quad (3.16)$$

Donde:

H potencia transmitida, en W;

ω velocidad angular, en rpm;

D diámetro primitivo, en mm.

$$H = \frac{67,58 \text{ N} \cdot \pi \cdot 753,96 \text{ rpm} \cdot 39,79 \text{ mm}}{60000}$$

$$H = 106,16 \text{ W}$$

El valor de la potencia transmitida es la necesaria para vencer la inercia del eje del motor y es generada por los dientes del piñón impulsando a los dientes del engranaje lo que implica la aplicación de un par torsional durante la rotación a determinada velocidad.

3.1.2.2.4 Diseño a flexión para el mecanismo piñón – cremallera

Ecuación de flexión de Lewis utilizada para estimar el esfuerzo de flexión en dientes de engranes en la que intervienen la forma de los mismos, está representado por (3.17).

$$\sigma = \frac{k_v \cdot W_t}{F \cdot m \cdot Y} \quad (3.17)$$

Donde:

- σ ecuación de deflexión de Lewis, en MPa;
 k_v factor dinámico, adimensional;
 W_t fuerza tangencial corregida horizontal, en N;
 F ancho mínimo de la cara, en mm;
 m módulo, en mm;
 Y factor de forma Lewis, adimensional.

A continuación, se calcula todas las variables necesarias para determinar la ecuación de deflexión de Lewis, comenzando por el factor dinámico (k_v), representado por (3.18):

$$k_v = \frac{6,1 + V}{6,1} \quad (3.18)$$

Donde:

- k_v factor dinámico, adimensional;
 V velocidad lineal, adimensional.

$$k_v = \frac{6,1 + 0,25}{6,1} = 1,04$$

El ancho mínimo de la cara (F), representado por (3.19), otra variable necesaria para el cálculo de la ecuación de Lewis; de esta ecuación se escoge el valor más alto como respuesta de cálculo.

$$\frac{8}{Pd} < F < \frac{16}{Pd} \quad (3.19)$$

Donde:

F ancho mínimo de la cara, en mm;

Pd paso diametral, en mm.

Reemplazando en (3.19), se tiene:

$$F = 12,73 \text{ mm}$$

El factor de forma Lewis (Y), obtenido de [9, pp. 718].

$$Y = 0,397$$

Reemplazando en (3.16), se tiene:

$$\sigma = \frac{k_v \cdot W_t}{F \cdot m \cdot Y}$$

$$\sigma = \frac{1,04 \cdot 67,58\text{N}}{12,73\text{mm} \cdot 1,5\text{mm} \cdot 0,397}$$

$$\sigma = 9,278 \text{ MPa}$$

El resultado de la ecuación de deflexión de Lewis (σ) es uno de los parámetros para determinar el factor de seguridad (S_f) del mecanismo piñón/cremallera.

3.1.2.2.5 Factor de seguridad

Las normas ANSI/AGMA 2001-D04 Y 2101-D04 [9] proponen un factor de seguridad (S_f) que protege a mecanismo de piñón/cremallera contra la falla por fatiga por deflexión, que se expone en (3.20).

$$S_f = \frac{S_t \cdot Y_N}{K_T \cdot K_R} = \frac{\text{resistencia a la flexión completamente corregida}}{\text{esfuerzo de flexión}} \quad (3.20)$$

Donde:

S_f factor de seguridad piñón – cremallera, adimensional;

S_t resistencia a la flexión AGMA, en MPa;

Y_N factor de ciclos de esfuerzo de resistencia a la flexión, adimensional;

K_T factor de temperatura, adimensional;

K_R factor de confiabilidad, adimensional;

σ ecuación de deflexión de Lewis, en MPa;

La primera variable a determinar para el factor de seguridad en piñones cremallera, es la resistencia a la flexión AGMA (S_t) representado por (3.21).

$$S_t = 0,533 H_B + 88,3 \text{ MPa} \quad (3.21)$$

Donde:

S_t resistencia a la flexión AGMA, en MPa;

H_B dureza brinell, en MPa.

$$S_t = 0,533 \cdot 260 \text{ MPa} + 88,3 \text{ MPa}$$

$$S_t = 226,958 \text{ MPa}$$

Para el factor de ciclos de esfuerzo de resistencia a la flexión (Y_N) es necesario calcular el número de ciclos de carga esperado representado en (3.22) según el valor obtenido de esta ecuación, se encuentra en tablas la variable deseada.

$$N_C = 60 \cdot L \cdot n \cdot q \quad (3.22)$$

Donde:

- N_C número de ciclos de carga esperado, en ciclos;
 L vida de diseño, en horas;
 n velocidad de giro del engranaje, en rpm;
 q número de aplicaciones de carga por revolución.

$$N_C = 60 \cdot 20000 \cdot 753 \cdot 1$$

$$N_C = \mathbf{9,04 \times 10^7 \text{ ciclos}}$$

Por lo tanto, con el (N_C) obtenido, según [9, pp. 754], el valor de $Y_N = 1$ para ciclos de 10^7 .

El factor de temperatura (K_T) se encuentra en tablas en el libro de diseño de ingeniería mecánica de Shigley [9]. Para temperaturas del aceite o del disco del engrane hasta de 250 °F (120°C), se emplea:

$$K_T = Y_\theta = 1.0.$$

El factor de confiabilidad (K_R) al igual que el factor de temperatura se encuentra en [9, pp. 754] y toma en cuenta el efecto de las distribuciones estadísticas de las fallas por fatiga del material.

$$K_R = 0,85$$

Reemplazando en (3.20), se tiene:

$$S_f = \frac{S_t \cdot Y_N}{K_T \cdot K_R \cdot \sigma}$$

$$S_f = \frac{\frac{226,958 \text{ MPa} \cdot 1}{1 \cdot 0,85}}{9,278}$$

$$S_f = 28,78$$

3.1.2.3 Recopilación de resultados del análisis y selección de elementos del Eje Y

En la Tabla 3.11 se encuentra el resultado de los elementos dimensionados para el Eje Y, dichos elementos cumplen con todas las especificaciones técnicas requeridas por la máquina y el diseño de la misma.

Tabla 3. 11. Recopilación resultados Eje Y.

Elemento	Diámetro	Material	Fabricante
Rodamientos Lineales	16mm	Aleación de Aluminio 6061	NBS
Piñón/Cremallera	Módulo 1.5 Número de dientes 25	S45C	A4L (Automation 4 less)

3.1.2.4 Análisis estructural del pórtico

En el análisis estructural del pórtico o la estructura principal del Eje Y se utiliza dos métodos. El cálculo matemático como se ha realizado en los demás elementos y un cálculo computacional por elementos finitos, que consiste en subdividir un sistema o mecanismo en elementos de estudio sencillos, para luego volverlo a reconstruir y así predecir el comportamiento global. Este último método ayuda a corroborar los datos obtenidos en el análisis matemático.

3.1.2.4.1 Análisis matemático estructura del pórtico

Existen tres límites de flexión para el cálculo de la flexión máxima permisible de una viga de máquina, chasis o estructura. El conocimiento de la aplicación debe servir de guía al momento de elegir el óptimo [10].

El límite de deflexión para la parte general de una máquina, representado por los límites a continuación:

$$Y_{m\acute{a}x} = 0,0005 \text{ a } 0,003 \frac{\text{in}}{\text{in}} \text{ o } \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \text{ de longitud de la viga.}$$

El límite de deflexión de precisión moderada, representado por los límites a continuación:

$$Y_{m\acute{a}x} = 0,00001 \text{ a } 0,0005 \frac{\text{in}}{\text{in}} \text{ o } \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \text{ de longitud de la viga.}$$

El límite de deflexión de alta precisión, representado por los límites a continuación:

$$Y_{m\acute{a}x} = 0,000001 \text{ a } 0,00001 \frac{\text{in}}{\text{in}} \text{ o } \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \text{ de longitud de vida.}$$

Los valores numéricos dados también podrían expresarse como la relación de la flexión máxima a la longitud de la viga. Para los cálculos matemáticos del pórtico del Eje Y se eligió el límite de flexión para precisión moderada, representado por (3.23), para ello se tiene el siguiente límite de flexión:

$$\frac{Y_{m\acute{a}x}}{L} = 0,00001 \text{ a } 0,0005 \text{ para precisión moderada.} \quad (3.23)$$

Para determinar el valor mínimo que se puede deformar la viga según (3.23), se tiene:

$$Y_{m\acute{a}x1} = \frac{0,00001 \text{ mm}}{\text{mm de longitud}} \cdot 1596 \text{ mm}$$

$$= 0,0159 \text{ mm (valor m\acute{i}nimo que se puede deformar)}.$$

Para determinar el valor máximo que se puede deformar la viga según (3.23), se tiene:

$$Y_{m\acute{a}x2} = \frac{0,0005 \text{ mm}}{\text{mm de longitud}} \cdot 1596 \text{ mm}$$

$$= 0,798 \text{ mm (valor m\acute{a}ximo que se puede deformar)}.$$

La fórmula que se utiliza para calcular el peso máximo que soporta el pórtico, con los extremos de deflexión de $Y_{m\acute{a}x}$ es la definida por apoyos simples con carga central y repesado por (3.24).

$$Y_{m\acute{a}x} = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} \quad (3.24)$$

Donde:

$Y_{m\acute{a}x}$ límite máximo de deflexión, en mm;

F fuerza máxima de deflexión, en N;

l largo de la viga, en mm;

E módulo de elasticidad, en GPa;

I inercia del elemento, en mm^4 .

Para determinar el valor máximo de deflexión en la viga, se utiliza $Y_{m\acute{a}x1}$. Despejando la fuerza máxima de deflexión (F) de (3.24) se obtiene:

$$F = \frac{48 \cdot E \cdot I \cdot Y_{m\acute{a}x1}}{l^3}$$

Remplazando:

$$F = \frac{48 \cdot 207\text{GPa} \cdot \left(\frac{460,67\text{cm}^4}{100^4}\right) \cdot 0,0159 \times 10^{-3}}{(1596 \times 10^{-3})^3}$$

$$F = 179,02 \text{ N}$$

(por lo tanto el valor de fuerza para el $Y_{m\acute{a}x}$ mínimo de deflexión)

Para determinar el valor máximo de deflexión en la viga, se utiliza $Y_{m\acute{a}x2}$. Despejando la fuerza máxima de deflexión (F) de (3.24) se obtiene:

$$F = \frac{48 \cdot 207\text{GPa} \cdot \left(\frac{460.67 \text{ cm}^4}{100^4}\right) \cdot 0.798 \times 10^{-3}}{(1596 \times 10^{-3})^3}$$

$$F = 8984.74 \text{ N}$$

(por lo tanto el valor de fuerza para el $Y_{m\acute{a}x}$ máximo de deflexión)

3.1.2.4.2 Análisis computacional estructura del pórtico.

El software que se utiliza para realizar el análisis computacional es Autodesk INVENTOR 2016 a través de su módulo de simulación "Análisis de estructura". El proceso de análisis consta de los siguientes pasos:

1. Definición de la geometría.
2. Asignación de material a cada componente.

3. Aplicación de restricciones (condiciones de borde) y cargas.
4. Mallado.
5. Ejecución de análisis.
6. Resultados y validación.

El análisis se realizó en la posición crítica de trabajo del pórtico que en este caso es cuando la carga, el Eje Z con un peso de 14,5 kg, se encuentra en el centro del pórtico. Adicionalmente, se consideró el peso de los elementos que se montan sobre el pórtico como son las rieles de los rodamientos lineales y la cremallera. En la Tabla 3.12 se detalla el peso extra de estos elementos para la simulación del pórtico.

Tabla 3. 12. Peso de elementos extra en pórtico - Eje Y.

Cantidad	Elemento	Material	Peso	Unidades
1	Cremallera	C45	1,95	kg
2	Rieles Rodamientos	Aluminio	8	kg
s/c	Guía – Cables	Varios	4	kg
TOTAL			13,95	kg

A partir de la sumatoria de todas las cargas establecidas, se realizó la simulación en Autodesk Inventor. Con una carga total en Newton de **9124,74 N**, la cual es la carga máxima que debe soportar el pórtico para una deflexión recomendada según los cálculos matemáticos realizados en la subsección 3.1.2.4.1 es de 0,798mm.

En la Figura 3.7 se observa que el desplazamiento que tuvo el pórtico en la simulación para una carga de 9124,74 N de 0,6542; el resultado varia mínimamente con el análisis matemático por lo que se realizó un cálculo de porcentaje de error que se puede observar en la Tabla 3.13.

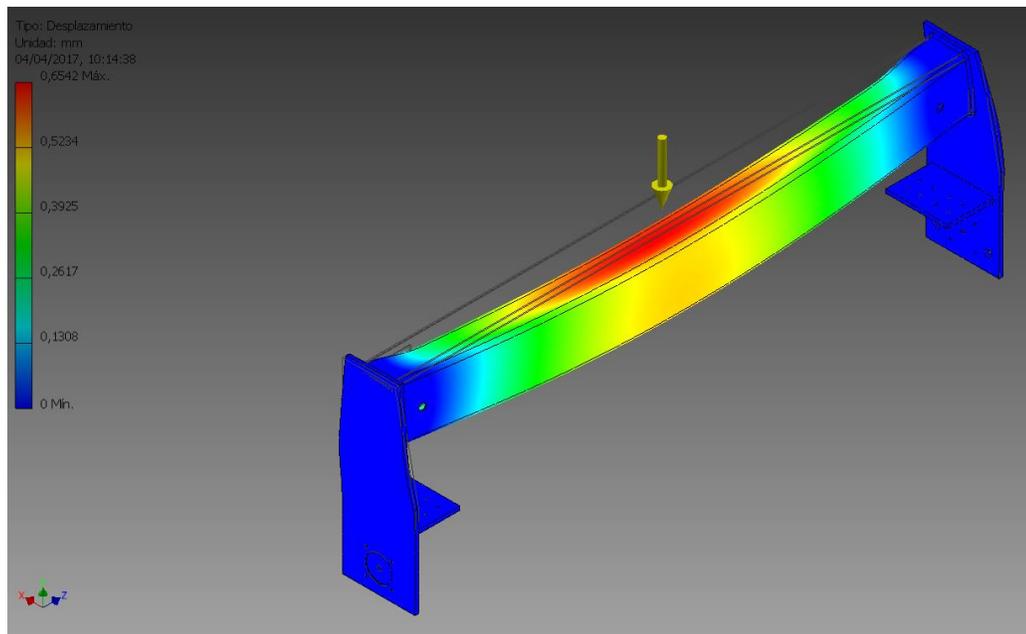


Figura 3. 7. Simulación Inventor Desplazamiento Eje Y.

Tabla 3. 13. Porcentaje de Error Pórtico Simulación - Análisis Matemático.

Estructura Pórtico		
<i>Valor de Cálculo Matemático</i>	<i>Valor de Simulación Inventor</i>	<i>Porcentaje de error</i>
0,798 mm	0,6542 mm	18%

El porcentaje de error de 18% se debe a los valores en las propiedades mecánicas del material que difieren entre el software y los cálculos matemáticos. En la Tabla 3.14 se observa la diferencia entre los valores utilizados por inventor y los proporcionados por la fábrica de acero ecuatoriana IPAC [16] en las propiedades mecánicas del material.

Tabla 3. 14. Propiedades Mecánicas ASTM A500.

Propiedades Mecánicas ASTM A500		
	<i>Fábrica IPAC</i>	<i>Inventor</i>
<i>Límite de Fluencia</i>	317MPa	350MPa

<i>Resistencia a la Tracción</i>	400MPa	420MPa
----------------------------------	--------	--------

3.1.2.5 Diagramas de Fuerza Cortante y Momento Flector.

Estos diagramas se utilizan para determinar la capacidad máxima que logra soportar la estructura comparando los resultados con las cargas para las cuales fue diseñada.

En la Figura 3.8 se observa el diagrama de cuerpo libre del soporte principal del Eje Y, es decir el pórtico de la CNC plasma, donde se encuentran las reacciones de los dos soportes y la carga central del peso total del Eje Z. Según la distribución de este diagrama se procede a realizar los diagramas de momento flector y fuerza cortante.

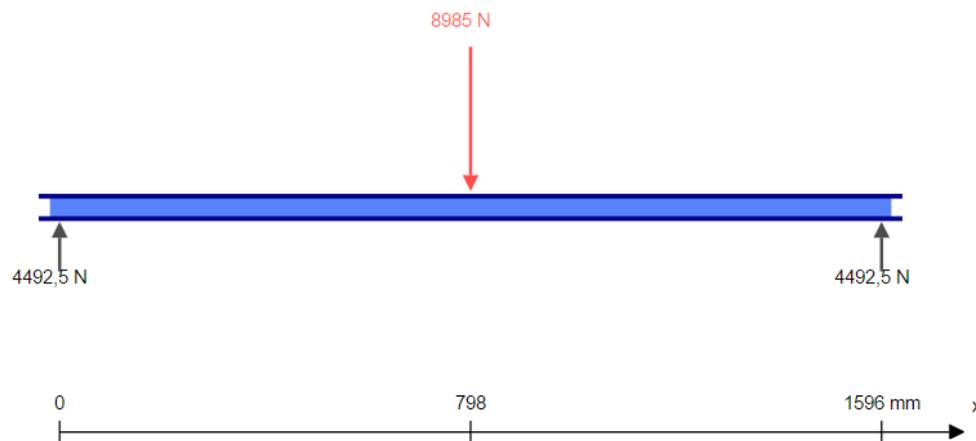


Figura 3. 8. Diagrama de cuerpo libre pórtico Eje Y.

3.1.2.5.1 Diagrama de fuerza cortante

En la Figura 3.9 se observa el diagrama de fuerza cortante del Eje Y; como resultado el diagrama indica donde no existen cargas aplicadas, se refleja líneas horizontales y a la vez la carga central-puntual se refleja una línea vertical con una longitud igual a la intensidad de la fuerza aplicada. El momento cortante máximo que va a soportar esta estructura es de 4492,5 N.

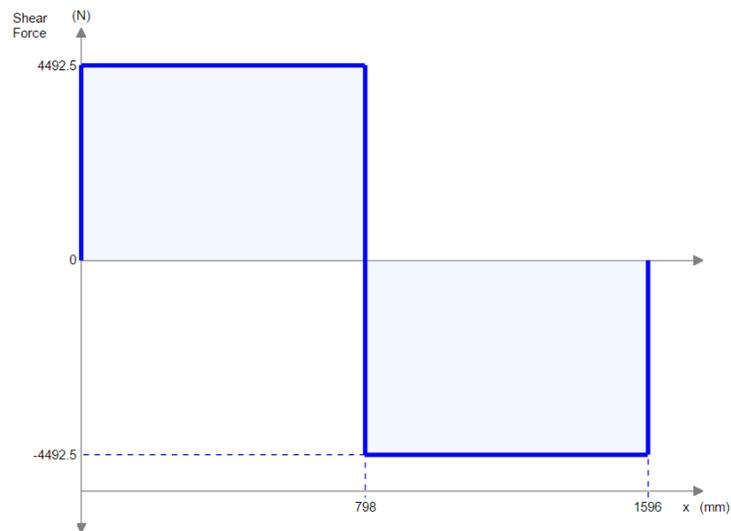


Figura 3. 9. Diagrama de Fuerza Cortante Estructura Principal Eje Y.

3.1.2.5.2 Diagrama de Momento Flector.

La Figura 3.10 presenta el diagrama de momento flector del pórtico del Eje Y, representado por un triángulo en el cual su valor máximo es de $3585 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}$ representa el máximo momento flector que tendrá el pórtico.

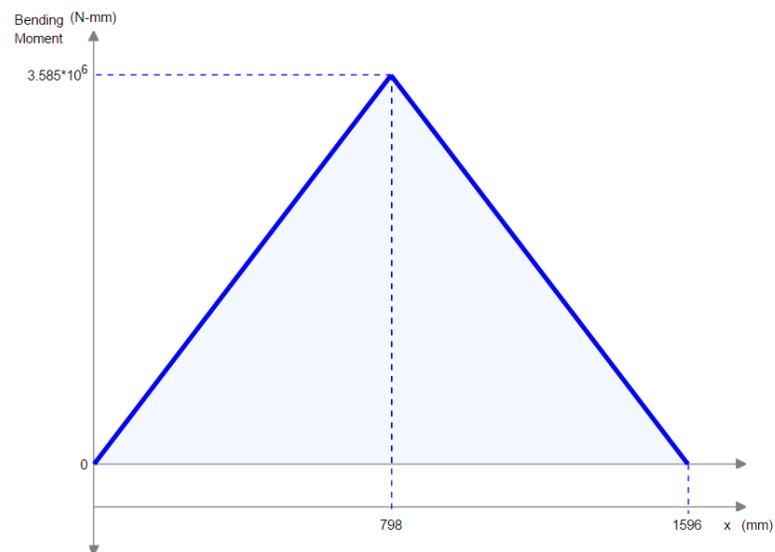


Figura 3. 10. Diagrama Momento Flector Pórtico Eje Y.

3.1.3 DISEÑO EJE X

El Eje X es el encargado del movimiento longitudinal de la máquina, además de ser la estructura principal del sistema CNC, donde se colocan las planchas metálicas a cortar además de soporta el peso total de los Ejes Y y Z.

Como se puede observar en la Figura 3.11, la estructura principal de este Eje X consiste en un sistema de rodamientos lineales los cuales permiten el desplazamiento longitudinal del Eje Y, este movimiento es accionado mediante un sistema de piñón – cremallera. Tanto la cremallera como las guías lineales se encuentran en los dos extremos de la máquina cada uno accionados por motores independientes lo que garantiza la precisión del movimiento.

En la estructura del Eje X viene incorporado una bandeja para agua que absorbe los gases producidos por el corte de plasma.

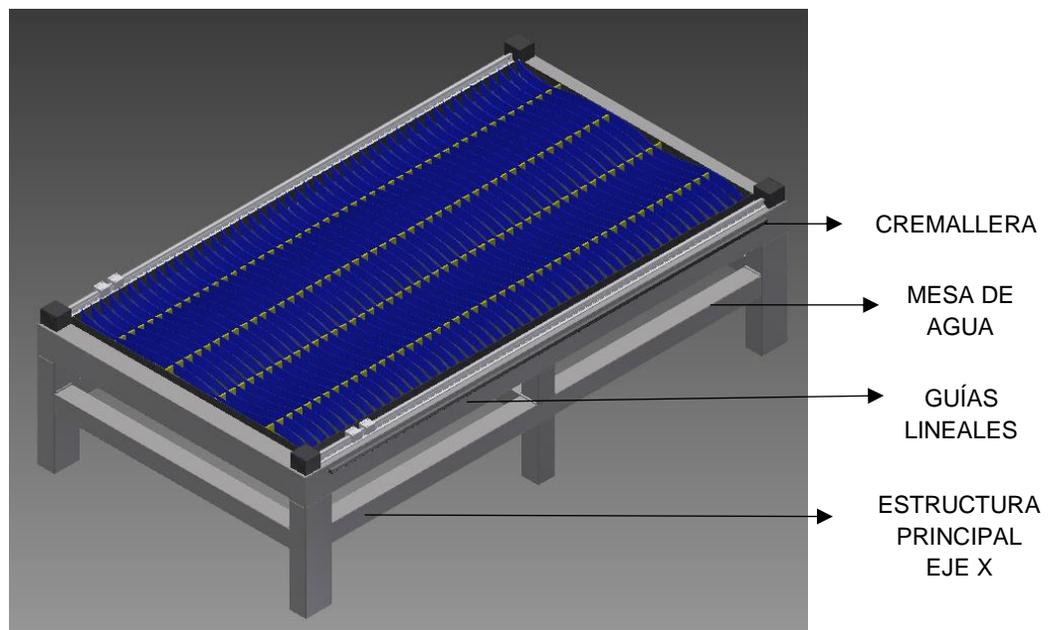


Figura 3. 11. Estructura principal y elementos Eje X.

3.1.3.1 Selección de Rodamientos Lineales

Como en el caso del Eje Y y Eje Z, la selección de las guías se realiza de acuerdo al tipo y magnitud de la carga que se requiera soportar. La capacidad de carga está definida por las condiciones de:

- Carga estática
- Carga dinámica

3.1.3.1.1 Carga Estática

Los factores que intervienen en los cálculos de carga estática o a su vez coeficiente de seguridad estático (a_s) representado por (3.1) fueron detallados anteriormente, solo los factores cambiantes como la capacidad de carga estática propia del rodamiento y la carga máxima aplicada son detallados a continuación.

$$a_s = f_c \cdot f_b \cdot \frac{C_0}{P}$$

La carga máxima aplicada (M) visualizada en la Tabla 3.15 indica el peso de cada uno de los elementos que intervienen en el cálculo para la selección de los rodamientos requeridos.

Tabla 3. 15. Peso elementos Eje Z y Y - cálculo rodamientos Eje X.

