



ESPE

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

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

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CORTADORA
POR PLASMA DE TRES EJES CON CAMA DE AGUA
MEDIANTE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO PARA
EL LABORATORIO CNC**

**AUTORES: SANDRA MARICELA MOLINA MOLINA
CARLOS DAVID TERÁN VACA**

DIRECTOR: ING. FAUSTO VINICIO ACUÑA COELLO

LATACUNGA

2017



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERIA EN MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CORTADORA POR PLASMA DE TRES EJES CON CAMA DE AGUA MEDIANTE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO PARA EL LABORATORIO CNC”, realizado por los señores SANDRA MARICELA MOLINA MOLINA y CARLOS DAVID TERÁN VACA, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores SANDRA MARICELA MOLINA MOLINA para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 24 de Febrero del 2017

ING. FAUSTO VINICIO ACUÑA COELLO
DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERIA EN MECATRÓNICA**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, SANDRA MARICELA MOLINA MOLINA Y CARLOS DAVID TERÁN VACA, con cédulas de identidad N° 0503618217 y N°0401515622 respectivamente, declaramos que este trabajo de titulación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CORTADORA POR PLASMA DE TRES EJES CON CAMA DE AGUA MEDIANTE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO PARA EL LABORATORIO CNC”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 24 de Febrero del 2017

SANDRA MARICELA MOLINA MOLINA
C.C.: 0503618217

CARLOS DAVID TERÁN VACA
C.C.: 0401515622



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERIA EN MECATRÓNICA**

AUTORIZACIÓN

Nosotros, SANDRA MARICELA MOLINA MOLINA Y CARLOS DAVID TERÁN VACA, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en el repositorio institucional el trabajo de titulación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CORTADORA POR PLASMA DE TRES EJES CON CAMA DE AGUA MEDIANTE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO PARA EL LABORATORIO CNC” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 24 de Febrero del 2017

SANDRA MARICELA MOLINA MOLINA
C.C.: 0503618217

CARLOS DAVID TERÁN VACA
C.C.: 0401515622

DEDICATORIA

Dedico mi trabajo de titulación a Dios, quién es el escritor de cada una de las páginas de mi vida y a la virgen Santísima quién día a día me cubre con su manto y me llena de bendiciones.

Sandra

DEDICATORIA

Dedico la culminación de este proyecto a mis abuelitas Bachita y Fide, siempre estarán en mi corazón y mis pensamientos, sé que me están cuidando donde quiera que estén.

De igual manera le dedico a mi Sammy, quien llena de alegría a mi vida.

Agradezco a mi padre, quien siempre ha sido un ejemplo de superación entrega y amor incondicional, a mi madre quien siempre me ha apoyado a pesar de mis errores, a Jorge por estar siempre a mi lado en los momentos más difíciles y a Andresito, por siempre escucharme, los amo demasiado a todos.

De igual manera a Sofi, una mujer maravillosa que me ha ayudado a superarme día a día, te amo negrita.

Carlos

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de todo corazón al ingeniero Fausto Vinicio Acuña, sin su ayuda incondicional, entrega y paciencia hacia nosotros, no hubiese sido posible la realización de este proyecto, adicionalmente a todas quienes de alguna manera han aportado en nuestra tesis.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
ÍNDICE DE TABLAS	xvi
RESUMEN	xviii
SUMMARY	xix

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	1
1.3. Estudio de cortadoras por plasma CNC.....	2
1.3.1. Diseño y construcción de un sistema para corte por plasma, usando técnicas de control numérico computarizado, Artiga René, Bolaños Gerardo, Martínez Abner, Reyes Erick; Universidad de El Salvador, enero 2015.....	3
1.3.2. Mesa de corte térmico MEGACORD, WELD-RAF, Buenos Aires – Argentina, 2013.....	4
1.3.3. Routers CNC semi-industriales, PROCAM, México, 2015.....	5
1.3.4. Cortadora por plasma, SOLAR1, Estados Unidos, 2015.....	5
1.3.5. KOIKE ARANSON, Arcade- EE. UU, 2015.....	6
1.3.6. KEMPER, Vreden-Alemania, 2015.....	7
1.4. Tecnología de máquinas CNC en el Ecuador	8
1.4.1. 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, Reinoso Martín, Universidad San Francisco, Quito, diciembre 2012.....	8

1.4.2. Mejoramiento de los parámetros de trabajo para una máquina de corte por plasma y oxiacetilénica tipo cnc – 4000 marca hugong welder, Calupíña Cristián, Oña Mauricio; Escuela Politécnica Nacional, Quito, Octubre - 2012.....	9
1.4.3. Diseño e implementación de un sistema de control numérico computarizado de corte por plasma para la empresa sermatex, 2010, Pérez Andrés; Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, enero – 2012.....	10
1.4.4. Diseño y construcción de un sistema automático de corte por plasma mediante control numérico computarizado cnc. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, Latacunga, 2007.....	11
1.5. El plasma	12
1.6. Formación del chorro de plasma.....	12
1.7. Aplicaciones de corte por plasma	12
1.8. Rangos de operación de la cortadora de plasma Hypertherm Powermax 1000	13
1.9. Equipo de un sistema básico de corte por plasma.....	13
1.10. Mesas de corte	14
1.10.1. Tipos de mesas de corte.....	14
1.11. Sistemas para reducción de polución	15
1.11.1. Sistemas basados en aspiración.....	15
1.11.2. Sistemas basados en agua.....	15
1.12. Tipos de transmisiones para cortadora por plasma CNC.....	15
1.12.1. Transmisión por piñón–cremallera.....	16
1.12.2. Transmisión por husillo de bolas.....	16
1.12.3. Transmisión por cadena.....	16
1.13. Actuadores.....	17
1.13.1. Motores a pasos.....	17
a. Aplicaciones.....	17
1.13.2. Servomotores.....	18
a. Funcionamiento	18
b. Aplicaciones.....	19
1.14. Finales de Carrera	19

1.14.1. Sensores Inductivos.....	19
1.14.2. Sensores Capacitivos.....	20
1.14.3. Sensores Mecánicos.....	20
1.15. Control Numérico Computarizado (CNC).....	20
1.15.1. Programación de máquinas de CNC con códigos G&M.....	20
1.16. Sistemas CAD/CAM.....	21
1.17. Controlador CNC	22
1.17.1. Controlador CNC Hypertherm EDGE Pro.....	22
1.17.2. Controlador ADTECH ADT-HC4500.....	22
1.17.3. Controlador CNC MISNCO SF-2012.....	23
1.18. Control de altura de la antorcha (THC)	24
1.18.1. Controlador Hypertherm ArcGlide.....	24
1.18.2. Controlador XPTHC-300 II.....	25
1.18.3. Controlador SH-HC30.....	25
1.18.4. Controlador ADTECH SHEZHEN HCA 1002.....	26
1.19. Resumen.....	26

CAPÍTULO II

DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO	27
2.1. Estado actual del laboratorio CNC de la universidad.....	27
2.2. Alternativa de solución	27
2.3. Parámetros de diseño	28
2.3.1. Dimensiones de la plancha.....	28
2.3.2. Velocidad de avance.....	29
2.3.3. Tipos de mesa de corte.....	29
2.3.4. Material de la estructura.....	30
2.3.5. Mecanismo de reducción de polución:.....	30
2.3.6. Transmisión.....	31
2.3.7. Tipo de motor.....	31
2.3.8. Finales de Carrera.....	32
2.3.9. Controlador de 3 ejes.....	33
2.3.10. Control de altura de la antorcha (THC).....	34
2.4. Diseño del Sistema Mecánico.....	35

2.5.	Diseño del Tornillo sin fin para el tercer eje (Z).....	42
2.6.	Cálculo de la cadena de transmisión y piñones	45
2.7.	Cálculos para la selección de los Motores “X” y “Y”	48
2.7.1.	Cálculos para el motor del eje “X”	48
2.7.2.	Cálculos para el motor del eje “Y”	50
2.8.	Análisis CAE	52
2.8.1.	Análisis en la viga superior de la estructura principal.....	52
2.8.2.	Análisis de la estructura principal.....	53
2.8.3.	Análisis en el pórtico.....	55
2.8.4.	Análisis del eje de transmisión.....	56
2.9.	Selección de motores y driver	58
2.10.	Sistema de control	62
2.10.1.	Controlador CNC ADTECH HC-4500.....	62
a.	Puerto XS3.....	62
b.	Puerto XS5.....	63
c.	Puerto XS6.....	64
2.10.2.	Control de altura Microstep SH-HC30.....	66
2.10.3.	Configuración del sistema de control.....	66
a.	Calibración de motores	66
b.	Configuración del controlador HC-4500	68
b.1.	Parámetros de corte del controlador HC-4500.....	71
c.	Configuración del THC Microstep SH-HC30	72
c.1.	Parámetros de Control	73
2.11.	Programación del corte	74
2.11.1.	Creación Código G y M en Software Sheetcam.....	74
2.12.	Sistema de corte Hypertherm Powermax1000.....	82
2.12.1.	Antorcha.....	83
CAPÍTULO III		
	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO	85
3.1.	Equipo y herramientas para la construcción	85
3.2.	Costos y mano de obra	86

3.3.	Costo-beneficio de la cortadora por plasma CNC.....	89
3.3.1.	Beneficio de la cortadora por plasma CNC.....	89

CAPÍTULO IV

	PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	91
4.2.	Pruebas Mecánicas.....	91
4.2.1.	Comportamiento de los ejes.....	95
a.	Precisión	95
4.2.2.	Área útil de trabajo.....	98
4.3.	Características del sistema mecatrónico.....	99
4.3.1.	Características Mecánicas.....	99
4.3.2.	Características Estructurales.....	99
4.3.3.	Características Dinámicas.....	100
4.3.4.	Características de Corte.....	100
4.3.5.	Características eléctricas.....	100
4.4.	Ciclo de trabajo	100
4.5.	Pruebas de corte en Acero al Carbono	101
4.5.1.	Pruebas en Cuadrados.....	101
4.5.2.	Pruebas en Círculos.....	103

CAPÍTULO V

	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
5.1.	Conclusiones	105
5.2.	Recomendaciones	106
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
	ANEXOS.....	111

Anexo 1 (a)	Rangos de velocidad y espesor de la Cortadora Hypertherm Powermax 1000 a 40 A
Anexo 1 (b)	Rangos de velocidad y espesor de la Cortadora Hypertherm Powermax 1000 a 60 A
Anexo 1 (c)	Rangos de velocidades del controlador HC-4500
Anexo 2	Catálogo de planchas de acero
Anexo 3	Catálogo de tubos cuadrados
Anexo 4	Dimensiones de roscas trapecoidales DIN
Anexo 5:	Catálogo de cadenas
Anexo 6	Tamaños de cadenas de rodillos

- Anexo 7: Catálogo de piñón N°35 con paso 3/8"
- Anexo 8: Dimensiones de motores NEMA
 - 8.1 NEMA 17
 - 8.2 NEMA 23
 - 8.3 NEMA 34
- Anexo 9: Catálogo de motores a paso NEMA 17
- Anexo 10 Catálogo de motores a paso NEMA 23
- Anexo 11 Catálogo de motores a paso NEMA 34
- Anexo 12 Planos Mecánicos
- Anexo 13 Ciclo de trabajo de la cortadora Hypertherm Powermax 1000

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura de la mesa	3
Figura 2: Mesa de Corte Térmico MEGACORD	4
Figura 3: Cortadora por plasma de la empresa Solar1	5
Figura 4: Cortadora por plasma Supergraph IV	6
Figura 5: KemTam Basic mesa de aspiración.....	7
Figura 6: Cortadora por plasma con mesa de corte KEMPER.....	7
Figura 7: Mesa con tanque y consumible	9
Figura 8: CNC-4000 Flame/Plasma Cutting Equipment PROMEC S.C.C.....	10
Figura 9: Mesa de corte por plasma UTE	11
Figura 10: Esquema de accionamiento por servomotor.....	18
Figura 11: Generación de una Onda PWM.....	19
Figura 12: Controlador CNC Hypertherm EDGE-Pro.....	22
Figura 13: Controlador ADTECH ADT-HC450.....	23
Figura 14: Controlador MISNCO SF-2012	23
Figura 15: THC Hypertherm ArcGlide	24
Figura 16: Control de altura XPTHC-300 II	25
Figura 17: Control de altura SH-HC 30	25
Figura 18: Controlador de altura ADTECH HCA 1002	26
Figura 19: Bosquejo de la alternativa de solución.....	28
Figura 20: Sensor Inductivo TK-12P4CF	33
Figura 21: Determinación del elemento más crítico en la estructura	36
Figura 22: Distribución de cargas en la viga superior de la estructura	36
Figura 23: Corte transversal en la viga superior	38
Figura 24: Diagrama de cortantes en la viga superior	39
Figura 25: Diagrama de momentos en la viga superior	40
Figura 26: Distribución de fuerzas del tornillo sin fin del tercer eje	43
Figura 27: Diagrama de fuerzas tornillo sin fin.....	43
Figura 28: Rosca Trapezoidal ISO.....	44
Figura 29: Esfuerzo Von Misses en la viga superior	53
Figura 30: Factor de seguridad en la viga superior.....	53
Figura 31: Distribución de esfuerzos en la estructura principal.....	54
Figura 32: Tensiones V.M. en la estructura principal	54
Figura 33: Factor de seguridad en la estructura principal	55
Figura 34: Distribución de esfuerzos en el pórtico	55
Figura 35: Tensiones V.M. en el pórtico	56
Figura 36: Factor de seguridad en el pórtico	56
Figura 37: Acción del torque en el eje de transmisión	57
Figura 38: Tensiones V.M. en el eje de transmisión	57
Figura 39: Factor de seguridad en el eje de transmisión	58
Figura 40: Puerto XS3	63

Figura 41: Puerto XS5	63
Figura 42: Puerto XS6	65
Figura 43: Interfaz principal del controlador ADTECH HC-4500.....	69
Figura 44: Interfaz de configuración de parámetros del sistema.....	69
Figura 45: Interfaz de precisión del controlador ADTECH HC-4500	70
Figura 46: Interfaz manual del controlador ADTECH HC-4500.....	70
Figura 47: Ajustes de parámetros de velocidad y aceleración	70
Figura 48: Parámetros de corte del Controlador ADTECH HC-4500.....	71
Figura 49: Parámetros de corte Reales del controlador HC-4500	72
Figura 50: Controlador de altura SH-HC30.....	73
Figura 51: Descripción Ventana principal Software Sheetcam	75
Figura 52: Ventana de opciones Sheetcam	75
Figura 53: Tipos de máquina (Sheetcam).....	75
Figura 54: Ventana de Post procesador (Sheetcam)	76
Figura 55: Ventana Trabajo sobre (Sheetcam).....	76
Figura 56: Mostrar mesa (Sheetcam)	76
Figura 57: Opciones de trabajo (Sheetcam)	77
Figura 58: Ventana de Material (Sheetcam)	77
Figura 59: Importar dibujo DXF 2D (Sheetcam).....	78
Figura 60: Selección del origen de la pieza (Sheetcam).....	78
Figura 61: Posición de la pieza ingresada al programa Sheetcam	78
Figura 62: Selección de nueva herramienta de corte (Sheetcam)	79
Figura 63: Ventana de herramientas (Sheetcam)	79
Figura 64: Parámetros para corte por plasma (Sheetcam)	79
Figura 65: Ventana de operaciones (Sheetcam).....	80
Figura 66: Ventana de corte por chorro	80
Figura 67: Ventana de simulación (Sheetcam)	81
Figura 68: Ventana de generación del código (Sheetcam)	81
Figura 69: Equipo de corte por plasma Hypertherm Powermax 1000.....	82
Figura 70: Dimensiones de la cortadora por plasma.....	82
Figura 71: Antorcha DURAMAX MRT	83
Figura 72: Juego de consumibles de la antorcha.....	84
Figura 73: Cortadora por plasma CNC (diseño CAD)	85
Figura 74: Cortadora de Plasma CNC	89
Figura 75: Posiciones del reloj comparador	92
Figura 76: Errores en el eje "Y"	95
Figura 77: Errores en el eje "X"	96
Figura 78: Promedio de errores en el eje "Z"	97
Figura 79: Precisión de la cortadora por plasma CNC.....	97
Figura 80: Posiciones para toma de mediciones en cuadrados.....	101
Figura 81: Posiciones para toma de mediciones en círculos	103
Figura 82: Muestras de corte en acero al carbono.....	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Rangos de Operación	13
Tabla 2 Cuadro comparativo de los tipos de mesa de corte	30
Tabla 3 Tipos de material para construcción de la máquina	30
Tabla 4 Cuadro comparativo para el sistema de reducción de polución	31
Tabla 5 Tipos de transmisiones para plasma CNC	31
Tabla 6 Cuadro comparativo de tipos de motores	32
Tabla 7 Finales de carrera	32
Tabla 8 Controladores 3 ejes para Hypertherm Powermax 1000	33
Tabla 9 Tipos de controladores de altura	34
Tabla 10 Especificaciones eléctricas del controlador SH-HC30	35
Tabla 11 Coeficiente de fricción de rodamiento (f_r)	46
Tabla 12 Coeficiente de fricción de deslizamiento (f_s)	46
Tabla 13 Coeficiente de velocidad de la cadena (k_c)	47
Tabla 14 Especificaciones Generales Motor a pasos 17HS111	58
Tabla 15 Especificaciones eléctricas del motor	59
Tabla 16 Especificaciones Generales motor a pasos 57BYGH115-003b	59
Tabla 17 Especificaciones eléctricas del motor	59
Tabla 18 Especificaciones eléctricas Driver DQ542MA	60
Tabla 19 Conexión del driver DQ542MA	60
Tabla 20 Especificaciones Generales motor a pasos 85BYGH45OC-012	60
Tabla 21 Especificaciones eléctricas del motor	61
Tabla 22 Especificaciones eléctricas Driver DQ860MA	61
Tabla 23 Conexión del driver DQ860MA	62
Tabla 24 Distribución de pines del puerto para motores	63
Tabla 25 Distribución de pines para el puerto de entrada del controlador	64
Tabla 26 Distribución de pines para el puerto XS6	65
Tabla 27 Distribución de pines del controlador de altura	66
Tabla 28 Posiciones de los DIP Switches para los pulsos/rev del driver DQ542MA	67
Tabla 29 Posiciones de los DIP Switches para los pulsos/rev del driver DQ860MA	68
Tabla 30 Descripción de los parámetros de corte del controlador HC-4500	71
Tabla 31 Parámetros del Microstep HC-SH30	73
Tabla 32 Parámetros del controlador SH-HC30	74
Tabla 33 Tipos de antorchas para la cortadora Hypertherm Powermax 1000	83
Tabla 34 Piezas Consumibles de la antorcha	84
Tabla 35 Equipo necesario para la construcción	85

Tabla 36	Herramientas e instrumentos requeridas para el montaje de la máquina.....	86
Tabla 37	Partes y componentes de la máquina.....	86
Tabla 38	Operaciones para la construcción de la máquina.....	87
Tabla 39	Máquinas CNC de corte por plasma de importación.....	90
Tabla 40	Resultados de los datos de longitudes.....	93
Tabla 41	Promedio de errores en el eje "Y".....	95
Tabla 42	Promedio de errores en el eje "X".....	96
Tabla 43	Promedio de errores en el eje "Z".....	97
Tabla 44	Precisión de la cortadora por plasma CNC.....	98
Tabla 45	Pruebas de corte en Cuadrados.....	102
Tabla 46	Pruebas de corte en Círculos.....	103
Tabla 47	Tabla de corte.....	104

RESUMEN

El trabajo de titulación se basó en el diseño y la construcción de una cortadora por plasma de tres ejes con cama de agua mediante control numérico computarizado para el laboratorio CNC. Para llevar a cabo dicho proyecto, se determinaron parámetros de corte para planchas de acero al carbono de dimensiones 1220 mm. x 1220 mm. con espesores entre 1,9 a 9,5 mm. Se diseñó la estructura donde fueron montados los elementos de forma manual, posteriormente se comprobó los resultados con software CAE. Para el sistema de control se utilizó un controlador de 3 ejes ADTECH HC-4500 y un THC Microstep SH-HC30. Finalizada la implementación del sistema mecatrónico se realizaron pruebas utilizando la norma ISO 10360-2 2009 para determinar la precisión y repetibilidad de la máquina. Adicionalmente se hicieron pruebas de corte en piezas de dimensiones mínimas 10 mm. para cuadrados y 15 mm. para círculos. Y para piezas grandes de 1150 mm. Finalmente se establecieron conclusiones y recomendaciones.

PALABRAS CLAVE:

- **LABORATORIO CNC**
- **CORTADORA POR PLASMA**
- **CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO**

SUMMARY

The titling project was based on the design and construction of a three axis plasma cutting machine with waterbed by computer numerical control for the CNC laboratory. To carry out this project, cut parameters were determined for carbon steel plates of dimensions 1220 mm. X 1220 mm. With thicknesses between 1,9 and 9,5 mm. The structure where the elements were assembled manually was designed, and the results were then checked with CAE software. For the control system an ADTECH HC-4500 3-axis controller and a THC Microstep SH-HC30 were used. After the implementation of the mechatronic system, tests were performed using ISO 10360-2 2009 to determine the accuracy and repeatability of the machine. In addition, cutting tests were performed on pieces with a minimum dimension of 10 mm. For squares and 15 mm. For circles. And for large pieces of 1150 mm. Finally conclusions and recommendations were established.

KEYWORDS:

- **CNC LAB**
- **PLASMA CUTTER**
- **COMPUTER NUMERIC CONTROL**

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

A nivel mundial en la industria, existen diversos procesos utilizados para la manufactura, siendo uno de ellos el corte por plasma, el cual utiliza diversos sistemas ya sean estos manuales, automáticos o controlados por computador para realizar el corte, sobre diversos materiales como acero, aluminio hierro fundido, acero inoxidable, etc.

Varias son las empresas que se han dedicado a producir este tipo de maquinaria, siendo el control numérico computarizado, el sistema de mayor utilización. Para ello, el proceso consiste en diseñar el modelo a cortar mediante software CAD, programar el corte del modelo mediante software CAM y producir el corte.

El corte se produce por la fusión del metal debido a un arco eléctrico que se genera entre la boquilla y la pieza, seguidamente un chorro de aire a presión rompe la cohesión de las partículas del material fundido de la zona térmica, desprendiéndose por reacción química polvo de hierro, estas partículas deben ser retiradas del medio a través de algún sistema de tracción como por absorción, por inundación, etc.

A nivel nacional, diversas empresas poseen cortadoras de plasma, utilizándolas tanto en la industria metalmecánica como en la industria automotriz.

1.2. Planteamiento del problema

La UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE EXTENSIÓN LATACUNGA, posee el Laboratorio de CNC al cuál tienen acceso los estudiantes de las carreras de ingeniería mecatrónica y electromecánica, en las asignaturas de Sistemas Flexibles de Manufactura, CAD/CAM/CAE.

En dicho Laboratorio existe una cortadora de plasma, la misma que fue diseñada y construida como proyecto de tesis en el año 2007 por Hólguer Fabián Guanoluisa Pilatásig y Freddy Eduardo Yánez Tapia de la carrera en Ingeniería Electromecánica la misma que fue utilizada por los estudiantes para el desarrollo de las prácticas de CAD/CAM y FMS, debido al avance tecnológico y la aparición de nuevas técnicas de control, este sistema quedó obsoleto, por lo que ya no se utiliza.

La cortadora de plasma fue diseñada con 2 1/2 ejes de trabajo, razón por la cual, para realizar un corte en diferente espesor y material, había que regular en forma manual, lo que conlleva la utilización de mayor tiempo en calibrar. El segundo inconveniente en este sistema es la emisión de polvo de hierro al ambiente, ya que no dispone de un sistema de extracción. El tercer inconveniente radica en que fue concebida para cortar materiales delgados y de área reducida, por la capacidad de la cortadora de plasma manual, de lo anterior, también se desprende que la boquilla de corte es netamente manual, el sistema de control no se puede automatizar completamente, requiere de una boquilla de corte automático.

1.3. Estudio de cortadoras por plasma CNC

En el año de 1957, se desarrolló el proceso de corte con plasma como una extensión del proceso de soldadura por arco de tungsteno con gas (GTAW); posteriormente, se ha ido mejorando dicha técnica, ya sea desde sistemas básicos de corte hasta la implementación del corte por plasma mecanizado, permitiendo el crecimiento de la industria en una amplia gama de aplicaciones; los mayores avances en este proceso se ha realizado en los últimos 10 años, a continuación se presenta el resultado de una investigación de diversos trabajos y proyectos desarrollados afines al tema. (Colt, 2014)

1.3.1. Diseño y construcción de un sistema para corte por plasma, usando técnicas de control numérico computarizado, Artiga René, Bolaños Gerardo, Martínez Abner, Reyes Erick; Universidad de El Salvador, enero 2015.

En este proyecto de tesis se realizó un sistema mecánico comprendido por un sistema de transmisión por medio de tornillos de potencia que genera el movimiento del carro en dirección lineal (ver Figura 10), y como requerimiento de dicho proyecto, las dimensiones del elemento a cortar fueron de: 750 x 750 mm, con un espesor de 6.35 mm. ($\frac{1}{4}$ in.). La altura estimada para la mesa fue de 940 mm, con ello facilitó colocar la pieza a cortar.

El sistema de control se implementó con la Tarjeta Principal Xylotex, que es idónea para mover hasta 4 motores paso a paso, entre sus características permite manipular el encendido y apagado de la antorcha. Además, tiene la capacidad de trabajar con limitadores, sensores de referencia y sensores de proximidad para tener un óptimo movimiento y evitar que sucedan colisiones de los elementos mecánicos, finalmente la interfaz que utiliza la tarjeta controladora es el programa Match3, esto significa que el control se ejecutará desde una computadora.



Figura 1: Estructura de la mesa

Fuente: (Artiga & Bolaños, 2015)

1.3.2. Mesa de corte térmico MEGACORD, WELD-RAF, Buenos Aires – Argentina, 2013.

MEGACORD desarrolló una máquina para corte pesado, es la primera con cabezal biselador del país, apta para aplicaciones navales e industriales, posee un panel ergonómico y pantalla táctil de manejo intuitivo, para el sistema de control utiliza el controlador CNC Hypertherm EDGE Pro brindando de este modo gran calidad y precisión en el corte, generando una alta productividad.

Posee guías lineales trapezoidales dobles para la sujeción del carro transversal y rieles de acero rectificadas para la banca longitudinal con ello ofrecen máxima precisión en sus cortes, el movimiento de las coordenadas utilizan servomotores AC Yaskawa con alimentación de 380V (50-60HZ) trifásico, con un torque de 140 N-m; posee reductores Alpha para la obtención de una buena relación peso/potencia, generando una velocidad máxima de 25000 mm/min, con una precisión de posicionamiento de +/- 0.2mm (ver Figura 2).



Figura 2: Mesa de Corte Térmico MEGACORD
Fuente: (MEGACORD, 2012)

1.3.3. Routers CNC semi-industriales, PROCAM, México, 2015.

PROCAM es una empresa dedicada al diseño y construcción de máquinas para corte, como principales características, sus productos tienen un área de corte hasta 120cm x 240 cm, altura de corte 15 cm, estructura construida con perfiles de acero, la viga principal del pórtico móvil construida con perfil de aluminio tratado térmicamente, con la utilización de motores a pasos para el movimiento de las coordenadas y drivers micro pasos independientes para cada eje, el voltaje de trabajo del sistema varía entre 110/220 VAC, para el sistema operativo de control se requiere de Windows 7 y software CNC Match3.

1.3.4. Cortadora por plasma, SOLAR1, Estados Unidos, 2015.

SOLAR1 es una empresa, la cual desarrolló una cortadora por plasma que utiliza transmisión por cadenas para el desplazamiento de los ejes "X" y "Y" (ver Figura 3), para el movimiento del tercer eje se utiliza un tornillo de potencia, la empresa recomienda el uso de motores a pasos con torque de 400 oz-in.



Figura 3: Cortadora por plasma de la empresa Solar1
Fuente: (Solar1, 2012)

1.3.5. KOIKE ARANSON, Arcade- EE. UU, 2015.

KOIKE empresa fabricante de equipos de posicionamiento, soldadura y corte, posee una amplia gama de servicios dentro de las industrias tales como: CNC oxidcombustión, CNC Plasma, CO2 de precisión láser, máquinas de corte por chorro de agua, mesas posicionadoras de soldadura, al mismo tiempo entre los equipos más novedosos para corte por plasma se puede mencionar: Monograph Extreme, Plate Pro, Plate Pro Extreme, Mastergraph EX2, Mastergraph Extreme, Supergraph IV, Versagraph Extreme.

A continuación, se describe las características de la máquina de corte por plasma Supergraph IV:

Supergraph IV posee una velocidad de desplazamiento de hasta 1000 in/min, el diseño es compacto lo que permite moverse y desplazarse con facilidad, cuenta con un Controlador CNC Hypertherm EDGE-Pro, y un control de altura Hypertherm ArcGlide, posee una mesa diseñada para la eliminación de escoria (ver Figura 4).



Figura 4: Cortadora por plasma Supergraph IV
Fuente: (KOIKE, 2010)

1.3.6. KEMPER, Vreden-Alemania, 2015.

KEMPER es una empresa líder e innovadora de la tecnología en equipos de aspiración y filtración de humos producidos en la soldadura de metales, hoy en día se destacan por su amplia gama de dispositivos automáticos de corte, la mesa de aspiración KemTab Basic (ver Figura 5) soporta una intensidad de corte hasta 150 A y un espesor de material hasta 75 mm, también oferta la mesa de aspiración KemTab HiEnd que está diseñado para los trabajos de corte por plasma apta para una intensidad de hasta 600 A y un espesor de material de hasta 300 mm en el oxicorte, teniendo como objetivo facilitar la limpieza de forma rápida y garantizar menores tiempos de inactividad (ver Figura 6).

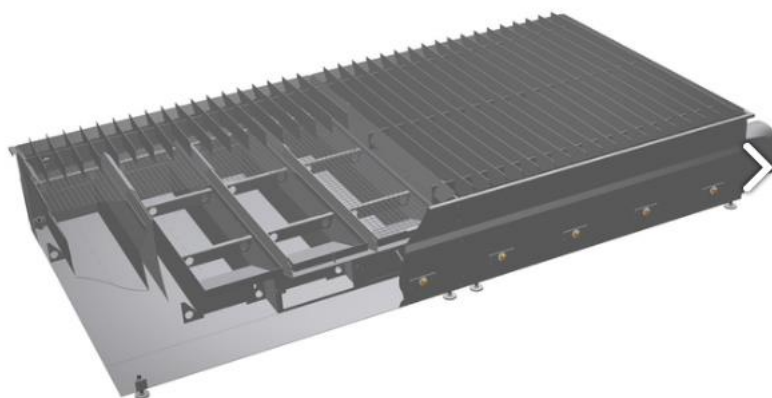


Figura 5: KemTab Basic mesa de aspiración

Fuente: (Ali Express, 2015)



Figura 6: Cortadora por plasma con mesa de corte KEMPER

Fuente: (Ali Express, 2015)

1.4. Tecnología de máquinas CNC en el Ecuador

En las últimas décadas, se ha tenido un gran avance a nivel tecnológico; esto es el resultado del enfoque a la investigación en diferentes ámbitos; a continuación, se detallan algunos trabajos afines al corte por plasma a nivel nacional.

1.4.1. 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, Reinoso Martín, Universidad San Francisco, Quito, diciembre 2012.

Este proyecto de tesis fue llevado a cabo en la empresa de INTERINOX, la misma que se dedica al montaje de equipos industriales en Acero Inoxidable, para este trabajo el diseño de la mesa de corte se realizó con ángulos laminados (ver Figura 7), el desplazamiento de los ejes “X” y “Y” se implementó el sistema de engranaje-cremallera y guías longitudinales de tubo cuadrado, mientras que el movimiento del eje “Z” se utilizó el sistema de Tornillo-tuerca.

Para el movimiento de los ejes se adquirió motores a paso MondoStep con sus respectivos drivers, en el sistema de control se implementó la tarjeta de control eZdsp F2808 que consta con interfaz de conexión por puerto serial, que facilita el envío de mensajes entre el software en la computadora y la tarjeta, con la ayuda del software VisSim se efectuó la programación de la tarjeta que mediante bloques permite programar el código y ejecutarlo. El programa genera un archivo compilado, y con el software Code Composer Studio V4 se graba a la tarjeta por interfaz USB.



Figura 7: Mesa con tanque y consumible

Fuente: (Reinoso, 2012)

1.4.2. Mejoramiento de los parámetros de trabajo para una máquina de corte por plasma y oxiacetilénica tipo cnc – 4000 marca hugong welder, Calupiña Cristián, Oña Mauricio; Escuela Politécnica Nacional, Quito, octubre - 2012.

El proyecto se ejecutó en la empresa PROMEC S.C.C, para definir los parámetros de trabajo en este plan de tesis se cuenta con un generador de plasma Powermax 1650 – Hypertherm, y una antorcha de corte por plasma mecanizada T100M-2, además se tiene en cuenta que la máquina está construida empíricamente (ver Figura 8) y para la comprobación de la resistencia de la mecánica de la mesa de corte se efectuó el análisis de cargas en cada una de las vigas, asimismo se cuenta con una antorcha de corte por plasma mecanizada T100M-2.

Realizado el análisis de la mesa de corte y comprobado el funcionamiento del sistema de corte y de la antorcha, se procedió a demostrar el modo de operación del proceso a través de probetas tanto para el acero al carbono A-36 y el acero inoxidable AISI 304.

Gracias a este estudio se pudo comparar la velocidad y costo del corte tanto para el acero al carbono y acero inoxidable, de la misma manera se logró analizar la vida útil de los consumibles utilizados a diferentes amperajes, todo esto permitió dar a conocer la calidad de corte que ofrece la empresa.



Figura 8: CNC-4000 Flame/Plasma Cutting Equipment PROMEC S.C.C

Fuente: (Calupiña & Mauricio, 2012)

1.4.3. Diseño e implementación de un sistema de control numérico computarizado de corte por plasma para la empresa sermatex, 2010, Pérez Andrés; Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, enero – 2012.

Este proyecto de tesis consistió en el diseño e implementación de un Sistema CNC de corte por plasma de 2 ejes, en la que un PC se encarga de controlar la posición y velocidad de los servomotores, los cuales accionan el sistema de transmisión, utilizando para la construcción de la mesa perfil estructural de ángulo doblado de 20x20x2 mm y plancha de acero ASTM A36 de 6mm de espesor.

Para el diseño del eje “Z” se desarrolló con tornillo de 12 mm de diámetro, mientras que el sistema de transmisión en los ejes “X” y “Y” se implementó con tornillo de potencia, para el accionamiento del sistema de transmisión se adquirió servomotores Brushless 110SY-M04030 con un torque nominal de 4N.m con servoamplificador para el control de los motores, además con el software Solid Works se plasmó el diseño mecánico en 3D, para el corte del metal se colocó una antorcha mecánica recta (ver Figura 9).

La comunicación entre el ordenador y el driver se ejecutó con la tarjeta de control MACH3 y como interfaz gráfico de la tarjeta de corte y la PC el software MACH3 CN.

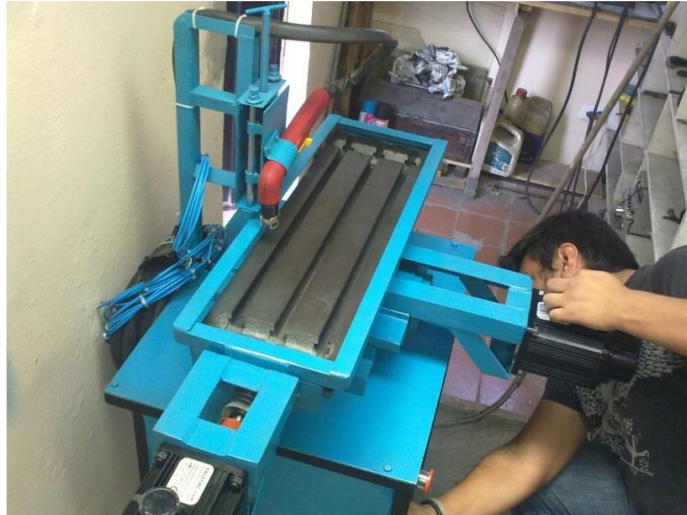


Figura 9: Mesa de corte por plasma UTE

Fuente: (Pérez, 2012)

1.4.4. Diseño y construcción de un sistema automático de corte por plasma mediante control numérico computarizado cnc. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, Latacunga, 2007.

El tema de tesis se desarrolló para el laboratorio CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, la construcción de la base principal de la máquina fue diseñado con tubo cuadrado tipo ASTM A36K con una dimensión de 1 pulgada, y el mecanismo de sujeción de las planchas se utilizó un perfil T de acero laminado de 1 pulgada.

EL movimiento de la antorcha se desarrolló con un sistema de tornillo de fuerza, guías cilíndricas con un diámetro de 8mm y material de acero plata K-510 al mismo tiempo que en el eje "Z" se colocó un motor a pasos bipolar de 0.38 N-m de torque; mientras que el movimiento de los ejes "X" y "Y" se llevó a cabo con un sistema de husillo de bolas, conjuntamente con servomotores DC de 0.42 N-m de torque.

El sistema de control se ejecutó con la tarjeta PC-2-Route modelo M2 rev. 1.8 y sistema de interfaz compatible con software Mach2 y Mach3, para el control de altura de la antorcha se implementó la tarjeta THC 300.

1.5. El plasma

El plasma, es un gas formado por partículas que están cargadas positiva y negativamente, pero su proporción es tal que la carga total suma cero, los electrones se separan de sus átomos, poseen libertad de movimiento y su carga eléctrica se vuelve positiva lo que provoca que se conviertan en iones al perder parte de sus electrones. A partir de este descubrimiento, se le conoce al plasma como el cuarto estado de la materia. (Daza, 2010)

1.6. Formación del chorro de plasma

Un gas se calienta por medio de un arco eléctrico hasta que sus átomos se ionizan, los electrones libres y los iones positivos engendrados producen plasma eléctricamente neutro, durante su calentamiento, el gas se dilata en una cámara cerrada y escapa por una boquilla a altas velocidades.

El circuito eléctrico está conectado a un soplete, el cual es el electrodo (cátodo) y a la pieza (ánodo); el calor se obtiene por medio del arco eléctrico y por el chorro de plasma, al cual se estabiliza utilizando un gas a manera de torbellino, el mismo que concentra al chorro en el centro de la boquilla, evitando que vaya a sus paredes. (Lobjois, 1984)

1.7. Aplicaciones de corte por plasma

Con los avances que se ha dado en los últimos años el corte por plasma se ha convertido en un proceso indispensable para el ámbito industrial, puesto que permite realizar cortes precisos en el acero y materiales no ferrosos, a continuación, se detalla algunas aplicaciones (Hypertherm, Energía, 2015):

Corte de metal expandido, como parte integral del proceso de fabricación de tractores; armar tabiques de metal, cerchas de pisos y techos; en la instalación de techos, revestimientos y terrazas; para la construcción de turbinas eólica, de plantas de energía nuclear; bisel de tubo; reparación de equipos, flotas de camiones, remolques para postes y bobinas de cables.

1.8. Rangos de operación de la cortadora de plasma Hypertherm Powermax 1000

Utilizando el manual de la cortadora se puede conocer en qué rangos de operación va a operar acorde a los diversos materiales sugeridos por el fabricante (ver Tabla 1), igualmente se puede observar los rangos de velocidad, corte y espesor idóneos para la cortadora Hypertherm Powermax 1000 (ver Anexo 1).

Tabla 1

Rangos de Operación

Capacidad de corte mecanizado a 60 amperios	
Capacidad Recomendada	3/8 in (9,5 mm)
Máxima Capacidad	1/2 in (12 mm)

Fuente: (Hypertherm, Manual de operación Hypertherm Powermax 1000, 1999)

1.9. Equipo de un sistema básico de corte por plasma

Sin importar de la aplicación de la máquina de corte por plasma o de su tamaño, siempre están vigentes los siguientes elementos:

- Electrodo (consumible): Puede ser de wolframio o circonio dependiendo del gas a utilizarse.
- Difusor de gas
- Tobera (consumible): Se encarga de forzar al arco eléctrico y dirigir el chorro de plasma, su tamaño varía en función a su amperaje.
- Porta tobera
- Pinza de masa.
- Cilindro de gas plasmágeno: es fundamental en toda operación de corte por plasma la utilización de un gas primario, los más utilizados son aire, nitrógeno, argón con hidrógeno o también se puede tener una mezcla de estos. Además, se puede poseer gases secundarios o agua presentes en las inmediaciones del chorro de plasma para remover la escoria y ayudar a confinar el arco.

- Fuente de energía: Se tiene un transformador con tensiones en vacío de 100-400 V y corriente constante.
- Antorcha: es el elemento que realiza el corte, el cual está equipado con mangueras para aire comprimido y electricidad.
- Pieza de trabajo: El proceso PAC (Corte por arco de plasma), puede utilizarse para los metales eléctricamente conductores, siendo estos: acero inoxidable, aluminio, hierro, cobre, latón, bronce y titanio. (De máquinas y herramientas, 2013)

1.10. Mesas de corte

La mesa de corte es aquella que soporta el movimiento que genera la antorcha al momento de cortar el material y dimensiones de las planchas, éstas generalmente cuentan con las siguientes características: resistencia al peso de las planchas a cortar, no debe pandearse ni mucho menos perder exactitud en ningún momento del funcionamiento, al realizar cualquier movimiento en el pórtico en especial los movimientos rápidos que se genera al momento de posicionarse en el punto home no debe sacudirse ni desplazarse de su lugar. (De Máquinas y Herramientas, 2015)

1.10.1. Tipos de mesas de corte

Con la investigación del estado del arte se observa que todos los proyectos y empresas se basan sus diseños para la mesa de corte con mesa fija y pórtico móvil, a continuación, se detallarán los tipos de mesas:

- **De pórtico fijo y mesa móvil:** en donde la mesa se desplaza por debajo del pórtico.
- **De mesa fija y pórtico móvil:** en donde el pórtico se desplaza por encima de la mesa. (De máquinas y herramientas, 2015)

1.11. Sistemas para reducción de polución

El proceso de corte por plasma produce una gran cantidad de escoria, polvo metálico fino y gases, es fundamental que se utilice un sistema adicional para reducir o contener a dichos contaminantes, en la industria (sección 1.3.6) se encuentran dos mecanismos para la reducción de los contaminantes:

- Sistemas basados en aspiración conocido como mesas secas.
- Sistema basado en agua conocido como mesas con agua.

1.11.1. Sistemas basados en aspiración

Este proceso consiste en un mecanismo de extracción por corriente descendente dispuesto debajo de la mesa y un extractor que succiona el aire conduciéndolo, por los laterales de la mesa, hacia el exterior, o bien, en los sistemas más complejos, a través de un sistema de filtración de aire con conexión al exterior permitiendo de esta manera eliminar el polvo y el humo. (De máquinas y herramientas, 2015)

1.11.2. Sistemas basados en agua

Este proceso consiste en una bandeja, una mesa poco profunda y llena de agua, que se colocan debajo de la superficie de corte. Cuando la antorcha realiza su trabajo de corte del metal, la fuerza del chorro de plasma conduce las chispas y el polvo hacia el agua, donde se atenúan rápidamente. (De máquinas y herramientas, 2015)

1.12. Tipos de transmisiones para cortadora por plasma CNC

Los sistemas de transmisión que utilizan para cortadora por plasma CNC según el estado del arte son: En el proyecto “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”, utiliza el sistema

de transmisión piñón-cremallera, también se puede ver que en el proyecto de tesis “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO DE CORTE POR PLASMA MEDIANTE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO CNC”; el sistema de transmisión utilizado es husillo de bolas, además en la “CORTADORA POR PLASMA, SOLAR1”; su sistema de transmisión lo realizan por cadena, a continuación una breve descripción de cada uno de los sistemas de transmisión mencionados :

1.12.1. Transmisión por piñón–cremallera

Este mecanismo transforma el movimiento circular del piñón en un movimiento lineal en la cremallera, se utiliza para movimientos de precisión especialmente en fresadoras, cortadoras láser y cortadoras por plasma. (Wittenstein Alpha, 2015)

1.12.2. Transmisión por husillo de bolas

Su costo es elevado, poseen mucha precisión, requieren de poco mantenimiento, velocidad media. Este sistema es para CNC's profesionales con un presupuesto elevado. (Mecapedia, 2015)

1.12.3. Transmisión por cadena

Las transmisiones por cadenas son transmisiones robustas, que permiten trabajar en condiciones ambientales adversas y con temperaturas elevadas, aunque requieren de lubricación. Además, proporcionan una relación de transmisión fija entre las velocidades y ángulo de giro de los ejes de entrada y salida, lo que permite su aplicación en automoción y maquinaria en general que lo requiera. (Ingemecánica, 2015)

1.13. Actuadores

Se denomina como actuador al dispositivo que proporciona energía necesaria para trasladar en forma rotacional o lineal a un sistema mecatrónico; el tipo de actuador dependerá de su fuente de alimentación, siendo eléctrica, neumática e hidráulica. (Reyes, Cid, & Vargas, 2013)

1.13.1. Motores a pasos

Empresas especializadas en el diseño y construcción de cortadoras por plasma CNC como PROCAM, México (Ver sección 1.3.3) y en proyectos de tesis como se detalló en la sección 1.3.1 recomiendan el uso de motores a pasos, estos motores no requieren de un sistema de retroalimentación, aunque si son compatibles con dichos sistemas. (Aguirre & Sandoval, 2008)

Cuando el motor es energizado, girará un ángulo específico por cada paso; se diseñan para producir un gran número de pasos por revolución, como ejemplo se tiene 50, 100 o 200; correspondientes a una rotación de 7.2° , 3.6° y 1.8° por paso; son compatibles con sistemas electrónicos; su resolución está definida por el número de dientes del rotor y del estator. (Fitzgerald, Charles, & Stephen, 2004)

a. Aplicaciones

Existe una amplia gama de aplicaciones de los motores paso a paso ya sea en mediciones y aplicaciones de control entre ellas se puede mencionar: brazos robóticos, bombas impelentes en aplicaciones de electro medicina, posicionamiento de válvulas de control industriales, bombas volumétricas, patrón mecánico de velocidad angular, plotters, impresoras chorro de tinta.

1.13.2. Servomotores

Se trata de un tipo especial de motor el cual incluye en la misma carcasa el grupo reductor y una tarjeta de control, su tamaño y peso son reducidos, la tensión de alimentación es de bajo consumo, poseen un par de torsión elevado, debido a la electrónica de control que poseen, es posible realizar movimientos precisos, esto se consigue utilizando un tren de pulsos. (Angulo, 2005). El movimiento de los ejes de la máquina para corte pesado MEGACORD se desarrolló con servomotores, mencionados anteriormente en la sección 1.3.2.

a. Funcionamiento

Básicamente un servomotor está constituido por un encoder y un driver también llamado amplificador lo cual forman un circuito realimentado para el control de la posición, torque y velocidad (ver Figura 10).

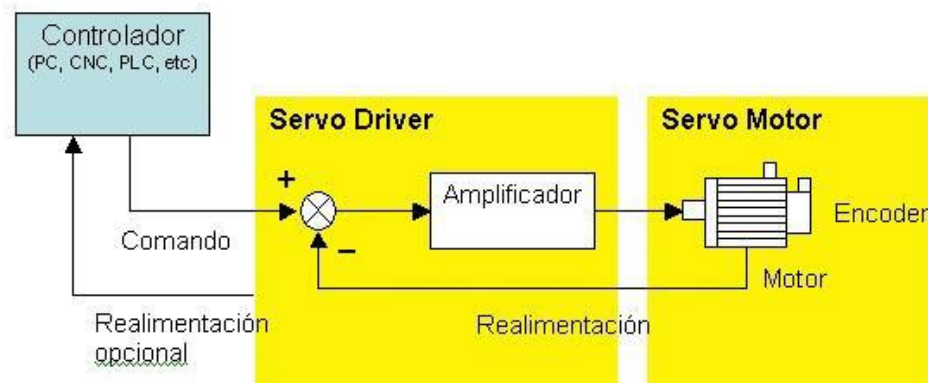


Figura 10: Esquema de accionamiento por servomotor

Fuente: (Area Tecnología, 2014)

Para el control de servomotores el sistema más utilizado es el control PWM (Pulse Width Modulation) modulación por ancho de pulsos, consiste en la generación de ondas cuadradas en la cual se varía el tiempo que el pulso se encontrará a nivel alto (ver Figura 11).