Elemento	Material	Peso	Unidades
Eje Z	Varios	14,5	kg
Pórtico	Acero ASTM A 500	17,5	kg
Soporte Lateral Izquierdo	Acero ASTM A36	7,5	kg
Soporte Lateral Derecho	Acero ASTM A36	7,5	kg
Base Placa de Rodamientos	Acero ASTM A36	3,4	kg
Escuadra Soporte	Acero ASTM A36	0,8	kg
Cremallera	Acero	1,95	kg

Piñón	Acero	0,44	kg
Guías Eje Y	Aluminio	8	kg
Rodamientos 20 mm	Aluminio	0,8	kg
Motor 1 Eje X	Varios	3,8	kg
Motor 2 Eje X	Varios	3,8	kg
<i>TOTAL ($\Sigma \times 2,5$)</i>		174.97	kg

El factor de seguridad para los cálculos realizados es de 2,5, este valor se tomará de acuerdo con las normas de factor de seguridad para rodamientos en el catálogo técnico del fabricante [8].

Para determinar la carga máxima en Newton [N] se utiliza (3.2), utilizando una aceleración promedio de $0,6 \text{ m/s}^2$.

Reemplazando en (3.2), se tiene:

$$\text{Fuerza resultante} = 174,97 \text{ kg} \cdot \frac{0,6\text{m}}{\text{s}^2}$$

A la fuerza resultante se sumará 300N extra de seguridad ante cualquier eventualidad que pueda presentar (este valor ya fue justificado en la sección 3.1.1.2.1).

La fuerza total se obtiene multiplicando la fuerza resultante (obtenida anteriormente) y la fuerza extra.

$$\text{Fuerza total} = 104,98 \text{ N} + 300 \text{ N} = \mathbf{404,98\text{N}}$$

Una vez calculados todos los datos necesarios se determina el coeficiente de seguridad estático (a_s), para rodamientos lineales del Eje Z de la CNC plasma:

Reemplazando en (3.1), se tiene:

$$a_s = 0,81 \cdot 1,41 \cdot \frac{1400\text{N}}{404,98\text{ N}}$$

$a_s = 4,87$ para un rodamiento de 20mm.

Se requiere que el a_s (coeficiente de seguridad estático) > 1 debido a la posibilidad de eventuales impactos y/o vibraciones, momentos de arranque y de parada y cargas accidentales, elementos que si no se tuvieran en cuenta podrían afectar la capacidad del sistema.

3.1.3.1.2 Carga dinámica

La vida útil (L_h) o carga dinámica se considera como el recorrido teórico sin la aparición de fatiga y se encuentra representada por (3.3).

$$L_h = \frac{\left(\frac{C}{P}\right)^3 \cdot 50 \cdot 10^3}{V_m \cdot 60} \quad (3.3)$$

Por lo tanto, reemplazando:

$$L_h = \frac{\left(\frac{3000\text{ N}}{404.98\text{ N}}\right)^3 \cdot 50 \cdot 10^3}{16,31 \frac{\text{m}}{\text{min}} \cdot 60}$$

$$L_h = 20769.58 \text{ horas} \approx 2.37 \text{ años.}$$

De forma análoga a las secciones 3.1.1.1.1 y 3.1.2.1.2 se determina que el resultado obtenido de la vida útil de rodamientos lineales de bolas se encuentra en el rango dado por el fabricante.

3.1.3.2 Dimensionamiento y Selección Piñón – Cremallera

3.1.3.2.1 Fuerza tangencial teórica

La fuerza tangencial teórica se encuentra representada por (3.12) expuesta a continuación.

$$F_{ht} = P \cdot (9,81 \cdot \mu + a)$$

En la Tabla 3.16 se puede observar el peso de los componentes que intervienen en el cálculo para la selección de la cremallera.

Tabla 3. 16. Peso elementos Eje Y y Z - cálculo piñón cremallera.

Elemento	Material	Peso	Unidades
Eje Z	Varios	14,5	kg
Pórtico	Acero ASTM A 500	17,5	kg
Soporte Lateral Izquierdo	Acero ASTM A36	7,5	kg
Soporte Lateral Derecho	Acero ASTM A36	7,5	kg
Base Placa de Rodamientos	Acero ASTM A36	3,4	kg
Escuadra Soporte	Acero ASTM A36	0,8	kg
Cremallera	Acero	1,95	kg
Piñón	Acero	0,44	kg
Guías Eje Y	Aluminio	8	kg
Rodamientos 20 mm	Aluminio	0,8	kg
Motor 1 Eje X	Varios	3,8	kg
Motor 2 Eje X	Varios	3,8	kg
<i>TOTAL</i>		69,99	Kg

Reemplazando de (3.12), se tiene:

$$F_{ht} = 69,99 \text{ kg} \cdot \left(9,81 \cdot 0,15 + 0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

$$F_{ht} = 144,98 \text{ N}$$

3.1.3.2.2 Fuerza tangencial corregida

La fuerza tangencial corregida es aquella que posee un coeficiente de seguridad representada por (3.13).

$$F_{hc} = F_{ht} \cdot k$$

Para el cálculo de la fuerza tangencial horizontal corregida se optará por un coeficiente de seguridad de **2.25** basándose en la Tabla 3.9, tabla extraída del fabricante de la cremallera, debido al tiempo de trabajo que tendrá la máquina y el tipo de carga que soporta.

Reemplazando en (3.13), se tiene:

$$F_{hc} = 144.98 \text{ N} \cdot 2.25$$

$$F_{hc} = 326.21 \text{ N}$$

De forma análogo a la sección 3.1.2.2.2 con el resultado de la fuerza tangencial corregida se selecciona el módulo del mecanismo piñón cremallera con el cual se va a realizar los cálculos restantes, para esta selección también es necesario la velocidad lineal promedio la cual en este caso es de 0,25m/seg dato experimental propuesto por el fabricante del mecanismo según las condiciones dadas por el diseñador. La Figura 3.12 muestra la selección realizada del módulo obteniendo como resultado un valor de M1.5.

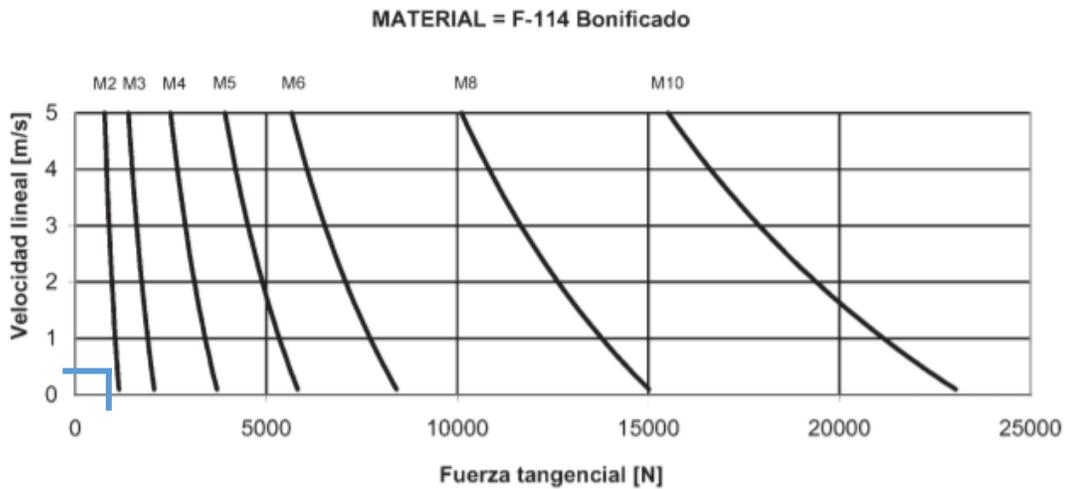


Figura 3. 12. Selección módulo piñón - cremallera Eje X, [11].

3.1.3.2.3 Análisis de fuerzas

Para mayor facilidad en la selección y compra del piñón, se eligió uno con características técnicas existentes en el mercado, en la Tabla 3.17 se observan los datos más relevantes.

Posteriormente se realizaron los análisis de fuerza los cuales de manera iterativa demostraron que la selección del piñón con las características técnicas de fabricante seleccionados eran los correctos.

Tabla 3. 17. Características técnicas piñón Eje X.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Diámetro Exterior (D_e)	42,8 mm
Diámetro Primitivo (D)	39,79 mm
Número de dientes (Z)	25mm
Módulo	1,5mm

El torque a vencer del piñón está representado por (3.14), reemplazando los valores de la tabla 3.17 se tiene:

$$T = F_{hc} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)$$

$$T = 326,21 \text{ N} \cdot \left(\frac{39,79 \text{ mm}}{2}\right)$$

$$\mathbf{T = 6490,04 \text{ Nmm} \rightarrow 6,49 \text{ Nm}}$$

El torque calculado nos permite saber la fuerza que en realidad transmite torque y potencia desde los dientes del piñón a los dientes del engranaje.

La velocidad angular representado por (3.15), se obtiene dividiendo la velocidad lineal por el diámetro primitivo:

$$\omega = \frac{2 \cdot V}{D}$$

$$\omega = \frac{2 \cdot 15 \frac{\text{m}}{\text{min}}}{0,039 \text{ m}}$$

$$\mathbf{\omega = 753,96 \text{ rpm}}$$

La potencia transmitida, representado por (3.16), requiere la fuerza tangencial corregida, velocidad angular y el diámetro primitivo dividido para una constante:

$$H = \frac{F \cdot \pi \cdot \omega \cdot D}{60000}$$

$$H = \frac{326,21 \text{ N} \cdot \pi \cdot 753,96 \text{ rpm} \cdot 39,79 \text{ mm}}{60000}$$

$$\mathbf{H = 512,42 \text{ W}}$$

El valor de la potencia transmitida es la necesaria para vencer la inercia del eje del motor y es generada por los dientes del piñón impulsando a los dientes del engranaje lo que implica la aplicación de un par torsional durante la rotación a determinada velocidad.

3.3.2.2.4 Diseño a flexión para el mecanismo piñón – cremallera

Para calcular el esfuerzo de flexión en dientes de engranes, intervienen la forma de los mismos, está representado por (3.17) expuesta a continuación.

$$\sigma = \frac{k_v \cdot W_t}{F \cdot m \cdot Y}$$

A continuación, se calcula todas las variables necesarias para determinar la ecuación de deflexión de Lewis, comenzando por el factor dinámico (k_v), representado por (3.18):

$$k_v = \frac{6,1 + 0,25}{6,1} = 1,04$$

El ancho mínimo de la cara (F), representado por (3.19), otra variable necesaria para el cálculo de la ecuación de Lewis; de esta ecuación se escoge el valor más alto como respuesta de cálculo.

$$F = 12,73 \text{ mm}$$

El factor de forma Lewis (Y) se encuentra en tablas en el libro de diseño de ingeniería mecánica de Shigley [9] página 718:

$$Y = 0.397$$

Reemplazando en (3.17), se tiene:

$$\sigma = \frac{1,04 \cdot 326,21\text{N}}{12,73\text{mm} \cdot 1,5\text{mm} \cdot 0,397}$$

$$\sigma = 44,75 \text{ MPa}$$

3.1.3.2.5 Factor de seguridad S_f contra la falla por fatiga por flexión.

Las normas ANSI/AGMA proponen un factor de seguridad S_f que protege al mecanismo piñón/cremallera contra la falla por fatiga por deflexión, que se expone en (3.20).

La primera variable a determinar para el factor de seguridad en piñones cremallera, es la resistencia a la flexión AGMA (S_t) representado por (3.21).

$$S_t = 0,533 \cdot 260 \text{ MPa} + 88,3 \text{ MPa}$$

$$S_t = 226,958 \text{ MPa}$$

Para el factor de ciclos de esfuerzo de resistencia a la flexión (Y_N) es necesario calcular el número de ciclos de carga esperado representado en (3.22) según el valor obtenido de esta ecuación, se encuentra en tablas la variable deseada.

$$N_c = 60 \cdot 20000 \cdot 753 \cdot 1$$

$$N_c = 9.04 \times 10^7 \text{ ciclos}$$

Por lo tanto, con el (N_c) obtenido, según [9, pp. 754], el valor de $Y_N = 1$ para ciclos de 10^7 .

El factor de temperatura (K_T) se encuentra en tablas en el libro de diseño de ingeniería mecánica de Shigley [9]. Para temperaturas del aceite o del disco del engrane hasta de 250 °F (120°C), se emplea:

$$K_T = Y_\theta = 1.0.$$

El factor de confiabilidad (K_R) al igual que el factor de temperatura se encuentra en tablas [9] y toma en cuenta el efecto de las distribuciones estadísticas de las fallas por fatiga del material.

$$K_R = 0.85$$

Reemplazando en (3.20), se tiene:

$$S_f = \frac{226,958 \text{ MPa} \cdot 1}{1 \cdot 0,85} = 44,75$$

$$S_f = 6$$

3.1.3.3 Recopilación de resultados del análisis y selección de elementos del Eje X

En la Tabla 3.18 se encuentra el resultado de los elementos dimensionados para el Eje X, dichos elementos cumplen con todas las especificaciones técnicas requeridas por la máquina y el diseño de la misma.

Tabla 3. 18. Recopilación resultados Eje X.

Elemento	Diámetro	Material	Fabricante
Rodamientos Lineales	20mm	Aleación de Aluminio 6061	NBS
Piñón/Cremallera	Módulo 1.5	S45C	A4L (Automation 4 less)

	Número de dientes 25		
--	----------------------	--	--

3.1.3.4 Análisis estructural del Soporte Planchas de corte

En el análisis estructural del soporte de planchas de corte se utilizó el mismo criterio que en el apartado 3.1.2.1.3.

3.1.3.4.1 Análisis matemático estructura soporte planchas de corte

Para los cálculos matemáticos de la estructura del soporte para planchas de corte del Eje X se eligió el límite de flexión para precisión moderada, representado por (3.21), para ello se utilizó el límite de flexión entre:

$$\frac{Y_{m\acute{a}x}}{L} = 0.00001 \text{ a } 0.0005 \text{ para precisión moderada.}$$

Para determinar el valor mínimo que se puede deformar la viga según (3.21), se tiene:

$$\begin{aligned} Y_{m\acute{a}x1} &= \frac{0.00001 \text{ mm}}{\text{mm de longitud}} \cdot 1230 \text{ mm} \\ &= 0.0123 \text{ mm (valor m\acute{i}nimo que se puede deformar)}. \end{aligned}$$

Para determinar el valor máximo que se puede deformar la viga según (3.21), se tiene:

$$Y_{m\acute{a}x2} = \frac{0.0005 \text{ mm}}{\text{mm de longitud}} \cdot 1230 \text{ mm}$$

$$= 0.615 \text{ mm (valor m\acute{a}ximo que se puede deformar).}$$

La f\ormula que se utilizar\aa para calcular el peso m\acute{a}ximo que soportar\aa dicha estructura, con los extremos de deflexi\on de $Y_{m\acute{a}x}$ es la definida por apoyos simples con carga continua y representada por (3.25).

$$Y_{m\acute{a}x} = \frac{5 \cdot w \cdot l^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (3.25)$$

Despejando (w) de (3.25), se obtiene:

$$w = \frac{384 \cdot E \cdot I \cdot Y_{m\acute{a}x}}{5 \cdot l^4}$$

El siguiente c\alculo se realiza con el valor m\acute{inimo de deflexi\on ($Y_{m\acute{a}x1}$) que puede tener la viga.

Reemplazando:

$$w = \frac{384 \cdot 207\text{GPa} \cdot \left(\frac{226,46\text{cm}^4}{100^4}\right) \cdot 0,0123 \times 10^{-3}}{5 \cdot (1230 \times 10^{-3})^4}$$

$$w = 193.47 \frac{N}{m} \rightarrow 0.193 \frac{N}{mm}$$

(valor m\acute{inimo de deflexi\on que puede tener la viga)

C\alculo con valor m\acute{a}ximo de deflexi\on ($Y_{m\acute{a}x2}$) que puede tener la viga. Despejando w y reemplazando los valores en (3.25), se obtiene:

$$w = \frac{384 \cdot 207 \text{GPa} \cdot \left(\frac{226,46 \text{cm}^4}{100^4}\right) \cdot 0,615 \times 10^{-3}}{5 \cdot (1230 \times 10^{-3})^4}$$

$$F = 9673.37 \frac{\text{N}}{\text{m}} \rightarrow 9.67 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

(valor máximo de deflexión que puede tener la viga)

Según cálculos realizados a continuación se determina el peso de la plancha a soportar para una flexión máxima. Los espesores seleccionados se basan en cálculos iterativos realizados con anterioridad, escogiendo planchas que se ajusten a los requerimientos del cliente.

El primero cálculo que se realiza es para el peso de una plancha de 38 mm de espesor, para determinar el peso de una plancha de cualquier tamaño y espesor se utiliza (3.26).

$$Peso = \frac{L \cdot A \cdot E \cdot 7.85 \text{ kg}}{1000} \quad (3.26)$$

$$Peso = \frac{2440 \text{ mm} \cdot 1220 \text{ mm} \cdot 38 \text{ mm} \cdot 7.85 \text{ kg}}{1000}$$

$$Peso = 887,97 \text{ Kg} \rightarrow 8708,01 \text{ N}$$

Se requiere determinar el peso como carga continua y así comparar con los resultados anteriores y determinar el espesor máximo de plancha que puede soportar la estructura, para ello se utilizó (3.27).

$$w = \frac{\text{Carga Total [N]}}{\text{Longitud total (viga principal)}} \quad (3.27)$$

$$w = \frac{8708,01 \text{ N}}{1230 \text{ mm}}$$

$$w = 7,08 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

Para determinar el peso máximo que puede soportar la estructura se realizó el cálculo con la plancha de peso máxima existente en el mercado, plancha de 50 mm de espesor:

Reemplazando en (3.26) para espesores de 50mm, se tiene:

$$Peso = \frac{2440 \text{ mm} \cdot 1220 \text{ mm} \cdot 50 \text{ mm} \cdot 7.85 \text{ kg}}{1000}$$

$$Peso = 1168,39 \text{ kg} \rightarrow 11461,95 \text{ N}$$

Reemplazando en (3.27) para espesores de 50mm, se tiene:

$$w = \frac{11461,95 \text{ N}}{1230 \text{ mm}}$$

$$w = 9,32 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

En conclusión, para una deformación máxima de 0,615 mm la estructura de soporte para planchas de corte soporta una plancha de 50 mm de espesor de acero ASTM A36.

3.1.3.4.2 Análisis computacional para la estructura de soporte planchas de corte.

El análisis se realizó asignando los siguientes miembros estructurales o perfiles de material acero ASTM A36.

- Tubo Rectangular de 100 x 150 x 3

- Tubo Cuadrado de 100 x4

La carga con la que se realizó la simulación es de 9.67 N/mm la cual es la máxima que debe resistir el soporte de las planchas para una deflexión máxima, ya calculada de forma analítica de 0,615mm.

En la Figura 3.13 se puede observar que el desplazamiento que tuvo el soporte de planchas para una carga de 9,67 N/mm es de 0,495; al variar mínimamente con el análisis matemático se realizó un cálculo de porcentaje de error que se puede observar en la Tabla 3.19.

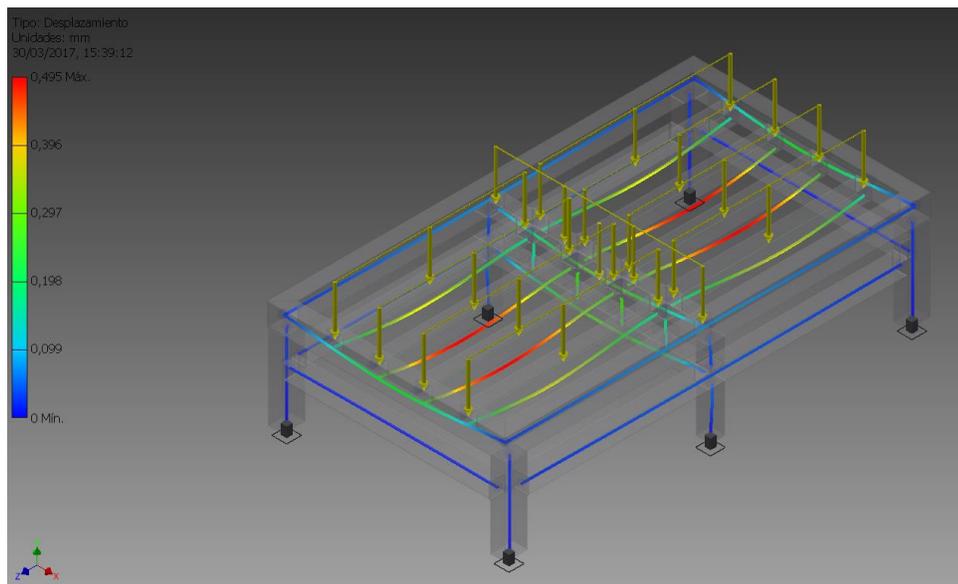


Figura 3. 13. Resultado de Simulación - Desplazamiento.

Tabla 3. 19. Porcentaje de error estructura soporte de planchas.

<i>Estructura Soporte de Planchas</i>		
<i>Valor de Cálculo Matemático</i>	<i>Valor de Simulación Inventor</i>	<i>Porcentaje de error</i>
0,615 mm	0,495 mm	19%

En la Tabla 3.20 se observa la diferencia entre los valores utilizados en el software y los proporcionados por la fábrica ecuatoriana importadora de material metalmeccánico.

Tabla 3. 20. Propiedades Mecánicas ASTM A500.

Propiedades Mecánicas ASTM A500		
	<i>Fábrica IPAC</i>	<i>Inventor</i>
<i>Límite de Fluencia</i>	317MPa	350MPa
<i>Resistencia a la Tracción</i>	400MPa	420MPa

3.1.3.5 Diagramas de Fuerza Cortante y Momento Flector.

En la Figura 3.14 se observa el diagrama de cuerpo libre de la estructura del soporte de planchas del Eje X, en este se determina las reacciones de los apoyos y el valor de la carga continua que para cálculos será convertida en carga puntual central.

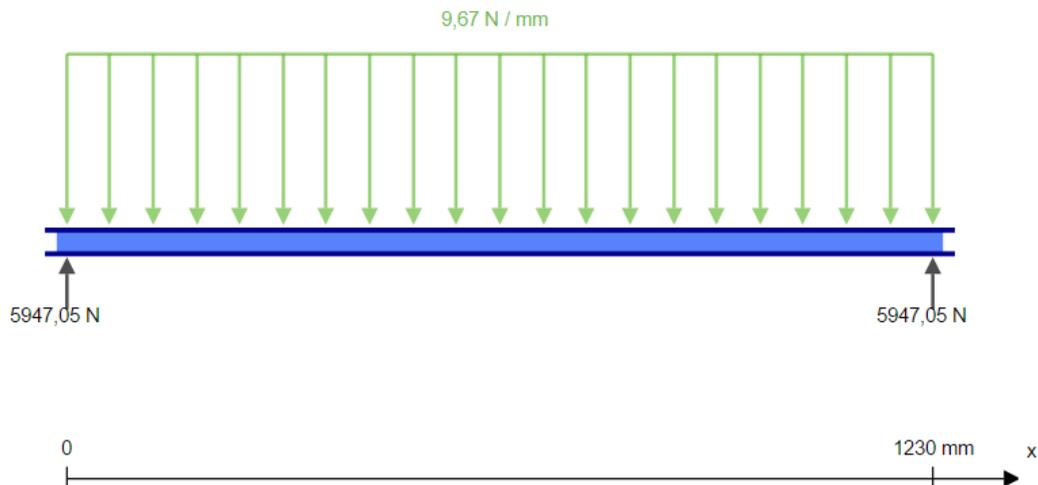


Figura 3. 14. Diagrama Cuerpo Libre Estructura Soporte Planchas.

3.1.3.5.1 Diagrama de Fuerzas Cortantes.

En la Figura 3.15 se observa el diagrama de fuerzas cortantes, se determina que el cortante es cero en el punto donde el momento flector es máximo de igual manera se establece que el valor de cortante máximo es de 5947,05 N.



Figura 3. 15. Diagrama de Fuerzas Cortantes Estructura Soporte Plancha.

3.1.3.5.2 Diagrama de Momento Flector.

La Figura 3.16 presenta el diagrama de momento flector de la estructura de soporte de planchas del Eje X, en donde el momento máximo se presenta en la mitad de la estructura con un valor máximo de $18287 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$.

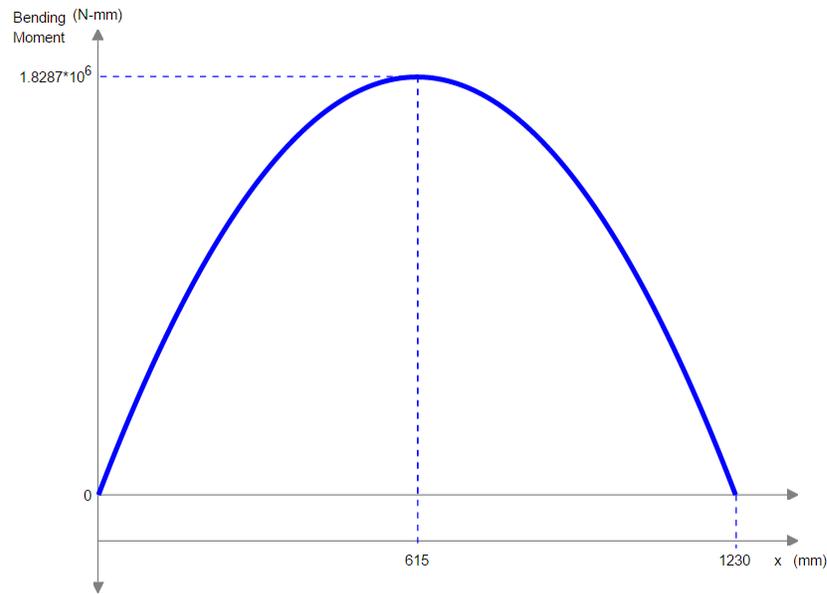


Figura 3. 16. Diagrama Momento Flector Estructura Soporte Planchas.