Figura 11: Generación de una Onda PWM

Fuente: (Area Tecnología, 2014)

El control del servo se basa en indicar un cierto ángulo medido desde cero grados para luego enviar una serie de pulsos que se indicarán en niveles altos y bajos, en los niveles altos conocidos también como tiempo ON se indica el ángulo de posición del servomotor mientras que en los niveles bajos o tiempo OFF el servomotor no es crítico.

b. Aplicaciones

Los servomotores se utilizan en distintas aplicaciones ya sea de corte, empaclado, impresión, robótica, manipulación de alimentos, etiquetado, en la industria se encuentran diferentes máquinas que poseen este tipo de dispositivos como: punzonadoras, prensas, plegadoras, etc.

1.14. Finales de Carrera

Uno de los elementos principales en todo sistema CNC, son los finales de carrera, con los cuales se evita colisiones y se determina el área de trabajo de todo el mecanismo; como alternativas se tiene sensores inductivos, capacitivos y mecánicos.

1.14.1. Sensores Inductivos

Solo pueden detectar objetos mecánicos, poseen excelente durabilidad, capaz de sensar a través de una fina capa de plástico, su detección no se ve afectada por polvo o salpicadura de aceite, agua etc. su consumo de corriente es inferior a 1 mA. compatibles con circuitos NPN y PNP. (Keyence, 2013)

1.14.2. Sensores Capacitivos

Detectan la mayoría de objetos, siendo materiales conductores y no conductores, líquido granulado y polvo, poseen alta durabilidad, detectan objetos ocultos o inaccesibles, necesitan amplificación de señal, por ello su alcance es regulable. (Balluff, 2015)

1.14.3 Sensores Mecánicos

Utilizados para el posicionamiento y la desconexión final, utilizados en máquinas CNC, robots, centros de fabricación flexible, poseen fiabilidad y robustez en entornos adversos, un buen funcionamiento en caso de vibraciones, cargas de choque, cambios rápidos de temperatura, lubricantes refrigerantes y acumulación de viruta. (Balluff, 2015)

1.15. Control Numérico Computarizado (CNC)

CNC es un dispositivo a través del cual nos permite controlar generalmente máquinas herramientas, su control se realiza con la ayuda de un computador, la máquina cumple con diferentes tareas permitiendo de este modo aumentar la productividad y mejorar la calidad.

Hoy en día muchas empresas han optado por equipar sus áreas de trabajo con maquinaria CNC ya que ofrece mayor precisión e incrementa en un ciento por ciento su productividad entre ellas se puede mencionar: WELD-RAF, PROCAM, KOIKE ARANSON, KEMPER, etc.

1.15.1. Programación de máquinas de CNC con códigos G&M

- La programación nativa de la mayoría de las máquinas de Control Numérico Computarizado se efectúa mediante un lenguaje de bajo nivel llamado G & M.
- Se trata de un lenguaje de programación vectorial mediante el que se describen acciones simples y entidades geométricas sencillas

(básicamente segmentos de recta y arcos de circunferencia) junto con sus parámetros de maquinado (velocidades de husillo y de avance de herramienta). (Gonzalez, 2012)

- El nombre G & M viene del hecho de que el programa está constituido por instrucciones Generales y Misceláneas. (Díaz, 2012)
- Los códigos G (preparatorios) y los M (funciones misceláneas) son los más utilizados para la programación CNC.

1.16. Sistemas CAD/CAM

Los sistemas CAD/CAM en lo referente al hardware tienen como característica principal que son sistemas con gran capacidad de cálculo y con subsistemas gráficos de altas prestaciones, el uso de dispositivos específicos de entrada y salida por diferentes requerimientos en los procedimientos. (Barragán, 2009)

En el proceso de diseño de un CNC se requiere plasmar la idea mediante una herramienta CAD (Computer-aided desing) para posteriormente este diseño convertirlo en datos y controlar a la máquina mediante una herramienta CAM (Computer-Aided Manufacturing), en donde se define instrucciones detalladas a seguir dependiendo del corte que se requiera y los tipos de herramientas a utilizar para obtener la pieza final, todo esto se almacena en un archivo de código G, luego con la ayuda de un Software CAM (FastCam, Match 3,etc) los comandos en código G se transmiten en forma de señales a la máquina-herramienta la cuál interpreta y facilita el movimiento de los motores y herramientas, finalizando así el proceso para obtener la pieza terminada. (Magallanes, 2014)

1.17. Controlador CNC

La parte fundamental de un sistema de corte por plasma mecanizado es el método para controlar el movimiento de los ejes de manera automática; en la mayoría de proyectos de investigación se realiza con tarjetas controladoras; el mayor inconveniente es que puede sufrir una desconfiguración el sistema porque el control se realiza desde un ordenador exterior. A continuación, se presenta las principales características de los controladores CNC investigados en el estado del arte además de los controladores compatibles con el sistema de corte Hypertherm 1000:

1.17.1. Controlador CNC Hypertherm EDGE Pro

Controlador EDGE Pro (ver Figura 12) ofrece rendimiento confiable, con la ayuda del software Phoenix, brinda ventajas como las comunicaciones integradas tanto con el sistema de plasma y con el control de altura de la antorcha (THC) para el control automático, posee asistentes y herramientas de soporte de diagnóstico, además cuenta con ayuda remota que es una herramienta basada en Internet lo que permite trabajar virtualmente con una empresa. (Hypertherm, EDGE-Pro, 2016)



Figura 12: Controlador CNC Hypertherm EDGE-Pro

Fuente: (Alibaba, 2016)

1.17.2. Controlador ADTECH ADT-HC4500

Controlador CNC confiable para corte por plasma, brinda excelente rendimiento en las industrias por su precisión y calidad en el corte, posee microprocesador ARM9, tecnología de interpolación, fácil interfaz de

operación (ver Figura 13), permite controlar 3 motores a paso o servomotores al mismo tiempo, tiene una biblioteca de 63 gráficos, soporta códigos G y códigos M. (ADTECH, 2014)



Figura 13: Controlador ADTECH ADT-HC450
Fuente: (Alibaba, 2016)

1.17.3. Controlador CNC MISNCO SF-2012

Controlador para corte por plasma modelo SF-2012 (ver Figura 14) permite el corte por chorro de agua a alta presión y corte por láser de gran fiabilidad, capaz de realizar control de velocidad en los cortes con curvas y control automático de altura, posee procesador industrial ARM7, su software es compatible con muchos programas como la IBE (Alemania), FastCam, etc. (soldgreat.com, 2015)



Figura 14: Controlador MISNCO SF-2012
Fuente: (Ali Express, 2015)

1.18. Control de altura de la antorcha (THC)

Control de altura de la antorcha THC (Torch Height Control), elemento primordial para la aplicación de corte térmico, va conectado a la máquina de plasma y por medio del voltaje de arco de plasma el THC controla la distancia entre la antorcha y la pieza a cortar, es decir permite el desplazamiento sobre el eje "Z" lo que implica el movimiento ascendente y descendente de la antorcha. (Hypertherm, Control de altura de la antorcha, 2012)

A continuación, se presenta las principales características de los principales controladores de altura:

1.18.1. Controlador Hypertherm ArcGlide

ArcGlide THC (ver Figura 15) muestrea continuamente el voltaje del arco y lo ajusta automáticamente para obtener una distancia óptima entre la antorcha y la pieza a cortar de este modo brinda mayor duración de los consumibles, maximiza la productividad puesto que viene incluido de una graduación automática para el cambio de altura después del sensado de altura inicial, posee un conjunto de anticolidión magnético o neumático, capacidad de elevación de 11,4 kg. (Hypertherm, ArcGlide THC, 2012)



Figura 15: THC Hypertherm ArcGlide

Fuente: (Ali Express, 2015)

1.18.2. Controlador XPTHC-300 II

Control de altura XPTHC-300 II (ver Figura 16) con funciones de doble velocidad de inicio de sensado para la protección de la antorcha, función anti-colisión, es compatible con corte bajo el agua, posee modo manual y automático junto a 6 indicadores para facilitar la solución de problemas. (plasmatech, 2015)



Figura 16: Control de altura XPTHC-300 II
Fuente: (Ali Express, 2015)

1.18.3. Controlador SH-HC30

THC SH-HC30 (ver Figura 17) posee control de ajuste de velocidad, altura automática, para evitar los problemas de choques con las piezas a cortar función anti-colisión, la precisión está en el rango de +/- 5 mm, es compatible con el sistema de corte por plasma Hypertherm Powermax 1000. (Ali Express, 2015)



Figura 17: Control de altura SH-HC 30
Fuente: (Microstep, 2014)

1.18.4. Controlador ADTECH SHEHZHEN HCA 1002

THC ADTECH SHEHZHEN HCA 1002 (ver Figura 18) controlador de altura que posee doble velocidad y dos modos de inicio de sensado, soporte de perforación dinámica para corte de material grueso, control automático en la recepción de señal de esquinas, la precisión está en el rango de ± 5 mm, es compatible con el sistema de corte por plasma Hypertherm Powermax 1000. (Alibaba, 2016)



Figura 18: Controlador de altura ADTECH HCA 1002

Fuente: (Ali Express, 2015)

1.19. Resumen

Finalmente con la investigación realizada en el estado de arte, se puede concluir que, para el diseño y construcción de una cortadora por plasma se debe tener en consideración varios parámetros entre ellos: el material más utilizado para la construcción de la estructura es el acero A-36, la mesa es fija y el pórtico móvil; para la reducción de polución se utiliza mayormente sistemas con cama de agua; el sistema de transmisión varía mucho dependiendo de la superficie máxima a cortar, por ejemplo, para planchas grandes se utiliza piñón cremallera y para superficies menores husillo de bolas; los actuadores más utilizados son los servomotores; para el control del sistema en la mayoría de los casos, se utiliza tarjeta controladora.

CAPÍTULO II

DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO

2.1. Estado actual del laboratorio CNC de la universidad

El Laboratorio CNC de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L, posee una cortadora por plasma automática de 2 ½ ejes, la cual presta servicio a los estudiantes de las carreras de Ingeniería Mecatrónica y Electromecánica; dicha cortadora posee tecnología obsoleta ya que se realizó en el año 2007, además que solo se puede cortar superficies de dimensiones 0.625 x 0.34 m. El control está realizado por software con tarjeta compatible con Match3, se ejecuta desde un computador, los dispositivos electrónicos pueden sufrir desconfiguraciones a causa de virus y fallos en el ordenador.

Por ello, se necesita diseñar y construir una nueva cortadora por plasma CNC, capaz de cortar planchas de dimensiones 1,22 x 1,22 m; utilizando la cortadora Hypertherm Powermax 1000; se necesita tomar en consideración el diseño de un mecanismo para reducir la polución ocasionada por el corte; también se requiere que el control no sea por software sino por hardware, logrando con ello evitar errores en los elementos de control.

2.2. Alternativa de solución

Finalizado el estudio del estado del arte, donde se analizó varios proyectos de investigación, e industrias afines al corte por plasma automático, se ha llegado a una alternativa de diseño (ver Figura 19)

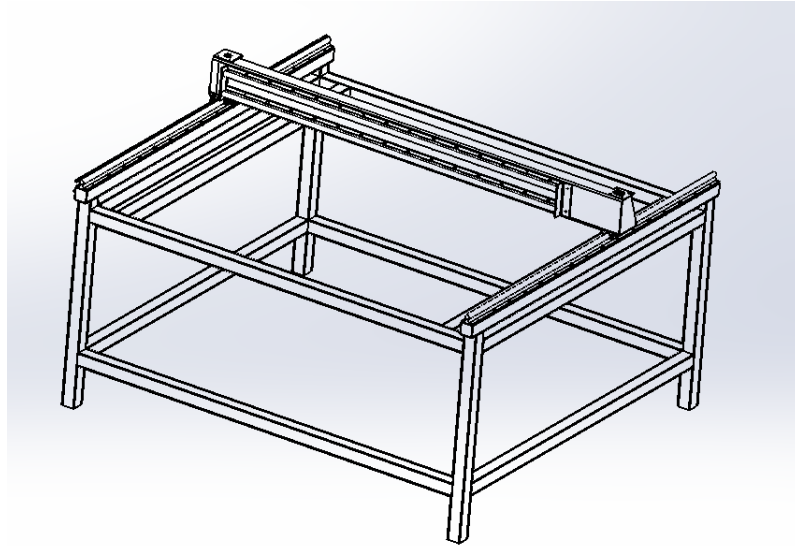


Figura 19: Bosquejo de la alternativa de solución

En esta figura se puede apreciar una estructura de pórtico móvil y mesa fija para el sistema de corte mecanizado, la antorcha irá ubicada en el pórtico a fin que pueda desplazarse en toda la superficie de trabajo.

2.3. Parámetros de diseño

Partiendo de la alternativa de solución, se procederá a analizar cada uno de los parámetros más idóneos, utilizando los datos obtenidos en el capítulo 1, en referencia al estado del arte, donde se tiene:

2.3.1. Dimensiones de la plancha

Previamente se ha establecido que se desea cortar planchas metálicas de hasta 1,22 x 1,22 m. adicionalmente, utilizando los rangos de operación descritos en la Tabla 1, el espesor máximo con el que se trabajará será 9,5 mm. (capacidad máxima de trabajo para un corte automático).

2.3.2. Velocidad de avance

Como valores de referencia se cuenta con las tablas del manual de usuario del equipo de corte Hypertherm Powermax 1000, en las que especifican la velocidad de corte dependiendo del espesor del material a cortar. En el Anexo 1(a), para cortes en acero al carbono con espesor de 1,9 mm. se recomienda una velocidad de avance de 5613 mm/min y corriente 40A, de la misma manera en el en el Anexo 1(b) para cortes en acero al carbono con espesor de 9,5mm. (Sección 2.3.1.) se recomienda una velocidad de avance de 1041 mm/min y corriente de 60A, finalmente se debe considerar la velocidad de corte máxima que recomienda el manual de usuario del controlador CNC HC-4500, que viene dado con un valor de 4000 mm/min (Ver Anexo 1 (c)), por lo que se trabajará con dicho valor, como velocidad en vacío.

2.3.3. Tipos de mesa de corte

Posterior al desarrollo del estado del arte, se realizó varios cuadros comparativos para determinar y seleccionar los parámetros de diseño.

Para dar valores a las tablas, se ha determinado un porcentaje en función de su importancia; por ejemplo, si se considera que es importante su porcentaje será mayor, la sumatoria de todos los porcentajes deben dar un total de 100%; en la columna denominada valor, tomará valores entre 1 y 10; dicho número será determinado previo al estudio realizado del estado del arte; y se tiene una casilla denominada total, que será el producto del valor con el porcentaje; al final de la columna total se tiene la sumatoria de dichos números, al comparar estos resultados se tendrá la opción adecuada para el diseño del sistema.

De acuerdo a la Tabla 2, se puede concluir: para el diseño de la estructura, se optó por realizar una mesa fija con pórtico móvil, que está sujeto a menor vibración, permitiendo tener mayor vida útil que un sistema de pórtico fijo y mesa móvil.

Tabla 2

Cuadro comparativo de los tipos de mesa de corte

Elementos de evaluación	Porcentaje	Pórtico fijo y mesa móvil		Mesa fija y pórtico móvil	
		Valor	Total	Valor	Total
Menor peso	25%	6	1.5	8	2
Facilidad en su desplazamiento	25%	7	1.75	9	2.25
Menor Vibración	25%	5	1.25	9	2.25
Velocidad	25%	9	2.25	8	2
TOTAL	100%		6.75		8.5

2.3.4. Material de la estructura

De acuerdo a la Tabla 3, se ha determinado que el material para la construcción será el acero A36, entre sus características se puede destacar mayor resistencia y dureza que el aluminio, permitiendo que el mecanismo sea más rígido y necesite de una plancha de menor espesor que una de aluminio; además, una vez finalizada su vida útil el material puede ser reciclado, lo cual es beneficioso para el medio ambiente.

Tabla 3

Tipos de material para construcción de la máquina

Elementos de evaluación	Porcentaje	Acero A36		Aluminio 6061	
		Valor	Total	Valor	Total
Costo menor	20%	9	1.8	7	1.4
Resistividad Eléctrica	20%	5	1	9	1.8
Resistencia a Tracción	15%	9	1.35	6	0.9
Elasticidad	10%	8	0.8	5	0.5
Resistencia	15%	9	1.35	6	0.9
Dureza	10%	9	0.9	7	0.7
Reciclable	10%	9	0.9	7	0.7
TOTAL	100%		8.1		6.9

2.3.5. Mecanismo de reducción de polución:

De acuerdo a la Tabla 4, el sistema a utilizar para la disminución de los contaminantes es la cama de agua, por la facilidad en su instalación, no genera ruido, su mantenimiento es muy sencillo, no necesita el cambio de repuestos al no utilizar un compresor ni filtros, solo una limpieza de la escoria con una brocha.

Tabla 4

Cuadro comparativo para el sistema de reducción de polución

Elementos de evaluación	Porcentaje	Filtración seca		Cama de agua	
		Valor	Total	Valor	Total
Costo menor	20%	4	0.8	7	1.4
Oxidación de piezas	10%	9	0.9	7	0.7
Control de humo	20%	9	1.8	9	1.8
Fácil instalación	20%	4	0.8	9	1.8
Ruido menor	20%	6	1.2	9	1.8
Mantenimiento	10%	6	0.6	9	0.9
TOTAL	100%		6.1		8.4

2.3.6. Transmisión

Al analizar la Tabla 5, se puede observar que los sistemas de transmisión más rentables son el husillo de bolas y piñón- cremallera ya sea por su precisión, velocidad, pero no son accesibles en el mercado nacional, razón por la cual se optó por implementar un sistema de transmisión por cadena, no posee deslizamiento, su peso es inferior en comparación con los anteriores sistemas mencionados, transmite altos torques.

Tabla 5

Tipos de transmisiones para plasma CNC

Elementos de evaluación	Porcentaje	Husillo de bolas		Piñón cremallera		Transmisión por cadenas	
		Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total
Precisión	25%	10	2,5	9	2,25	5	1,25
Fricción	20%	10	2	9	1,8	6	1,2
Transmisión de potencia	10%	8	0,8	9	0,9	10	1
Velocidad	10%	9	0,9	8	0,8	7	0,7
Peso	10%	6	0,6	7	0,7	10	1
Accesibilidad en el mercado	15%	4	0,6	4	0,6	8	1,2
Costo	10%	5	0,5	5	0,5	6	0,6
TOTAL	100%		7,9		7,55		6,95

2.3.7. Tipo de motor

Con los resultados obtenidos en la Tabla 6, se puede concluir que los motores idóneos para el mecanismo serán servomotores, aunque se optó

utilizar motores a pasos, por su costo inferior, menor consumo de energía, accesibilidad en el mercado y facilidad para obtener un buen control.

Tabla 6
Cuadro comparativo de tipos de motores

Elementos de evaluación	Porcentaje	Servomotores		Motores a pasos	
		Valor	Total	Valor	Total
Precisión	15%	10	1,5	6	0,9
Torque	10%	10	1	5	0,5
Comportamiento ante el ruido eléctrico	10%	6	0,6	7	0,7
Control	10%	10	1	7	0,7
Precio Bajo	15%	5	0,75	10	1,5
Menor consumo de energía	10%	7	0,7	10	1
Comportamiento ante ambiente hostil	10%	5	0,5	7	0,8
Lazo Abierto	10%	0	0	10	1
Lazo Cerrado	10%	10	1	0	0
TOTAL	100%		7,15		7

2.3.8. Finales de Carrera

Se determinó que la mejor opción es el sensor inductivo, no presenta errores de sensado ante polvo, aceites o líquidos en general, lo que no sucede con los sensores capacitivos, solo detecta metales, tienen alta durabilidad, al no estar en contacto con la pieza como es el caso de los sensores mecánicos.

Tabla 7
Finales de carrera

Elementos de evaluación	Porcentaje	Sensor Inductivo		Sensor Capacitivo		Sensor Mecánico	
		Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total
Durabilidad	30%	10	3	10	3	5	1,5
Consumo	10%	8	0,8	6	0,6	10	1
No tiene error por polvo	30%	10	3	1	0,3	1	0,3
Distancia de sensado	20%	7	1,4	10	2	1	0,2
Costo	10%	4	0,4	3	0,3	10	1
TOTAL	100%		8,6		6,2		4

Se adquirió un sensor inductivo modelo TK-12P4C F, sus características: 12 mm de diámetro, NPN NO, distancia de detección es 4 mm, corriente de salida máxima 200 mA. (Ver Figura 20)



Figura 20: Sensor Inductivo TK-12P4CF

Fuente: (soldgreat.com, 2015)

2.3.9. Controlador de 3 ejes

Analizando la Tabla 8, se determinó que el controlador ideal para la cortadora por plasma será el controlador ADTECH modelo HC-4500, teniendo como principal ventaja la compatibilidad con la cortadora por plasma Hypertherm Powermax 1000, posee mayor capacidad de memoria que los otros controladores mencionados en el capítulo 1, es compatible con motores a paso y servomotores.

Tabla 8

Controladores 3 ejes para Hypertherm Powermax 1000

Elementos de evaluación	Porcentaje	CNC Hypertherm EDGE Pro		ADTECH HC-4500		MISNCO SF-2012	
		Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total
Resolución	15%	10	1,5	10	1,5	10	1,5
Tamaño de archivo códigos G	15%	9	1,35	10	1,5	7	1,05
Consumo de energía menor	15%	8	1,2	9	1,35	10	1,5
Compatible con motores paso a paso y THC	15%	10	1,5	10	1,5	10	1,5
Tamaño Pantalla LCD	10%	10	1	10	1	5	0,5
Compatible con Hypertherm	10%	10	1	10	1	10	1
Precio	20%	10	2	9	1,8	7	1,4
TOTAL	100%		9,55		9,65		8,45

Las principales características del controlador ADT-HC 4500 son: trabaja a 24 V DC, memoria interna 256 MB, controla hasta 3 motores a pasos o servomotores, compatible con códigos G y M, rango de desplazamiento (+)99999.999/ (-)99999.999 mm. incluye una librería de 64 figuras pre establecidas, 16 canales para el control de los motores, 25 canales de entrada destinado para sensores y señales, 25 canales de salida para la conexión de la antorcha con capacidad para corte por plasma u oxicorte.

2.3.10. Control de altura de la antorcha (THC)

Acorde a la Tabla 9, se puede concluir que el controlador para altura a utilizar será el Microstep, modelo SH-HC30, su peso es menor que los otros controladores de altura descritos en la misma tabla; precisión +/- 0,05 mm, su velocidad de procesamiento es superior al controlador XPTHC-300II, disminuirá el tiempo de reacción anti colisiones de la punta de la antorcha en caso de un pandeo en la plancha y es compatible con el controlador CNC ADTECH HC-4500.

Tabla 9
Tipos de controladores de altura

Elementos de evaluación	Porcentaje	Hypertherm ArcGlide		XPTHC-300II		SH-HC30		HCA 1002	
		Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total
Precisión	10%	10	1	9	0,9	10	1	9	0,9
Velocidad	5%	9	0,45	10	0,5	9	0,45	10	0,5
Consumo de energía menor	10%	10	1	9	0,9	10	1	10	1
Incluye motor para eje z	20%	0	0	0	0	10	2	0	0
Menor peso	20%	10	2	5	1	10	2	1	0,2
Incluye control anti choques	15%	10	1,5	10	1,5	10	1,5	10	1,5
Precio	20%	9	1,8	5	1	9	1,8	7	1,4
TOTAL	100%		7,75		5,8		9,75		5,5

En la Tabla 10, se tiene los principales parámetros del controlador de altura

Tabla 10

Especificaciones eléctricas del controlador SH-HC30

Requerimientos de poder	24 VDC \pm2V 3^a
Motores aplicables	17/23 HS series de motores a pasos
Rango manual de ajuste	0 – 100 mm
Rango automático de control	3 – 30 mm
Ajuste de velocidad automático o manual	4000 mm/min (30° en bajada)
Precisión	\pm 0.5 mm
Temperatura de operación	-10°C to 50°C

Fuente: (Microstep, 2014)

2.4. Diseño del Sistema Mecánico

Definidos los parámetros de diseño y la alternativa de solución, se procederá a realizar los cálculos para la estructura; previamente es necesario considerar todos los pesos que actuarán en la misma; al revisar el Anexo 2, se determinó que el peso de la media plancha con un espesor de 9.5 mm. es 116.84 kg. (kubiec, 2015)

Además, se debe tomar en cuenta los pesos de los elementos que estarán presentes para el movimiento. Como un valor aproximado se tiene: el peso del pórtico (12,2 kg.), HTC (5 kg.), cadena (2 kg.), guías (25.4 kg.) motor del eje X (3,1 kg.), platinas (12 kg), protector cadena (2.2 kg). La sumatoria de los elementos será 61.9 Kg. Es necesario indicar que se trabajará en SI, por lo que es necesario realizar una conversión de unidades, teniendo:

$$W_{plancha} = 1146.2 \text{ N}$$

$$W_{elementos} = 607 \text{ N}$$

Tanto el peso de la plancha como el de los elementos afectarán a toda la estructura; para realizar el cálculo de esfuerzos es necesario determinar el elemento más crítico; para ello se utilizó el software CAE Solid Works, en donde se aplicaron las cargas a la estructura principal, tal como se puede apreciar en la Figura 21.