3.1.3.6 Dimensionamiento y validación de rejilla de corte.

Dentro de la estructura de soporte de planchas dentro del Eje X, se encuentra un arreglo de placas o rejillas de corte también conocidas como “burning bars” en inglés. Éste conjunto de placas o rejillas tienen la función de soportar la plancha metálica en posición horizontal y normalmente son intercambiables debido al deterioro del producto de corte por lo que están apoyadas sobre cuatro platinas donde deben calzar perfectamente. Las rejillas de corte no deben ser colocadas de manera recta u horizontal ya que al momento de producir el corte plasma estas pueden soldarse con la plancha a cortar por ello el diseño de la máquina está pensado para rejillas con curvaturas.

Para el diseño mecánico de las rejillas se decidió trabajar con un peso máximo de una plancha metálica estándar de 38mm de espesor y determinar la carga por área que se podría efectuar en cada placa.

En la Tabla 3.21 se determina según el número de placas la carga que cada una soportará, además de la separación que cada una tiene dependiendo de las medidas internas de la estructura de soporte de la plancha.

Tabla 3. 21. Selección del número de placas.

Número de Placas	Separación entre placas	Carga	Unidades
15	169 mm	59,198	Kg
20	124 mm	44,39	Kg
25	98 mm	35,52	Kg
30	81 mm	29,60	Kg
35	69 mm	25,37	Kg
48	50 mm	18,50	Kg

Para la estructura de la mesa de corte se optó por 35 rejillas las cuales soportarán un peso máximo de 25,37 kg, valor óptimo para una plancha de 38mm.

Normalmente las placas que conforman la rejilla de corte tienen un espesor entre 1,5 a 3 mm, para determinar el espesor adecuado a construir se realizó una simulación en Inventor donde se obtuvieron los siguientes datos presentados en la Tabla 3.22.

Tabla 3. 22. Factor de seguridad espesor de placas rejilla.

Número de placas 48	
Espesor	Factor de seguridad
1,5	23
2	54
3	187

Todos los espesores, según la simulación realizada, tienen un factor de seguridad alto. Sin embargo, debido al desgaste y deterioro que tendrán las piezas se decide utilizar placas de 3mm de espesor.

3.1.3.7 Análisis estructural Soporte Bandeja de Agua

En el análisis estructural del soporte bandeja de agua se utilizó el mismo criterio que en el apartado 3.1.2.1.3. La bandeja de agua sirve para enfriar los desechos de corte que caen en ella, y eliminar el polvo o humo que genera el corte. Para su limpieza y desfogue consta únicamente de una válvula de bola de 2" de tipo general para este tipo de aplicación.

3.1.3.7.2 Análisis computacional para la estructura de soporte planchas de corte.

La carga con la que se realizó la simulación es de 6,11 N/mm la cual es la máxima que debe soportar el soporte de la bandeja de agua para una deflexión máxima, que fue calculada de forma analítica llegando a un valor de 3,69mm.

En la Figura 3.17 se observa que el desplazamiento que tuvo el soporte de planchas para una carga de 6,11 N/mm es de 3,149 mm; al variar mínimamente con el análisis matemático se realizó un cálculo de porcentaje de error que se puede observar en la Tabla 3.23.

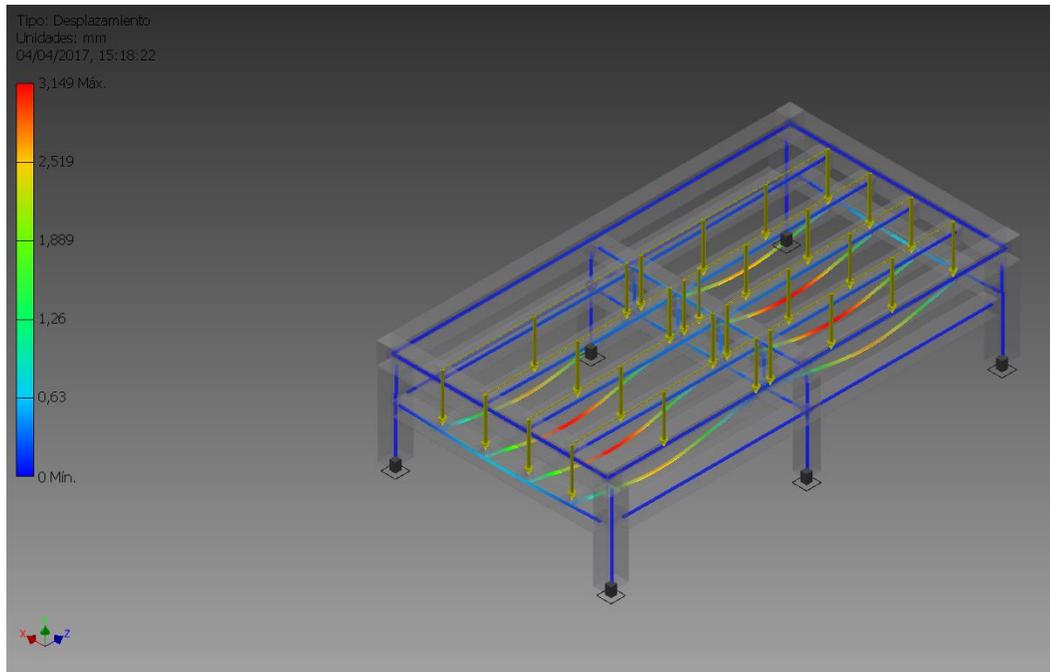


Figura 3. 17. Resultado simulación inventor desplazamiento bandeja de agua.

Tabla 3. 23. Porcentaje error soporte bandeja de agua.

Estructura Soporte Bandeja de Agua		
<i>Valor de Cálculo Matemático</i>	<i>Valor de Simulación Inventor</i>	<i>Porcentaje de error</i>
3,69 mm	3,149 mm	15%

El porcentaje de error de 15% se debe al valor de la inercia y del módulo de elasticidad que proporciona el software y que son valores cambiantes en los cálculos matemáticos.

3.1.3.8 Diagramas de Fuerza Cortante y Momento Flector.

En la Figura 3.18 se observa el diagrama de cuerpo libre de la estructura del soporte de bandeja de agua del Eje X, en este se determina las reacciones de los apoyos y el valor de la carga continua que para cálculos será convertida en carga puntual central.

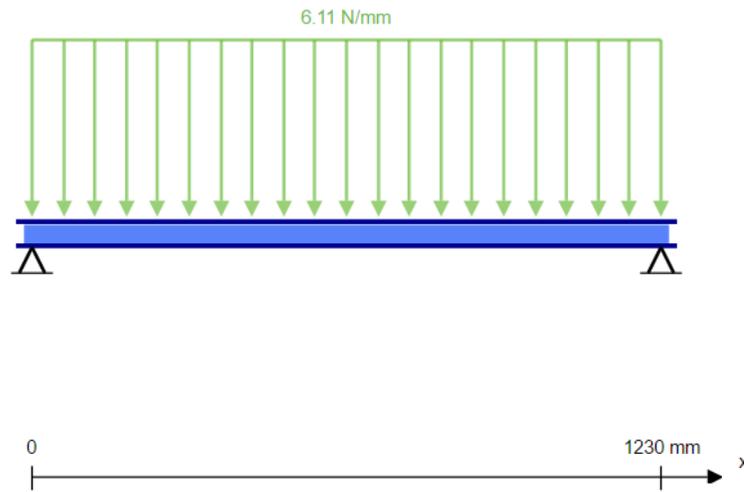


Figura 3. 18. Diagrama Cuerpo Libre Estructura Soporte Bandeja de Agua.

3.1.3.8.1 Diagrama de Fuerzas Cortantes.

En la Figura 3.19 se observa el diagrama de fuerzas cortantes, se determina que el cortante es cero en el punto donde el momento flector es máximo de igual manera se establece que el valor de cortante máximo es de 3757,65 N.

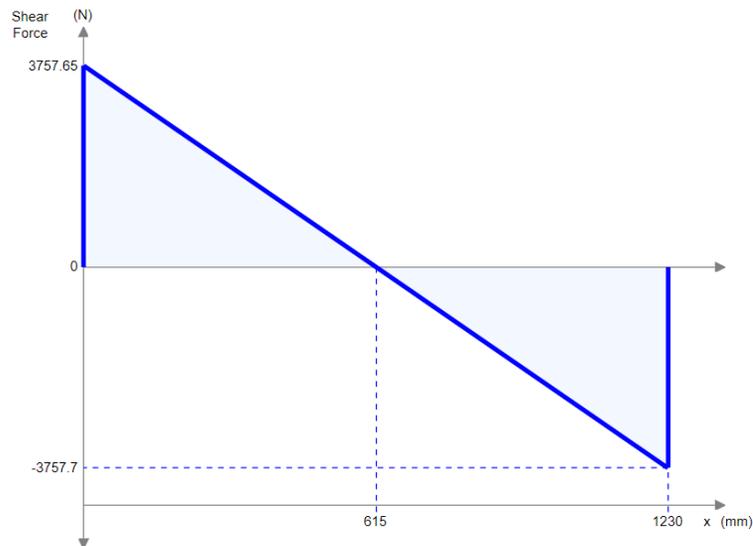


Figura 3. 19. Diagrama Fuerza Cortante Estructura Soporte Bandeja de Agua.

3.1.3.7.1 Análisis matemático estructura soporte bandeja de agua

Para los cálculos matemáticos de la estructura del soporte de bandeja de agua del Eje X se elige el límite de flexión para parte general de una máquina, representado por (3.28), para ello se tiene un límite de flexión entre:

$$Y_{m\acute{a}x} = 0,0005 \text{ a } 0,003 \frac{\text{in}}{\text{in}} \text{ o } \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \text{ de longitud de la viga.} \quad (3.28)$$

Para determinar el valor mínimo que se puede deformar la viga según (3.28), se tiene:

$$\begin{aligned} Y_{m\acute{a}x1} &= \frac{0,0005 \text{ mm}}{\text{mm de longitud}} \cdot 1230 \text{ mm} \\ &= 0,615 \text{ mm (valor m\acute{i}nimo que se puede deformar)}. \end{aligned}$$

Para determinar el valor máximo que se puede deformar la viga según (3.28), se tiene:

$$Y_{m\acute{a}x2} = \frac{0,003 \text{ mm}}{\text{mm de longitud}} \cdot 1230 \text{ mm} = 3,69 \text{ mm (valor m\acute{a}ximo que se puede deformar)}.$$

La fórmula que se utiliza para calcular el peso máximo que soportará dicha estructura, con los extremos de deflexión de $Y_{m\acute{a}x}$ es la definida por apoyos simples con carga continua y representada por (3.25).

Despejando w y reemplazando los valores en (3.25), con un valor de deflexión mínimo ($Y_{m\acute{a}x1}$), se obtiene:

$$w = \frac{384 \cdot 207 \text{ GPa} \cdot \left(\frac{23,84 \text{ cm}^4}{100^4} \right) \cdot 0,615 \times 10^{-3}}{5 \cdot (1230 \times 10^{-3})^4}$$

$$F = 1018,34 \frac{\text{N}}{\text{m}} \rightarrow 1,02 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

(valor resultante de fuerza con un valor de deflexión mínimo $Y_{\text{máx1}}$)

Despejando w y reemplazando los valores en (3.23), con un valor de deflexión mínimo ($Y_{\text{máx2}}$), se obtiene:

$$w = \frac{384 \cdot 207 \text{ GPa} \cdot \left(\frac{23,84 \text{ cm}^4}{100^4} \right) \cdot 3,69 \times 10^{-3}}{5 \cdot (1230 \times 10^{-3})^4}$$

$$F = 6110,04 \frac{\text{N}}{\text{m}} \rightarrow 6,11 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

(valor resultante de fuerza con un valor máximo de deflexión $Y_{\text{máx2}}$)

Según cálculos realizados a continuación se determina el peso de la bandeja de agua y del agua que debe soportar el soporte de la bandeja para los cálculos realizados de flexión máxima.

El peso bandeja de agua plancha de 3 mm de espesor, se calcula utilizando (3.26):

Reemplazando en (3.26), se tiene:

$$Peso = \frac{1640 \text{ mm} \cdot 1530 \text{ mm} \cdot 3 \text{ mm} \cdot 7.85}{1000}$$

$$\mathbf{Peso = 59.1 \text{ kg} \rightarrow 579.57 \text{ N}}$$

El peso del agua máximo que puede soportar la bandeja de agua se calcula por (3.29):

$$\text{volumen de la bandeja} = \text{alto} \cdot \text{largo} \cdot \text{ancho} \quad (3.29)$$

$$\text{volumen de la bandeja} = 15 \text{ cm} \cdot 123 \text{ cm} \cdot 134 \text{ cm}$$

$$\text{volumen de la bandeja} = 247230 \text{ cm}^3$$

Con la relación existente entre el peso y el volumen del agua se tiene que:

$$\frac{1g}{1 \text{ cm}^3} \rightarrow 1 \text{ cm}^3 \text{ de agua} = 1g$$

$$\text{peso del volumen de la bandeja} = 247,23 \text{ kg}$$

$$\text{peso del volumen de la bandeja} = 2424,5 \text{ N}$$

Para determinar la carga total de la bandeja de agua se suman los resultados obtenidos anteriormente que son el peso de la bandeja de agua y el peso del agua que esta va a soportar.

$$\text{Carga Total} = \text{peso bandeja de gua} + \text{peso del volumen del agua}$$

$$\text{Carga Total} = 579,57 \text{ N} + 2424,5 \text{ N}$$

$$\text{Carga Total} = 3004,07 \text{ N}$$

Se requiere determinar el peso como carga continua para comparar con los resultados anteriores y determinar el espesor máximo de plancha que puede soportar la estructura,

para ello se reemplaza los volares obtenidos de carga total de la bandeja de agua y la longitud total de la misma en (3.27), se tiene:

$$w = \frac{3004.07 \text{ N}}{1230 \text{ mm}}$$

$$w = 2.44 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$$

En conclusión, el peso total de la bandeja de agua como carga distribuida es de 2,44 N/mm está por debajo del peso de 6,11 N/mm, calculado con anterioridad, para una deflexión máxima que puede soportar de 0.615mm. El material con el cual construirá la bandeja será Acero ASTM A36 de 3mm el cual cumple con todos los requerimientos especificados en los cálculos matemáticos.

3.1.3.8.2 Diagrama de Momento Flector.

La Figura 3.20 presenta el diagrama de momento flector de la estructura de soporte de planchas del Eje X, en donde el momento máximo se presenta en la mitad de la estructura con un valor máximo de $11555 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$.

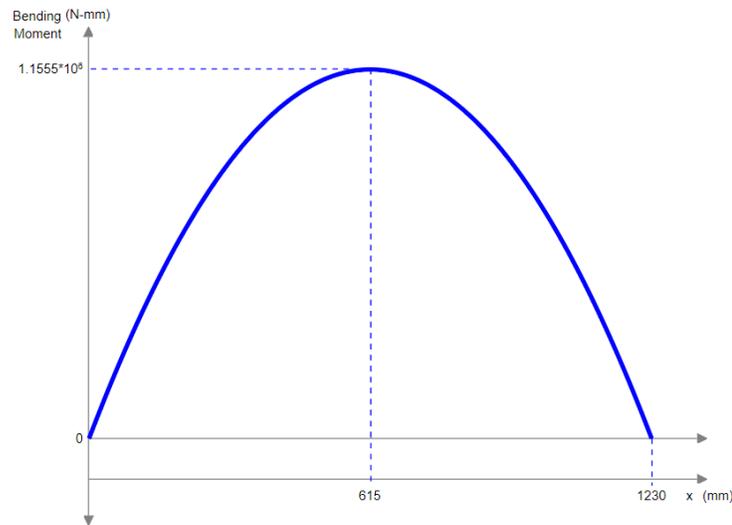


Figura 3. 20. Diagrama Momento Flector Estructura Soporte Bandeja de Agua.

3.1.3.9 Selección de apoyos regulables.

En los 6 soportes verticales de la mesa se debe colocar apoyos regulables mediante tornillo para posibilitar la nivelación de la máquina en cualquier lugar que vaya a ser instalada.

Determinar el diámetro medio del tornillo garantiza una adecuada resistencia al desgaste, así como resistencia al desplazamiento; para ello se utiliza (3.30) expuesta a continuación.

$$d_m \geq \sqrt{\frac{4 \cdot P}{\pi \cdot \sigma_p}} \quad (3.30)$$

Donde:

P carga máxima aplicada, en N;

σ_p esfuerzo axial norma, en MPa.

La carga máxima aplicada necesaria para el cálculo de los soportes regulables se calcula de la siguiente manera, el peso de la máquina es de 6981,26 N y al ser 6 apoyos regulables el peso se divide para 6 respectivamente:

$$F = \frac{\text{Peso total de la máquina}}{6}$$

$$F = \frac{6981,26\text{N}}{6}$$

$$F = 1163,54\text{N}$$

Reemplazando en (3.30), se tiene:

$$d_m \geq \sqrt{\frac{4 \cdot 1163,54 \text{ N}}{\pi \cdot 3,7 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}}$$

$$d_m = 0,0226 \text{ m} = 22,6 \text{ mm}$$

Con estas dimensiones se garantiza una adecuada resistencia al desgaste y al aplastamiento, teniendo en cuenta que el diámetro del tornillo se determina con base en la resistencia al desgaste de la tuerca.

3.2 DISEÑO ELECTROMECAÁNICO

3.2.1 SELECCIÓN DEL MOTOR PARA EJE Z ALTURA DE LA ANTORCHA

El torque que requiere ser suministrado por el sistema de accionamiento al actuador debe ser mayor que el torque resistivo y se determina como la suma del torque de aceleración

y del torque resistivo a velocidad constante, se recomienda aplicar al motor un factor de seguridad entre 20 a 100%.

La fórmula del torque que el motor debe suministrar está expuesta en (3.31) [17].

$$T_{motor} = T_{acel} + T_{resist} \quad (3.31)$$

En donde:

El torque de aceleración (T_{acel}) es el torque que requiere el motor para acelerar/desacelerar la inercia total del sistema (inercia incluyendo la del motor y del actuador), en Nm; y el torque resistivo (T_{resist}) es el torque de carga, que trabaja a velocidad constante y es el encargado de hacer funcionar el mecanismo venciendo la fricción, fuerzas externas de carga, etc., en Nm.

En la Tabla 3.24 se encuentran los datos y requerimientos necesarios para calcular, definir y seleccionar el motor adecuado para el trabajo a realizar.

Tabla 3. 24. Requerimientos del actuador Eje Z.

Datos requeridos para el cálculo del motor del Eje Z.			
Carga Máxima	W	7,72	kg
Ángulo del mecanismo	α	90	Grados
Diámetro del tornillo	D_B	13,6	mm
Longitud del tornillo	L_B	175	mm
Material del tornillo		Acero	
Resolución deseada	L_θ	0,254	mm/paso
Paso del tornillo	P_B	4,7	mm
Coeficiente de fricción de superficies que se deslizan	μ	0,15	
Tiempo de movimiento	T_{total}	1	s

Tiempo de aceleración	t_{acel}	0,425	s
Velocidad especificada	V	50	mm/s
Eficiencia del sistema	η	31	%

La resolución requerida (θ_s) representado por (3.30) es la característica más importante de un motor paso a paso, ya que determina la precisión del mismo, permitiendo mover al motor un paso por cada pulso que se le aplique. Estos pasos pueden variar entre 90° hasta 1.8° .

$$\theta_s = \frac{360^\circ \cdot L_\theta}{P_B} \quad (3.32)$$

Donde:

θ_s resolución requerida, en grados;

L_θ resolución deseada, en grados;

P_B paso del tornillo, en mm/paso.

$$\theta_s = \frac{360^\circ \cdot 0,254 \text{ mm/paso}}{4,7 \text{ mm}}$$

$$\theta_s = 19,45^\circ$$

La velocidad máxima y el torque del motor trabajan conjuntamente; a más velocidad menos torque. Si la velocidad máxima ($V_{m\acute{a}x}$), representado por (3.33), sobrepasa su valor de referencia calculado, el motor perderá pasos y a su vez la resolución del mismo se verá considerablemente afectada.

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{V}{P_B} \cdot 60 \quad (3.33)$$

Donde:

$V_{m\acute{a}x}$ velocidad máxima, en RPM;

V velocidad especificada, en mm/s;

P_B paso del tornillo, en mm.

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{50 \text{ mm/s}}{4,7\text{mm}} \cdot 60$$

$$V_{m\acute{a}x} = 638,30 \text{ RPM}$$

Para que el motor se mueva libremente sin ningún tipo de fricción se debe calcular la inercia de los elementos que depende su movimiento. La importancia de calcular la inercia se debe a que no permite al motor llegar a la velocidad requerida de forma inmediata perjudicando el desempeño de todo el sistema.

La inercia del tornillo $J_{tornillo}$, representado por (3.34), depende de la longitud del mismo, su diámetro y la densidad del material que fue construido; y su cculo se emplea en el torque de aceleración.

$$J_{tornillo} = \frac{\pi \cdot L_B \cdot \rho \cdot D_B^4}{32} \quad (3.34)$$

Donde:

$J_{tornillo}$ inercia del tornillo, en kg/m²;

L_B longitud del tornillo, en mm;

ρ densidad del material del tornillo, en kg/m³;

D_B diámetro del tornillo, en m⁴.

$$J_{\text{tornillo}} = \frac{\pi \cdot 0,175 \text{ m} \cdot 7850 \text{ kg/m}^3 \cdot (0,0136\text{m})^4}{32}$$

$$J_{\text{tornillo}} = 5,93 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

El cálculo de la inercia de la carga (J_w), representado por (3.35), depende de la carga máxima del sistema a desplazar además del paso del tornillo. Su cálculo se emplea en el torque de aceleración.

$$J_w = W \cdot \left(\frac{P_B}{2 \cdot \pi} \right)^2 \quad (3.35)$$

Donde:

J_w inercia de la carga, en kg/m^2 ;

W carga máxima, en kg ;

P_B paso del tornillo, en m .

$$J_w = 7,72 \text{ kg} \cdot \left(\frac{0,0047 \text{ m}}{2 \cdot \pi} \right)^2$$

$$J_w = 4,32 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Para determinar la inercia total en el eje del motor (J_L) se suma el resultado de la inercia de la carga y el piñón, representado en (3.36):

$$J_L = J_{\text{tornillo}} + J_w \quad (3.36)$$

$$J_L = 5,93 \times 10^{-6} + 4,32 \times 10^{-6} = 10,25 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Con el resultado de todos los cálculos realizados con anterioridad se determina el torque de aceleración (T_{acel}), representado por (3.37) y definido a inicios de la sección 3.2.1.

$$T_{acel} = J_L \cdot \frac{V_{m\acute{a}x}}{T_{acel}} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \quad (3.37)$$

Donde:

T_{acel} torque de aceleración, en Nm;

J_L inercia total eje del motor, en kg/m²;

$V_{m\acute{a}x}$ velocidad máxima, en RPM;

t_{acel} tiempo de aceleración, en s.

$$T_{acel} = 10,25 \times 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot \frac{638,30 \text{ RPM}}{0,425 \text{ s}} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60}$$

$$T_{acel} = 0,001612 \text{ N m}$$

Al igual que la inercia la fuerza de gravedad ($F_{gravedad}$), representado por (3.38), no permite que el motor realice un movimiento libre por lo que se toma en cuenta al momento de calcular el torque resistivo.

$$F_{gravedad} = W \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot 9.81 \quad (3.38)$$

Donde:

$F_{gravedad}$ fuerza de gravedad, en N;

W carga máxima, en kg;

α ángulo del mecanismo, en grados.

$$F_{gravedad} = 7,72 \text{ kg} \cdot \text{sen}(90^\circ) \cdot 9,81$$

$$F_{gravedad} = 75,73 \text{ N}$$

La fuerza de fricción ($F_{fricción}$), representado por (3.39), causa los mismos problemas descritos anteriormente y de igual forma se toma en cuenta en el cálculo de torque resistivo.

$$F_{fricción} = \mu \cdot W \cdot \cos(\alpha) \cdot 9.81 \quad (3.39)$$

Donde:

$F_{fricción}$ fuerza de fricción, en N;

μ coeficiente de fricción de superficies que se deslizan, adimensional;

W carga máxima, en kg;

α ángulo del mecanismo, en grados.

$$F_{fricción} = 0,15 \cdot 7,72 \text{ kg} \cdot \cos(90^\circ) \cdot 9,81$$

$$F_{fricción} = 0$$

La fuerza total (F_{total}) que el mecanismo debe vencer es la sumatoria entre la fuerza externa producida, la fuerza de fricción y la fuerza de gravedad, está representado por (3.40):

$$F_{total} = F_{ext} + F_{fricción} + F_{gravedad} \quad (3.40)$$

$$F_{total} = 75,73 \text{ N}$$

Con los datos calculados se procede a determinar el torque resistivo de la carga (T_L), representado por (3.41) y definido a inicios de la sección 3.2.1:

$$T_L = \frac{F_{total} \cdot P_B}{2 \cdot \pi \cdot \eta \cdot 0.01} + \frac{\mu \cdot F_0 \cdot P_B}{2 \cdot \pi} \quad (3.41)$$

Donde:

T_L torque resistivo de la carga, en Nm;

F_{total} fuerza total a vencer, en N;

P_B paso del tornillo, en m;

μ coeficiente de fricción de superficies que se deslizan, adimensional;

η eficiencia del sistema, adimensional;

$$T_L = \frac{75,73 \text{ N} \cdot 0,0047 \text{ m}}{2 \cdot \pi \cdot 0,31 \cdot 0,01} + \frac{0,15 \cdot 25 \cdot 0,0047 \text{ m}}{2 \cdot \pi}$$

$$T_L = 0,183 \text{ N m}$$

Por último determinamos el Torque total requerido por el sistema (T_M), representado por (3.42), definido en la sección 3.2.1:

$$T_M = (T_{acel} + T_L) \cdot \text{factor de seguridad} \quad (3.42)$$

$$T_M = (0,001612 \text{ N m} + 0,183 \text{ N m}) \cdot 2$$

$$T_M = 0,184 \text{ Nm}$$

Según los cálculos realizados para el torque requerido (T_M) se seleccionó un motor paso a paso 57HS22 de la marca Leadshine Nema 23, en la Tabla 3.25 se observa las especificaciones generales del motor.