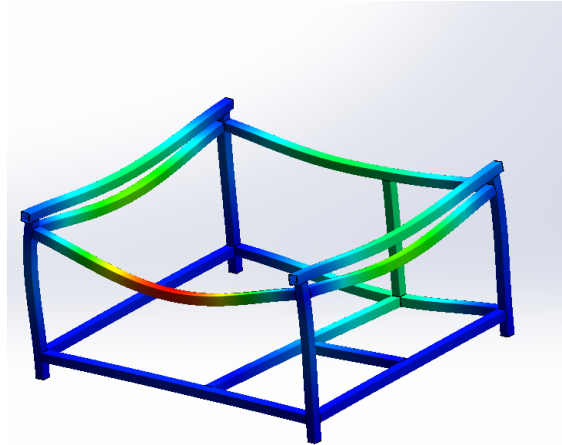


Figura 21: Determinación del elemento más crítico en la estructura

Como se puede apreciar, el elemento que posee el mayor desplazamiento es la viga superior ($L=1,6$ m). Para una mayor rigidez, la estructura será soldada, por ello su análisis se realizará como una viga hiperestática empotrada en sus dos extremos; la distribución de los pesos se muestra en la Figura 22.

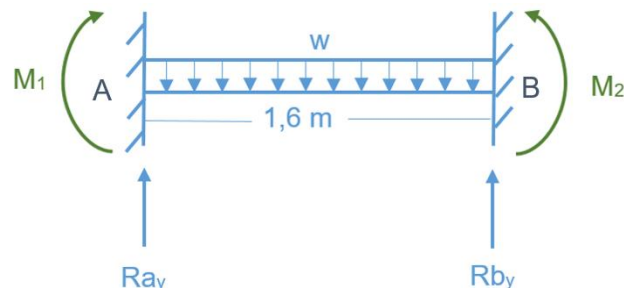


Figura 22: Distribución de cargas en la viga superior de la estructura

La sumatoria de la distribución de carga se tiene presente en la Ecuación 1.

$$W = W_{plancha} + \frac{W_{elementos}}{2} \quad (1)$$

Como el peso de los elementos se distribuirá uniformemente hacia los dos extremos de la estructura y el análisis se realiza solamente en uno de ellos, por lo que se utilizará la mitad de su peso.

$$W_{plancha} = \frac{1146,2 \text{ N}}{1,6 \text{ m}} = 716,375 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$\frac{W_{elementos}}{2} = \frac{303,5 N}{1,6 m} = 189,6875 \frac{N}{m}$$

Sustituyendo las cargas distribuidas de la plancha y de la mitad del peso de los elementos en la Ecuación 1, se tiene:

$$W = 906,0625 \frac{N}{m}$$

El momento en cada empotramiento está presente en la Ecuación 2:

$$M = \frac{1}{12} qL^2 \quad (2)$$

Reemplazando los valores se tiene:

$$M_1 = M_2 = 193,293 N - m$$

Para determinar las reacciones se utilizará las ecuaciones de equilibrio en el eje "Y", se tomarán como positivas las cargas en dirección hacia arriba:

$$\begin{aligned} \sum F_Y &= 0 \\ Ra_Y + Rb_Y - P &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Como un dato inicial se tiene $P = 1449,7 N$. Posteriormente se utilizará la sumatoria de momentos en el punto A, tomando como positivos los valores en sentido anti horario:

$$\begin{aligned} \sum M_A &= 0 \\ -M_1 + M_2 + (Rb_y * 1,6) - P(0,8) &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Despejando R_{by} se tiene:

$$R_{by} = \frac{0,8(1449,7)}{1,6} = 724,85 \text{ N}$$

Reemplazando R_{by} y P en la Ecuación 3 resulta:

$$R_{ay} = 724,85 \text{ N}$$

Calculadas las reacciones se obtendrá el diagrama de cortantes, para ello, se realiza un corte en la viga al final para determinar la ecuación de cortantes, (Ver Figura 23).

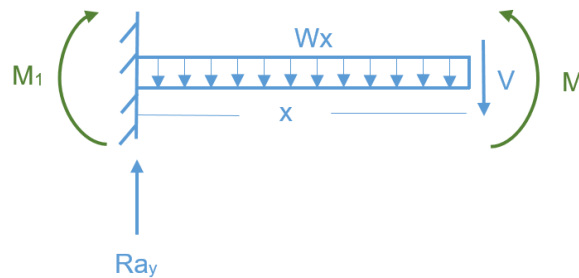


Figura 23: Corte transversal en la viga superior

Para la obtención del cortante (V), se parte de la ecuación de equilibrio en el eje "Y":

$$\sum F_Y = 0$$

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

Despejando V se tiene:

$$V = 724,85 - 906,0625(x)$$

Se reemplazará el valor de x en los probables puntos críticos, siendo estos el centro de la viga y sus extremos:

$$V(0) = 724,85 - 906,0625(0) = 724,85 \text{ N}$$

$$V(0,8) = 724,85 - 906,0625(0,8) = 0 \text{ N}$$

$$V(1,6) = 724,85 - 906,0625(1,6) = -724,85 \text{ N}$$

Se pudo determinar: en los extremos será máximo y en el centro será cero, el diagrama de cortantes está presente en la Figura 24; donde los valores positivos están hacia arriba.

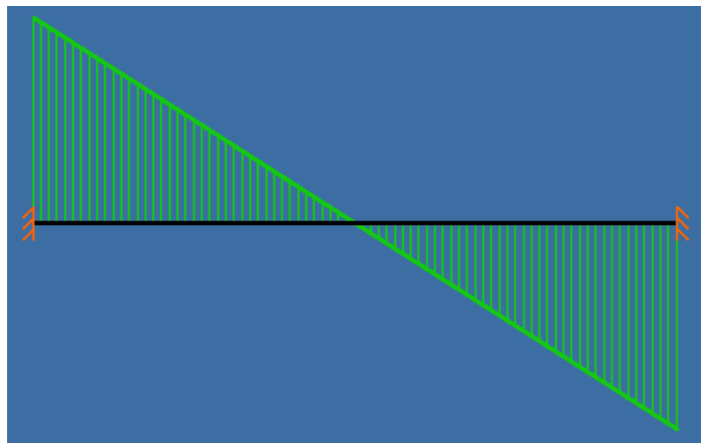


Figura 24: Diagrama de cortantes en la viga superior

Se determina el momento crítico

$$A1 = \frac{1}{2}Ray(0,8) = 289,94 \text{ N} - m$$

$$M(0) = M1 = 193,293 \text{ N} - m$$

$$M(0,8) = 193,293 - 289,94 = -96,647 \text{ N} - m$$

$$M(1,6) = -96,647 + 289,94 = 193,293 \text{ N} - m$$

El diagrama de momentos se muestra en la Figura 25:

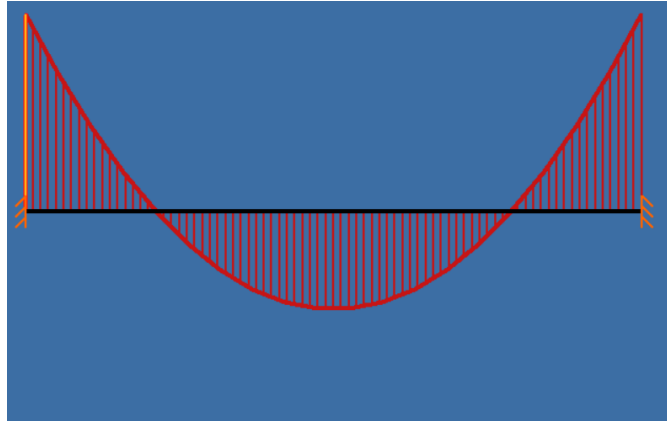


Figura 25: Diagrama de momentos en la viga superior

El momento crítico obtenido es 193,293 N-m y estará presente en los extremos de la viga. Ya que el material a utilizar será el acero A36, se conoce que $S_y = 250 \text{ MPa}$. De acuerdo a la sección 5-7 de (Mott, 2006), se aplica un factor de diseño igual a 2, debido a que se trata de un diseño de estructuras estáticas con cargas dinámicas, la cual brindará mayor confiabilidad en los datos obtenidos.

Partiendo de la Ecuación 5 se tiene:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{S_y}{n} \quad (5)$$

Donde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = Esfuerzo normal máximo

S_y = Resistencia a la fluencia del material

n = Factor de seguridad

Sustituyendo los valores se tiene:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 250/2 = 125 \text{ MPa}$$

Para obtener el elemento estructural es necesario encontrar el módulo de sección, el que se obtiene por medio de la Ecuación 6.

$$S = M/\sigma_{m\acute{a}x} \quad (6)$$

Donde:

$S = \text{Módulo de sección}$

$M = \text{Momento flector máximo}$

$\sigma_{\text{máx}} = \text{Esfuerzo normal máximo}$

Se reemplaza los valores:

$$S = \frac{193,293 \text{ N} - \text{m}}{125 \text{ MPa}} = 1,546 \times 10^{-6} \text{ m}^3 = 1,546 \text{ cm}^3$$

Al analizar el catálogo de perfiles cuadrados (Ver Anexo 3), se determinó que el perfil será un tubo estructural cuadrado de 40 mm. con un espesor de 2 mm. cabe indicar que la estructura cumple con un perfil de espesor 1,5 mm. pero, para evitar fallos por pandeo y vibraciones, el espesor necesariamente tiene que ser mayor. (IPAC, 2015)

El análisis del elemento estructural seleccionado será en sus extremos, ya que en este punto existe una mayor concentración de cargas; en esta sección el esfuerzo flector será máximo, y el cortante 0; porque el elemento estará sometido a flexión pura.

Para determinar el esfuerzo flector, se tiene la Ecuación 7:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (7)$$

Donde:

$\sigma = \text{Esfuerzo flector}$

$M = \text{Momento flector máximo}$

$c = \text{Distancia desde el centro de gravedad hacia su extremo}$

Como datos se tiene:

$M = 193293 \text{ N} - \text{mm}$

$c = 14,8 \text{ mm}$

$I = 92800 \text{ mm}^4$

Posteriormente, se reemplaza los valores en la Ecuación 7:

$$\sigma = \frac{193293 * 14,8}{92800} = 26,78 \text{ MPa}$$

La Ecuación 8 permite determinar los esfuerzos principales de Von Mises:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma}{2} \pm \sqrt{\frac{\sigma^2}{2} + \tau^2} \quad (8)$$

El elemento estará sometido a flexión pura, por ello τ será igual a 0:

$$\sigma_1 = \sigma = 26,78 \text{ MPa}$$

Para definir el factor de seguridad se utiliza la Ecuación 9:

$$n = \frac{\sigma_{perm}}{\sigma_{von\ mises}} \quad (9)$$

$$n = \frac{150 \text{ MPa}}{26,78 \text{ MPa}} = 5,6$$

El factor de seguridad es superior a 2, ya que el espesor utilizado para la estructura, supera al mínimo, se consideró de esta manera para asegurar el modelo sin incurrir en un diseño dinámico, en el que se incluyen cálculos de: frecuencia natural, resonancia, análisis espectral, armónicos, etc. Con ello se logrará reducir el desequilibrio en el mecanismo, mayor robustez, disminuirá el riesgo a fallos por fatiga, elementos móviles y concentradores de tensiones.

2.5. Diseño del Tornillo sin fin para el tercer eje (Z)

El tercer eje estará soportado en el pórtico, donde la mesa será fija y el pórtico móvil; el diseño debe soportar el peso del HTC y de la antorcha. En la Figura 26 se tiene la distribución de fuerzas que estarán presentes en el tornillo sin fin, transmitirá el movimiento para que la antorcha pueda subir y bajar libremente.

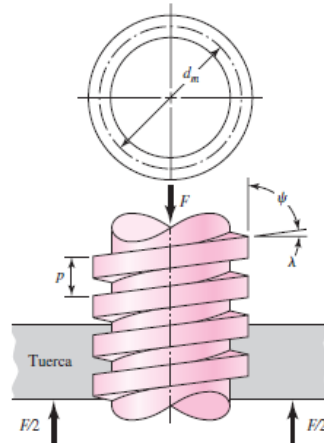


Figura 26: Distribución de fuerzas del tornillo sin fin del tercer eje

La Figura 27 representa los diagramas de fuerzas para subir y bajar la carga:

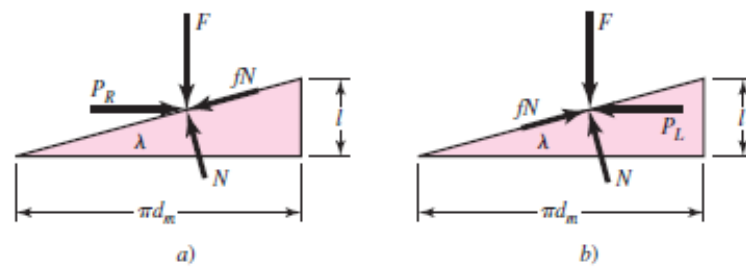


Figura 27: Diagrama de fuerzas tornillo sin fin

Donde:

P_R : Fuerza cuando sube la carga

P_L : Fuerza cuando baja la carga

N : Normal

F : Fuerza de compresión axial

l : Avance

f : Coeficiente de fricción

λ : Ángulo de avance de la rosca

ψ : Ángulo de la hélice

Con los respectivos diagramas de fuerzas se determina las ecuaciones tanto para subir como bajar la carga. La Ecuación 10 permite calcular el torque necesario para que venza la fricción y pueda elevar la carga:

$$T_R = \frac{Fdm}{2} \left(\frac{l + \pi f dm}{\pi dm - fl} \right) + \frac{F f_c d_c}{2} \quad (10)$$

La Ecuación 11 ayuda a calcular el torque para bajar la carga:

$$T_L = \frac{F d_2}{2} \left(\frac{\pi f d_2 - l}{\pi d_2 + fl} \right) + \frac{F f_c d_c}{2} \quad (11)$$

En la Figura 28 se observa los parámetros de una rosca métrica

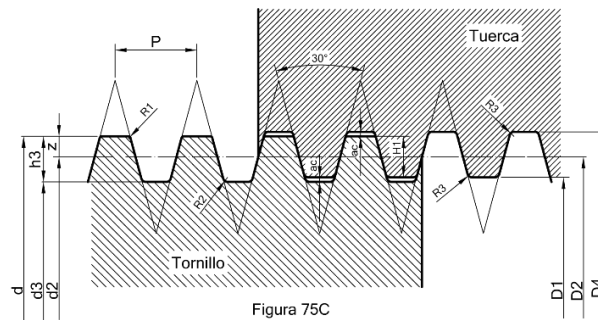


Figura 28: Rosca Trapezoidal ISO

Fuente: (Del Águila, 2016)

Con la tabla de dimensiones de roscas trapezoidales, se obtiene los parámetros específicos para una rosca Tr22x5, mirar (Ver Anexo 4).

$$d = 22 \text{ mm}$$

$$\text{Paso: } p = 5 \text{ mm}$$

$$d_2 = 19,394 \text{ mm}$$

$$d_3 = 16,5 \text{ mm}$$

Adicionalmente otros datos iniciales son:

$$\text{Diámetro del collarín: } d_c = 30 \text{ mm}$$

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

$$F = 119,4 \text{ N}$$

El avance será determinado por: $l = np = 5 \text{ mm}$

Se reemplaza los valores en la Ecuación 10

$$T_R = \frac{119,4 * 0.019394}{2} \left(\frac{0.005 + \pi * 0.07 * 0.019394}{\pi * 0.019394 - 0.07 * 0.005} \right) + \frac{119,4 * 0.07 * 0.03}{2}$$

$$T_R = 0.302 N - m$$

Para la selección del motor se utilizará este valor con un factor de seguridad de 1,5 ya que el recomendado es de 1 a 2 (Mott, 2006) y transformando su valor a oz-in se tiene: $T_R = 64,16 \text{ oz} - \text{in}$.

Se reemplaza los valores en la Ecuación 11

$$T_L = \frac{119,4 * 0.019394}{2} \left(\frac{\pi * 0.07 * 0.019394 - 0.005}{\pi * 0.019394 + 0.07 * 0.005} \right) + \frac{119,4 * 0.07 * 0.03}{2}$$

$$T_L = 0.111 N - m$$

2.6. Cálculo de la cadena de transmisión y piñones

En el diseño de la transmisión los elementos más importantes serán la cadena y los piñones, de ellos dependerá la precisión de todo el sistema, para seleccionar los motores se requiere previamente hacer el diseño y selección de la cadena y los piñones; el torque requerido en los motores dependerá del diámetro del piñón, así como del número de dientes de la misma (Z); por ello, se debe calcular una cadena que soporte toda la tensión ejercida por la carga a desplazarse, definida por la Ecuación 12:

$$\sigma = F * f_r * f_s * k_c \quad (12)$$

Donde:

σ = Resistencia a la tracción de la cadena (average tensile strength)

F = Carga a desplazarse

f_r = coeficiente de fricción

f_s = coeficiente de deslizamiento

k_c = coeficiente de velocidad de la cadena

De la Tabla 11 se toma el valor del coeficiente de rozamiento para una cadena de rodillo estándar, en un ambiente seco, que corresponde a 0,21.

Tabla 11
Coeficiente de fricción de rodamiento (f_r)

Tipo de rodillo	Seco	Lubricado
rodillo grande	0,12	0,08
rodillo standard	0,21	0,14

Fuente: (catarina.udlap.mx, 2015)

Se aprecia en la Tabla 12 que el coeficiente de fricción de deslizamiento será 0,33 para un sistema construido en acero.

Tabla 12
Coeficiente de fricción de deslizamiento (f_s)

Material	Coeficiente	
	Seco	Lubricado
Acero sobre acero	0,33	0,2
Hierro fundido en acero fundido sobre la misma superficie	0,5	0,4
Acero sobre bronce	-	0,15
Acero sobre madera dura	0,35	0,25
Hierro fundido en acero fundido sobre madera dura	0,44	-

Fuente: (catarina.udlap.mx, 2015)

Se determinará la velocidad de avance de la antorcha en vacío; utilizando la velocidad máxima de corte permitida en el controlador CNC: $V = 4000 \text{ mm}/\text{min}$.

Ya que el catálogo de cadenas viene dado en el sistema inglés (SI), es necesario transformar la velocidad de la cadena a dichas unidades, por consiguiente:

$$V = \frac{4000 \text{ mm}}{\text{min}} * \frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ mm}} * \frac{1 \text{ ft}}{30,48 \text{ cm}} = 13,12 \text{ ft}/\text{min}$$

Con la velocidad de la cadena calculada, se puede conocer el factor de velocidad que para el diseño será igual a 1 (Ver Tabla 13).

Tabla 13**Coefficiente de velocidad de la cadena (kc)**

Velocidad de cadena (ft/min)	Factor de Velocidad
0/50	1
50/100	1,2
100/160	1,4
160/230	1,6
230/300	2,2
300/360	2,8
360/400	3,2

Fuente: (catarina.udlap.mx, 2015)

La carga será: $F = 303,5 N = 68,23 lbf$ (peso de los elementos, Sección 2,4)
 Reemplazando los valores en la Ecuación 12 se tiene:

$$\sigma = 21,03 lbf$$

Con el valor de “average tensile strength” y analizando el catálogo de cadenas de transmisión (Ver Anexo 5), se seleccionó la cadena ISO N° 35, la cual soporta una tensión máxima de 2100 lb. (Mott, 2006)

Para determinar el verdadero valor de la resistencia de la cadena, se añadirá un nuevo cálculo incluyendo datos, como el peso de la cadena y la distancia entre centros de los piñones. En la Ecuación 13 está presente el valor real de la tensión a la que estará sujeta la cadena, incluyendo la distancia entre los centros de los piñones y el peso de todos los elementos.

$$\sigma_R = (2,1W + M)f_r C \quad (13)$$

Donde:

σ_R = Resistencia a la tracción de la cadena Real (average tensile strength)

W = Peso aproximado de la cadena

M = Carga de los elementos

f_r = Coeficiente de fricción de la cadena

C = Distancia entre los centros de los piñones

Datos:

$$W = 0,348 \text{ lbf}$$

$$M = 68,23 \text{ lbf}$$

$$f_r = 0,21$$

$$C = 4,0027 \text{ ft}$$

Sustituyendo los valores se tiene:

$$\sigma_R = 57,97 \text{ lbf}$$

En el Anexo 5 se observa los valores de "average tensile strength", donde se ha seleccionado la cadena ISO N°35, el paso de la cadena (3/8 in) se muestra en el Anexo 6. El Catálogo de piñones para un paso de 3/8 de pulgada (Ver Anexo 7), está distribuido acorde al número de dientes. Por la geometría del diseño, se necesita un piñón pequeño por ello se seleccionó como "N° Teeth=20".

2.7. Cálculos para la selección de los Motores "X" y "Y"

En esta sección se realizará el cálculo para dos motores, uno para desplazar a la antorcha por el eje "X" y otro para el pórtico en el eje "Y".

2.7.1 Cálculos para el motor del eje "X"

El cálculo se lleva a cabo con la siguiente nomenclatura:

m_{Total_x} = masa total a desplazar del eje "X"

$r_{catarina}$ = radio de la catarina

U_k = Fuerza de rozamiento en las guías

a = aceleración de los motores

F = Fuerza total para el movimiento de los motores

F_T = Fuerza tangencial

F_r = Fuerza de rozamiento en las guías

$T_c =$ Tensión de la cadena

$m =$ masa a desplazar

$a =$ aceleración tangencial

$U_k =$ Coeficiente de rozamiento en las guías

$P =$ potencia de los motores

$\sigma =$ Tensión real de carga

$V =$ Velocidad de avance del sistema

Datos:

$$m_{Total_x} = 4,683 \text{ lb}$$

$$r_{catarina} = 1,2965 \text{ in}$$

$$U_k = 0,004$$

$$a = 1,31 \text{ ft/s}^2 (\text{recomendada por el fabricante})$$

Se comenzará calculando el torque necesario para desplazar el peso total en el eje "X", con la Ecuación 14:

$$T = F * r \quad (14)$$

La fuerza total que ejerce para el movimiento del motor en el eje "X", será el resultado de la Ecuación 15:

$$F = F_T + F_r + T_c \quad (15)$$

Para determinar la Fuerza tangencial se utilizará la Ecuación 16

$$F_T = m * a \quad (16)$$

La Fuerza de rozamiento de las guías se utiliza la Ecuación 17:

$$F_r = F_T * U_k \quad (17)$$

El cálculo de la potencia requerida en los motores, se tiene con la Ecuación 18:

$$P = (\sigma * V)/33000 \quad (18)$$

Se reemplaza los valores en la Ecuación 14

$$F_T = 4,683 \text{ lb} * 1,31 \text{ ft/s}^2$$

$$F_T = 6.134 \text{ lbf}$$

Sustituyendo los valores en la Ecuación 17 se tiene:

$$F_r = 6,134 \text{ lbf} * 0,004 = 0,01 \text{ lbf}$$

A continuación, se reemplaza los valores de F_r y F_T en la Ecuación 15:

$$F = 5,212 \text{ lbf} + 0,02 \text{ lbf} + 5 \text{ lbf} = 10,232 \text{ lbf}$$

Se reemplaza los valores en la Ecuación 16:

$$T = F * r = 13,27 \text{ lbf} - \text{in} = 212,32 \text{ oz} - \text{in}$$

Para asegurar el diseño debido a que el cálculo es ideal, se utiliza un factor de seguridad de 1,5: (Mott, 2006)

$$T = 212,32 * 1,5 = 318,48 \text{ Oz} - \text{in}$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la Ecuación 18, se obtiene la potencia requerida en el motor para el eje "X":

$$H = \frac{13,27 \text{ lbf} * 16,4 \frac{\text{ft}}{\text{min}}}{33000} = 0,006 \text{ HP}$$

2.7.2 Cálculos para el motor del eje "Y"

Se lo realiza de igual manera que los cálculos para el eje "X", utilizando la misma nomenclatura y las mismas ecuaciones.