Tabla 3. 25. Especificaciones Generales Motor paso a paso Eje Z, [19].

ESPECIFICACIONES GENERALES										
MODELO	NEMA	FASE	ÁNGULO DE PASO	NÚMERO DE CABLES	CONEXIONES	CORRIENTE/FASE [A]	HOLDING TORQUE [Nm]	LONGITUD [mm]	PESO [kg]	DRIVERS COMPATIBLES
57HS22	23	2	1,8	8	Paralelo	5,6	2.2	81	1,15	EM503
					Serie	2,8	2,2			EM806
					Unipolar	4,0	1,5			DE556

La Figura 3.21 presenta las curvas de velocidad/torque del motor 57HS22, se observa que el torque requerido según los cálculos es menor que el torque característico del motor a la velocidad máxima requerida, esto se debe a que por seguridad el motor no permita que la antorcha baje o sea atraída completamente hacia las planchas.

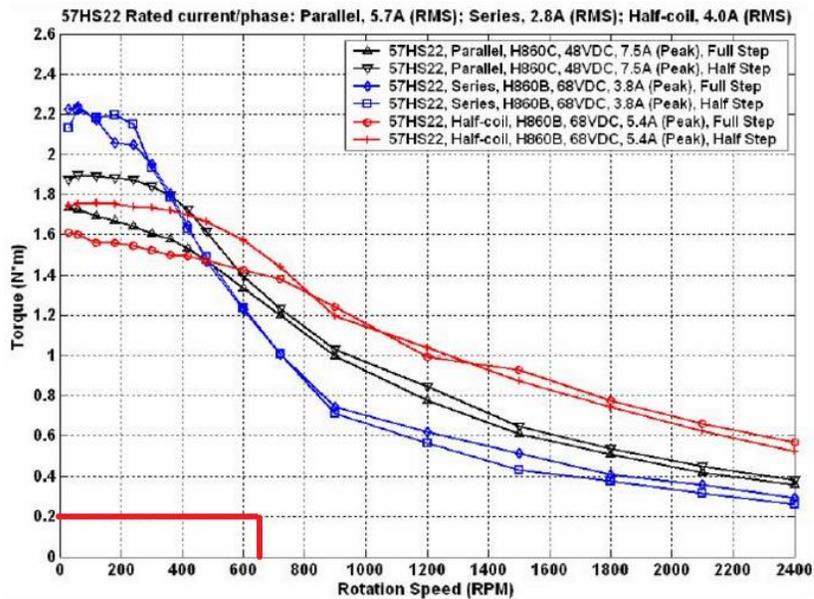


Figura 3. 21. Curva Característica Torque/Velocidad motor 57HS22 según cálculos realizados para Eje Z, [19].

3.2.2 SELECCIÓN DEL MOTOR EJE Y PARA EL DESPLAZAMIENTO DE LA ANTORCHA

Al igual que la selección del motor del Eje Z se recurrirá a (3.29) la cual proporciona el torque necesario para definir el motor paso a paso del Eje Y.

La Tabla 3.26 posee los datos requeridos para calcular y seleccionar el actuador adecuado mediante el mecanismo de piñón cremallera.

Tabla 3. 26. Requerimientos del actuador Eje Y.

Datos requeridos para el cálculo del motor Eje Y.			
Carga Máxima	W_1	14,50	kg
Distancia de movimiento	D_{total}	1260	mm
Resolución deseada	L_θ	0,254	mm/paso
Coefficiente de fricción de la guía	μ	0,15	
Tiempo de movimiento	T_{total}	0,8	s
Tiempo de aceleración	t_{accel}	0,425	s
Diámetro del piñón	D_p	42,8	mm
Espesor de piñón	L_p	17	mm
Material del piñón		Acero	
Densidad del material de piñón	ρ	7900	kg/m ³
Eficiencia del Sistema	η	90	%
Peso de la cremallera	W_2	0	kg
Velocidad específica	V	250	mm/s
Angulo del mecanismo	α	0	Grados

El desplazamiento por rotación del eje (d_{carga}), representado por (3.43), es la distancia que se mueve la carga por rotación del eje del motor; calculado para determinar el torque de aceleración del motor.

$$d_{carga} = \pi \cdot D_p \quad (3.43)$$

Donde:

d_{carga} desplazamiento por rotación del eje, en mm;

D_p diámetro del piñón, en mm;

$$d_{carga} = \pi \cdot 42,8 \text{ mm} = \mathbf{134,46 \text{ mm}}$$

Los siguientes parámetros comparten las mismas definiciones que los de la subsección 3.2.1, aunque las fórmulas matemáticas al ser para un motor de piñón/cremallera cambia ciertos datos de manera no relevante.

A continuación, se calculan las variables necesarias para el torque de aceleración, comenzando por la resolución requerida (θ_s), representado por (3.44):

$$\theta_s = \frac{360^\circ \cdot L_\theta}{d_{carga}} \quad (3.44)$$

Donde:

θ_s resolución requerida, en grados;

L_θ resolución deseada, en mm/paso;

d_{carga} desplazamiento por rotación del eje, en mm;

$$\theta_s = \frac{360^\circ \cdot 0,254 \text{ mm/paso}}{134,47 \text{ mm}}$$

$$\theta_s = 0,68^\circ$$

La velocidad máxima requerida ($V_{m\acute{a}x}$) por el sistema, representado por (3.45) en sistemas de piñón cremallera:

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{V}{d_{carga}} \cdot 60 \quad (3.45)$$

Donde:

$V_{m\acute{a}x}$ velocidad máxima, en RPM;

V velocidad especificada, en mm/s;

d_{carga} desplazamiento por rotación del eje, en mm.

Reemplazando en (3.45), se tiene:

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{250 \text{ mm/s}}{134,47 \text{ mm}} \cdot 60$$

$$V_{m\acute{a}x} = 111,55 \text{ RPM}$$

La inercia del piñón ($J_{piñón}$), representada por (3.46), que incluye el espesor del piñón (L_p), en m; por la densidad (ρ) del material del mismo, en kg/m^3 ; y el diámetro (D_p), en m:

$$J_{piñón} = \frac{\pi \cdot L_p \cdot \rho \cdot D_p^4}{32} \quad (3.46)$$

$$J_{piñón} = \frac{\pi \cdot 0,017 \text{ m} \cdot 7900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (0,0428 \text{ m})^4}{32}$$

$$J_{piñón} = 4,42 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Para la inercia de la carga (J_{w1}), representado por (3.47), multiplica la carga máxima (W_1), en kg; por el diámetro del piñón (D_p) al cuadrado, en m; dividido para 4:

$$J_{w1} = W_1 \cdot \frac{D_p^2}{4} \quad (3.47)$$

$$J_{w1} = 14,50 \text{ kg} \cdot \frac{(0,0428 \text{ m})^2}{4}$$

$$J_{w1} = 0.0066 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Inercia de la cremallera (J_{w2}), representado por (3.48), multiplica el peso de la cremallera (W_2), en kg; por el diámetro del piñón (D_p) al cuadrado, en m; dividido para 4:

$$J_{w2} = W_2 \cdot \frac{D_p^2}{4} \quad (3.48)$$

$$J_{w2} = 0 \text{ kg} \cdot \frac{(0,0428 \text{ m})^2}{4} = 0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

La inercia de la carga (J_{w1}) y el piñón (J_{w1}) junto con la inercia de la cremallera (J_{w2}) se suman para obtener la inercia total del sistema reflejados al eje del motor (J_L), representado en (3.49). Todas las inercias deben estar en Kg/m²:

$$J_L = J_{\text{piñón}} + J_{w1} + J_{w2} \quad (3.49)$$

$$J_L = 4.42 \times 10^{-5} + 0.0066 + 0 = 0.0066442 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Con los datos obtenidos con anterioridad se calcula el torque de aceleración (T_{accel}) del sistema, representado por (3.50):

$$T_{acel} = 1,2 \cdot J_L \cdot \frac{V_{m\acute{a}x}}{t_{acel}} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \quad (3.50)$$

Donde:

T_{acel} torque de aceleraci3n, en Nm;

J_L inercia total eje del motor, en kg/m²;

$V_{m\acute{a}x}$ velocidad m\acute{a}xima, en RPM;

t_{acel} tiempo de aceleraci3n, en s.

$$T_{acel} = 1,2 \cdot 0,0066442 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot \frac{111,55 \text{ RPM}}{0,425 \text{ s}} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60}$$

$$T_{acel} = 0.2191 \text{ N m}$$

Las tres fuerzas a continuaci3n calculadas sirven para determinar el torque resistivo de la carga requeridos por el motor:

Para determinar la fuerza de gravedad ($F_{gravedad}$), se aplica (3.51):

$$F_{gravedad} = (W_1 + W_2) \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot 9.81 \quad (3.51)$$

Donde:

W_1 c\acute{a}rga m\acute{a}xima del sistema, en kg;

W_2 peso de la cremallera, en kg;

α \xc1ngulo del mecanism, en grados.

Remplazando en (3.51), se tiene:

$$F_{gravedad} = (14,50 \text{ kg} + 0 \text{ kg}) \cdot \text{sen}(0^\circ) \cdot 9,81$$

$$F_{gravedad} = 0 \text{ N}$$

Para la fuerza de fricción ($F_{fricción}$), representado por (3.52):

$$F_{fricción} = \mu \cdot (W_1 + W_2) \cdot \cos(\alpha) \cdot 9,81 \quad (3.52)$$

$$F_{fricción} = 0,15 \cdot (14,5 \text{ kg} + 0 \text{ kg}) \cdot \cos(0^\circ) \cdot 9,81$$

$$F_{fricción} = 21,34 \text{ N}$$

La Fuerza total (F_{total}) del sistema, *tomado* de (3.38), suma la fuerza externa, la fuerza de fricción y la fuerza de gravedad calculadas anteriormente:

$$F_{total} = F_{ext} + F_{fricción} + F_{gravedad}$$

$$F_{total} = 21,34 \text{ N}$$

El torque resistivo de la carga (T_L) se calcula mediante (3.53), utilizando la fuerza total del sistema, en N y diámetro del piñón, en m:

$$T_L = F_{total} \cdot \frac{D_p}{4} \quad (3.53)$$

$$T_L = 21,34 \text{ N} \cdot \frac{0,0428 \text{ m}}{4}$$

$$T_L = 0,23 \text{ N m}$$

Por último, con todos los datos ya obtenidos se calcula el Torque *requerido* (T_M), tomado de (3.40):

$$T_M = (T_{acel} + T_L) \cdot \text{factor de seguridad}$$

$$T_M = (0,22 \text{ N m} + 0,23 \text{ N m}) \cdot 2$$

$$T_M = 0,9 \text{ Nm}$$

Según los cálculos realizados para el torque requerido (T_M) se seleccionó un motor paso a paso 57HS22 de la marca Leadshine Nema 23 igual al del eje Z sección 3.2.2, en la Tabla 3.25 se observa las especificaciones generales del motor.

La Figura 3.20 presenta las curvas de velocidad/torque del motor 57HS22, se observa que el torque requerido según los cálculos es menor que el torque característico del motor a la velocidad máxima requerida, como un factor de seguridad propio del sistema.

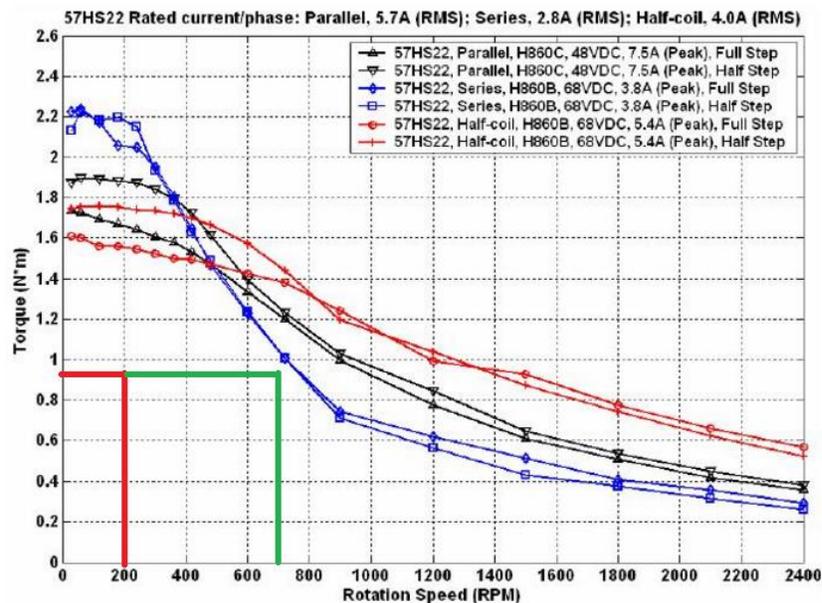


Figura 3. 22. Curva Característica Torque/Velocidad motor 57HS22 según cálculos realizados para Eje Y, [19].

3.2.3 SELECCIÓN DEL MOTOR EJE X PARA EL DESPLAZAMIENTO DE PÓRTICO

Para el desplazamiento del pórtico en la mesa CNC plasma se consideró implementar dos motores a pasos, con el fin de evitar pérdidas en los pasos de transmisión del motor durante el funcionamiento además de un mejor movimiento debido al funcionamiento sincrónico de los dos. El cálculo del torque necesario se realiza de forma análoga al Eje Y debido a que el sistema de transmisión es idéntico, la diferencia radica en el peso de la carga total a desplazar.

En la Tabla 3.28 se especificó los parámetros de movimiento para la selección del motor paso a paso.

Tabla 3. 27. Requerimientos del actuador Eje X.

Datos requeridos para el cálculo del motor Eje X.			
Carga Máxima	W_1	70	kg
Distancia de movimiento	D_{total}	2570	mm
Resolución deseada	L_θ	0,254	mm/paso
Coeficiente de fricción de la guía	μ	0,15	
Tiempo de movimiento	T_{total}	0,8	s
Tiempo de aceleración	t_{acel}	0,425	s
Diámetro del piñón	D_p	42,8	mm
Espesor de piñón	L_p	17	mm
Material del piñón		Acero	
Densidad del material de piñón	ρ	7900	kg/m ³
Eficiencia del Sistema	η	90	%
Peso de la cremallera	W_2	0	kg
Velocidad específica	V	250	mm/s
Angulo del mecanismo	α	0	Grados

La Tabla 3.29 contiene las variables calculadas necesarias para seleccionar los motores del Eje X, las ecuaciones utilizadas son las mismas que la subsección 3.2.2; debido a ello no se profundizo detallando cada una de las ecuaciones para su obtención.

Tabla 3. 28. Resultados Cálculo Motor Eje X.

Variable	Resultado
Desplazamiento por rotación del eje (d_{carga}), reemplazando en (3.43).	$d_{carga} = 134,46 \text{ mm}$

Resolución requerida (θ_s), reemplazando en (3.44):	$\theta_s = 0.68^\circ$
Velocidad máxima requerida ($V_{m\acute{a}x}$), reemplazando (3.45):	$V_{m\acute{a}x} = 111.55 \text{ RPM}$
Inercia del piñón ($J_{\text{piñón}}$), reemplazando en (3.46):	$J_{\text{piñón}} = 4.42 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$
Inercia de la carga (J_{w1}), reemplazando (3.47):	$J_{w1} = 0,032 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$
Inercia de la cremallera (J_{w2}), reemplazando (3.48):	$0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$
Inercia de la carga y el piñón reflejados al eje del motor (J_L), reemplazando (3.49):	$0,0321 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$
Torque de aceleración (T_{acel}), reemplazando (3.50):	$T_{\text{acel}} = 1,06 \text{ Nm}$
Fuerza de gravedad (F_{gravedad}), reemplazando (3.51):	$F_{\text{gravedad}} = 0 \text{ N}$
Fuerza de fricción ($F_{\text{fricción}}$), reemplazando (3.52):	$F_{\text{fricción}} = 103,00 \text{ N}$
Fuerza total (F_{total}), reemplazando (3.38):	$F_{\text{total}} = 103,00 \text{ N}$
Torque resistivo de la carga (T_L), reemplazando (3.53):	$T_L = 1.10 \text{ N m}$
Torque requerido (T_M), reemplazando (3.54):	$T_M = 4,32 \text{ Nm}$

El valor de 4.32Nm del torque requerido se divide para dos, debido a que son dos motores los cuales van a proporcionar el torque necesario.

$$T_{total} = \frac{\text{Torque requerido}}{2}$$

$$T_{total} = \frac{4.32 \text{ Nm}}{2} = 2.16$$

Según los cálculos realizados se seleccionó un motor paso a paso 86HS85 de la marca Leadshine Nema 34, en la Tabla 3.30 [19] se observa las especificaciones generales del motor.

Tabla 3. 29. Especificaciones Técnicas Motor Eje X.

ESPECIFICACIONES GENERALES										
MODELO	NEMA	FASE	ÁNGULO DE PASO	NÚMERO DE CABLES	CONEXIONES	CORRIENTE/FASE [A]	HOLDING TORQUE [Nm]	LONGITUD [mm]	PESO [kg]	DRIVERS COMPATIBLES
86HS85	34	2	1,8	8	Paralelo	6,8	8,5	118	3,8	EM503
					Serie	3,4	8,5			EM806
					Unipolar	4,9	6,0			DE556

La Figura 3.23 presenta las curvas de velocidad/torque del motor 86HS85, se observa que el torque requerido según los cálculos es menor que el torque característico del motor a la velocidad máxima requerida, como un factor de seguridad propio del sistema.

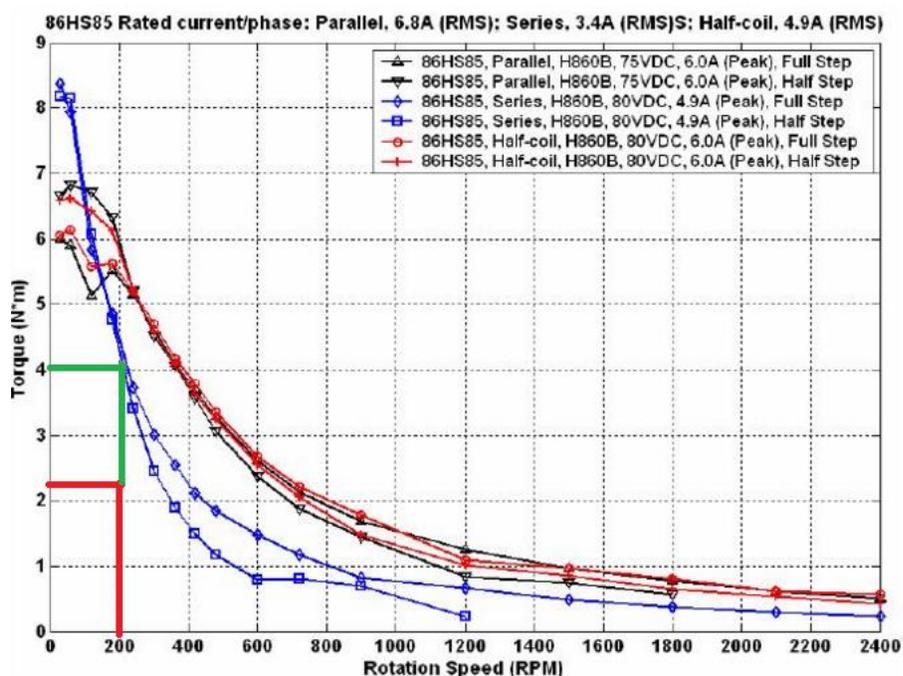


Figura 3. 23. Curva Característica Torque/Velocidad motor 86HS85, [19].

3.2.4 SELECCIÓN DE DRIVERS PARA LOS MOTORES PASO A PASO.

La selección de los drivers se realizó en función de la corriente necesaria para accionar los motores, así como también considerando la recomendación del constructor que viene dada en la ficha técnica de los motores como "drivers compatibles" [16].

Los drivers serán los encargados de amplificar y recibir la señal para el accionamiento de los motores paso a paso indicadas por el usuario en el software, así como de energizar las bobinas del motor para hacerlo girar.

Cada driver de un motor requiere de al menos las siguientes conexiones para operar de manera óptima:

- Señal de dirección.
- Señal de paso.
- Conexión común a tierra entre el driver y el módulo de interferencia.
- Conexión de energía de la fuente de alimentación de energía.

- Puesta a tierra de la fuente de alimentación de energía.

Con base a los motores seleccionados y la recomendación del constructor se seleccionó un mismo driver para todos los motores el **EM806** de la marca Leadshine, en la Figura 3.24 se indica la imagen del modelo de driver seleccionado; a continuación, se describen sus características principales:



Figura 3. 24. Driver EM806, [19].

- Obliga a que el motor trabaje a un ruido extra bajo.
- Optimiza el par de torsión y anula la inestabilidad del rango medio. (Anti resonancia)
- Automática reducción de corriente de reposo.
- Automática reducción de velocidad configurable por software.
- Control de paso y dirección 100% eficaz.
- Posee la opción de establecer la corriente de salida y la resolución de los micro pasos vía DIP switch o software.
- Posee autocomprobación y tecnología de configuración automática.
- Micro pasos desde 1 a 512.

En la Tabla 3.31 se especifican los parámetros eléctricos del driver EM806.

Tabla 3. 30. Especificaciones Eléctricas Driver EM806, [19].

Parámetro	Mínimo	Normal	Máximo	Unidades
Voltaje de Entrada	24	68	80	V Dc
Frecuencia de Entrada de Pulso	0	-	200	kHz
Corriente de Señal Lógica.	7	10	16	mA
Resistencia de Aislamiento.	500	-	-	Mohmios

3.2.5 SELECCIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Para lograr un buen control de operación, es importante seleccionar una fuente apropiada de voltaje y corriente de salida. Generalmente, la fuente de voltaje determina el desarrollo de altas velocidades del motor, mientras que la corriente determina el torque de salida (a mayor torque menor velocidad). El suministro de un mayor voltaje permite que el motor alcance altas velocidades, pero esto genera más ruido y más calor. Si la velocidad de movimiento requerido es baja, es mejor usar un suministro de bajo voltaje para disminuir el ruido y la generación de calor y mejor fiabilidad.

La selección de la fuente de alimentación se basa en la corriente y voltaje requeridos por los motores paso a paso y los drivers de los mismos, seleccionados con anterioridad. En la Tabla 3.32 [19] se resumen los requerimientos eléctricos de cada uno de ellos.

Tabla 3. 31. Parámetros eléctricos requeridos para fuente de alimentación.

Parámetros Eléctricos	MOTOR EJE X	MOTOR EJE Y	MOTOR EJE Z	DRIVERS (4 MOTORES)

Torque de sujeción	8,5 Nm	2,2 Nm	2,2 Nm	-----
Voltaje de alimentación	80 Vdc	68 Vdc	68 Vdc	24Vdc – 80 Vdc
Tipo	Nema 34	Nema 23	Nema 23	-----
Cantidad	2	1	1	4
Corriente por fase	3,4 A	2,8 A	2,8 A	0,35 A – 6 A

La corriente suministrada por parte de la fuente de alimentación se calcula con (3.54) expuesta a continuación.

$$I_s = \frac{2}{3} \cdot \left(\sum I_f \right) \quad (3.54)$$

Donde:

I_s corriente suministrada por la fuente de alimentación de energía, en A;

I_f corriente por fase, en A.

$$I_s = \frac{2}{3} \cdot (2 \cdot 3,4 + 2,8 + 2,8 + 4)$$

$$I_s = 10,93 \text{ A}$$

La corriente necesaria para el buen desempeño de los equipos eléctricos es de 10,33 A según la fórmula antes empleada para ello se seleccionó una fuente LeadShine modelo RPS4810, en la Tabla 3.33 [19] se observa las especificaciones eléctricas de dicha fuente.

Tabla 3. 32. Especificaciones Eléctricas Fuente de Alimentación RPS4810.

MODELO	RPS4810	
	VOLTAJE DC	48 V
	CORRIENTE NOMINAL	10,4 A

SALIDA	CORRIENTE PICO	12.5 A
	POTENCIA NOMINAL	500 W
	PICO DE POTENCIA	600 W
ENTRADA	RANGO VOLTAJE	176-265 VAC o 85-132VAC, seleccionado por switch.
	RANGO FRECUENCIA	47-63 Hz
PROTECCIÓN	SOBRE VOLTAJE	71-79V
		Tipo de protección: es necesario apagar la entrada para reiniciar.
	SOBRE CARGA	110%-130%
		Tipo de protección: es necesario apagar la entrada para reiniciar
DIMENSIÓN (MM)		261 × 103 × 65
PESO		1127 g (39,75 oz)

3.2.6 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR Y THC

En la parte de control de movimiento se seleccionó el controlador MP3600 modular de la marca CandCNC, se observa en la Figura 3.25, para elegir este controlador se tomaron las siguientes consideraciones:

- La marca CandCNC es líder en la construcción de elementos eléctricos para CNC, además de tener una línea especializada en corte por plasma CNC.
- Posee software y dispositivos completamente compatibles con sistemas de plasma Hypertherm.
- Ofrece todos los elementos eléctricos necesarios para el control de máquinas y dispositivos CNC, sin la necesidad de recurrir a otras marcas.
- Se especializa en máquinas industriales de toda escala.

- Al ser una empresa americana, todos los elementos que construye y distribuye cumplen normas ISO.



Figura 3. 25. Control de Altur THC MP3600, [19].

El controlador MP3600 cumple con dos funciones principales en la máquina cortadora CNC, interpretar el código G del software haciendo mover los actuadores en este caso los motores y además poseer un sistema automático de compensación de altura llamado THC (Torch Height Control o en español control de altura de la antorcha).

Para que el corte plasma se realice de una manera óptima se necesita que la antorcha este separada de 1,5 milímetros del material que se cortará, aún más si el material es delgado ya que a consecuencia del calor los materiales se deforman debido a que internamente en sus átomos se están generando tensiones provocadas por la dilatación fenómeno suficiente para deformar un material delgado; debido a esto la antorcha plasma debe mantener una separación constante requiriendo un sistema automático de compensación de altura llamado THC [24].

Debido a las consideraciones anteriores se seleccionó un controlador que incluya un THC, al ser un elemento importante en el sistema de mecanizado de corte para proteger a la antorcha, sus consumibles y partes en general además de mejorar la calidad del corte y el rendimiento de la máquina produciendo menores costos operativos y mayor productividad.

El controlador seleccionado trabaja exclusivamente con sistema operativo Linux, tiene la ventaja de separarse mediante cable del CPU 15 metros sin ningún tipo de ruido en la señal, para las conexiones posee un puerto paralelo y conexión a red Ethernet de 100Mbps. Su característica principal y de mayor utilidad es el de transferir la HMI información de la antorcha como: voltaje y corriente con la que está trabajando la máquina, además de la posición de la misma; es decir si la antorcha está subiendo o bajando y a qué velocidad, y por último informa si el arco de corte está encendido o no.

3.2.7 SELECCIÓN DE LOS SENSORES DE POSICIONAMIENTO

Para controlar la eficiencia de la máquina y mejorar la seguridad de operación de la misma se coloca en cada eje 2 sensores de posicionamiento los cuales envían una señal al software cuando el recorrido de cada eje llegue al fin de cada guía.

El objetivo de los sensores es evitar y precautelar que los ejes choquen con sus protecciones (de caucho), debido a alguna falla mecánica o si por alguna razón el programa no evita que salgan de la zona de trabajo especificada que es de 1,22 x 2,44 metros.

Los sensores seleccionados para esta operación son sensores inductivos utilizados especialmente en la industria para aplicaciones de posicionamiento como para detectar la presencia o ausencia de objetos metálicos especialmente ferrosos. Algunos de los parámetros por los cuales se realizó su selección se encuentran a continuación:

- Alta durabilidad, debido a que realizan su trabajo sin la necesidad de contacto o impacto con el elemento a sensar.
- Estos sensores no responden a líquido, la grasa, el tacto de las manos; favoreciendo el proceso de producción o trabajo.
- Menos costo y fácil mantenimiento en comparación con sensores capacitivos y ultrasónicos.
- El diseño de los sensores proporciona gran protección contra cortocircuito.

- Exclusivos para la medición de elementos ferrosos.

El principio de funcionamiento de los sensores inductivos consiste en un campo magnético de alta frecuencia es generado por la bobina en el circuito interno de oscilación. Cuando un objeto se acerca al campo magnético, fluye una corriente de inducción en el objeto, debido a la inducción electromagnética. Conforme el objeto se acerca al sensor, aumenta el flujo de corriente de inducción, lo cual provoca que la carga en el circuito de oscilación crezca. Entonces la oscilación se atenúa o decrece. El sensor detecta este cambio en el estado de oscilación mediante el circuito de detección de amplitud y emite una señal de detección [20]. En la Figura 3.26 se observa una imagen del funcionamiento descrito del sensor inductivo.

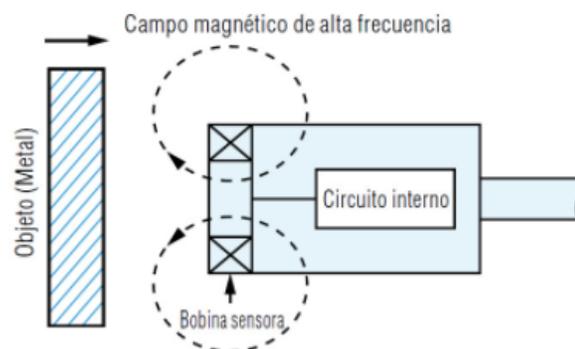


Figura 3. 26. Funcionamiento Sensor Inductivo, [20].

Para la instalación de los sensores en cada eje de la máquina se seleccionó sensores con diámetro M12 los cuales tiene un rango de funcionamiento de 2mm/4mm, son sensores sin blindado lo que permite realizar un censado lateral debido a su área libre de metal. En la Tabla 3.34 se observa algunas especificaciones eléctricas de dichos sensores.

Tabla 3. 33. Especificaciones Técnicas Sensores Inductivos diámetro M12, [20].

Parámetro	Valor
Distancia Estipulada	2mm/4mm
Distancia de detección	2mm: 0-1,6mm -- 4mm:0-3,2mm
Voltaje de Alimentación	DC10-30V
Frecuencia	2mm<600Hz -- 4mm<400Hz
Corriente de Salida	<200mA
Rango de temperatura de funcionamiento.	-25° / 70°

3.2.8 SELECCIÓN ELEMENTOS ELÉCTRICOS OPERATIVOS Y DE FUERZA

3.2.8.1 Parámetros a considerar para la selección de luces indicadoras

Para realizar la selección de las luces indicadoras se debe contar con tres parámetros importantes detallados a continuación:

- Voltaje de funcionamiento
- Intensidad de funcionamiento
- Tipo de carga

Las luces piloto seleccionadas tiene las especificaciones técnicas que se detallan en la Tabla 3.35 [22].

Tabla 3. 34. Especificaciones Técnicas Luces Indicadoras AD16-22D/S

Parámetro	Valor
Voltaje nominal(VAC)	220 – 240
Intensidad nominal(mA)	20
Vida útil eléctrica(horas)	+/- 30000

Norma	IEC 60947-5-1
-------	---------------

La cabina de control cuenta con una luz piloto marca STECK, Figura 3.27, las cuales indicarán si el plasma se encuentra en funcionamiento o no.



Figura 3. 27. Luces Piloto Marca Steck, [22].

3.2.8.2 Parámetros a considerar para la selección de pulsadores

La cabina de control de la máquina CNC cortadora por plasma posee 3 pulsadores importantes; un pulsador para encender la máquina, un pulsador para apagar la máquina y un pulsador de emergencia. Para la selección de estos pulsadores se requieren los siguientes parámetros:

- Los pulsadores de marcha se conectan en paralelo.
- Los pulsadores de parada se conectan en serie.
- Se debe considerar la tensión nominal de funcionamiento.
- La corriente de servicio (Ie) que consume en Amperios (A).

Los pulsadores normalmente cerrados seleccionados tienen las siguientes especificaciones técnicas detalladas en la Tabla 3.36 [22]:

Tabla 3. 35. Especificaciones Técnicas Pulsadores NC.

Parámetro	Valor
-----------	-------

Voltaje de aislamiento UI(V)	400
Intensidad nominal(A)	10 - 6
Norma	IEC 60947-5-1

Los pulsadores normalmente abiertos tienen las siguientes especificaciones técnicas detalladas en la Tabla 3.37 [22]:

Tabla 3. 36. Especificaciones Técnicas pulsadores NA.

Parámetro	Valor
Voltaje de aislamiento UI(V)	380
Intensidad nominal(A)	6
Norma	IEC 60947-5-1

El pulsador de paro tiene las especificaciones técnicas que se mencionan en la Tabla 3.38 [22]:

Tabla 3. 37. Especificaciones Técnicas pulsador de paro.

Parámetro	Valor
Voltaje de aislamiento UI(V)	600
Voltaje nominal(v)	240
Intensidad nominal(A)	3
Norma	IEC 60947-5-1

3.2.8.3 Parámetros a considerar para dimensionar y seleccionar un contactor

Un contactor es un elemento electromagnético que tiene como función principal establecer o interrumpir el paso de corriente, puede ser en el circuito de potencia o en el

circuito de mando [22]. Para determinar qué tipo de contactor se utilizará en el sistema eléctrico de la máquina CNC se necesita conocer los siguientes parámetros:

- Por su función
- La naturaleza y la tensión de la red
- La potencia instalada
- Las características de la carga
- Las exigencias del servicio deseado
- La normalización
- La intensidad térmica

Considerando que la máxima carga será de un motor de 1,5hp y considerando un sobredimensionamiento del 125% de la potencia nominal de la carga [22], se calcula mediante (3.55) que se muestra a continuación:

$$P_{Contactor} = F_s \cdot P_c \quad (3.55)$$

Donde:

F_s factor de dimensionamiento;

P_c potencia de carga, en hp.

Reemplazando los datos anteriores en (3.55) se obtiene el siguiente resultado:

$$P_{Contactor} = 1,25 \cdot 1,5 \text{ hp} = 1,875 \text{ hp}$$

Basándose en el criterio anterior se tiene los siguientes resultados para la selección del contactor que se observa en la Tabla 3.39:

Tabla 3. 38. Especificaciones Técnicas Motor Nema 34, [22].

Carga	Potencia nominal [hp]	Voltaje nominal [V]	Corriente nominal [A]	Categoría de servicio	Potencia del contactor [hp]
Motor	1,5	220	4,4	AC3	2

Los contactores seleccionados tienen las siguientes especificaciones técnicas mencionadas en la Tabla 3.40.

Tabla 3. 39. Especificaciones Técnicas Contactor, [22].

Parámetro	Especificación
Tipo de accionamiento	Electromagnético
Voltaje de aislamiento UI(V)	600
Voltaje nominal(V)	220
Intensidad nominal(A)	9
Frecuencia(Hz)	60
Voltaje de bobina(VAC)	110
Contactos auxiliares	1NA
Contactos principales	2NA-2NC
Norma	IEC 60947-5-1

3.3 DISEÑO CABINA DE CONTROL

La cabina de control es la encargada de resguardar todos los elementos eléctricos y de control que permiten el funcionamiento de la máquina CNC cortadora por plasma, además de mantener la comunicación entre la máquina y el operador.

Según la selección de dichos elementos en la sección 3.2, la cabina debe constar de los siguientes componentes:

Elementos de control y potencia:

- Controlador y THC. (junto con sus tarjetas de conexión)
- Drivers de los motores.
- Fuente de control.
- Borneras de conexión.
- Contactor.
- Relés.
- Fusible.
- RS485.
- CPU.

Dispositivos periféricos:

- Pantalla 19”.
- Teclado.
- Mouse.
- Selector.
- Botón de emergencia.
- Pulsador prendido apagado.
- Luz indicadora.

La cabina está dividida en tres partes principales de conexión: control, potencia y dispositivos periféricos. La parte inferior de la misma está diseñada para todos los elementos de control y potencia, las dimensiones para dar cabida a todos estos elementos se muestran en la Figura 3.28 y su forma en la Figura 3.29:

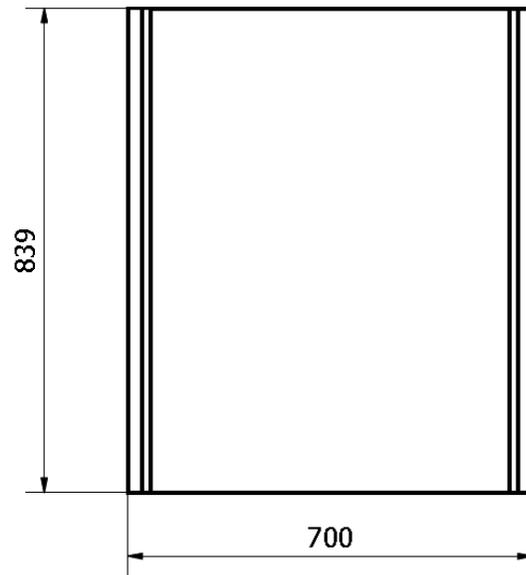


Figura 3. 28. Medidas en mm cabina de control parte inferior.

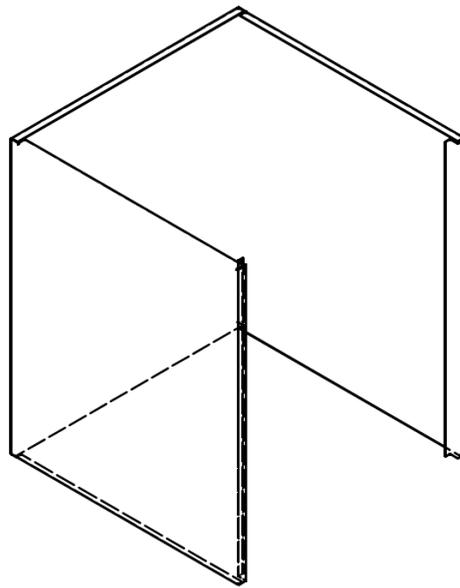


Figura 3. 29. Forma cabina de control parte inferior.

La parte superior está destinada para los dispositivos periféricos consta de las siguientes medidas representadas en la Figura 3.30.

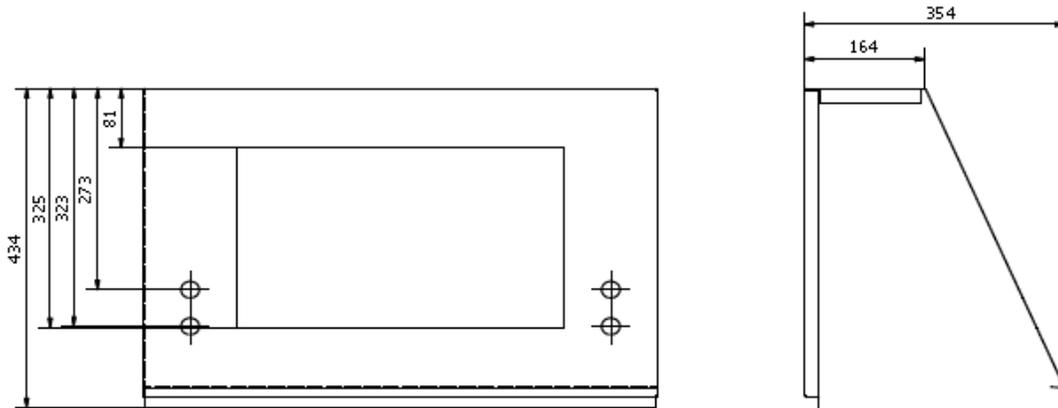


Figura 3. 30. Medidas cabina de control parte superior.

La Figura 3.31 muestra la cabina de control completa, en los Anexos C se puede verificar las medidas y partes de los planos correspondientes a este elemento.

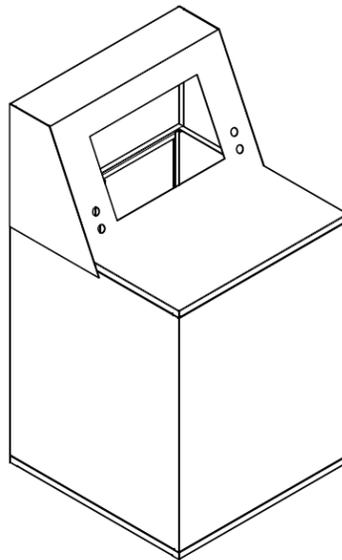


Figura 3. 31. Cabina de control estructura completa.

Para la colocación de los elementos eléctricos en la parte interna de la cabina de control se instaló rieles DIN para el soporte de los elementos y canaletas ranuradas para la organización de cables.

3.4 SELECCIÓN SOFTWARE CAM CNC CORTADORA PLASMA

Entre varios software CAM para máquinas CNC cortadoras plasma como hypertherm CNC, Flashcut V6 CAD/CAM, AlmaCAM CUT, se eligió el software propietario SheetCam el cual posee varias ventajas y características necesarias, la Figura 3.32 muestra la pantalla principal del software; entre las principales y la razón por la que se eligió este software es por tener una gama entera de elementos eléctricos, controladores compatibles entre ellos de la misma marca lo que facilita la instalación y la compatibilidad de los mismos. A continuación, se detalla de manera minuciosa las características de este software.

SheetCam está diseñado como una aplicación para computadora fácil de usar para el mecanizado de piezas planas; idóneo para máquinas industriales como fresadoras, router, plasma, corte por agua, corte láser y oxicorte [23].

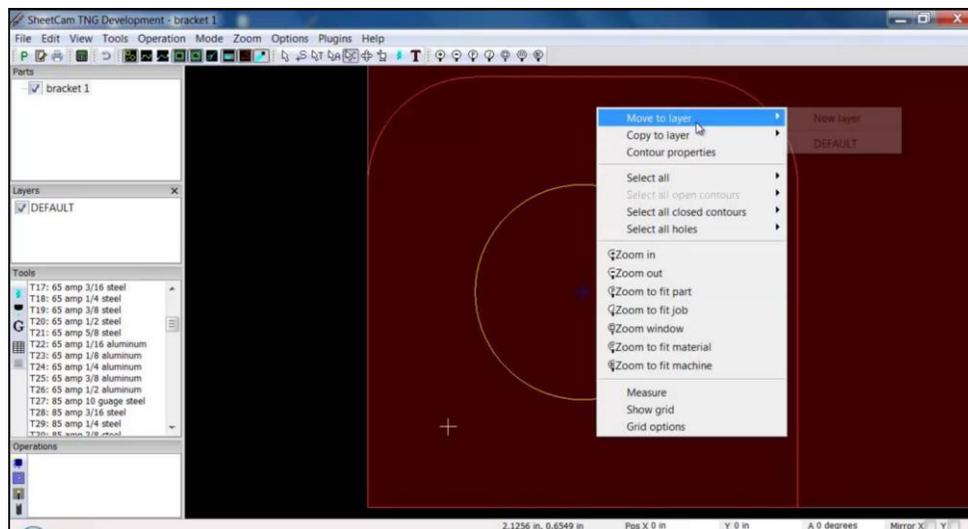


Figura 3. 32. Software CAM SheetCam (pantalla principal).

La función de este software es generar el código G requerido para el corte de las piezas, ofreciendo tres opciones de código para cortes: en contornos interiores, exteriores y sin contorno. Para el ingreso de datos SheetCam acepta archivos en formato DXF (dibujos

CAD), HPGL (línea de arte) y Excellon (placas de circuitos); además el software tiene la posibilidad de ser configurado para aceptar archivos de aplicaciones o formatos no estándar satisfaciendo las necesidades de muchos paquetes de control disponibles [23].

SheetCam también tiene algunas opciones que permiten trabajar como software CAD, utilizando funciones como el anidamiento de piezas y características como copiar, duplicar, girar y reflejar partes para reducir el desperdicio de material al mínimo, además de ahorrar los consumibles de la antorcha en algunos cortes.

3.5 SELECCIÓN SOFTWARE HMI CNC CORTADORA PLASMA

SheetCam ofrece al usuario un software compatible CommandCNC el cual relaciona el código G generado en SheetCam con las funciones de control de la máquina, en la Figura 3.33 se observa la pantalla principal de CommandCNC.

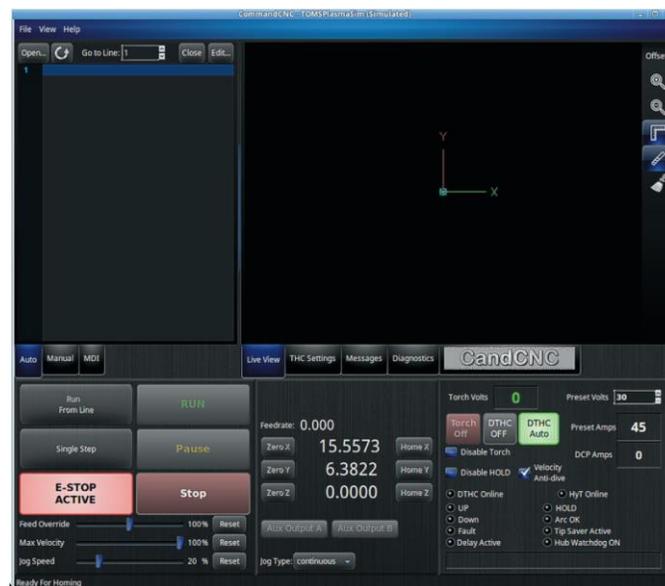


Figura 3. 33. Software HMI CommandCNC (pantalla principal).

Un gran beneficio del software es su interfaz humano máquina amigable con el operador la cual permite visualizar una vista previa en tiempo real de las operaciones que ejecuta

la máquina, exponiendo los caminos de corte, movimientos rápidos, capas y operaciones en general; además la pieza puede ser rotada y vista en 3 dimensiones en el panel identificando posibles errores antes de realizar el mecanizado [24].

Otra característica del software es que permite configurar los ejes de la máquina de manera independiente, con vista previa en tiempo real; opción de gran importancia para realizar el corte colocando los Ejes Y-X-Z en cero máquina, para esta función el software trabaja con una tarjeta de movimiento integrada ethernet de alta velocidad para un control suave de los motores. Informa el estado de los sensores en la máquina permitiendo al operador detectar de manera más fácil cual es el posible error de funcionamiento; al tener comunicación directa con el controlador de altura facilita que pueda ser activado/desactivado además de informar el funcionamiento del mismo posicionando la antorcha de la máquina. Por último, una vez determinado los parámetros de corte, configurados los motores y registrado el funcionamiento del controlador de altura permite realizar una simulación de corte permitiendo al operador observar el movimiento de los motores y de la antorcha de corte sin la necesidad de activar la misma [24]. En la Figura 3.34 se describe cada una de las partes que conforman la pantalla del HMI.

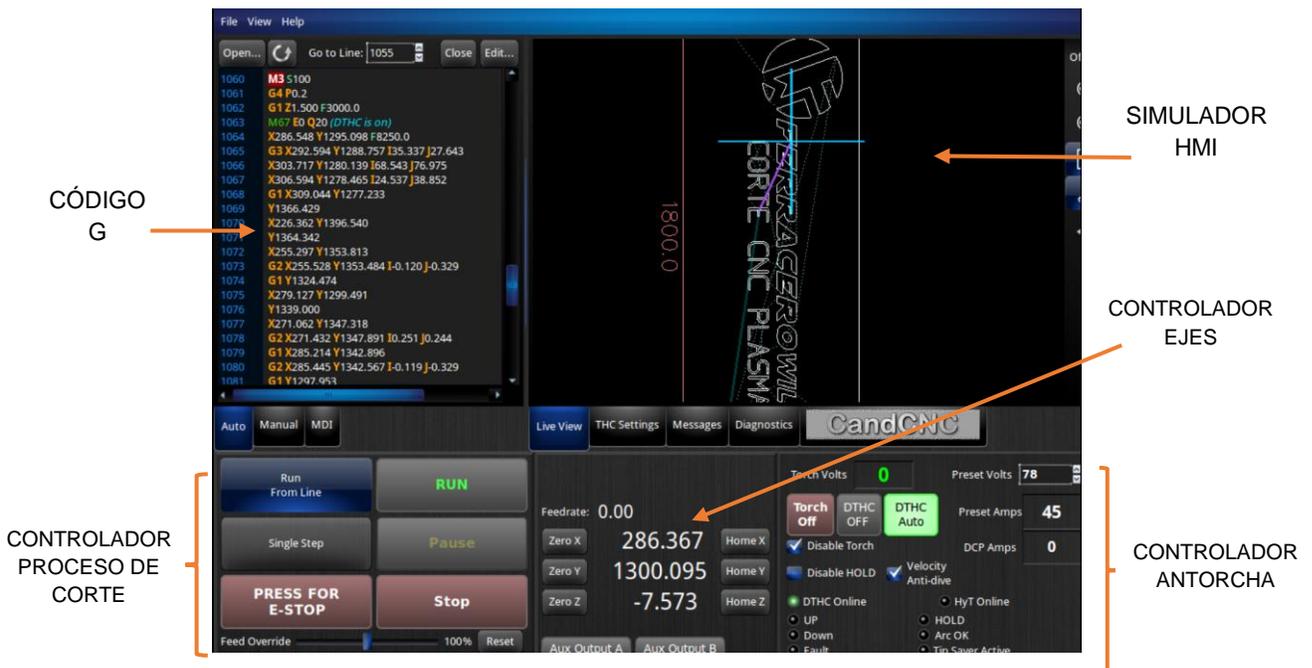


Figura 3. 34. Descripción software HMI.