Datos:

$$m_{Totaly} = 31.48 \text{ lb}$$

$$r_{catarina} = 1,2965 \text{ in}$$

$$U_k = 0,004$$

$$a = 1,31 \text{ ft/s}^2 (\text{recomendada por el fabricante})$$

La fuerza tangencial se determina reemplazando los valores en la Ecuación 14:

$$F_T = 31.48 \text{ lb} * 1,31 \text{ ft/s}^2$$

$$F_T = 41.24 \text{ lbf}$$

Para la fuerza de rozamiento se reemplaza los valores en la Ecuación 17:

$$F_r = 41.24 \text{ lbf} * 0,004 = 0,16496 \text{ lbf}$$

A continuación, se reemplaza los valores de F_R y F_T en la Ecuación 15, para obtener la fuerza necesaria para el movimiento del motor:

$$F = 41.24 \text{ lbf} + 0,16496 \text{ lbf} + 10 = 51.4 \text{ lbf}$$

Se reemplaza los valores en la Ecuación 16:

$$T = F * r = 66.64 \text{ lbf} - \text{in} = 1066,24 \text{ oz} - \text{in}$$

Utilizando un factor de seguridad de 1,5 se tiene:

$$T = 1066,24 * 1,5 = 1599.36 \text{ Oz} - \text{in}$$

El cálculo de la potencia requerida en los motores, se la realiza con la Ecuación 18:

$$H = \frac{66,64 \text{ lbf} * 16,4 \frac{\text{ft}}{\text{min}}}{33000} = 0,033 \text{ HP}$$

2.8. Análisis CAE

Actualmente existen varias herramientas computacionales, que pueden ayudar a obtener los esfuerzos principales sin importar la geometría que posea el diseño, como principales alternativas se tiene: Solidworks, Catia, Ansys, etc.

Para el análisis, se utilizó la herramienta Solidworks versión 2016, donde se analizará los elementos que estén sometidos a mayor concentración de esfuerzos.

2.8.1. Análisis en la viga superior de la estructura principal

En la Sección 2.4. se determinó que el elemento más crítico será la viga principal, por ello en este punto se utilizará el software para comprobar los cálculos realizados previamente; para ello se tiene:

Datos:

$$\sigma_{Von\ Misses} = 30,82 \text{ MPa}$$

$$n = 5.6$$

Para su análisis, el programa subdivide al modelo en pequeñas partes, este proceso se lo conoce como mallado, el valor obtenido en la simulación, dependerá directamente del tamaño y tipo de las mallas, debido a que el cálculo lo realiza en los nodos de las mismas; por ello una vez que se han ajustado los parámetros, hasta que el valor calculado sea similar al valor simulado, se aplicará el mismo tipo de mallado al resto de elementos a analizarse.

En la Figura 29 se observa que el esfuerzo de Von Misses es $2.872e + 007 \text{ N/m}^2$; si este valor lo pasamos a unidades standard, se tiene

28,72 MPa, lo que nos indica que hay una diferencia de 2,1 MPa entre el valor calculado con el valor obtenido en el programa CAE.

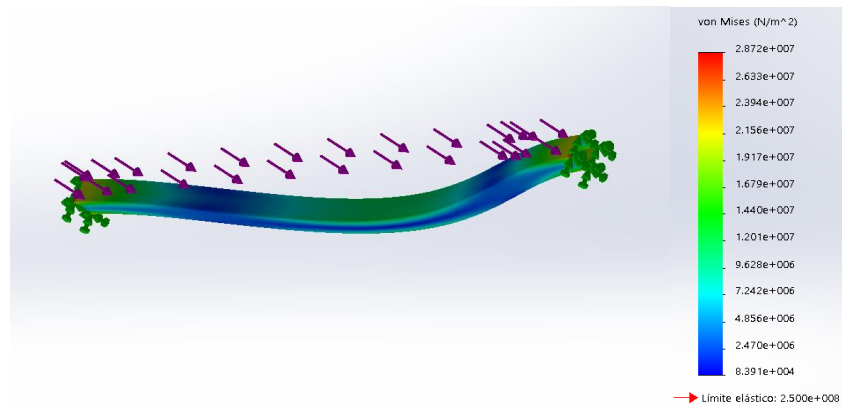


Figura 29: Esfuerzo Von Mises en la viga superior

En la Figura 30 se observa un factor de seguridad de 5.8, la diferencia del valor calculado con el de Solid Works es 0.2; por lo tanto el programa será utilizado para determinar el esfuerzo de Von Mises y el factor de seguridad, en los diferentes y principales elementos del diseño mecánico.

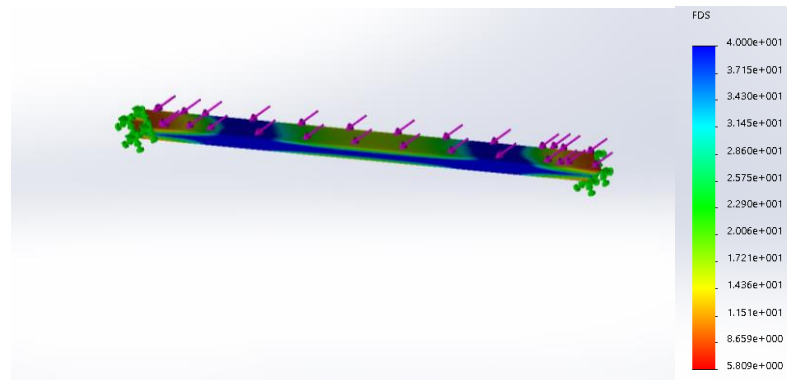


Figura 30: Factor de seguridad en la viga superior

2.8.2. Análisis de la estructura principal

Para realizar su análisis se aplicó las cargas en la estructura como se aprecia en la Figura 31, la carga de los elementos (607 N) se aplica a los eslabones, donde irá apoyado el pórtico, y en el resto de la estructura se distribuye el peso de la plancha de 1,22 x 1,22 m (1146,2 N). La estructura estará empotrada en sus cuatro extremos

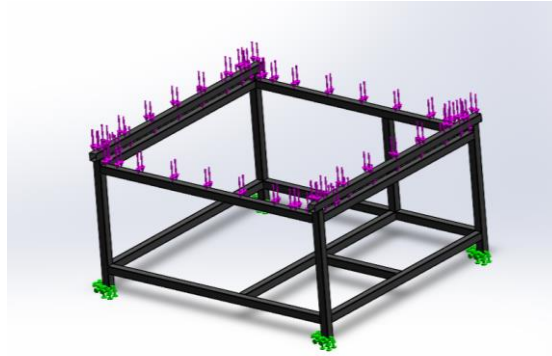


Figura 31: Distribución de esfuerzos en la estructura principal

En la Figura 32, se muestran las tensiones de Von Mises, indicando un valor máximo de $67,14 \text{ MPa}$ y se ubica en las uniones; conociendo que el esfuerzo normal máximo es 125 MPa (Sección 2.4), las tensiones simuladas son inferiores a las máximas permitidas en una proporción de 1,8, indicando que la estructura soportará todos los elementos montados en el sistema.

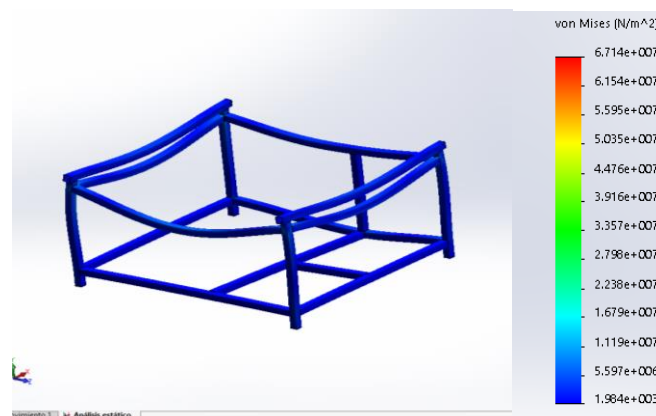


Figura 32: Tensiones V.M. en la estructura principal

En la Figura 33 se observa la distribución del factor de seguridad, siendo 3,7 el mínimo, según “ (Mott, 2006)”, se debe trabajar con un factor de 2, se debe tomar en cuenta que el espesor del perfil está sobredimensionado, para evitar fallos a causa de vibraciones y con ello, mantener mayor estabilidad en el sistema.

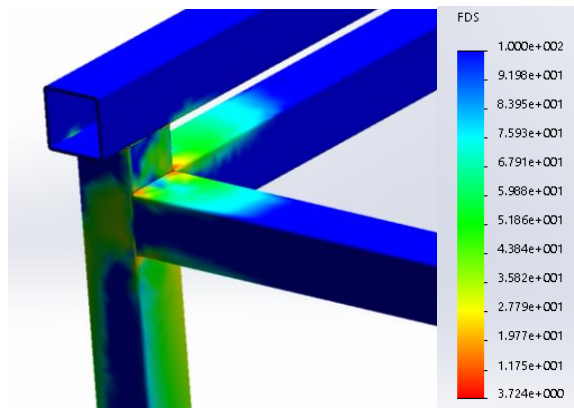


Figura 33: Factor de seguridad en la estructura principal

2.8.3. Análisis en el pórtico

El pórtico desplazará a la antorcha, soportará al controlador de altura y y el peso de los elementos para el sistema de transmisión: motor a pasos, cadena, canaleta porta cables, protecciones para cadena, para su análisis se aplicó una fuerza en la parte central haciendo una simulación al estar montados los elementos (ver Figura 34).

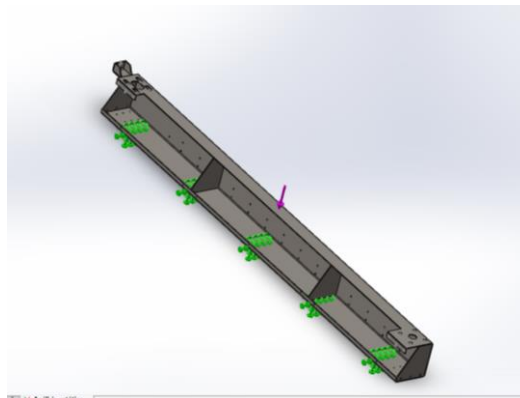


Figura 34: Distribución de esfuerzos en el pórtico

En la Figura 35 se muestran las tensiones de Von Mises, en donde el valor máximo simulado será 49.6 MPa . el valor obtenido es inferior al máximo permitido (125 MPa), su gran diferencia se debe a que se trabajó con planchas de 2 mm . para una estructura que no requiere soportar mucho peso, con el objetivo de tener un pórtico rígido; no debe sufrir pandeos mientras se desplaza la antorcha, por el área de trabajo.

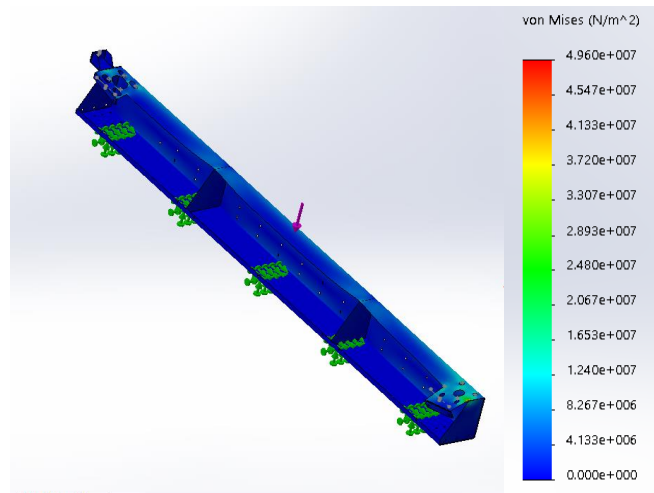


Figura 35: Tensiones V.M. en el pórtico

En la Figura 36 se presenta el análisis del factor de seguridad, donde es visible que el punto crítico será en el extremo; 4.97. este valor es el resultado de seleccionar el perfil de 2 mm.

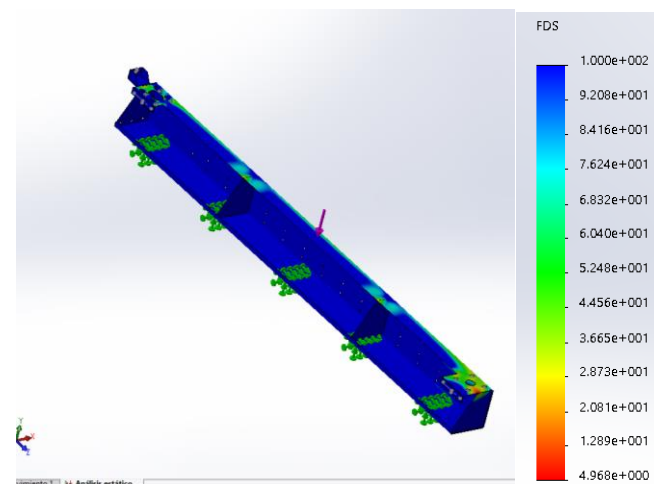


Figura 36: Factor de seguridad en el pórtico

2.8.4. Análisis del eje de transmisión

Para desplazar al mismo tiempo el pórtico por el eje "Y", se optó colocar un eje que transmita el movimiento simultáneamente a sus dos extremos por medio de piñones; aplicando un torque de 2 N. en la Figura 37 se observa que en uno de sus extremos actuará el efecto del torque y el eje estará sujeto en ambos lados.

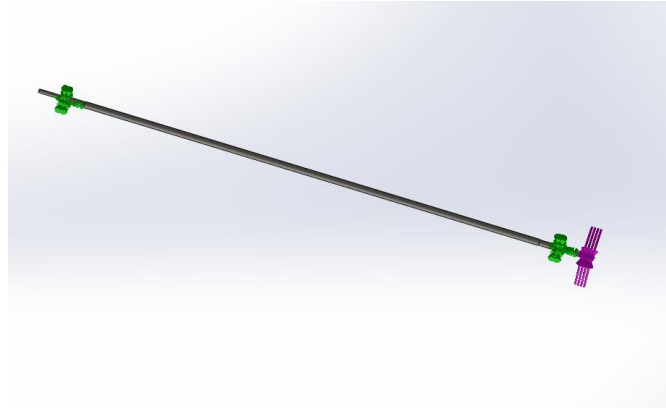


Figura 37: Acción del torque en el eje de transmisión

En la Figura 38 se muestran las tensiones de Von Mises, con un valor de $54,22 \text{ MPa}$, a pesar de seleccionar un eje con un espesor de 1 mm . el resultado es muy inferior al esfuerzo normal máximo (125 MPa). esto se debe a que el eje solo estará sometido a torsión, ya que la fuerza será transmitida por matrimonios, estando apoyado en chumaceras sin soportar ningún elemento estructural.

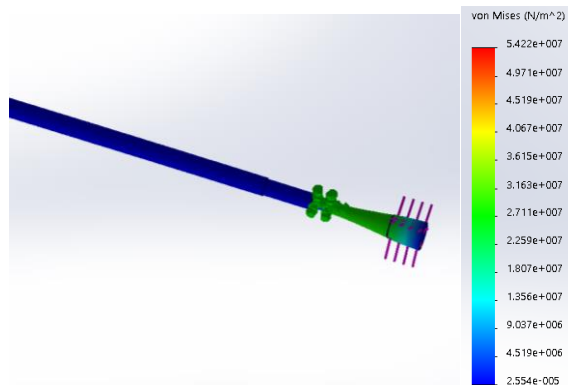


Figura 38: Tensiones V.M. en el eje de transmisión

En la Figura 39 se observa la zona del factor de seguridad crítico con un valor de 4.61 , obteniendo un valor superior al sugerido para elementos de transmisión de potencia (3). (Mott, 2006)

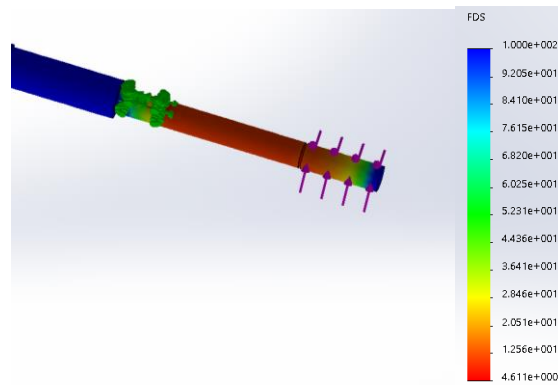


Figura 39: Factor de seguridad en el eje de transmisión

2.9. Selección de motores y driver

Para la selección de los motores se necesita conocer el torque requerido para el desplazamiento de los ejes, valores obtenidos previamente, en donde se tiene: para el eje “Z” un valor de 64,16 oz-in (Sección 2.5), para el desplazamiento del eje “X” 318,48 oz-in y para el eje “Y”, 1599,36 oz-in (Sección 2.7).

Se selecciona un motor a pasos para el eje “Z” porque se requiere movimientos precisos para el ascenso y descenso de la antorcha, este tipo de motor al ser energizado una o más de sus bobinas queda enclavado en una posición deseada característica requerida para el corte por plasma, estará ubicado en la parte superior del pórtico, en el catálogo de motores a paso híbrido de dos fases se elige un motor NEMA 17 modelo 17HS111 (ver Anexo 9), en la Tabla 14 se observan las especificaciones del motor. (Mott, 2006)

Tabla 14

Especificaciones Generales Motor a pasos 17HS111

Precisión	±5%
Temperatura máxima	80°C Máx
Rango de temperatura ambiente	20°C \mp 50°C
Resistencia de aislamiento	3.7M Ω Min 50V DC
Fuerza Dieléctrica	500V AC

Fuente: (Guangzhou, 2012)

Adicionalmente, en la Tabla 15 se tiene las características eléctricas de dicho motor.

Tabla 15
Especificaciones eléctricas del motor

Modelo	Paso (°)	Eje Motor (mm)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Inductancia (mH)	Torque (oz-in)	Peso del motor (kg)
17HS111	1.8	39.8	24	2	2.2	68	0.28

Fuente: (Guangzhou, 2012)

El torque requerido para el desplazamiento en el eje “X” es de 318,48 oz-in, para su selección se opta por la marca WANTAI modelo 57BYGH115-003B, NEMA 23 con torque de 425 oz-in, el motivo de seleccionar un torque mayor fue por la disponibilidad en el mercado, muy utilizado en la implementación de máquinas CNC por su alta calidad y confiabilidad, en el catálogo de motores a paso NEMA 23 (Ver Anexo 10), se observa las características del motor.; en la Tabla 16 se muestra las características técnicas del mismo.

Tabla 16
Especificaciones Generales motor a pasos 57BYGH115-003b

Precisión	±5%
Temperatura máxima	80°C Máx
Rango de temperatura ambiente	20°C ±50°C
Resistencia de aislamiento	100MΩ Min 50V DC
Fuerza Dieléctrica	500V AC

Fuente: (Guangzhou, 2012)

Adicionalmente, en la Tabla 17 se tiene las especificaciones eléctricas del motor NEMA 23.

Tabla 17
Especificaciones eléctricas del motor

Modelo	Paso (°)	Eje Motor (mm)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Inductancia (mH)	Torque (oz-in)	Peso del motor (kg)
57BYGH15-003B	1.8	115	24	3.5	9	425	1.55

Fuente: (Guangzhou, 2012)

El driver DQ542MA es un controlador para motores a pasos híbrido de dos fases, posee alto rendimiento, 8 canales de ajuste de corriente de fase de

salida, 15 subdivisiones de canales pulso/rev, alta velocidad de inicio, el torque del motor está relacionado con la velocidad, (Ver Tabla 18).

Tabla 18
Especificaciones eléctricas Driver DQ542MA

Voltaje de entrada	18-50 VDC
Corriente de entrada	< 4A
Corriente de salida	1.0 A ~ 4.2 A
Potencia	80 W
Temperatura	Temperatura de trabajo -10 / 45°C ; Temperatura de almacenamiento -40°C/70°C
Humedad	Sin condensación, sin gotas de agua
Gas	Prohibición de gases combustibles y polvo conductor
Peso	200 g

Fuente: (Guangzhou, 2012)

En la Tabla 19 están presentes los pines de conexión del driver DQ542MA, A+/A-/B+/B- son las fases, DC+/DC- es la alimentación.

Tabla 19
Conexión del driver DQ542MA

Pines de conexión	1	A+	Negro	Color de cable
	2	A-	Verde	
	3	B+	Rojo	
	4	B-	Azul	
	5,6	DC+ DC-	Fuente de alimentación	Fuente de alimentación: 18-50 VDC La corriente máxima de entrada no puede alcanzar 4 A

Fuente: (Guangzhou, 2012)

Para el eje "Y" se selecciona un motor a pasos híbrido de dos fases marca WANTAI modelo 85BYGH450C-012, NEMA 34 las especificaciones se encuentran en la, Tabla 20.

Tabla 20
Especificaciones Generales motor a pasos 85BYGH450C-012

Precisión	±5%
Temperatura máxima	80°C Máx
Rango de temperatura ambiente	20°C \mp 50°C
Resistencia de aislamiento	100M Ω Min 50V DC
Fuerza Dieléctrica	500V AC

Fuente: (Guangzhou, 2012)

En la Tabla 21 se tiene las especificaciones eléctricas del motor NEMA 34.

Tabla 21
Especificaciones eléctricas del motor

Modelo	Paso (°)	Eje Motor (mm)	Voltaje (V)	Corriente (A)	Inductancia (mH)	Torque (oz-in)	Peso del motor (kg)
85BYGH4 50C-012	1.8	115	24	3	22	1600	4

Fuente: (Guangzhou, 2012)

El driver DQ860MA es un controlador de motor a paso híbrido de dos fases, permite que el motor funcione sin problema ante ruido y vibraciones, ampliamente utilizados en máquinas CNC, máquinas de embalaje, máquinas de bordado; entre sus características se puede mencionar: posee alto rendimiento, 8 canales de ajuste de corriente de fase de salida, 15 subdivisiones de canales pulso/rev, alta velocidad de inicio, sus especificaciones están en la Tabla 22.

Tabla 22
Especificaciones eléctricas Driver DQ860MA

Voltaje de entrada	18-50 VDC
Corriente de entrada	< 6 A
Corriente de salida	2.8 A ~ 7.8 A
Potencia	80 W
Temperatura	Temperatura de trabajo -10 / 45°C ; Temperatura de almacenamiento -40°C/70°C
Humedad	No condensación, No gotas de agua
Gas	Prohibición de gases combustibles y polvo conductor
Peso	500 g

Fuente: (Guangzhou, 2012)

En la Tabla 23 están presentes los pines de conexión del driver DQ860MA

Tabla 23
Conexión del driver DQ860MA

Pines de conexión	1	A+	Negro	Color de cable
	2	A-	Verde	
3	B+	Rojo		
4	B-	Azul		
5,6	DC+	Fuente de alimentación		Fuente de alimentación: 24-80 VDC La corriente máxima de entrada no puede alcanzar 6 ^a .
	DC-			

Fuente: (Guangzhou, 2012)

2.10. Sistema de control

Determinados todos los elementos electrónicos, requeridos para la implementación del sistema de control, y previo a desarrollar los planos eléctricos, se procede a describir los pines de conexión del controlador CNC y THC.

2.10.1. Controlador CNC ADTECH HC-4500

En el controlador se tienen presentes 3 puertos para el control de todo el sistema, el XS3 (Conexión de motores), XS5(Entradas), XS6(Salidas); a continuación: un puerto DB15 denominado XS3 para la conexión de los drivers de los motores a pasos, dos puertos DB25 macho uno denominado XS5 que permite conectar las entradas como sensores, paro de emergencia, señal de ascenso y descenso de la antorcha, señal de detección de arco de plasma, además posee un segundo puerto DB25 hembra denominado XS6 para la conexión de salidas de las válvulas de control.

a. Puerto XS3

La Figura 40 se encuentran los pines del puerto DB15 denominado XS3, que se conecta a los drivers de los motores. Los detalles están en la Tabla 24.

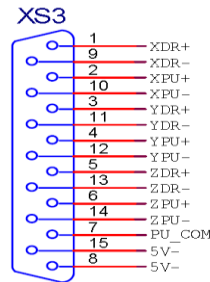


Figura 40: Puerto XS3
Fuente: (ADTECH, 2014)

Tabla 24
Distribución de pines del puerto para motores

Line S/N	Nombre	Función
1	XDR+	Dirección de la señal X+
9	XDR-	Dirección de la señal X -
2	XPU+	Señal de pulso X+
10	XPU-	Señal de pulso X-
3	YDR+	Dirección de la señal Y+
11	YDR-	Dirección de la señal Y-
4	YPU+	Señal de pulso Y+
12	YPU-	Señal de pulso Y-
5	ZDR+	Dirección de la señal Z+
13	ZDR-	Dirección de la señal Z -
6	ZPU+	Señal de pulso Z+
14	ZPU-	Señal de pulso Z -
7	PU_COM	Fuente interna de 5V positivo, no es permitido conectar a una fuente externa de poder
15	5V-	Fuente interna de 5V negativo, no es permitido conectar a una fuente externa de poder
8	5V-	Fuente interna de 5V negativo, no es permitido conectar a una fuente externa de poder

Fuente: (ADTECH, 2014)

b. Puerto XS5

En la Figura 41 se muestra la distribución de los pines para el puerto DB25 también llamado XS5, al cual llegarán todas las señales de entrada, como arco de voltaje de la antorcha, sensores, etc.

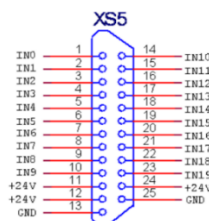


Figura 41: Puerto XS5
Fuente: (ADTECH, 2014)

En la Tabla 25 se observa la explicación de cada pin del puerto XS5

Tabla 25
Distribución de pines para el puerto de entrada del controlador

Line S/N	Nombre	Función
1	IN0	Detección del arco de voltaje de la antorcha
2	IN1	Posición original, señal de detección del límite del eje Z, bajo la llama (control de altura).
3	IN2	Manual/Auto accionamiento (Para un reseteo, inválido por el momento (eje Z negativo)
4	IN3	Paro externo
5	IN4	Accionamiento externo X+
6	IN5	Accionamiento externo Y+
7	IN6	Control de aceleración para un control externo
8	IN7	Accionamiento de la antorcha hacia arriba
9	IN8	Límite positivo de X (>X+)
10	IN9	Límite negativo de X (X-<)
11	+24V	Fuente interna de control 24V+ (no conectar ningún circuito)
12	+24V	Fuente interna de control 24V+ (no conectar ningún circuito)
13	GND	Fuente interna de control 24V tierra
14	IN10	Límite positivo de Y (>Y+)
15	IN11	Límite negativo de Y (Y-<)
16	IN12	Paro de emergencia externo
17	IN13	Arranque externo
18	IN14	Accionamiento externo X-
19	IN15	Accionamiento externo Y-
20	IN16	Control de desaceleración para un accionamiento externo
21	IN17	Accionamiento de la antorcha hacia abajo
22	IN18	Adelante
23	IN19	Atrás
24	+24V	Fuente interna de control 24V+ (no conectar ningún circuito)
25	GND	0 V

Fuente: (ADTECH, 2014)

c. Puerto XS6

En la Figura 42 se presenta la distribución de pines del puerto DB25 de salidas del controlador (XS6), el cual será el encargado de enviar las señales de control al control de altura, así como también la señal para que inicie el corte.

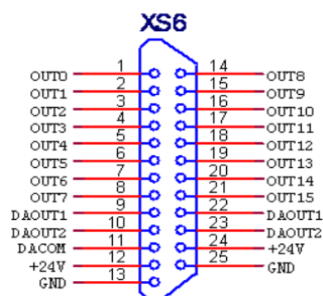


Figura 42: Puerto XS6

Fuente: (ADTECH, 2014)

En la Tabla 26 se especifica el funcionamiento de cada pin del puerto XS6

Tabla 26

Distribución de pines para el puerto XS6

Line S/N	Nombre	Función
1	OUT0	Control de la válvula de la antorcha, M10 (Abierto), M11 (Cerrado)
2	OUT1	Control del corte de la antorcha, M14 (Abierto), M15 (Cerrado)
3	OUT2	Control de la ignición de la flama, M20 (Abierto), M21 (Cerrado)
4	OUT3	Control de la velocidad de rotación del plasma, M22 (Abierto), M23 (Cerrado)
5	OUT4	Control de la reserva de acetileno, M40 (Abierto), M41 (Cerrado)
6	OUT5	Apoyo del corte ascendente, M28 (Abierto), M29 (Cerrado)
7	OUT6	Apoyo del control de ignición, M34 (Abierto), M35 (Cerrado)
8	OUT7	Control de la velocidad de giro ascendente, M38 (Abierto), M39 (Cerrado)
9	NC	Nulo
10	NC	Nulo
11	NC	Nulo
12	+24V	Fuente interna de control 24V+ (no conectar ningún circuito)
13	GND	Fuente interna de control 24V+ tierra
14	OUT8	Oxígeno para corte / Plasma (arco) control, M12 (Abierto), M13 (Cerrado)
15	OUT9	Control de corte al bajar la antorcha, M16 (Abierto), M17 (Cerrado)
16	OUT10	Apoyo, M18 (Abierto), M19 (Cerrado)
17	OUT11	Control de la válvula de oxígeno de precalentamiento oxicorte, M24 (Abierto), M25 (Cerrado)
18	OUT12	Apoyo del control de oxígeno de precalentamiento, M26 (Open), M27 (Cerrado)
19	OUT13	Apoyo oxígeno/arco del control de corte, M32 (Abierto), M33 (Cerrado)
20	OUT14	Apoyo del control al descender la antorcha, M36 (Abierto), M37 (Cerrado)
21	OUT15	(Flama) Control de altura de la antorcha, M42 (Abierto), M43 (Cerrado)
22	NC	Nulo
23	NC	Nulo
24	+24V	Fuente interna de control 24V+ (no conectar ningún circuito)
25	GND	0 V

Fuente: (ADTECH, 2014)

2.10.2. Control de altura Microstep SH-HC30

El THC Microstep SH-HC30, posee un puerto DB25, el cual está descrito en la Tabla 27.

Tabla 27

Distribución de pines del controlador de altura

S/N	Atributos	Descripción
1	Puerto serial para el COM	232 - COM
2	Puerto serial de recepción	232 - RXD
3	Puerto serial de transmisión	232 - TXD
4	Señal de entrada	Señal del arco de voltaje
5	Señal tierra	Señal del arco de voltaje-tierra
7,14	Fuente de alimentación	24V positiva para el control de altura
8,15	Fuente de alimentación	24V tierra para el control de altura
10	Entrada	Selector de señal manual automático
12	Entrada	Señal de ascenso manual para la conducción de la antorcha
13	Input	Señal de descenso manual para la conducción de la antorcha

Fuente: (ADTECH, 2014)

2.10.3. Configuración del sistema de control

a. Calibración de motores

Se requiere previamente calcular la resolución de los mismos, para ello se utiliza la Ecuación 19:

$$P_{total} = \frac{D_{total}}{d_{carga}} * \theta_{paso} \quad (19)$$

Donde:

θ_{paso} = Resolución del paso (pasos/revmotor)

$L\theta$ = Resolución deseada

d_{carga} = Distancia/rotación (eje del motor) (mm)

D_{total} = Distancia total del movimiento

Adicionalmente se necesita obtener la resolución de pasos (ver Ecuación 20)

$$\theta_{paso} = \frac{d_{carga}}{L\theta} \quad (20)$$

Donde:

$$d_{carga} = \pi * \text{Diámetro de la Catarina}$$

Datos:

$$\text{Diámetro de la catarina} = 65.86 \text{ mm}$$

$$L\theta = 0.1 \text{ mm}$$

Se reemplaza los datos en la Ecuación 20.

$$d_{carga} = \pi * 65,86 \text{ mm} = 206.91 \text{ mm}$$

$$\theta_{paso} = \frac{\pi * 65,86}{0.1} = 2069,05 \text{ pasos/rev}$$

Reemplazar los valores en la Ecuación 19.

$$P_{total} = \frac{1220}{206,91} * 2069,05 = 12199,71 \text{ pul/rev}$$

Los drivers de los motores a pasos para el eje "X" y "Y" permiten configurar el valor de los pul/rev, con la ayuda de 4 DIP Switches (Ver Tabla 28 y Tabla 29), inicialmente se colocó un valor aproximado al calculado de 1800 pul/rev, generando problemas por vibraciones, por ello, se optó a cambiar la posición de los DIP Switches hasta encontrar un valor óptimo, que es de 25600 pul/rev. el cuál es el más óptimo para el desplazamiento de los ejes "X" y "Y".

Tabla 28

Posiciones de los DIP Switches para los pulsos/rev del driver DQ542MA

SW5	SW6	SW7	SW8	PULSE/REV
OFF	ON	ON	ON	400
ON	OFF	ON	ON	800
OFF	OFF	ON	ON	1600
ON	ON	OFF	ON	3200
OFF	ON	OFF	ON	6400
ON	OFF	OFF	ON	12800
OFF	OFF	OFF	ON	25600
ON	ON	ON	OFF	1000

CONTINÚA 

OFF	ON	ON	OFF	2000
ON	OFF	ON	OFF	4000
OFF	OFF	ON	OFF	5000
ON	ON	OFF	OFF	8000
OFF	ON	OFF	OFF	10000
ON	OFF	OFF	OFF	20000
OFF	OFF	OFF	OFF	25000

Fuente: (ADTECH, 2014)

Tabla 29

Posiciones de los DIP Switches para los pulsos/rev del driver DQ860MA

SW5	SW6	SW7	SW8	PULSE/REV
ON	ON	ON	ON	400
OFF	ON	ON	ON	800
ON	OFF	ON	ON	1600
OFF	OFF	ON	ON	3200
ON	ON	OFF	ON	6400
OFF	ON	OFF	ON	12800
ON	OFF	OFF	ON	25600
OFF	OFF	OFF	ON	51200
ON	ON	ON	OFF	1000
OFF	ON	ON	OFF	2000
ON	OFF	ON	OFF	5000
OFF	OFF	ON	OFF	10000
ON	ON	OFF	OFF	25000
OFF	ON	OFF	OFF	50000
OFF	OFF	OFF	ON	51200

Fuente: (ADTECH, 2014)

b. Configuración del controlador HC-4500

Configurada la resolución de los drivers, para un adecuado funcionamiento de los motores se procede a configurar la precisión de la máquina:

En la Interfaz principal del controlador (Ver Figura 43) Pulse [F4] (Para) para acceder a la función de ajuste de parámetros (Ver Figura 44), en la interfaz de configuración del parámetro del sistema, presione [F5] (Prec) (Ver Figura 45), a continuación, establecer el valor de la distancia en mm que se mueve la máquina cuando el sistema de control da un impulso se lo realiza para el eje "X" y el eje "Y" este valor influye directamente en la calidad del corte, cada vez que se modifica un valor debe presionar [F6] (Save) para guardar los cambios.

Para comprobar si el valor insertado es el adecuado, presionar [F1](Auto)→[F2](Manual)→[F1](Pint), se accede a la interfaz manual

(Ver Figura 46); en donde se resalta “Input L” en la parte inferior de la pantalla e ingresamos una distancia en mm, a continuación, pulsar [X +], [X-], [Y +] ó [Y-] para el desplazamiento de los ejes “X” y “Y”; de ser correcto el valor insertado en el parámetro de precisión, los ejes se desplazarán el valor ingresado; si la distancia recorrida es errónea, se repite el procedimiento las veces necesarias, utilizando un flexómetro se tiene un valor cercano, y con un reloj comparador se obtiene la medida exacta.

Además, en la interfaz de configuración de parámetros presionar [F2](Sped) (Ver Figura 47), en la que se debe colocar los valores de la velocidad de puesta en marcha (start speed), aceleración (add speed), velocidad manual (hand speed) y velocidad de corte (cut speed) de manera que el arranque sea suave y no presente vibraciones.



Figura 43: Interfaz principal del controlador ADTECH HC-4500

Fuente: (ADTECH, 2014)

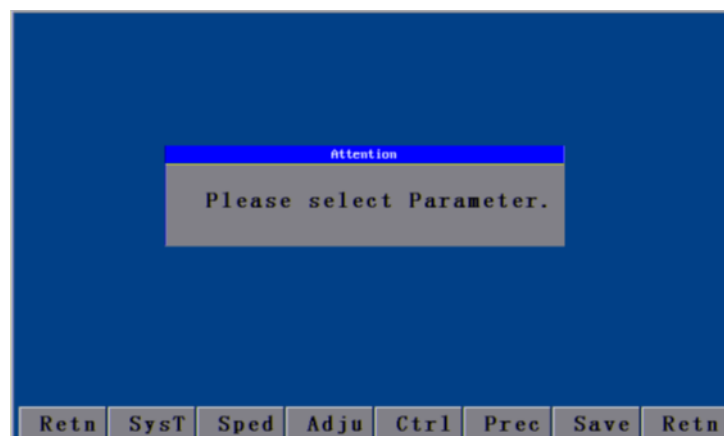


Figura 44: Interfaz de configuración de parámetros del sistema

Fuente: (ADTECH, 2014)

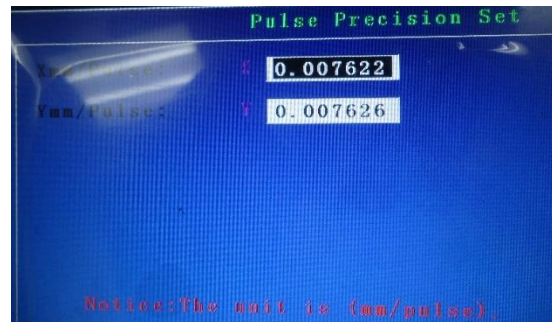


Figura 45: Interfaz de precisión del controlador ADTECH HC-4500

Fuente: (ADTECH, 2014)

En la Figura 45 se observa los valores con los cuales se acerca más a la medida real para el desplazamiento de los ejes “X” (0.007622 mm/pul) y “Y” (0.007626 mm/pul).

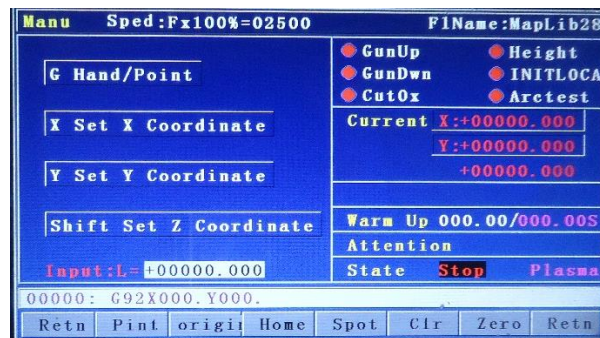


Figura 46: Interfaz manual del controlador ADTECH HC-4500

Fuente: (ADTECH, 2014)

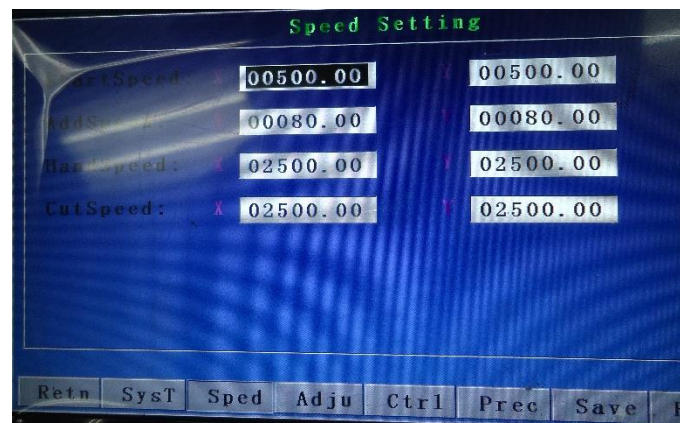


Figura 47: Ajustes de parámetros de velocidad y aceleración

Fuente: (ADTECH, 2014)

En la Figura 47 se muestran los valores óptimos para el arranque de la máquina consiguiendo un arranque suave sin vibraciones en su

desplazamiento; los valores de “hand speed” y “cut speed” vienen dados por el fabricante dependiendo de los espesores a cortar (Ver Anexo 1).

b.1. Parámetros de corte del controlador HC-4500

En la interfaz de parámetros del sistema, presionar [F4](Ctrl) (Ver Figura 48). La descripción de los distintos parámetros está presente en la Tabla 30, además, como los valores sugeridos para un buen funcionamiento en el movimiento de la antorcha.

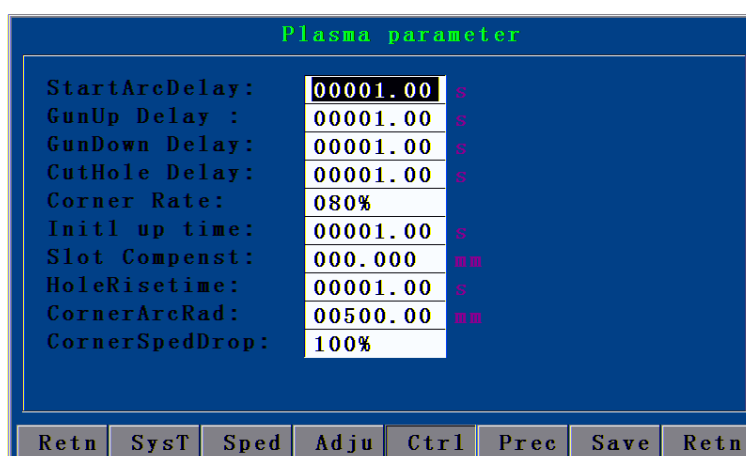


Figura 48: Parámetros de corte del Controlador ADTECH HC-4500

Fuente: (ADTECH, 2014)

Tabla 30

Descripción de los parámetros de corte del controlador HC-4500

Parámetro	Descripción	Unidad	Valor sugerido
Start Arc Delay	Período de retardo antes del inicio del arco (Procesamiento de plasma)	0.01 s	0.50
GunUp Delay	Se utiliza generalmente antes de la posición de cambio G00 para levantar la pistola de corte a una altura adecuada con el fin de evitar la colisión de la pistola de corte y la plataforma de acero.	0.01 s	0.25
GunDown Delay	Es la acción opuesta de GunUp Delay, es necesario para baja la antorcha hasta una altura determinada antes del proceso de corte.	0.01 s	0.25
CutHole Delay	Luego del encendido de la antorcha, durante el precalentamiento, la pistola se elevará para evitar que la pulverización del acero fundido bloquee el agujero de la boquilla, posteriormente abrirá el aire, esperará un instante, y bajará nuevamente.	0.01 s	0.50
Corner Rate	Es la velocidad con la que irá por las esquinas,	%	90%

	Cuando el radio de procesamiento del arco circular es menor que este valor, la velocidad se ralentizará.		
Initl Up Time	Establece el tiempo inicial de subida durante el proceso de plasma.	0.01 s	0.30
Slot compenst	Compensación de antorcha	mm	1.00
Hole Rise Time	Es el tiempo de subida de la antorcha cuando el plasma está llevando la operación de retardo	0.01 s	0.50
Corner Arc Rad	Es el valor crítico del radio para generar arcos en el procesamiento; cuando el radio del arco generado es menor que este valor, la velocidad se ralentizará.	mm	500.0
Corner Speed Drop	Al ajustar el arco de procesamiento, y cuando el radio es menor que el arco de las esquinas, la velocidad se reducirá a esta.	%	80%
Close Cut Leng	Corte por la longitud más cercana	mm	0


Partiendo de los valores de fábrica, se modificaron hasta que se obtuvo un corte óptimo en las piezas. Estos valores están presentes en la Figura 49.

Plasma parameter	
StartArcDelay:	00000.50
GunUp Delay :	00000.25
GunDown Delay:	00000.25
CutHole Delay	00000.50
Corner Rate:	090%
Initl up time:	00000.30
Slot Compenst:	001.000
HoleRisetime:	00000.50
CornerArcRad:	00500.00
CornerSpedDrop:	080%
Close Cut Lenth:	00000.00

Figura 49: Parámetros de corte Reales del controlador HC-4500

c. Configuración del THC Microstep SH-HC30

El THC Microstep SH-HC30 (Ver Figura 50) permite el control automático de altura, se requiere de su configuración para obtener un corte óptimo en las figuras.

Para ingresar al modo de edición de parámetros, se debe mantener presionado la tecla ENTER [], la secuencia de los valores a modificar son H (valor del límite superior de voltaje) → L (valor del límite inferior) → A (seteo del valor de altura) → E (zona muerta) → d (regulador de velocidad de descenso) → c (selector del modo) → b (parámetros de reducción sin borde); para cambiar el ingreso de un parámetro a otro se debe presionar la tecla de

función [C]; Con las teclas ascendente [↑] y descendente [↓] la opción seleccionada se podrá modificar; una vez calibrados todos los parámetros, se presiona ENTER para guardarlos.



Figura 50: Controlador de altura SH-HC30

c.1. Parámetros de Control

En la Tabla 31 se describen los distintos parámetros del controlador HC-SH30.

Tabla 31
Parámetros del Microstep HC-SH30

Letra	Parámetro	Función
H	Límite alto	Cuando la posición de la boquilla sea superior a este valor, aparecerá una alarma y la antorcha no podrá subir.
L	Límite bajo	Cuando la posición de la boquilla es inferior a este valor, se disparará una alarma y la antorcha no podrá bajar.
A	Rango de altura	Se ajusta el valor de la distancia (altura) entre la boquilla de corte y la pieza de trabajo, que es determinada por el usuario.
E	Área de error o Zona muerta	Cuando la distancia real es $A \pm E$, la altura de la antorcha de corte no será ajustable (zona de histéresis).
d	Zona de velocidad de descenso	Se ajusta la velocidad con la que descenderá la antorcha hasta hacer contacto con la placa.
C	Modo de corte	0: detección de voltaje de arco (cortadora por plasma) y 1: para detección capacitiva (oxicorte).
b	detección capacitiva	Cuando la altura detectada es mayor que el valor b, la antorcha de corte seguirá descendiendo; Cuando la altura llega a ser inferior al valor b, se activará de nuevo el control automático de altura; En el modo de detección de voltaje de arco, cuando la antorcha de corte se desplaza hacia abajo manualmente y se encuentra con la señal de punto cero, la máquina de corte se moverá hasta b mm.

Para la configuración de los parámetros, se tomó como referencia los valores de fábrica, pero para llegar a un corte óptimo se modificaron acorde a los distintos espesores, estos datos se muestran en la

Tabla 32.

Tabla 32
Parámetros del controlador SH-HC30

		H	L	A	E	d	C	b
Voltaje de Arco	Definir rango (V)	100-300	10-40	20-200V	0-20	0-100	0-1	0-50
	Valor predeterminado de fábrica (V)	280	10	80	3	5	0	5
	Espesores 1,9 - 6,4 mm	220	20	90	3	5	0	5
	Espesores 6,4 - 9,5mm	220	20	120	3	5	0	5

2.11. Programación del corte

El controlador CNC trabaja con códigos G y M para su programación y acepta archivos con extensiones: .CNC, .CN, .tap y .txt; se elige un software que permita generar el código adecuado para el corte de las figuras.

Existen diversos programas para generar códigos G requeridos para realizar el corte desde el controlador, de los cuales se sugiere SheetCam TNG, tiene un post procesador incorporado compatible con el controlador HC-4500, con esto se evita modificar posteriormente algunos comandos en el código.

2.11.1. Creación Código G y M en Software Sheetcam

En la Figura 51, se describen las partes de la ventana del software.

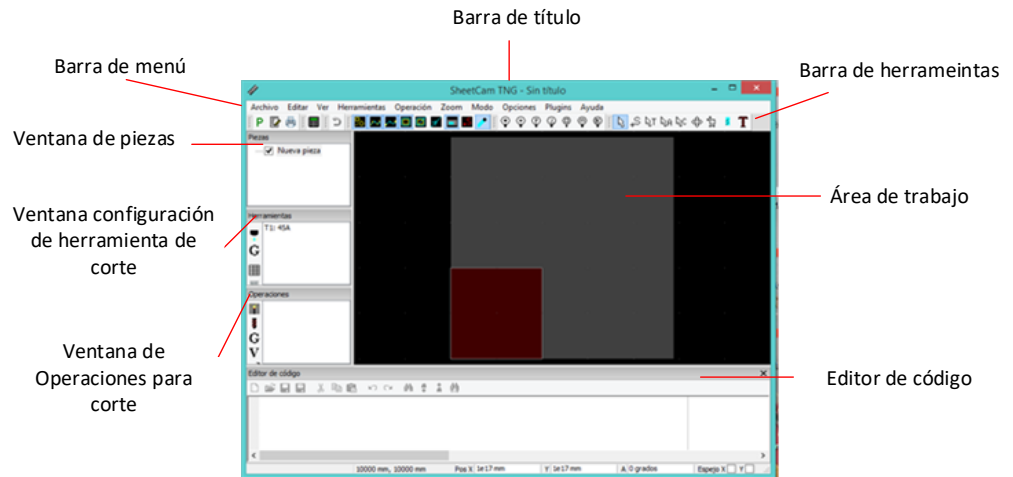


Figura 51: Descripción Ventana principal Software Sheetcam

En la barra de menú seleccionar opciones → máquina (Ver Figura 52)

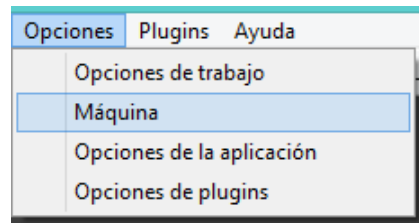


Figura 52: Ventana de opciones Sheetcam

Seleccionar el tipo de corte: corte por chorro (plasma). (Ver Figura 53).