CAPÍTULO IV

PROCESO CONSTRUCTIVO Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

En este capítulo final se detalla el proceso de construcción de cada uno de los Ejes de la máquina CNC cortadora por plasma y las pruebas de funcionamiento de la misma.

4.1 PROCESO CONSTRUCTIVO MÁQUINA CNC CORTADORA POR PLASMA.

En el proceso constructivo de la máquina se detallan las actividades realizadas en la implementación de cada uno de los Ejes, comenzando desde el Eje X, Eje Y, Eje Z y la cabina de control.

4.1.1 CONSTRUCCIÓN EJE X

En la Figura 4.1 se detalla el diagrama de construcción del Eje X o mesa de corte de la máquina. En los Anexos C se observa todos los planos constructivos de este Eje. Los materiales necesarios para el proceso son:

- Tubo cuadrado de 100x100x4 acero ASTM A500.
- Tubo cuadrado de 50x50x4 acero ASTM A500.
- Tubo rectangular de 100x150x4 acero ASTM A500.
- Platina 60x8 acero ASTM A36.
- Plancha 3mm acero ASTM A36.
- Plancha 1mm acero ASTM A36.

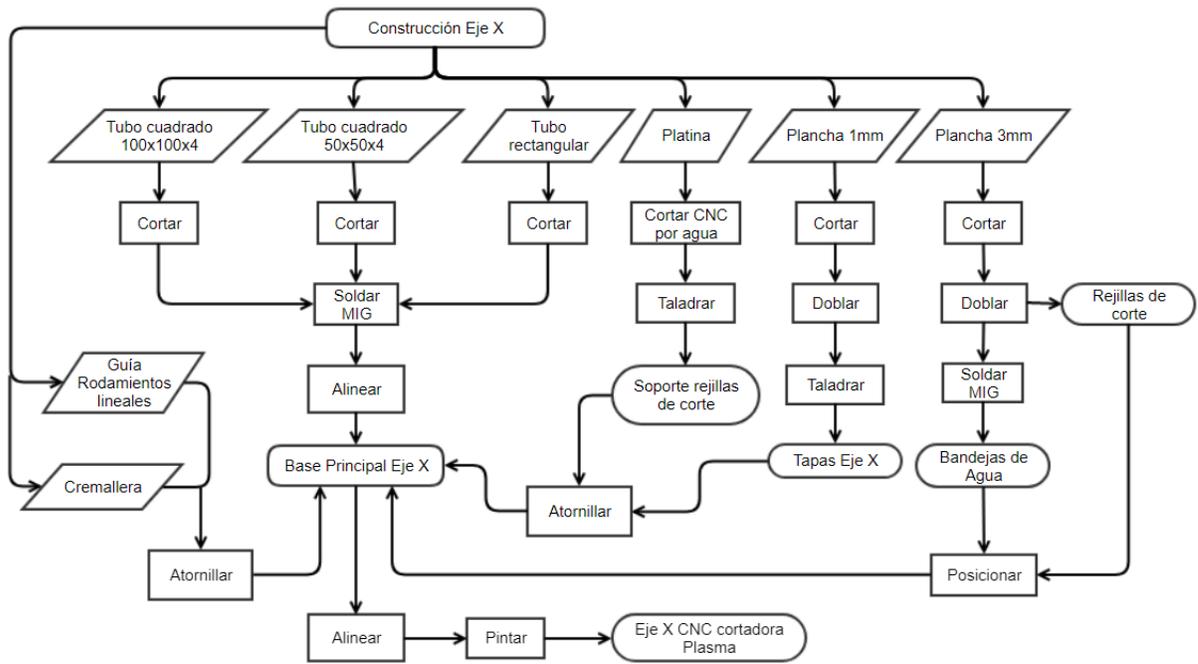


Figura 4. 1. Diagrama de construcción Eje X.

Las Figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 representan algunos de los pasos más importantes que se utilizaron para realizar la construcción del Eje X.



Figura 4. 2. Estructura principal mesa de corte (Eje X).



Figura 4. 3. Instalación soporte rejillas de corte.



Figura 4. 4. Instalación rejillas de corte



Figura 4. 5. Instalación cremallera - guías lineales - bandejas de agua.

4.1.2 CONSTRUCCIÓN EJE Y

El diagrama de construcción del Eje Y se encuentra detallado en la Figura 4.6. En los Anexos C se observa todos los planos constructivos de este Eje. Los materiales utilizados para la construcción son:

- Tubo Rectangular 150x100x4 acero ASTM A500.
- Plancha 3mm acero ASTM A36.
- Plancha 10mm acero ASTM A36.
- Ángulo 40x3 acero ASTM A36

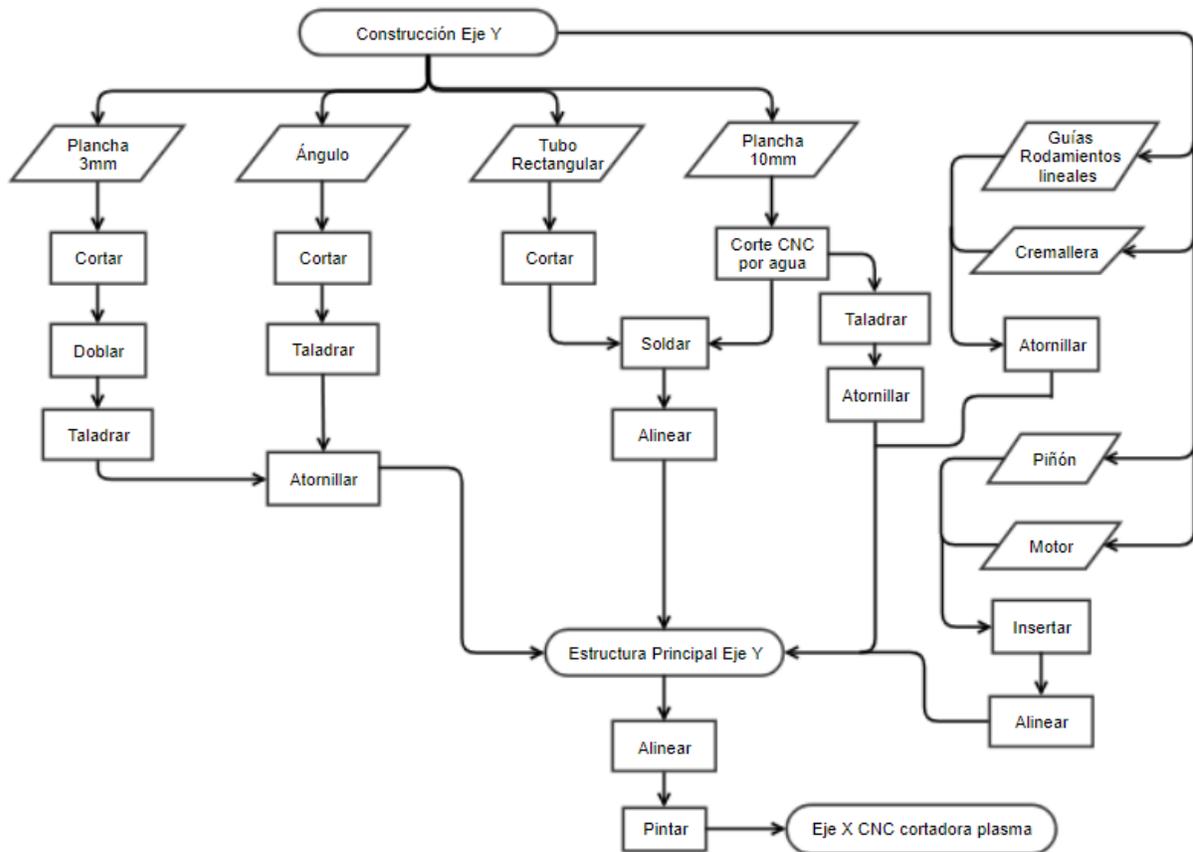


Figura 4. 6. Diagrama de construcción Eje Y.

Para la construcción del Eje Y lo primero que se realiza es su estructura principal, Figura 4.7, en ella se instala las guías lineales de los rodamientos, la cremallera, el motor. La distancia entre el Eje X y el Eje Y debe ser la mínima posible, debido a posibles inestabilidades en su centro de gravedad. Esta distancia se calcula sumando la plancha de más espesor para realizar el corte y el movimiento máximo que se requiere de la antorcha hacia abajo.

Distancia máxima = espesor de la plancha + distancia máxima de corte.

$$\text{Distancia máxima} = 50\text{mm} + 50\text{mm} = 100\text{mm}$$



Figura 4. 7. Estructura principal Eje Y.

4.1.3 CONSTRUCCIÓN EJE Z

La Figura 4.8 muestra el diagrama de construcción del Eje Z. En los Anexos C se observa todos los planos constructivos de este Eje. Los materiales utilizados para el desarrollo son los siguientes:

- Placa 9mm aluminio 6061.

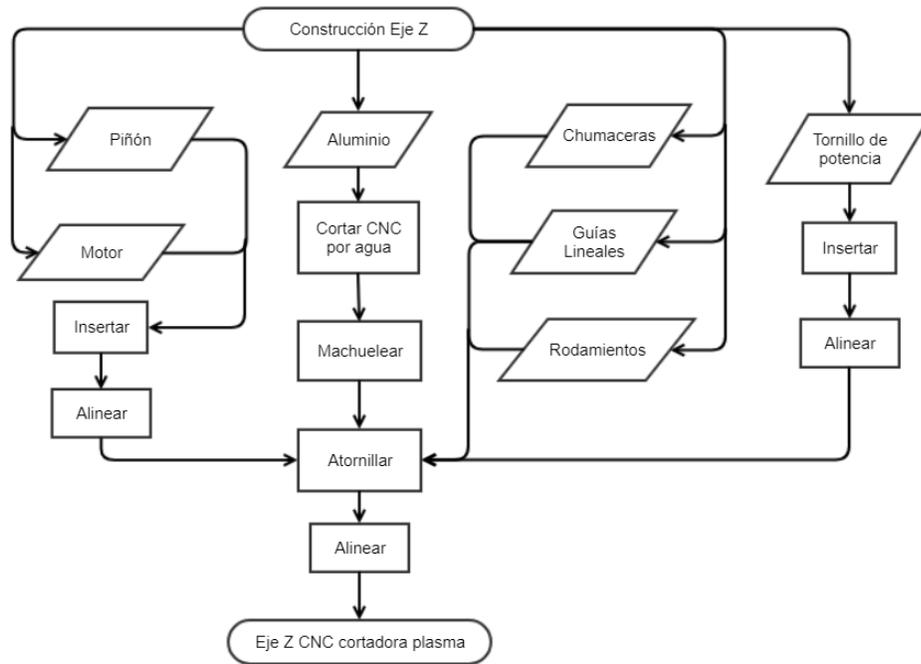


Figura 4. 8. Diagrama de construcción Eje Z.

Las Figuras 4.9, 4.10 y 4.11 a continuación, indican algunos pasos del proceso de construcción del Eje Z.



Figura 4. 9. Instalación chumaceras - tornillo de potencia



Figura 4. 10. Instalación guías lineales - soporte antorcha.

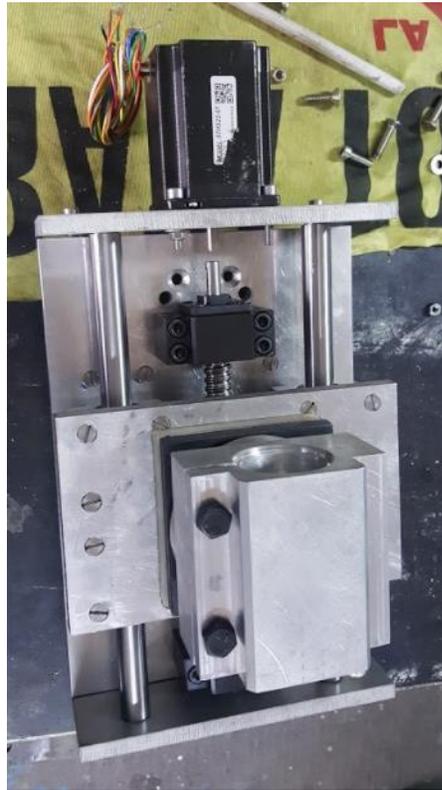


Figura 4. 11. Instalación motor paso a paso.

4.1.4 ENSAMBLAJE DE LA MÁQUINA

Una vez contruidos todos los Ejes de la máquina se procede a ensamblar la misma en su totalidad. La Figura 4.12 muestra el diagrama de proceso del ensamblaje total que se realiza para finalizar la construcción de la cortadora CNC plasma. En la Figura 4.13 se observa la estructura final de la máquina.

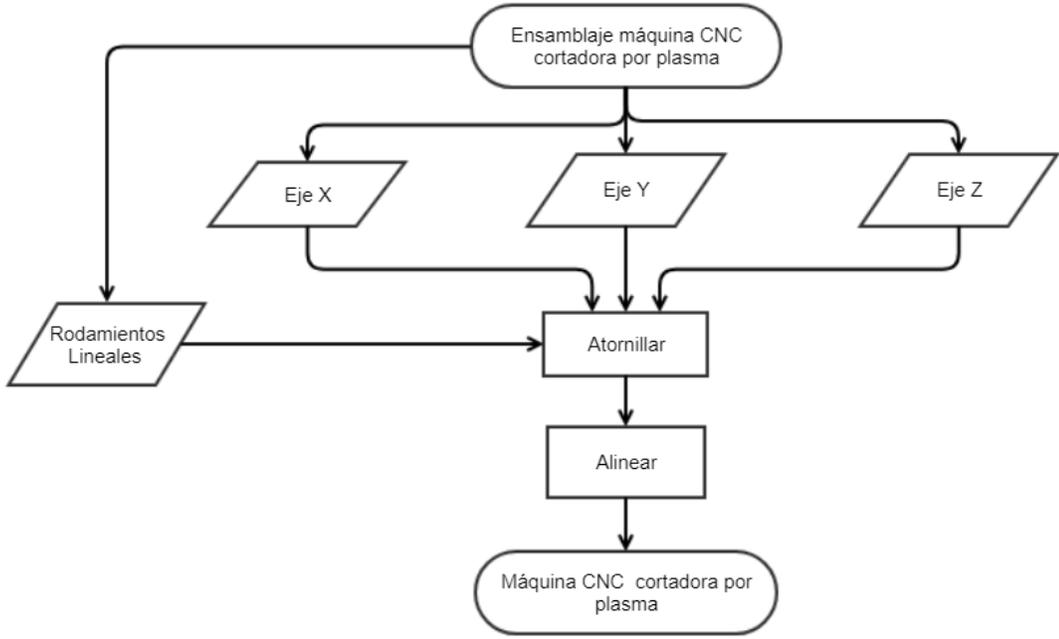


Figura 4. 12. Diagrama de ensamble total máquina CNC cortadora por plasma.



Figura 4. 13. Ensamblaje total CNC cortadora plasma.

4.1.5 CONSTRUCCIÓN CABINA DE CONTROL

La cabina de control es un elemento independiente de la máquina CNC, utilizada para la instalación de los elementos eléctricos de control y de potencia. El diagrama de construcción de dicha cabina se encuentra en la Figura 4.14. En los Anexos C se puede observar todos los planos constructivos de este elemento. Los materiales utilizados en su elaboración se detallan a continuación.

- Plancha galvanizada 1mm acero ASTM A36.
- Acrílico 10mm.

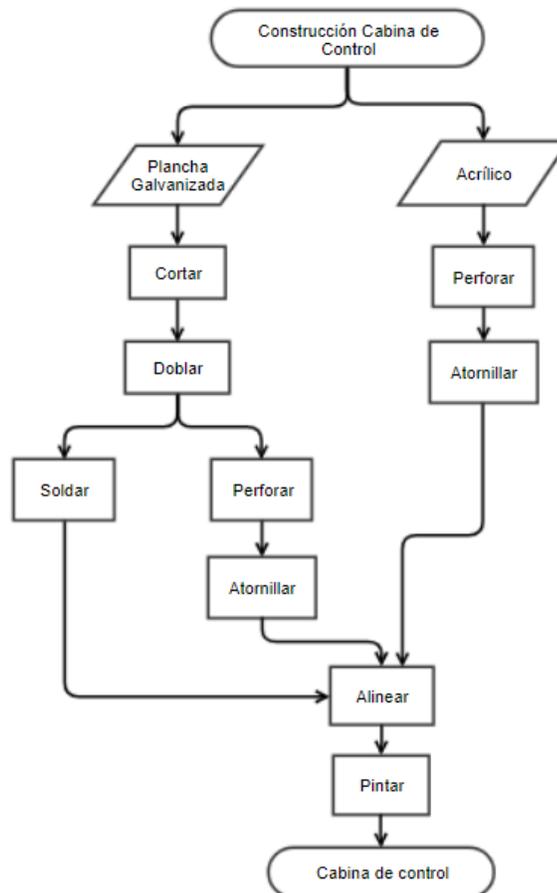


Figura 4. 14. Diagrama de construcción cabina de control.

Como se explicó en la subsección 3.3 los elementos eléctricos van colocados en la parte interna de la cabina sujetos mediante rieles DIN y organizados por canaletas ranuradas. En las Figuras 4.15 y 4.16 se observa el diseño y organización de los elementos internos de la cabina de control.



Figura 4. 15. Cabina de control elementos de potencia.



Figura 4. 16. Cabina de control elementos de control.

La Figura 4.17 muestra la estructura final de la cabina de control.



Figura 4. 17. Cabina de control.

4.2 PRUEBAS DE CORTE: PLANCHA DE ACERO AL CARBONO 1mm

Las pruebas de corte realizadas ayudarán a determinar la precisión de la máquina, la exactitud en sus movimientos, la repetibilidad en los cortes que realiza y la tolerancia que se puede garantizar. A continuación que explica de manera más detallada el significado de cada uno de los términos utilizados.

- Precisión: “proximidad existente entre los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, bajo condiciones específicas.” [25]

- Exactitud: “proximidad existente entre un valor medido y un valor verdadero de un medido.” [25]

Una importante distinción entre exactitud y precisión es que la exactitud puede determinarse con una sola medida, mientras que para evaluar precisión se necesita varias medidas.

- Repetibilidad: “Habilidad de un sistema para realizar la misma acción en forma consistente proporcionando la misma información.” [25]
- Tolerancia: “Rango explícito de valores permitidos.” [25]

Debido a que la CNC cortadora plasma trabaja con un amplio rango de espesores de corte desde 0,5mm hasta 22mm se determinó realizar las pruebas con un espesor de 1mm debido a que estos espesores delgados son críticos debido a la deformación provocada por las altas temperaturas de corte, dificultando el trabajo del controlador de altura además de dificultar el posicionamiento de la pieza de corte y el seteo de la máquina por parte del operador. Otra razón por la que se eligió realizar las pruebas con un espesor de 1mm es el costo, mientras menor sea el espesor menor será el costo de la plancha [26].

Para realizar las pruebas se utilizó una plancha entera de 1220 x 2440 en la cual se realiza 250 cortes de circunferencias con diferentes diámetros, la Tabla 4.1 detalla el número de cortes a realizarse y el diámetro de cada uno de ellos:

Tabla 4. 1. Detalle de cortes de prueba.

Diámetro	Número de Cortes
25mm	50 circunferencias
50mm	50 circunferencias

75mm	50 circunferencias
100mm	50 circunferencias
150mm	50 circunferencias

En la Figura 4.18 se observa las circunferencias cortadas ordenadas y seleccionadas con las medidas de corte especificadas anteriormente.



Figura 4. 18. Cortes de Prueba.

Para la medición de las circunferencias cortadas se utilizará como herramienta de medición un calibrador, las especificaciones técnicas del calibrador se encuentran en la Tabla 4.2.

Tabla 4. 2. Especificaciones técnicas calibre digital Stainless.

Especificaciones Técnicas Calibre digital Stainless	
Rango de material	0 a 150 mm
Resolución	0,1mm
Precisión	+/- 0,2 mm
Batería	1,5 V
Velocidad de medida	<1,5 m/s
Temperatura de trabajo	0 – 40 °C
Peso	200 g
Ancho	40 mm
Largo	235 mm

4.3 RESULTADOS PRUEBAS DE CORTE

4.3.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS CIRCUNFERENCIA DE 20mm

En la Tabla 4.3 a continuación se observa un resumen del resultado de las pruebas de mediciones realizadas para una circunferencia de 20mm donde se encuentra el número de medición, el diámetro requerido, la desviación estándar y el criterio de rechazo de +/- 1mm para circunferencias de 20mm.

Tabla 4. 3. Resultado Pruebas de Circunferencia de 20mm.

Valores promedio resultado circunferencia 20mm.	
Número de mediciones	50
Diámetro	20
Promedio desviación estándar	19,6958
Criterio de rechazo	0,7 / -0,4

Para el análisis de resultados de las mediciones realizadas se utilizó la distribución normal, la media y la desviación estándar. Las cuales permiten analizar de manera más detallada los datos obtenidos proporcionando la tolerancia en cada corte que ofrece la máquina además del rango de repetibilidad.

La ecuación (4.1) permite determinar la media de los resultados obtenidos de las mediciones de los cortes realizados, determinando la tolerancia que la máquina ofrece en cada uno de los cortes.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{N} \quad (4.1)$$

$$Media = 19,6958$$

El resultado de la tolerancia en circunferencia de 20mm es de 0.3024 rango permitido según los objetivos de la máquina, para determinar este valor se utilizó (4.2).

$$Tolerancia = Valor\ real - Media. \quad (4.2)$$

$$Tolerancia = 20 - 19,6958$$

$$\mathbf{Tolerancia = 0,3024}$$

Desviación estándar: Medida de dispersión que nos indica cuánto pueden alejarse los valores respecto al promedio. Es decir, el rango que puede fallar la máquina CNC plasma.

La ecuación (4.3) permite determinar el valor de la desviación estándar.

$$Desviación\ Estándar = \sqrt{\frac{\sum |x - \bar{x}|}{n}} \quad (4.3)$$

$$Desviación\ Estándar = 0.2475$$

A continuación, en la Figura 4.19 se representa la distribución normal junto con los límites de deflexión en las medidas tomadas.

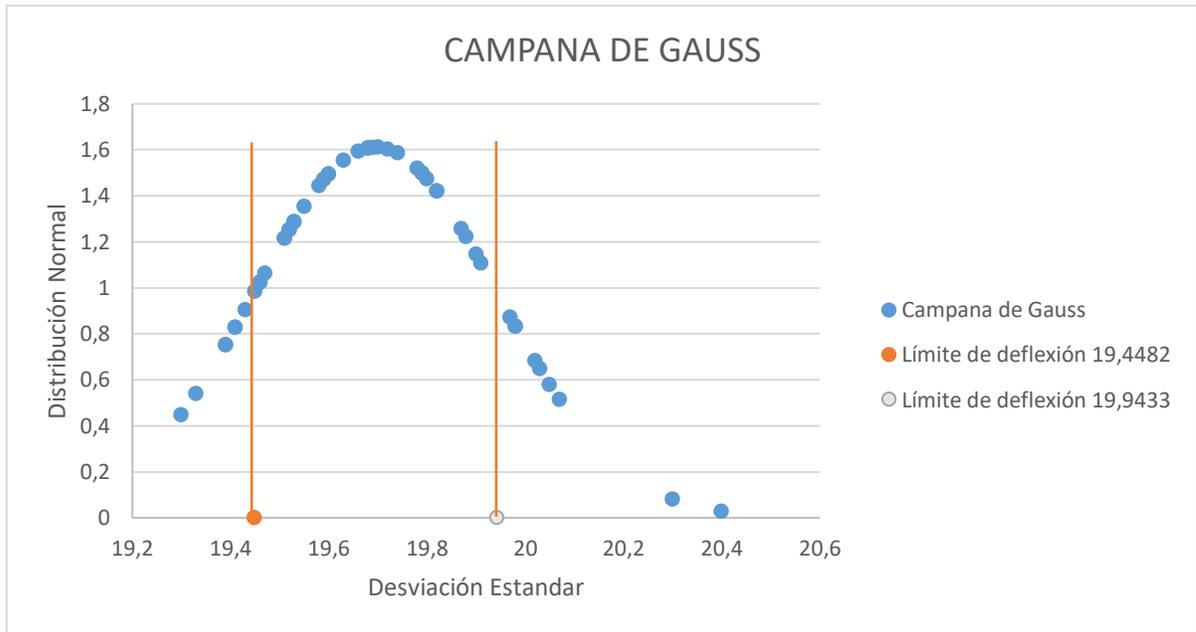


Figura 4. 19. Campana de Gauss Resultado Circunferencia de 20mm.

Los límites de deflexión obtenidos permiten determinar el rango de repetibilidad logrado por la máquina.

$$\text{Rango de repetibilidad} = 19,4482 - 19,9433$$

$$\text{Rango de repetibilidad} = 0,4950$$

El porcentaje de repetibilidad logrado por la máquina en las pruebas de 20mm realizadas es de 68%. En (4.4) se observa el proceso para determinar dicho valor.

$$\% \text{ repetibilidad} = \frac{\text{Número de datos dentro de los límites de deflexión} \cdot 100\%}{\text{Número de datos tomados}} \quad (4.4)$$

$$\% \text{ repetibilidad} = \frac{34 \cdot 100\%}{50} = 68\%$$

4.3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS CIRCUNFERENCIA DE 50mm

En la Tabla 4.4 se observa el resultado de las pruebas de mediciones realizadas para una circunferencia de 50mm.

Tabla 4. 4. Resultado pruebas de circunferencia 50mm.

Valores promedio resultado circunferencia 50mm.	
Número de mediciones	50
Diámetro	50
Promedio desviación estándar	49,8314
Criterio de rechazo	0,7 / -0,37

Para analizar los datos obtenidos de las pruebas en circunferencia de 50mm se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Reemplazando en (4.1), se tiene:

$$Media = 49,8314$$

Reemplazando en (4.2), se tiene:

$$Tolerancia = 50 - 49,8314$$

$$\mathbf{Tolerancia = 0,1686}$$

Reemplazando en (4.3), se tiene:

$$Desviación Estándar = 0,2451$$

A continuación, en la Figura 4.20 representa la distribución normal junto con los límites de deflexión en las medidas tomadas.

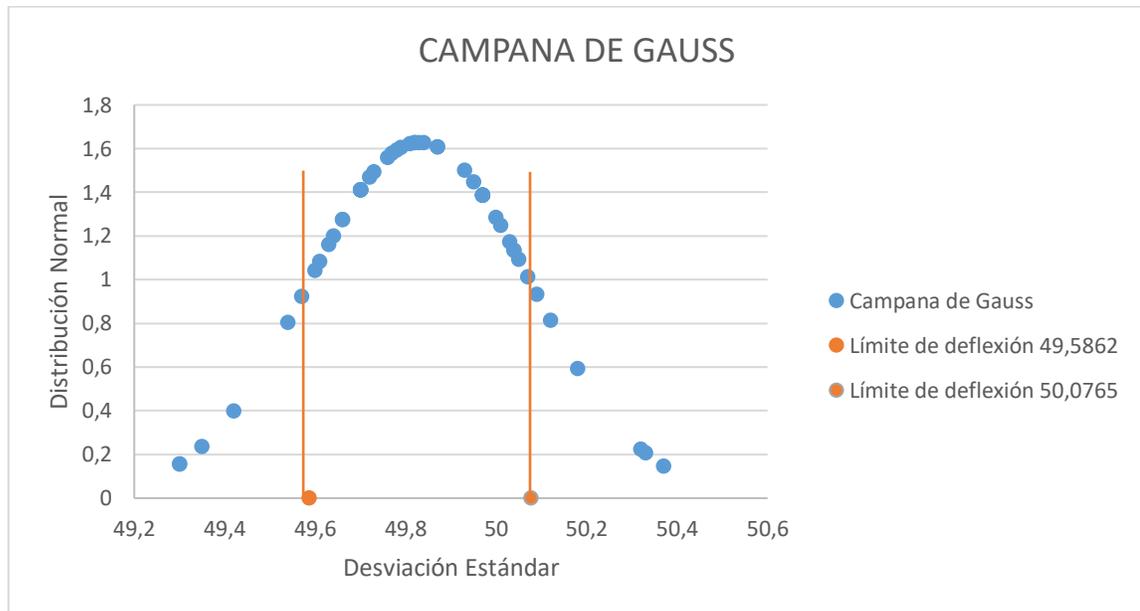


Figura 4. 20. Campana de Gauss Resultado Circunferencia 50mm.

$$\text{Rango de repetibilidad} = 49,5862 - 50,0765$$

$$\text{Rango de repetibilidad} = 0,4902$$

El porcentaje de repetibilidad logrado por la máquina en las pruebas de 50mm realizadas es de 76%, resultado de (4.4).

4.3.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS CIRCUNFERENCIA DE 75mm

En la Tabla 4.5 se observa el resumen del resultado de las pruebas de mediciones realizadas para una circunferencia de 75mm.

Tabla 4. 5. Resultado pruebas de circunferencia 75mm.

Valores promedio resultado circunferencia 75mm.	
Número de mediciones	50
Diámetro	75
Promedio desviación estándar	75,7752
Criterio de rechazo	0,95 / -0,3

Analizando los datos obtenidos de los cortes de prueba realizados, se tiene los siguientes resultados, representados por:

Reemplazando en (4.1), se tiene:

$$Media = 74,7752$$

Reemplazando en (4.2), se tiene:

$$Tolerancia = 75 - 74,7752$$

$$\mathbf{Tolerancia = 0,2248}$$

Reemplazando en (4.3), se tiene:

$$Desviación Estándar = 0,2422$$

A continuación, la Figura 4.21 representa la distribución normal junto con los límites de deflexión en las medidas tomadas.

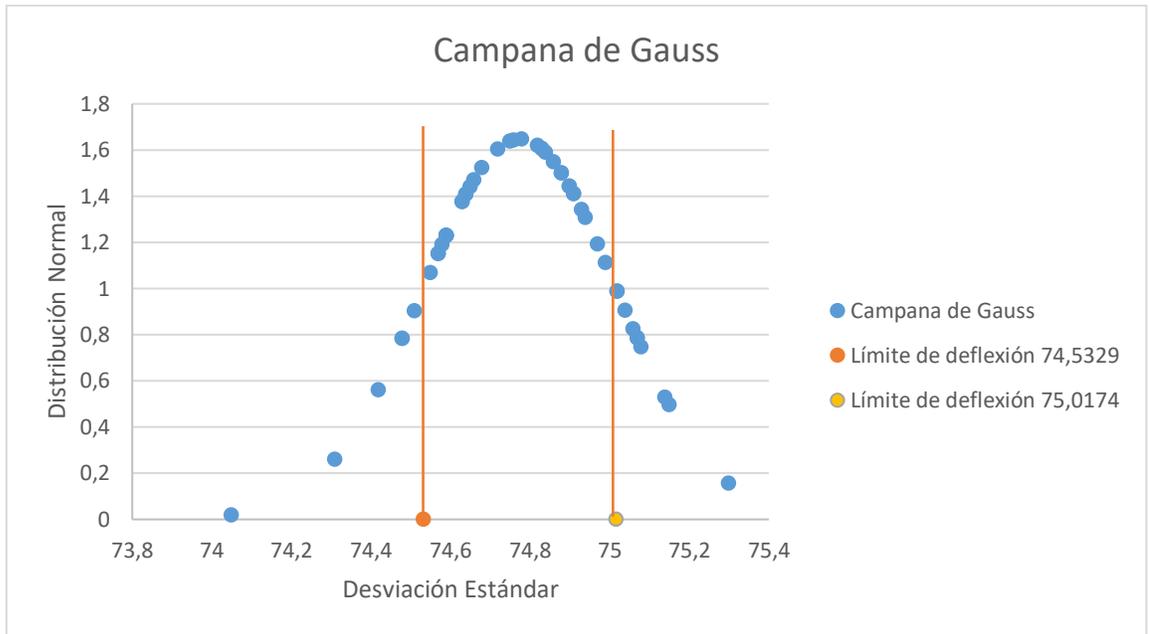


Figura 4. 21. Campana de Gauss Resultado Circunferencia 75mm.

$$\text{Rango de repetibilidad} = 74,5329 - 75,0174$$

$$\text{Rango de repetibilidad} = 0,4844$$

El porcentaje de repetibilidad, representado por (4.4), logrado por la máquina en las pruebas de 75mm realizadas es de 72%.

4.3.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS CIRCUNFERENCIA DE 100mm

En la Tabla 4.6 se observa el resumen del resultado de las pruebas de mediciones realizadas para una circunferencia de 100mm.

Tabla 4. 6. Resultado de pruebas circunferencia 100mm.

Valores promedio resultado circunferencia 100mm.

Número de mediciones	50
Diámetro	100
Promedio desviación estándar	99,9412
Criterio de rechazo	0,53 / -0,7

Para analizar los datos obtenidos de las pruebas de corte en circunferencia de 100mm se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Reemplazando en (4.1), se tiene:

$$Media = 99,9412$$

Reemplazando en (4.2), se tiene:

$$Tolerancia = 100 - 99,94$$

$$Tolerancia = 0,2465$$

Reemplazando en (4.3), se tiene:

$$Desviación Estándar = 0,2482$$

A continuación, en la Figura 4.22 se representa la distribución normal junto con los límites de deflexión en las medidas tomadas.

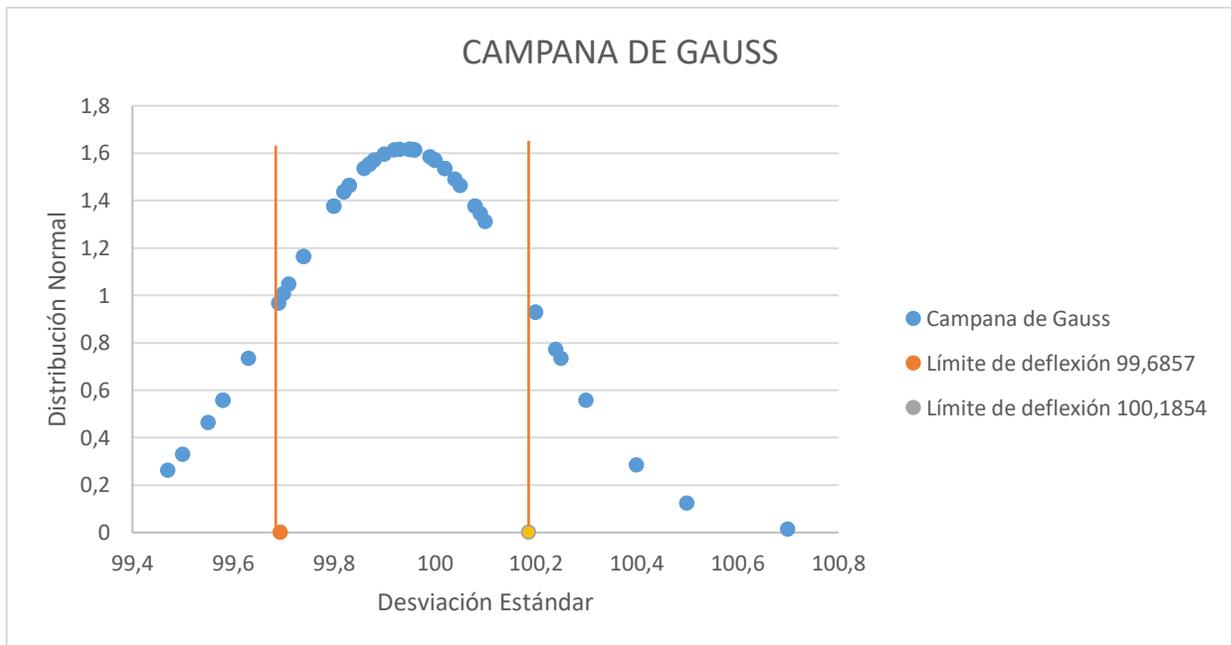


Figura 4. 22. Campana de Gauss Resultado Circunferencia 100mm.

$$\text{Rango de repetibilidad} = 99,6934 - 100,1854$$

$$\text{Rango de repetibilidad} = 0,4931$$

El porcentaje de repetibilidad logrado por la máquina según (4.4), en las pruebas de 100mm realizadas es de 72%.

4.3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS CIRCUNFERENCIA DE 150mm

En la Tabla 4.7 se observa el resultado de las pruebas de mediciones realizadas para una circunferencia de 150mm.

Tabla 4. 7. Resultados Prueba circunferencia 150mm.

Valores promedio resultado circunferencia 150mm.	
Número de mediciones	50
Diámetro	150
Promedio desviación estándar	149.753
Criterio de rechazo	0.75 / -0.7

Analizando los datos obtenidos de los cortes de prueba de circunferencia, se tiene los siguientes resultados, representados por:

Reemplazando en (4.1), se tiene:

$$Media = 149,753$$

Reemplazando en (4.2), se tiene:

$$Tolerancia = 150 - 149,753$$

$$\mathbf{Tolerancia = 0,247}$$

Reemplazando en (4.3), se tiene:

$$Desviación Estandar = 0,2478$$

A continuación, en la Figura 4.23 se representa la distribución normal junto con los límites de deflexión en las medidas tomadas.

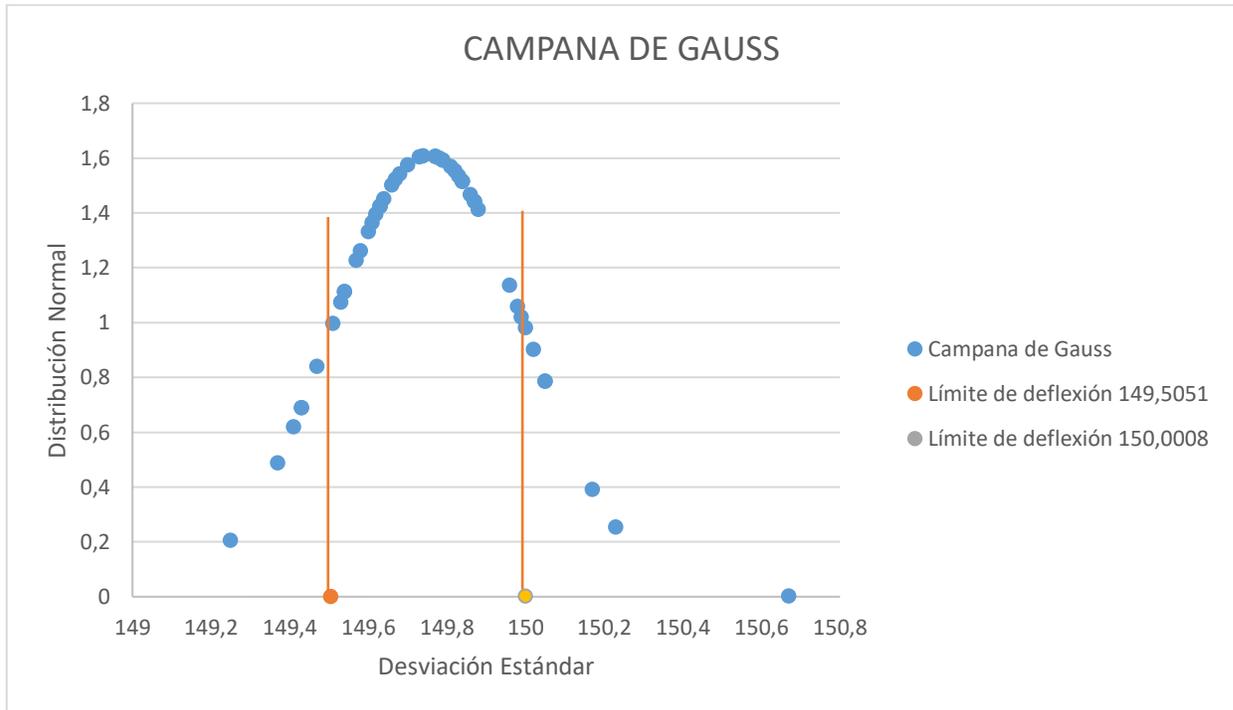


Figura 4. 23. Campana de Gauss Resultado Circunferencia 150mm.

$$\text{Rango de repetibilidad} = 149,5051 - 150,0008$$

$$\text{Rango de repetibilidad} = 0,4956$$

El porcentaje de repetibilidad logrado por la máquina, según (4.4), en las pruebas de 150mm realizadas es de 76%.

4.3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS GENERALES PRUEBAS DE CORTE

Al realizar el análisis de los resultados obtenidos en cuanto a tolerancia y rango de repetibilidad se obtuvo que:

- La tolerancia promedio de la máquina en cortes tiene un rango de 0,2378 debido a los datos obtenidos de cada circunferencia, la Tabla 4.8 contiene los datos analizados:

Tabla 4. 8. Rango Tolerancia.

Circunferencia	Tolerancia
20mm	0,3024 mm
50mm	0,1686 mm
75mm	0,2248 mm
100mm	0,2465 mm
150mm	0,247 mm
Tolerancia	0,2378 mm

- El rango general de repetibilidad de la máquina, la Tabla 4.9 contiene los datos analizados:

Tabla 4. 9. Rango General de Repetibilidad.

Circunferencia	Repetibilidad	% de Repetibilidad
20mm	0,495 mm	68%
50mm	0,4902 mm	76%
75mm	0,4844 mm	72%
100mm	0,4931 mm	72%
150mm	0,4956 mm	76%
Rango de Repetibilidad	0,4916 mm	72,8%

Finalmente, la Figura 4.24 muestra un corte más complejo realizado en la máquina CNC cortadora plasma el cual prueba los rangos de repetibilidad y tolerancia determinados con anterioridad.



Figura 4. 24. Corte complejo CNC cortadora por plasma.

4.4 PRUEBAS FUNCIONAMIENTO DE DISPOSITIVOS SEGURIDAD

La máquina consta de 6 sensores de seguridad, 2 en cada Eje, además de un botón de paro y un pulsador de protección para la antorcha en el Eje Z. La Figura 4.25 muestra la distribución de cada uno de estos elementos.

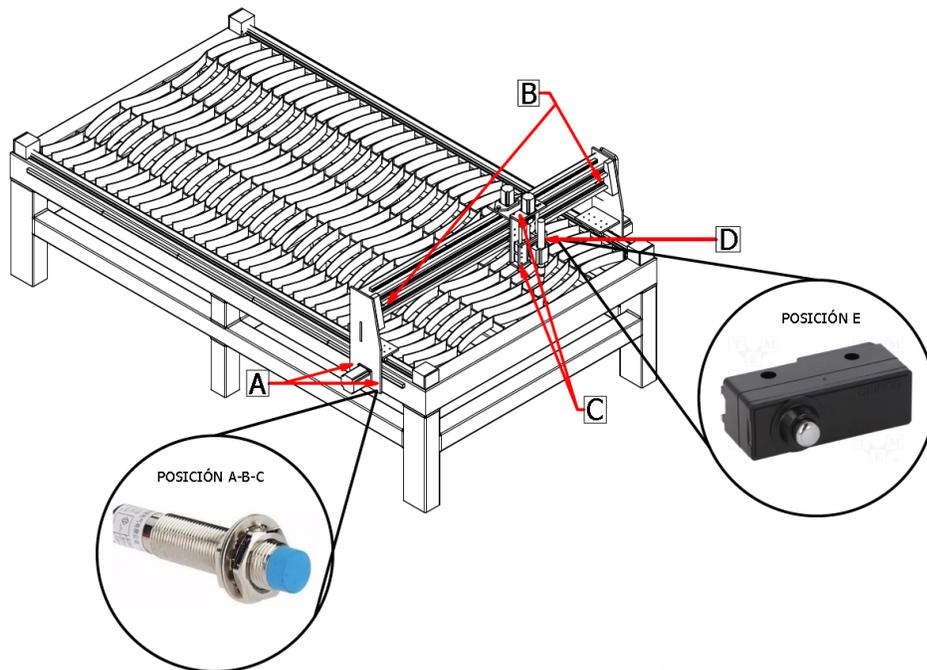


Figura 4. 25. Disposición elementos de seguridad máquina CNC cortadora por plasma.

A continuación, se detalla el funcionamiento de cada uno de los sensores de seguridad con su respectiva señal de alerta en HMI.

4.4.1 SENSORES POSICIÓN A – EJE X

Son los encargados de restringir el movimiento del pórtico de la máquina a lo largo del Eje X, están colocados en el soporte lateral del Eje Y uno a cada lado y tienen su tope de activación en el extremo de la mesa de corte por eso son llamados sensores de posicionamiento del Eje X. Las Figuras 4.26 y 4.27 muestran la posición de dicho sensor y su señal de activación.

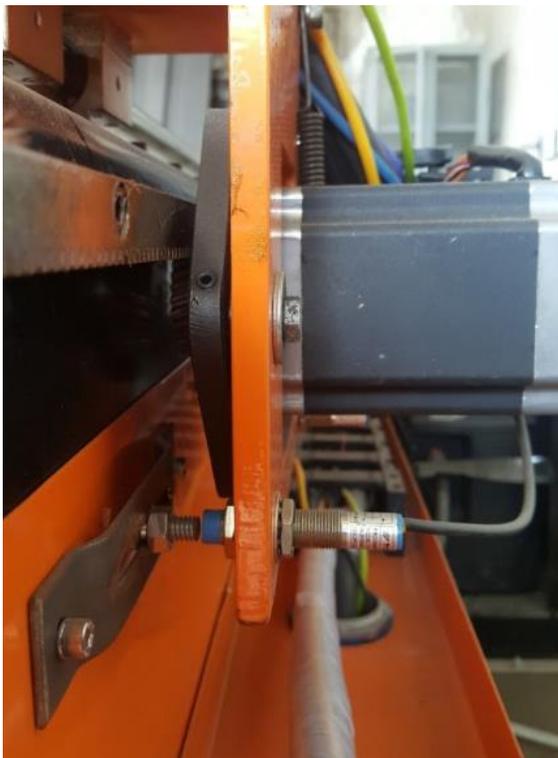


Figura 4. 26. Posicion de sensor Eje X.

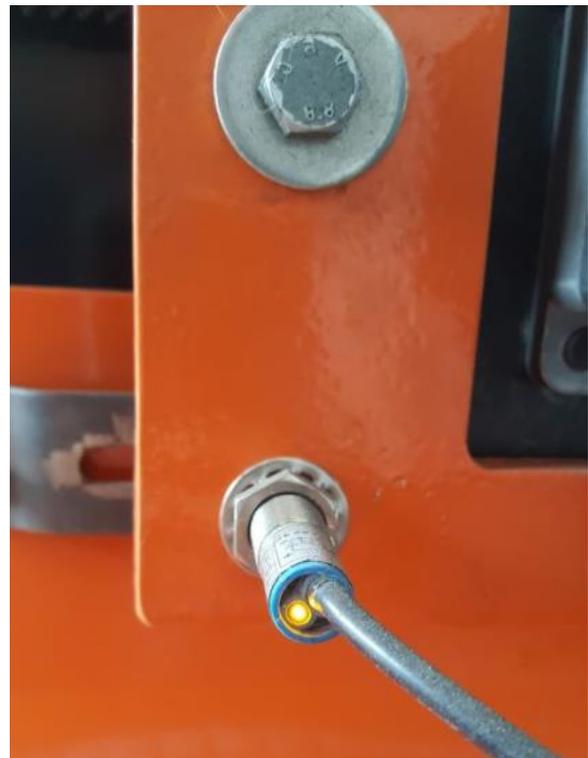


Figura 4. 27. Señal de activación.

Las Figuras 4.28 y 4.29 indican las señales de activación en la HMI y el paro total de todas las funciones de la máquina. El sensor delantero genera una señal *A HOME* y el sensor en la parte posterior la señal *LIMITS*.

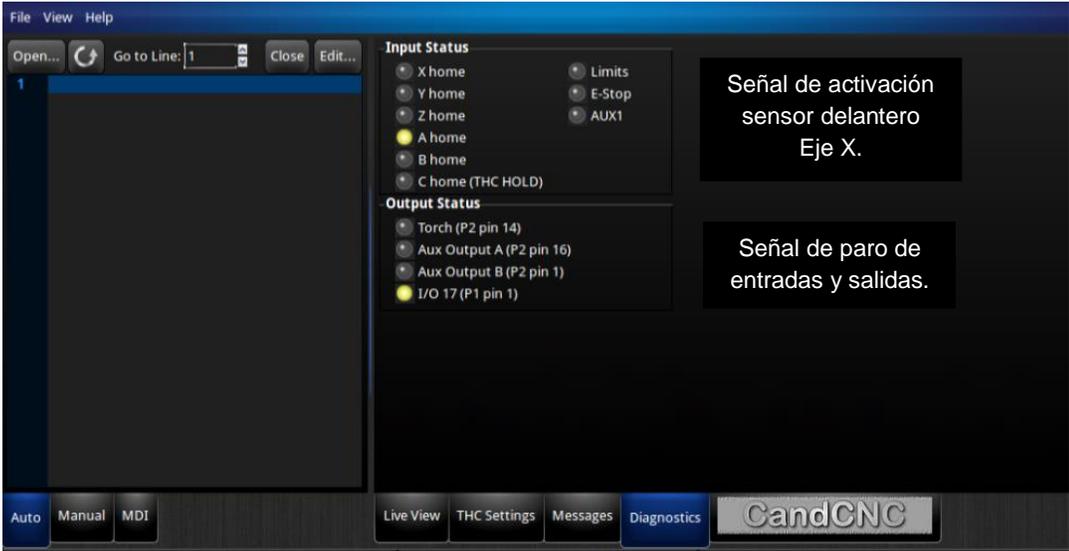


Figura 4. 28. Activación HMI restricción sensor delantero seguridad Eje X.