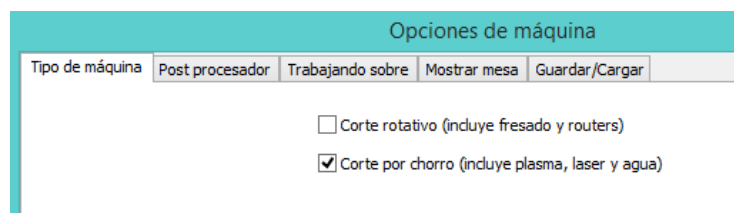


Figura 53: Tipos de máquina (Sheetcam)

En la pestaña de Post procesador elegir Adtech HC-4500 abs arcs (Ver Figura 54)

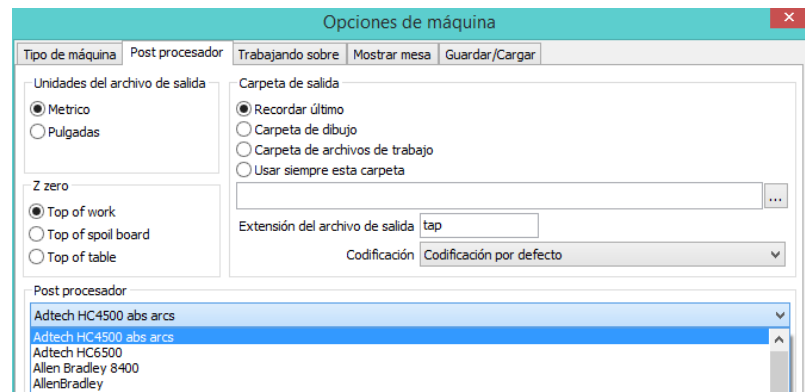


Figura 54: Ventana de Post procesador (Sheetcam)

En la pestaña trabajando sobre, elegir el tamaño de la mesa de corte (1220x1220) y seleccionar el origen (Ver Figura 55)

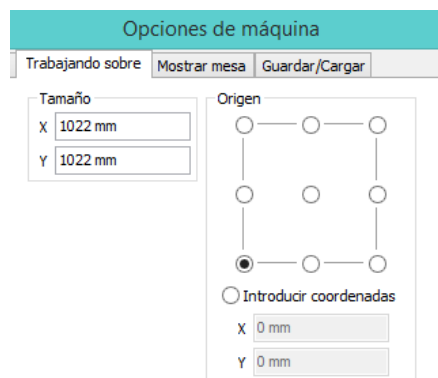


Figura 55: Ventana Trabajo sobre (Sheetcam)

En mostrar mesa, digitar los mismos valores que en trabajo sobre, el área de trabajo total será la marcada por color plomo. (Ver Figura 56) Posteriormente dar clic en Aceptar.

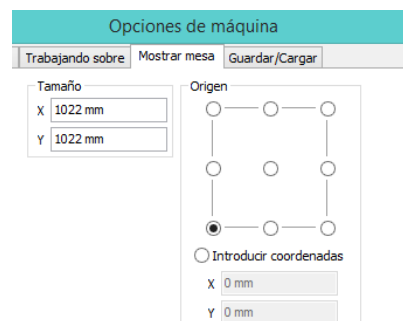


Figura 56: Mostrar mesa (Sheetcam)

Dirigirse en la barra de menú: Opciones→ Opciones de trabajo (Ver Figura 57)

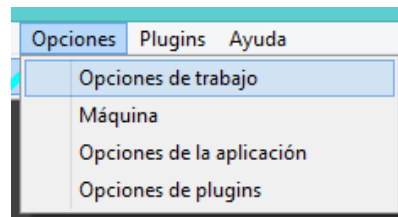


Figura 57: Opciones de trabajo (Sheetcam)

En esta ventana se configura el espesor y dimensiones de la plancha a cortarse. Figura 58

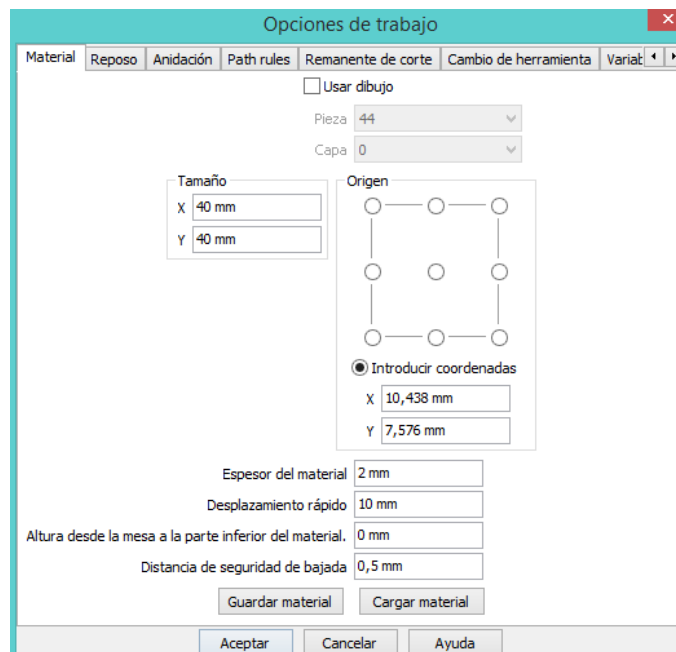


Figura 58: Ventana de Material (Sheetcam)

Para importar la figura de corte, se requiere un archivo DXF 2D, puede ser creado en AutoCad, SolidWorks, en la barra de menú ir a: Archivo →Importar dibujo y buscar el archivo. (Ver Figura 59)

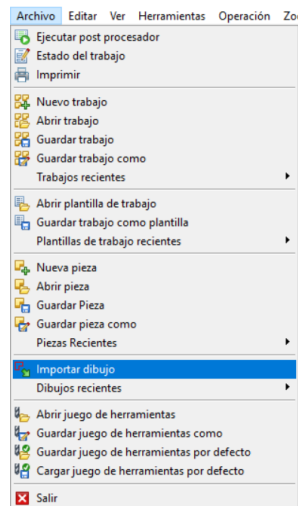


Figura 59: Importar dibujo DXF 2D (Sheetcam)

Una vez seleccionada la pieza, elegir las unidades y la posición para el dibujo
 → Aceptar (Ver Figura 60)

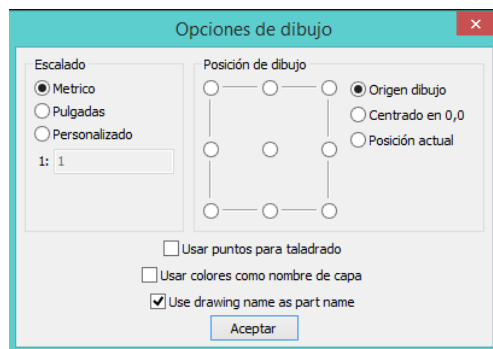


Figura 60: Selección del origen de la pieza (Sheetcam)

La imagen ingresada se ubicará como se muestra en la Figura 61:

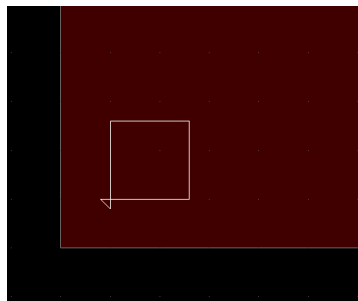


Figura 61: Posición de la pieza ingresada al programa Sheetcam

En la barra de menú dar clic en herramientas → nueva herramienta de corte por chorro. (Ver Figura 62)

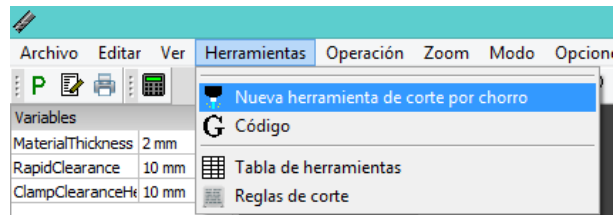


Figura 62: Selección de nueva herramienta de corte (Sheetcam)

En el ítem tipo seleccionar Plasma (Ver Figura 63)

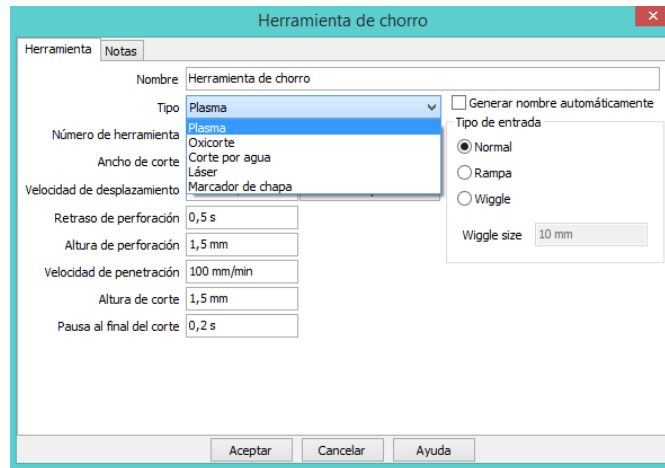


Figura 63: Ventana de herramientas (Sheetcam)

En esta ventana configurar la velocidad de desplazamiento, el resto de parámetros dejar en 0 y luego dar clic en Aceptar. (Ver Figura 64)

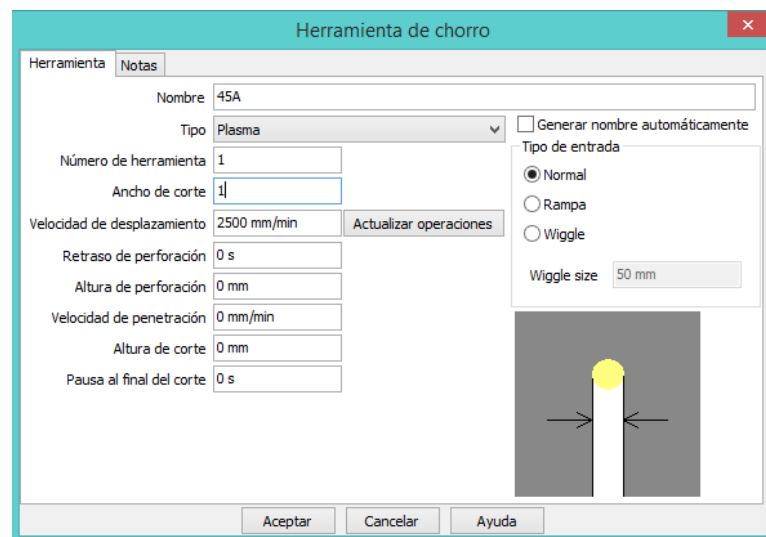


Figura 64: Parámetros para corte por plasma (Sheetcam)

En la ventana de operaciones ubicada en la parte inferior izquierda, seleccionar crear operación de corte por chorro. (Ver Figura 65)

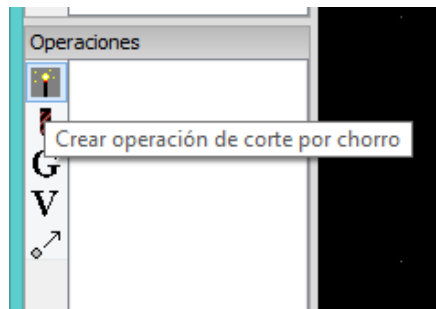


Figura 65: Ventana de operaciones (Sheetcam)

En Capa seleccionar 0 → digitar la velocidad de desplazamiento y el resto de parámetros colocar como se observa en la Figura 66.

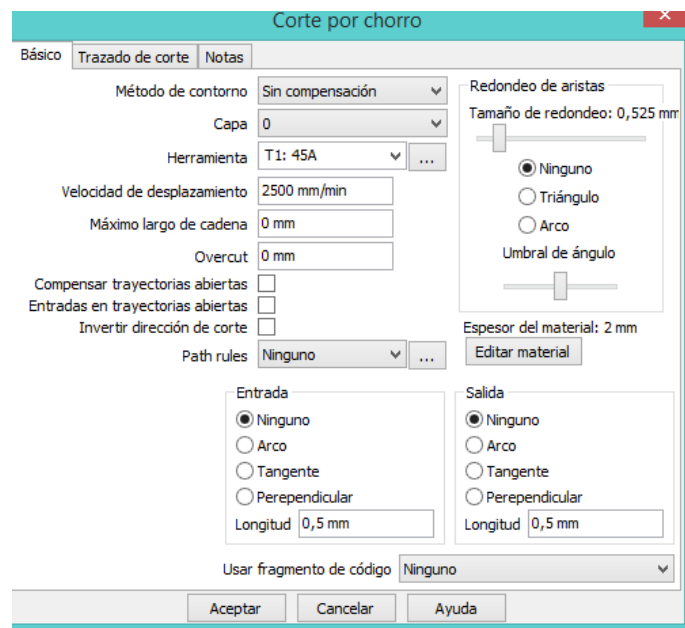



Figura 66: Ventana de corte por chorro

En la barra de herramientas ubicada en la parte superior derecha dar clic en el ícono de simulación [] para observar el movimiento de la antorcha, luego dar clic en el botón inicio para empezar la simulación. (Ver Figura 67)

2.12. Sistema de corte Hypertherm Powermax1000

Un elemento primordial del sistema mecatrónico, es la cortadora por plasma Hypertherm Powermax 1000 (ver Figura 69), que opera con voltajes de CA entre 200 y 600 V, tanto en monofásico como trifásico; la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L cuenta con el equipo.



Figura 69: Equipo de corte por plasma Hypertherm Powermax 1000

En la Figura 70, se indican las dimensiones principales de la misma, el peso total sin considerar la antorcha es 34,5 Kg.

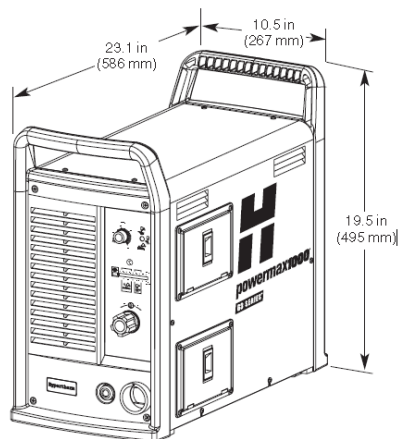


Figura 70: Dimensiones de la cortadora por plasma

2.12.1. Antorcha

La cortadora Powermax 1000, posee dos alternativas para la instalación de la antorcha de corte, una antorcha con gatillo (manual), en donde el operario puede trabajar directamente cortes de metal con espesores hasta 19 mm. y la otra con una antorcha mecanizada, la cual se utiliza en procesos automatizados pero a diferencia de la antorcha manual esta antorcha permite cortes en planchas de acero con un menor espesor; en la Tabla 33 se describen las características de los dos tipos de antorchas.

Tabla 33
Tipos de antorchas para la cortadora Hypertherm Powermax 1000

	Antorcha Manual HRT	Antorcha Mecanizada MRT
Capacidad de corte recomendado	19 mm. (3/4")	9,5 mm. (3/8")
Capacidad de corte Máximo	25 mm. (1")	12 mm. (1/2")
Corte de separación	32 mm. (1 1/4")	
Tasa de remoción de metal en acero de carbono	4,5 kg/hora	
Material para corte	Acero al carbono, acero inoxidable, aluminio	

La antorcha utilizada para el corte es DURAMAX MRT, posee cremallera extraíble, un mango de fibra reforzada con una resistencia al calor, tiene la posibilidad de convertirse en una mini antorcha para ampliar la accesibilidad de corte (Ver Figura 71).



Figura 71: Antorcha DURAMAX MRT
Fuente: (Hypertherm, Energía, 2015)

Para el uso de la antorcha se requiere seleccionar las piezas consumibles utilizando los catálogos adecuados, y teniendo en cuenta todos los elementos

que forman la antorcha (aislador, capuchón de retención, boquilla, electrodo y difusor) cada uno de ellos depende del amperaje, espesor y material a cortar, como se observa en la Tabla 34.

Tabla 34
Piezas Consumibles de la antorcha

Tipo de consumible	Tipo de antorcha	Amperaje	Boquilla	Escudo frontal/deflector	Capuchón de retención	Electrodo	Anillo Distribuidor
Mecanizado	Mecánica	45	220941	220817	220854 220953 (óhmico)	220842	220857
		65	220819				
Sin protección	Mecánica	45	220941	220955	220854	220842	220857
		65	220819				
Corte Fino	Mecánica	45	220930	220948	220854 220953 (óhmico)	220842	220857
Ranurado	Mecánica		220797	220798	220854	220842	220857

Los consumibles de la antorcha están presentes en la Figura 72.

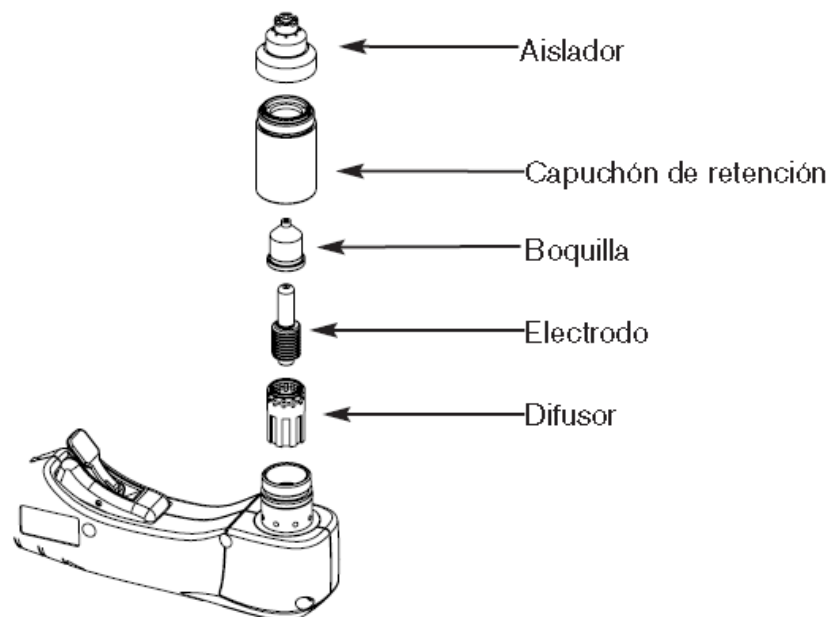


Figura 72: Juego de consumibles de la antorcha

Fuente: (Hypertherm, Energía, 2015)

CAPÍTULO III

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA MECATRÓNICO

Con la asistencia del software CAD Solid Works versión 2016, se ha realizado el diseño de la parte mecánica de la máquina, para proceder a la implementación, como se observa en la Figura 73, en función de la alternativa de solución (ver Anexo 12-A).

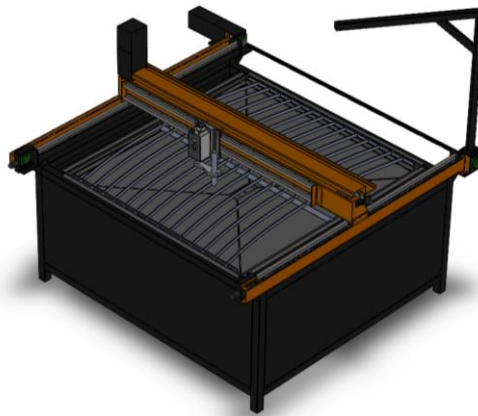


Figura 73: Cortadora por plasma CNC (diseño CAD)

3.1. Equipo y herramientas para la construcción

En el proceso de construcción de la cortadora por plasma, se requirió el uso de diferentes equipos, herramientas e instrumentos los mismos que están descritos en la Tabla 35 y Tabla 36

Tabla 35

Equipo necesario para la construcción

N°	Descripción
1	Soldadora SMAW
2	Torno
3	Fresadora
4	Sierra Tronzadora
5	Pulidora
6	Dobladora
7	Taladro de banco
8	Compresor

Tabla 36

Herramientas e instrumentos requeridas para el montaje de la máquina

N°	Descripción
1	Flexómetro
2	Calibrador
3	Pinzas de presión
4	Machuelos
5	Destornillador
6	Electrodos 6011
7	Remaches
8	Peladora de cables
9	Remachador tipo acordeón
10	Remachador manual neumática
11	Esmeril

3.2. Costos y mano de obra

La máquina cortadora de plasma está básicamente constituida por: la estructura, cama de agua, sistema de transmisión y cada una de ellas posee sus correspondientes componentes, los cuales se describen en la Tabla 37.

Tabla 37

Partes y componentes de la máquina

Partes principales	Componentes	Cantidad (Valor)	Precio Unitario	Total
Estructura	Tubo cuadrado 50x50x2	30 m	38	190
	Planchas de tol	2	35	70
	Chumaseras de Pared	9	5	45
	Pernos	200	0,18	36
	Pintura	2 Gal	22.5	45
Cama de agua	Planchas de tol	4	26,9	107,6
	Platinas de acero	15	0,82	12,3
	Perfil tipo L	4	12	12
Sistema de transmisión	Guías Longitudinales		335	1340
	Cadena de rodillos simples P35 3/8	4	15	60
	Piñón sencillo 35B20	6	7	42
	Motor a paso eje "X" Wantai NEMA 23 57BYGH115-003B Driver: DQ542MA	1	300	300
	Motor a paso eje "Y" Wantai NEMA 34 85BYGH450C-012 Driver: DQ860MA	1	450	450
	Motor a paso eje "Z" NEMA 17 HS11	1	100	100
Pórtico	Planchas de acero	2	50	100
Brazo móvil	Tubo cuadrado 38x38x2	1	25	25

CONTINÚA 

Tablero control de	Controlador CNC	1	1466,08	1344
	Controlador THC	1	1344	1344
	Planchas	1	35	35
	Tubo cuadrado 35x35x2	1	18	18
	Cable AWG #18	2	18	36
	Borneras de 12	7	5	35
	Sensores Inductivos	4	8	32
	Fuente para motores	1	160	160
	Fuente para controlador	1	80	80
	Divisor de tensión	1	336	336
	Relés	5	3,55	17,75
	Breaker	1	8,05	8,05
	Canaletas 50x50	8 m	8,68	8,68
	Mangueras	3 m	0,38	1,14
	Cable blindado 25 hilos	4 m	15	60
	Cable blindado 9 hilos	2 m	10	20
	Cable UTP	10 m	0,55	5,5
	Luz piloto verde	1	1,45	1,45
	Pulsador paro de emergencia	1	8	8
	Riel DIN 35 mm	5 m	3	3
	Libretín marcador	1	5	5
Terminales eléctricos	300	5	15	
Equipo de Corte	Cortadora Hypertherm	1	5300	5300
	Antorcha Duramax	1	1200	1200
	Juego Consumibles para antorcha	1	56	56
Total				13064,47

En la construcción se llevaron a cabo varias operaciones las mismas que se detallan en la Tabla 38.