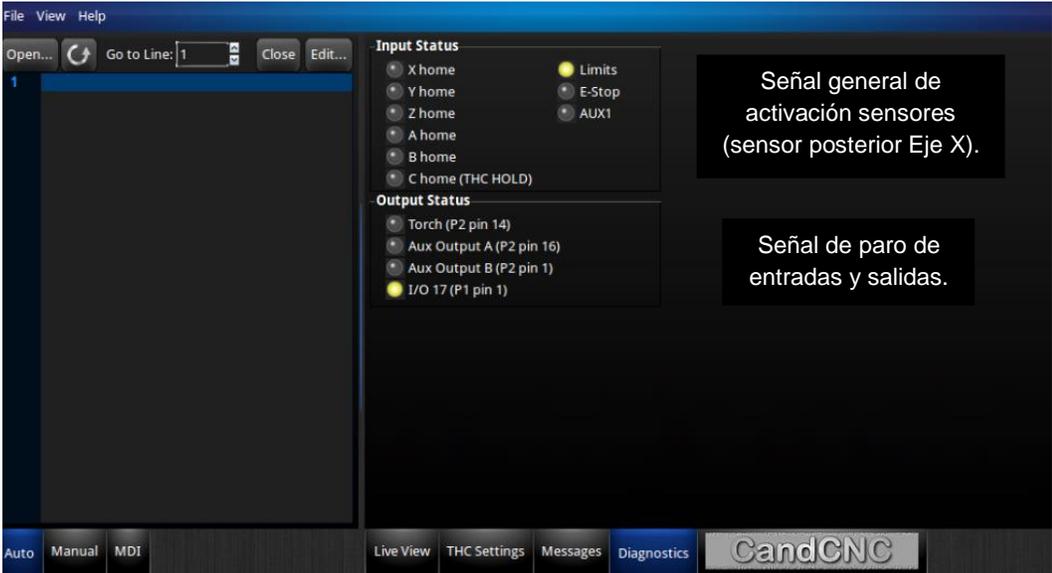


Figura 4. 29. Activación HMI restricción sensor trasero seguridad Eje X.

4.4.2 SENSORES POSICIÓN B - EJE Y

Son los encargados de restringir el movimiento del cabezal del Eje Z de la máquina a lo largo del Eje Y, están colocados en la placa soporte del Eje Z uno a cada lado y tienen su tope de activación en cada extremo del Eje Y; son llamados sensores de posicionamiento del Eje Y. Las Figuras 4.30 y 4.31 muestran la posición de dicho sensor y su señal de activación.



Figura 4. 30. Posición de sensor Eje Y.



Figura 4. 31. Señal mecánica de activación sensor Eje Y.

La Figura 4.32 indica la señal de activación en el HMI y el paro total de todas las funciones de la máquina. El sensor derecho del Eje Y genera la señal de paro general de los sensores “LIMITS” mostrada en la Figura 4.29 y el sensor de la parte izquierda genera una señal *X HOME* Figura 4.32.

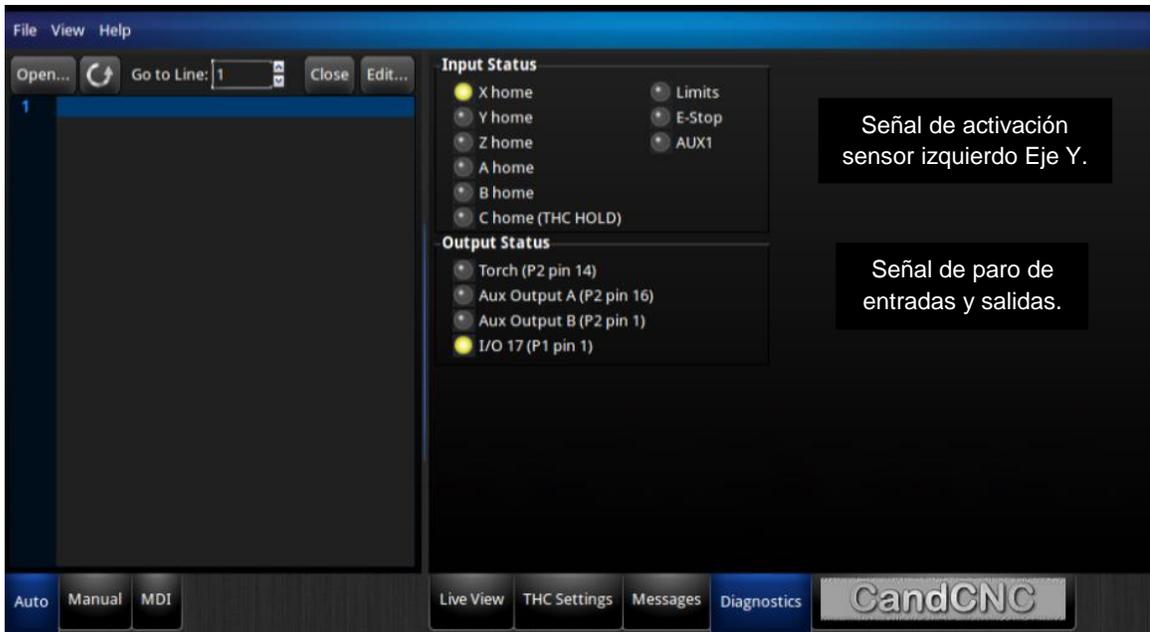


Figura 4. 32. Activación HMI restricción sensor seguridad Eje Y parte izquierda.

4.4.3 SENSORES POSICIÓN C – EJE Z

Son los encargados de restringir el movimiento de la antorcha a lo largo del Eje Z, están colocados en las placas de soporte inferior y superior del mismo Eje uno en cada placa y tienen su tope de activación en los rodamientos de este Eje, son llamados sensores de posicionamiento del Eje Z. La Figura 4.33 muestran la posición de dicho sensor y su señal de activación.



Figura 4. 33. Posicionamiento y activación sensor Eje Z.

La señal de activación que se genera en el HMI tanto para el sensor de la parte inferior como superior se presenta en la Figura 4.29 y es la señal general de activación de sensores.

4.4.4 ACTIVACIÓN BOTÓN DE PARO

Según la norma ISO 13850, la función del botón de parada de emergencia es prevenir situaciones que puedan poner en peligro a las personas cerca de la máquina y a su

operador, además de evitar daños en la máquina o en trabajos en curso o para minimizar los riesgos ya existentes, y ha de activarse con una sola maniobra de una persona.

La posición exacta del botón de paro de la máquina se encuentra descrita de manera detallada en el manual de usuario de la misma y la Figura 4.35 indica la señal de activación en el HMI junto con el paro de todas las funciones de la máquina.

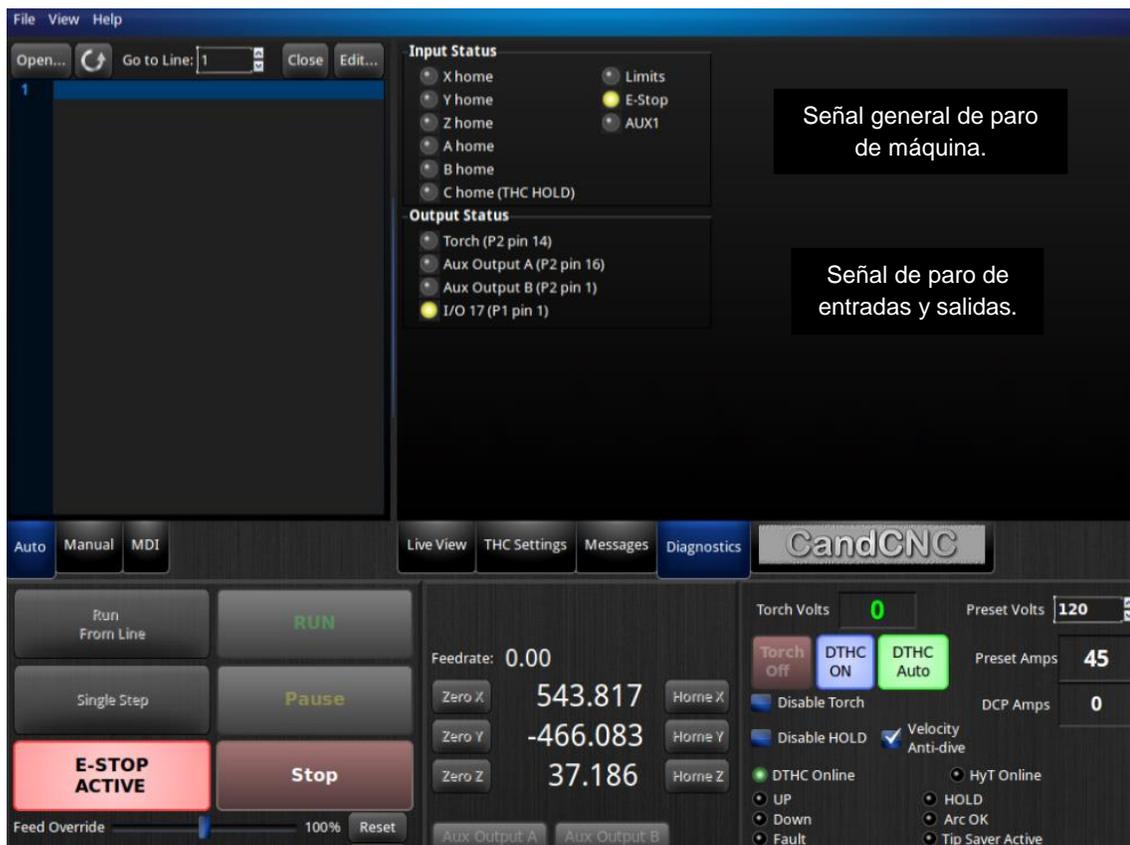


Figura 4. 34. Señal de activación E-STOP.

4.4.5 ACTIVACIÓN DEL SENSOR - PULSADOR DE PROTECCIÓN PARA LA ANTORCHA.

El pulsador de emergencia instalado en la antorcha cumple la función de desactivar la misma una vez esta se haya movido de su posición exacta, además protege al escudo y consumibles de la tobera si por algún motivo el controlador de altura dejó de funcionar y

la antorcha choca con el material a cortar. Otra función que cumple es determinar durante el corte si existe material conductor; si el sensor establece que no existe dicho material inmediatamente genera un mensaje al HMI que activa el sensor de paro. La Figura 4.36 muestra la posición de desactivación dicho sensor en el Eje Z al ser movida la antorcha. La señal que activa este sensor – pulsador es la misma a la Figura 4.35.



Figura 4. 35. Alerta desactivación antorcha.

4.5 CÁLCULO DE COSTOS DE LA MÁQUINA

Para determinar el costo total de la máquina se debe realizar una serie de cálculos los cuales se detallan a continuación.

La Tabla 4.10 detalla los costos de elementos normalizados y suministros, estos elementos son aquellos que no necesitan ningún tipo de manufactura extra y se instalan directamente al mecanismo en construcción. La tabla demuestra que los elementos de mayor costo son dos: el plasma de marca hypertherm, debido a que permite realizar cortes de hasta 25mm de espesor además de ser un plasma de alta definición, y el controlador junto a la PC los cuales son los encargados de controlar y ejecutar el movimiento de todo el sistema. Además, la tabla contiene el costo total de envío que tiene los elementos que son importados desde otros países.

Tabla 4. 10. Costo de elementos normalizados y suministros.

CANTIDAD	DENOMINACIÓN	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
1	CPU Dell Optiplex 755-Controlador-HTC	\$ 1.185,00	\$ 1.185,00
2	Motor Nema 23	\$ 40,00	\$ 80,00
2	Motor Nema 34	\$ 118,00	\$ 236,00
4	Drivers	\$ 129,00	\$ 516,00
1	Fuente de alimentación	\$ 88,00	\$ 88,00
1	Kit de conexión avanzada	\$ 400,00	\$ 400,00
1	Pantalla 19"	\$ 200,00	\$ 200,00
1	Mouse - teclado	\$ 35,00	\$ 35,00
6	Sensores Inductivos	\$ 25,00	\$ 150,00
1	Chumacera BK	\$ 80,00	\$ 80,00
1	Chumacera BF	\$ 45,00	\$ 45,00
1	Tornillo de Potencia 16mm - Tuerca de Bolas	\$ 115,00	\$ 115,00
1	Plasma hypertherm antorcha CNC	\$ 8.500,00	\$ 8.500,00
3	Piñón	\$ 40,00	\$ 120,00
5	Cremallera	\$ 85,00	\$ 425,00
7	Guías Lineales y Rodamientos 20mm - 16mm	\$ 200,00	\$ 1.400,00
2	Eje Rodamientos Lineales 16mm	\$ 6,00	\$ 12,00
3	Cadena de Cables	\$ 170,00	\$ 510,00
1	Material Eléctrico	\$ 600,00	\$ 600,00

1	Envió material	\$ 1.000,00	\$ 1.000,00
	TOTAL		\$ 15.697,00

En la Tabla 4.11 se observa otro calculo que interviene en la máquina CNC y es el costo de material, el cual detalla los materiales utilizados en la construcción y son aquellos a los cuales se debe realizar diversos tipos de manufactura para poder ser utilizados.

Tabla 4. 11. Costos de materiales.

Denominación	Material	Cantidad	Dimensión Estándar	Precio Unitario	Precio Total
Eje Z	Aluminio 6061	1	1,22 x 1,22	\$100,00	\$100,00
Estructura Mesa de Corte	Tubo Rectangular ASTM A500	2	100 x 150 x 4 x 6m	\$115,00	\$230,00
Estructura Mesa de Corte	Tubo Cuadrado ASTM A500	4	100 x 100 x 4 x 6m	\$85,00	\$340,00
Estructura Mesa de Corte	Tubo Cuadrado ASTM A500	2	50 x 50 x 4 x 6m	\$32,00	\$64,00
Cabina de Control - Tapas Mesa de Corte	Plancha ASTM A36 (1MM)	4	1,22 x 2,44	\$23,00	\$92,00
Bandeja de Agua	Plancha ASTM A36 (3MM)	2	1,22 x 2,44	\$65,00	\$130,00
Soportes Laterales Eje Y	Plancha ASTM A36 (10MM)	1	1,22 x 1,22	\$120,00	\$120,00
Estructura Mesa de Corte	Platina ASTM A36 (8MM)	4	6m	\$28,00	\$112,00
			TOTAL		\$ 1.188,00

El costo de la mano de obra y la maquinaria utilizada se detallan en la Tabla 4.12, el valor total depende del tiempo invertido, cuantos operarios estuvieron encargados del trabajo y que tipo de trabajo se realizó.

Tabla 4. 12. Costo de mano de obra y maquinaria.

Denominación	Tiempo	Personas	Precio
Taller mecánico y mano de obra (soldadora, cizalla, dobladora hidráulica, amoladora, taladro, torno)	1 mes	2	\$ 3.000,00

Subcontratación corte CNC agua	1 hora	1	\$ 250,00
Instalación elementos eléctricos y pruebas	2 semanas	1	\$ 1.000,00
		TOTAL	\$ 4.250,00

Una vez determinados y sumados los costos totales de las tablas 4.10, 4.11 y 4.12 se procede a determinar un costo subtotal de la máquina (*TOTAL 1*) en el cual se estima un porcentaje de 10% por diseño de mecatrónico y un 10% a 20% por imprevistos; con el valor de estos porcentajes sumados al *TOTAL 1* se determina el subtotal (*TOTAL 2*) con este valor se calcula el valor total final con un porcentaje de ganancia del 20%. En la Tabla 4.13 se observa los cálculos realizados para determinar el valor total de la máquina.

Tabla 4. 13. Costos Finales Máquina CNC Cortadora Plasma.

DENOMINACIÓN	VALOR
Elementos Normalizados y Suministros	\$ 15.697,00
Costo de Material	\$ 1.188,00
Costo Mano de obra	\$ 4.250,00
TOTAL 1	\$ 21.135,00
Diseño Mecatrónico 15%	\$ 3.170,25
Herramientas / imprevistos (10%-20%)	\$ 2.113,50
TOTAL 2	\$ 26.418,75
Ganancia 20%	\$ 5.283,75
VALOR FINAL TOTAL	\$ 31.702,50

El valor final de la máquina de \$30.434,40 es un valor competitivo comparado con máquinas CNC plasma importadas, ya que esta máquina puede cortar espesores de hasta 25mm además de que todos sus elementos son americanos con garantía y posee un software de control propietario.

CONCLUSIONES

- Para generar soluciones eficientes en el diseño y construcción de la máquina CNC cortadora plasma es necesario utilizar herramientas tales como QFD, análisis funcional y matriz morfológica; mismos que permiten estudiar de forma detallada los procesos de ingeniería necesarios para el desarrollo de un producto.
- La máquina CNC cortadora plasma está compuesta en general por 4 motores, dos Nema 23 para los Ejes Y y Z respectivamente y dos Nema 34 para el Eje X; la transmisión utilizada para el Eje Z es un tornillo de potencia de 300mm junto con dos guías redondas de 16mm y 4 rodamientos lineales de 16mm, para el Eje Y y X se utilizó la transmisión de piñón – cremallera módulo 1.5 junto con guías redondas y rodamientos lineales de 16mm y 20mm respectivamente, la máquina posee una bandeja de agua para el control de emisiones y desechos en la parte inferior de la zona de corte junto con dos válvula de bola las cuales permiten un vaciado y llenado semiautomático. El control de la máquina se encuentra en una cabina de control independiente en la parte inferior de la misma se encuentran todas las conexiones y elementos electrónicos, y en la parte superior el HMI.
- La máquina CNC cortadora por plasma logró cortes precisos con una tolerancia objetivo de +/- 1mm, para planchas de hasta 22mm de espesor en la perforación y hasta 32mm con un inicio predefinido.
- El diseño de la máquina y los cálculos matemáticos realizados junto con su simulación permiten determinar un área de trabajo para una plancha entera estándar de 1220 x 2440 mm con un espesor máximo de hasta 50mm, el área de trabajo posee una holgura de 60 mm a cada lado por precaución, posicionamiento, seguridad y confort del operario.
- El software seleccionado SheetCam cumple con las expectativas y requerimientos tanto de precisión como de transmisión de datos para el manejo de la máquina.

- La transmisión seleccionada de piñón – cremallera, así como las guías redondas de desplazamiento desempeñan su trabajo de manera óptima sin trabas en su movimiento y en el caso del piñón sin salto de pasos logrando movilizar los Ejes de la máquina sin sobrecargar los motores.
- Las herramientas computacionales como Autodesk Inventor 2013 permitieron validar los cálculos y diseños matemáticos mediante comparaciones de los resultados logrados, además de permitir realizar cambios y ajustes en periodos cortos de tiempo.
- Los factores de seguridad utilizados para la selección y análisis a los elementos que componen la máquina permitieron comprobar su utilidad exponiendo la resistencia de los mismos a las condiciones de diseño y trabajo en que se opera, mediante la simulación en el software de diseño.
- La implementación de la tecnología THC (control de altura para la antorcha plasma), genera grandes ventajas tales como optimización de tiempo de corte además del ajuste continuo y automático del voltaje de arco de corte permitiendo así reducir el desgaste de los consumibles.
- Con los resultados obtenidos de las pruebas realizadas se pudo concluir que la máquina CNC cortadora de plasma tiene una tolerancia de 0,2378 en los cortes además de un rango de repetibilidad de 0,4916 con un porcentaje de repetibilidad de 72,8%.

RECOMENDACIONES

- Para evitar una excesiva oxidación y desgaste de los consumibles, el daño de la antorcha además que se reduzca la velocidad y la calidad de corte; la instalación del aire comprimido no debe contener humedad y aceite por lo que se recomienda utilizar un filtro secador.
- Los elementos de transmisión tales como tornillo de potencia, piñón – cremallera y rodamientos lineales necesitan una lubricación, mantenimiento y revisión cada 15 días de acuerdo con las recomendaciones de cada uno de los fabricantes.
- El mantenimiento de las bandejas de agua depende del desperdicio de corte que caigan en ellas, mientras más sea el desperdicio más rápido será su mantenimiento; depende en gran medida de la observación y criterio del operador. Según las pruebas realizadas y el uso de la máquina el tiempo máximo de mantenimiento es de 30 días.
- La operación de la máquina CNC cortadora plasma necesita de una capacitación previa a los operarios, para que conozcan el funcionamiento de la misma y además para tomar en cuenta todas las precauciones al ser una máquina de corte.
- Para que el software CAM y el plasma funcionen de manera óptima en conjunto es necesario seleccionar de forma correcta las siguientes especificaciones tipo de material a cortar, espesor del material, calidad de corte deseada, presión del gas (o rango de flujo) y velocidad de corte.
- Frente a un problema con un elemento en específico de la máquina CNC y en el caso que el manual de usuario no satisfaga todas las necesidades de información requeridas, se recomienda recurrir a los manuales técnicos propios de los fabricantes de dichos componentes.

- Los parámetros de selección tales como: el tipo de boquilla a utilizar, parámetro de separación entre la boquilla y la plancha de corte, sobremedida en los gráficos CAD, voltajes y corriente de corte, etc. Se seleccionan en tablas realizadas por el fabricante del plasma utilizado, en este caso hypertherm, los fabricantes proporcionan estos datos después de varias pruebas estrictas de funcionamiento en sus sistemas de corte. Aunque es deber del operador determinar si para su sistema de corte, estos datos son los correctos; en el caso de esta máquina estos parámetros sirven perfectamente.
- Para la nivelación de los mecanismos de transmisión, cremallera y guías lineales, se utilizó una platina rectificadora de fábrica con una tolerancia de 0.1 mm la cual permite de una manera fácil nivelar dichos elementos, sin la necesidad de utilizar herramientas de nivel costosas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Y. Altintas, "Design and Analysis of CNC Systems" in *Manufacturing Automation*, Vancouver, Canada: ScienceDirect, 2012.
- [2] A. Overby, "The Physical Architecture" in *CNC Machining Handbook*, San Francisco, Estados Unidos: Mc Graw Hill, 2010.
- [3] J. Floyd y P. Hood, "Build your Own CNC Machine", Apress Ed. Miami, Estados Unidos: MIT Press, 2010.
- [4] F. Yáñez, "Diseño y Construcción de un sistema automático de corte por plasma mediante control numérico computarizado CNC", Pregrado, Dep. Elect., Escuela Politécnica del Ejército, Latacunga, Ecuador, 2007.

- [5] F. Hurtado, "Diseño y Construcción de una máquina de control numérico por corte CO2 láser de 40 Watts para acrílico de hasta 4mm", Pregrado, Dep. Mect., Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador, 2014.
- [6] Hypertherm. Inc, "Historia, desarrollos y Avances tecnología plasma" Hanover NH Ed. New Hampshire, Estados Unidos: Wiley, 2011.
- [7] A. Nájar, "British Broadcasting Corporation", BBC. Cuáles son los países latinoamericanos que más exportan e invierten en el exterior, pp 31-43.Oct, 2015.
- [8] NBS. Inc, Catálogo de Sistema de Guiado Lineal, Barcelona, España, 2012.
- [9] J. K. N. Richard G. Budynas, "Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley", México D. F.: McGraw-Hill Interamericana, Octava, Ed. 2008.
- [10] R. L. Mott, Diseño de Elementos de Máquinas, México D. F.: University of Dayton, Pearson Educación, Cuarta, Ed. 2006.
- [11] KOOM, Transmisiones por cremallera piñón, Estados Unidos, 2016.
- [12] M. Reinoso, "Diseño, construcción, programación de software y protocolo de transferencia de datos de una mesa de corte CNC por plasma a ser usada en el corte de planchas de acero inoxidable", Pregrado, Dep. Elect., Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador, 2012.
- [13] H. Zhang y J. Xu, G. Wang, "Optimization of plasma deposition manufacturing parameters using a hybrid ANN-GAs method", Plasma Science, Los Angeles, CA, Sci. Rep. 73, Aug. 2003.

- [14] Y. Li, Q. Liu, J. Xiong y J. Wang, "Research on data-sharing and intelligent CNC machining system", Mechatronics and Automation (ICMA), Univ. Texas, Austin: Nov. 2015.
- [15] J. Xing y W. T. Sun, "The design and implementation of CNC system based on the circular buffer", System Science and Engineering (ICSSE), Univ. Texas, Austin, Feb. 2012.
- [16] IPAC, Catálogo de Acero IPAC, Manta.
- [17] E. Real, "Sistema de posicionamiento de amplia carrera para corte por plasma usando CAD/CAM", Maestría, Dep. Elect., Instituto Politécnico Nacional, México, 2013.
- [18] V. M. Faires, Diseño de Elementos de Máquinas. México: Editorial Limusa, 1995.
- [19] Leadshine. Inc, Manual del Sistema Leadshine, California, Estados Unidos, 2011.
- [20] R. L. Norton, "Diseño de Máquinas". México: Prentice-Hall (Pearson), 1999.
- [21] T. H. Lambert, "Effects of Variations in the Screw Thread Coefficient of Friction on Clamping Forces of Bolted Connections" Nueva York: 1962. pp. 401.
- [22] STECK, *Catálogo General Productos*, Sao Paolo. Brasil, 2013.
- [23] SheetCAM, <<SheetCam>>, 2013. [En línea]. Available: <http://www.sheetcam.com/>.
- [24] CandCNC, <<CandCNC>>, 2008. [En línea]. Available: <https://www.candcnc.com/>.
- [25] J. E. Burns, P. J. Champion y A. Williams, Error and uncertainty. Metrologia, Los Angeles, Ca. Dic. 1973. pp 101- 102.

[26] ISO, ISO 17123-3, ISO, 2001.

[27] ISO, ISO 17123-4, ISO, 2001.

[28] D. C. Montgomery, Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons, Texas, Estados Unidos, 2017.