Tabla 38
Operaciones para la construcción de la máquina

Partes	Componentes	Operación	Tiempo (min)
Estructura	Tubo cuadrado	Corte	25
		Soldado	90
		Corte	40
		Doblado	30
		Soldado	50
		Pulido	15
Cama de agua	Planchas	Corte	60
		Soldado	120
		Pulido	60
	Perfil tipo L	Corte	45
		Soldado	60
		Pulido	45
Platinas	Corte	15	
	Esmerilado	20	
Sistema de transmisión	Acoples motores ejes "X", "Y"	Refrentado y cilindrado	30
		Fresado	40
	Base para motores ejes "X", "Y"	Corte	45
		Roscado	30

CONTINÚA 

	Base para Chumaceras de pared y tensor de cadena	Corte	30
		Soldado	40
		Taladrado	60
		Roscado	60
	Base para Guías longitudinales	Taladrado	90
		Roscado	60
	Eje de transmisión	Corte	15
		Soldado	10
	Topes para guías	Corte	30
		Taladrado	20
		Roscado	20
	Protector para cadena	Corte	15
		Doblado	60
		Taladrado	20
		Roscado	20
Pórtico	Planchas	Trazado	40
		Doblado	30
		Soldado	90
	Placa para sujeción del eje "Z"	Mecanizado	30
Brazo Móvil	Tubo cuadrado	Corte	15
		Soldado	20
Tablero de control	Estructura y base para componentes	Corte	30
		Doblado	30
		Soldado	45
	Canaletas y rieles	Trazado	45
		Corte	40
	Base para Sensores inductivos	Remachado	30
		Corte	15
		Taladrado	10
		Remachado	10
Tiempo Total			1850
Tiempo en Horas			31
Costo Mano de obra (40 USD/hora)			1240

En la Figura 74 se observa el diseño terminado de la cortadora, las partes móviles y en las que se requiere de mayor nivel de seguridad en el momento de su funcionamiento se pintó de color tomate, los elementos fijos de negro; para evitar problemas con el cableado, se optó por la inclusión de canaletas porta cables, dando un diseño más robusto a la máquina.



Figura 74: Cortadora de Plasma CNC

3.3. Costo-beneficio de la cortadora por plasma CNC

El precio del material incluido la mano de obra es 14304,47 USD, al compararlo con máquinas CNC con características similares importados en el país resulta entre un 60% y 85% de su valor (Ver Tabla 39), lo que demuestra que es factible producirlo a nivel nacional, ayudando a la matriz productiva, con un producto de calidad.

3.3.1. Beneficio de la cortadora por plasma CNC

La máquina permitirá realizar prácticas de corte automático, a los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L en las asignaturas de CAD CAM y FMS logrando adquirir mayor conocimiento tanto práctico como teórico en el ámbito de máquinas CNC, además, con la inclusión de la cama de agua, disminuirá la polución, reduciendo el índice de enfermedades en los operarios.

Tabla 39

Máquinas CNC de corte por plasma de importación

Máquina	Características
	<p>Modelo: QL-1325 País de origen: Shandong, China Espesor de corte: 6mm Área de trabajo: 1300x2500 mm Precisión: 0,07mm Repetitividad: 0,02mm Fuente de plasma: Hua Yuan 60A Precio: \$ 18000 (sin envío)</p>
	<p>País de origen: United States Espesor de corte: 30 mm Área de trabajo: 1300x2500 mm Precisión: 0,05mm Repetitividad: 0,01mm Fuente de plasma: Thermal Dinamic Precio: \$ 32000 (sin envío)</p>

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Es necesario determinar las características mecánicas (precisión, repetitividad) y de operación del sistema mecatrónico

4.2. Pruebas Mecánicas

Para probar el error de indicación y repetibilidad de una longitud de prueba calibrada, se utilizó la norma ISO 10360-2 2009, aplicable en máquinas por coordenadas de tipo cartesiano; tomando 5 diferentes longitudes de prueba deben ser medidas 3 veces en 5 diferentes posiciones en el volumen de medición de la máquina para dar un total de 75 mediciones, usando un reloj comparador como herramienta de medición.

Se calibró la máquina (Sección 2.10.3.2), se tomaron las mediciones requeridas, en las primeras 4 posiciones, se tiene una longitud máxima 1220 mm. para los ejes "X" y "Y" y en la quinta posición, una distancia de 85 mm. para el eje "Z"; en la Figura 75 se observa la ubicación del reloj comparador en cada una de las distintas posiciones; en la Tabla 40 se muestran los datos obtenidos.

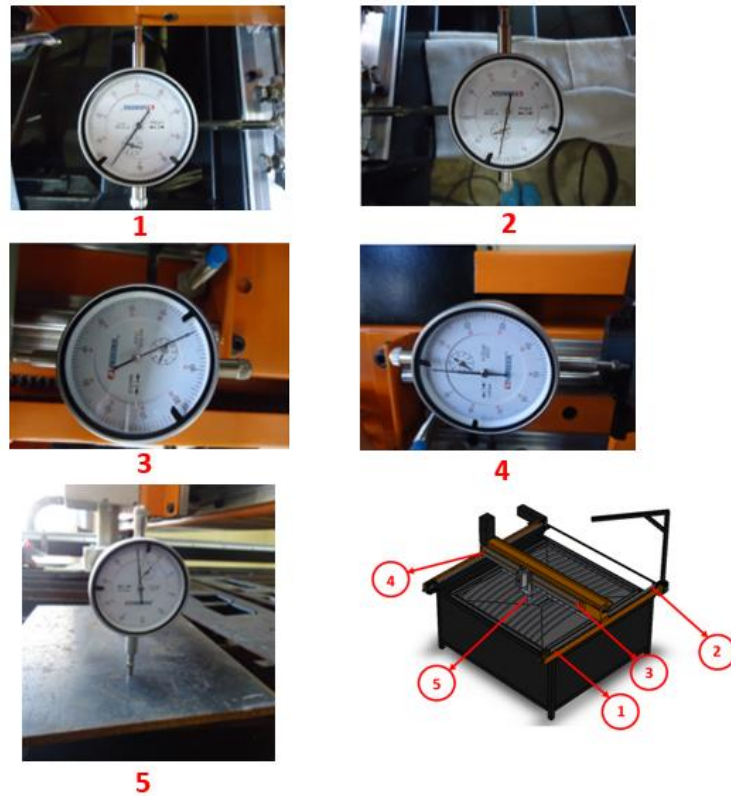


Figura 75: Posiciones del reloj comparador

Con los datos recolectados en la Tabla 40 tenemos el error de medición de longitud (EL) que es el error de indicación al medir una longitud de prueba. En cuanto a la Repetibilidad (R0) es la diferencia del valor máximo y mínimo de tres mediciones repetidas en los valores de EL. Error máximo permitido (MPE) es el valor extremo del error de medición de la longitud.

Tabla 40
Resultados de los datos de longitudes

EJES	Número de Posición	Longitudes	Valores obtenidos			EL		
			Número 1	Número 2	Número 3	Dato 1	Dato 2	Dato 3
Y	1	1220	1220,71	1220,83	1220,93	0,71	0,83	0,93
		500	500,69	500,58	500,77	0,69	0,58	0,77
		250	250,41	250,50	250,59	0,41	0,50	0,59
		125	125,34	125,26	125,47	0,34	0,26	0,47
		50	50,08	50,23	50,15	0,08	0,23	0,15
	2	1220	1220,76	1220,90	1220,99	0,76	0,90	0,99
		500	500,52	500,68	500,62	0,52	0,68	0,62
		250	250,48	250,53	250,37	0,48	0,53	0,37
		125	125,21	125,39	125,30	0,21	0,39	0,30
		50	50,10	50,05	50,16	0,10	0,05	0,16
X	3	1220	1220,71	1220,83	1220,92	0,71	0,83	0,92
		500	500,63	500,42	500,55	0,63	0,42	0,55
		250	250,42	250,51	250,32	0,42	0,51	0,32
		125	125,39	125,30	125,15	0,39	0,30	0,15
		50	50,19	50,12	50,04	0,19	0,12	0,04
	4	1220	1220,87	1220,81	1220,97	0,87	0,81	0,97
		500	500,72	500,64	500,53	0,72	0,64	0,53
		250	250,44	250,37	250,25	0,44	0,37	0,25
		125	125,18	125,25	125,11	0,18	0,25	0,11
		50	50,12	50,06	50,01	0,12	0,06	0,01
Z	5	85	85,3	85,28	85,31	0,30	0,28	0,31
		80	80,28	80,3	80,29	0,28	0,30	0,29

CONTINÚA 

4.2.1. Comportamiento de los ejes

Se utiliza la norma ISO 10360-2, para probar el error de indicación y la repetitividad, al medir una longitud de prueba calibrada, utilizando un reloj comparador. en los respectivos ejes cartesianos;

a. Precisión

En la Figura 76 está presente el diagrama de dispersión de los errores obtenidos en el eje "Y" (Posiciones 1 y 2), se observa que el error y la repetibilidad se incrementan, a medida que la longitud (L) aumenta. El error máximo permitido es de 0,99 en L=1220mm con una repetibilidad de 0.23mm. (Ver Tabla 41)

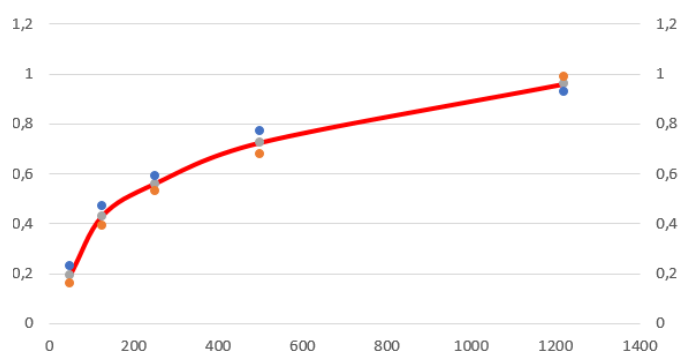


Figura 76: Errores en el eje "Y"

Tabla 41
Promedio de errores en el eje "Y"

EJES	Número de Posición	Longitudes	EL			R0	MPE
			Dato 1	Dato 2	Dato 3		
Y	1	1220	0,71	0,83	0,93	0,22	0,93
		500	0,69	0,58	0,77	0,19	0,77
		250	0,41	0,50	0,59	0,18	0,59
		125	0,34	0,26	0,47	0,21	0,47
		50	0,08	0,23	0,15	0,15	0,23
	2	1220	0,76	0,90	0,99	0,23	0,99
		500	0,52	0,68	0,62	0,16	0,68
		250	0,48	0,53	0,37	0,16	0,53
		125	0,21	0,39	0,30	0,18	0,39
		50	0,10	0,05	0,16	0,11	0,16

En la Figura 77 está presente el diagrama de dispersión de los errores obtenidos en el eje "X" (Posiciones 3 y 4), se observa que el error y la repetibilidad se incrementa, a medida que la longitud (L) aumenta. El error máximo permitido es de 0,97 en L=1220mm con una repetibilidad de 0.16mm. (Ver Tabla 42)

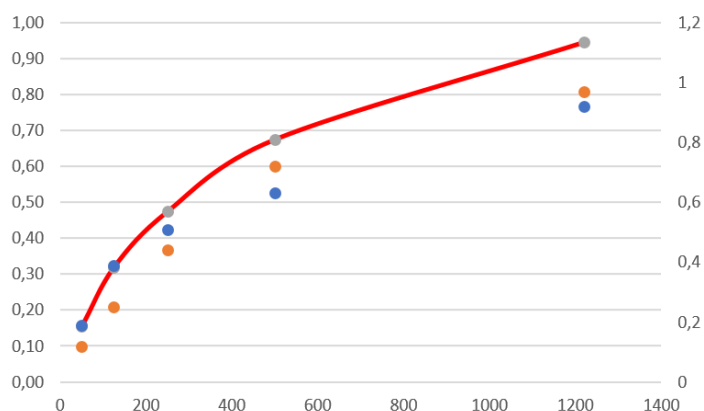


Figura 77: Errores en el eje "X"

Tabla 42

Promedio de errores en el eje "X"

EJES	Número de Posición	Longitudes	EL			R0	MPE
			Dato 1	Dato 2	Dato 3		
	3	1220	0,71	0,83	0,92	0,21	0,92
		500	0,63	0,42	0,55	0,21	0,63
		250	0,42	0,51	0,32	0,19	0,51
		125	0,39	0,3	0,15	0,24	0,39
		50	0,19	0,12	0,04	0,15	0,19
	4	1220	0,87	0,81	0,97	0,16	0,97
		500	0,72	0,64	0,53	0,19	0,72
		250	0,44	0,37	0,25	0,19	0,44
		125	0,18	0,25	0,11	0,14	0,25
		50	0,12	0,06	0,01	0,11	0,12

En la Figura 78 está presente el diagrama de dispersión de los errores obtenidos en el eje "Z" (Posición 5), se observa que el error y la repetibilidad se incrementa, a medida que la longitud (L) aumenta. El error máximo permitido es de 0,31 en L=1220mm con una repetibilidad de 0.03mm. (Ver Tabla 43)

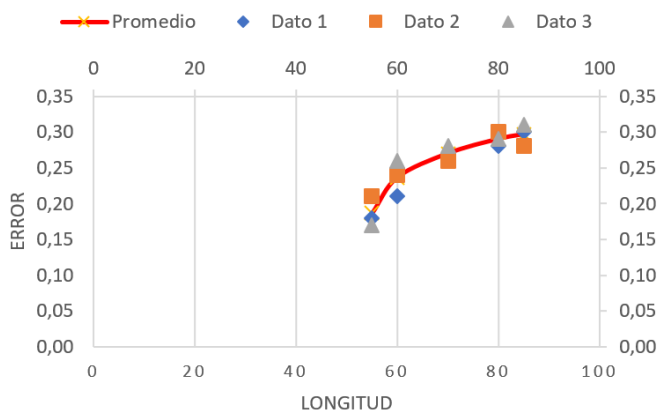


Figura 78: Promedio de errores en el eje "Z"

Tabla 43
Promedio de errores en el eje "Z"

EJES	Número de Posición	Longitudes	EL			R0	MPE
			Dato 1	Dato 2	Dato 3		
Z	5	85	0,3	0,28	0,31	0,03	0,31
		80	0,28	0,3	0,29	0,02	0,3
		70	0,27	0,26	0,28	0,01	0,28
		60	0,21	0,24	0,26	0,05	0,26
		55	0,18	0,21	0,17	0,04	0,21

Para determinar la precisión de la máquina, se realizó el diagrama de dispersión de los tres ejes "X", "Y" y "Z" (Ver Figura 79), la curva resultante es el promedio de los datos en cada punto de los 3 ejes. La precisión mínima de la cortadora por plasma es 0,12 mm (L=50 mm.) con una repetibilidad de 0.11 y la máxima es 0,99 mm. (L=1220 mm) con una repetibilidad de 0.23mm. La precisión promedio de la máquina es 0,49 mm con una repetibilidad de 0.15mm. (Ver Tabla 44)

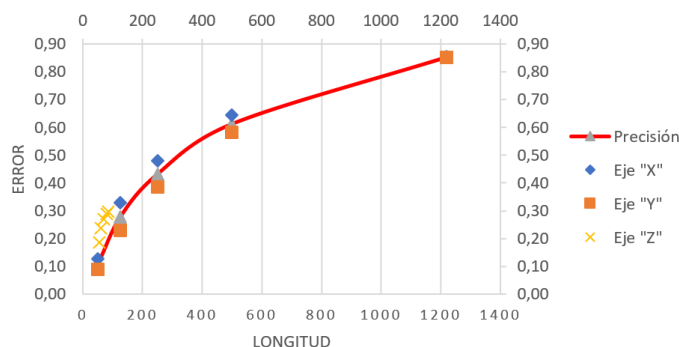


Figura 79: Precisión de la cortadora por plasma CNC

Tabla 44
Precisión de la cortadora por plasma CNC

EJES	Número de Posición	Longitudes	R0	MPE
Y	1	1220	0,22	0,93
		500	0,19	0,77
		250	0,18	0,59
		125	0,21	0,47
		50	0,15	0,23
	2	1220	0,23	0,99
		500	0,16	0,68
		250	0,16	0,53
		125	0,18	0,39
		50	0,11	0,16
X	3	1220	0,21	0,92
		500	0,21	0,63
		250	0,19	0,51
		125	0,24	0,39
		50	0,15	0,19
	4	1220	0,16	0,97
		500	0,19	0,72
		250	0,19	0,44
		125	0,14	0,25
		50	0,11	0,12
Z	5	85	0,03	0,31
		80	0,02	0,30
		70	0,01	0,28
		60	0,05	0,26
		55	0,04	0,21

4.2.2. Área útil de trabajo

Con los resultados de las pruebas mecánicas, se conoce que el máximo desplazamiento en el eje "X" es 1225 mm, y en el eje "Y" es 1230 mm. utilizando la Ecuación 21, se calcula el área útil de trabajo.

$$A = X \times Y \quad (21)$$

Donde

$A = \text{Área útil de trabajo}$

$X = \text{Distancia máxima a desplazarse en el eje "X"}$

$Y = \text{Distancia máxima a desplazarse en el eje "Y"}$

Reemplazando los valores se tiene:

$$A = 1225 \times 1230 = 1506750 \text{ mm}^2$$

4.3. Características del sistema mecatrónico

Finalizada la construcción y pruebas mecánicas, se presenta un resumen de todo el sistema:

4.3.1. Características Mecánicas

- Desplazamiento de los ejes "X" y "Y" mediante Guías longitudinales redondas con rodamientos recirculantes
- Desplazamiento del eje "Z" mediante tornillo sin fin
- Sistema de transmisión por cadena ANSI N°35 para los ejes "X" y "Y"

4.3.2. Características Estructurales

- Estructura principal, diseñada con tubos cuadrados de 50x2 de acero ASTM A36.
- Cama de agua, con planchas de 2 mm de espesor y perfiles tipo L.
- Pórtico, utilizando planchas de acero de 2 mm.
- Todos los elementos estructurales fueron soldados con electrodo 6011.
- Brazo móvil para la sujeción de la manguera con tubo cuadrado 35x2 de acero ASTM A36.

4.3.3. Características Dinámicas

- Velocidad máxima de avance de corte: 3000 mm/min
- Recorrido eje "X": 1225 mm
- Recorrido eje "Y": 1230 mm
- Recorrido eje "Z": 85 mm

4.3.4. Características de Corte

- Equipo de corte por plasma Hypertherm Powermax 1000
- Espesores de corte desde 1,9 mm. hasta 9,5 mm. trabajando al 100% de capacidad de la máquina.
- Control del encendido del arco y altura de la antorcha mediante el THC HC-SH 30.

4.3.5. Características eléctricas

- Alimentación del sistema independiente para el controlador y la cortadora de 220 VAC, 60 HZ monofásica para evitar fallos por ruido eléctrico por parte de la máquina Hypertherm.

4.4. Ciclo de trabajo

El ciclo de trabajo se define como el tiempo en el cual una máquina puede operar de forma continua comparado con el tiempo que debe reposar en un lapso de 10 min.

Para la cortadora Hypertherm Powermax 1000, se recomienda operar al 100% para espesores entre 1,9 mm. y 6,4 mm. con una corriente de 45 A y para espesores entre 6,4 mm. y 9,5 mm. con una corriente de 60 A. se recomienda trabajar al 50%. (Ver Anexo 13)

4.5. Pruebas de corte en Acero al Carbono

Las pruebas se dividieron en cortes de cuadrados y círculos con diferentes dimensiones.

4.5.1. Pruebas en Cuadrados

En este caso la dimensión mínima posible de corte fue 10 mm. adicionalmente se hizo un corte de 600 mm. (longitud intermedia) y un corte de 1150 mm. (dimensiones máximas de corte); para las pruebas se realizaron 6 mediciones en cada pieza (Ver Figura 80). Estos datos se muestran en la Tabla 45.

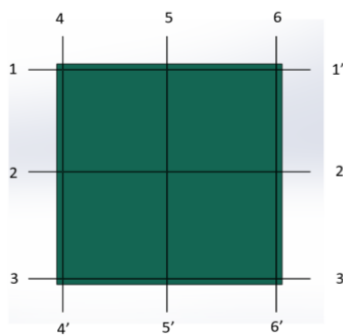


Figura 80: Posiciones para toma de mediciones en cuadrados

Tabla 45
Pruebas de corte en Cuadrados

Figura	Longitud	1-1'	2-2'	3-3'	4-4'	5-5'	6-6'	Error1	Error2	Error3	Error4	Error5	Error6	Promedio
Cuadrado1	10	10,27	9,99	10,2	10,04	10,05	10,14	0,27	0,01	0,2	0,04	0,05	0,14	0,12
Cuadrado2	10	10,28	10,14	10,21	10,17	10,24	10,24	0,28	0,14	0,21	0,17	0,24	0,24	0,21
Cuadrado3	10	10,05	10,2	10,01	9,97	10,12	10,21	0,05	0,2	0,01	0,03	0,12	0,21	0,10
Cuadrado4	10	10,15	10,17	10,19	10,24	10,08	10,13	0,15	0,17	0,19	0,24	0,08	0,13	0,16
Cuadrado5	10	10,27	10,1	10,08	10,16	10,27	10,2	0,27	0,1	0,08	0,16	0,27	0,2	0,18
											Error en piezas pequeñas			0,16
Cuadrado6	600	600,5	601	601	601	601	601,5	0,5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,5	1,00
Cuadrado7	1150	1150,5	1151	1151	1151	1151	1151,5	0,5	1,00	1,00	1,00	1,00	1,5	1,00
											Error en piezas grandes			1,00

De los datos tabulados, se obtuvo un error promedio de 0,16 mm para piezas pequeñas, en el cuadrado mediano y grande, un error de 1,00 mm. lo que comprueba que el error se incrementa en cortes de longitudes extensas. (Ver Sección 4.2).

4.5.2. Pruebas en Círculos

Para las pruebas de corte de figuras de círculos se realizaron con un valor nominal mínimo de diámetro igual a 15 mm. adicionalmente se hizo un corte de un círculo de 600 mm, para la verificación de los valores con respecto al valor nominal se realizaron 3 mediciones en cada pieza. (Ver Figura 81)

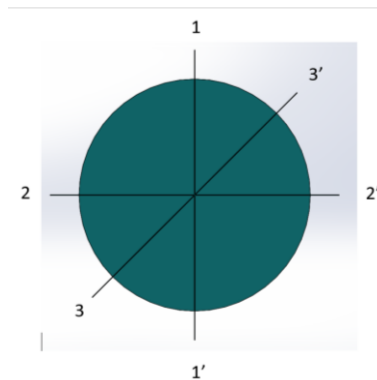


Figura 81: Posiciones para toma de mediciones en círculos

En la Tabla 46 se presenta los datos obtenidos de las respectivas mediciones, el error promedio es 0,27 mm en piezas pequeñas y 1,00 mm en el círculo de 600 mm. El error obtenido es similar que en las pruebas con cuadrados.

Tabla 46
Pruebas de corte en Círculos

Longitud	1-1'	2-2'	3-3'	Error1	Erro2	Error3	Promedio
15	15,41	15,46	15,47	0,41	0,46	0,47	0,45
15	15,26	15,19	15,35	0,26	0,19	0,35	0,27
15	15,12	15,08	15,16	0,12	0,08	0,16	0,12
15	15,38	15,30	15,25	0,38	0,30	0,25	0,31
15	15,23	15,17	15,28	0,28	0,17	0,28	0,23
				Error en piezas pequeñas			0,27
600	600,5	601	601	0,5	1,00	1,00	1,00
				Error en piezas grandes			1,00

Luego de haber finalizado las pruebas de corte en distintos espesores y tomando como referencia el Anexo 1, se determinaron los parámetros mostrados en la Tabla 47.

Tabla 47

Tabla de corte

Material	Espesor (mm)	Corriente (A)	Velocidad de corte (mm/min)
Acero al carbono	1,9	45	3000
	4	60	2000
	9,5	60	1500

En la Figura 82 se observan varias muestras de corte, realizadas con diversos espesores.



Figura 82: Muestras de corte en acero al carbono

Las características técnicas de la máquina obtenidas con la norma ISO 10360-2, nos entregó un valor de precisión de 0,49mm y una repetibilidad de $\pm 0,15$ mm, con referencia a las especificaciones de las máquinas CNC de la Tabla 39, los valores obtenidos son aceptables, contando que la tesis fue diseñada y construida en nuestro país, además al realizar el análisis de resultados para el corte se obtiene un error absoluto de 0,16 mm. en cortes de longitudes de 10 mm. y un error absoluto de 1,00 mm. en cortes de longitudes de 1150 mm. concluyendo que los cortes realizados por la cortadora plasma de 3 ejes son de buena calidad.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se diseñó y construyó una cortadora de corte por plasma de tres ejes con cama de agua, mediante control numérico computarizado CNC.
- El desplazamiento máximo en el eje "X" es 1225 mm y en el "Y" 1230 mm; la cortadora satisface el objetivo planteado (1220x1220 mm).
- La norma ISO 10360-2 permitió obtener la precisión (0,49 mm) y repetibilidad (+/- 0,15 mm) de la máquina CNC.
- El espesor máximo de corte permitida en la cortadora por plasma de 3 ejes es de 9,5 mm y el mínimo 1,9 mm.
- En el corte de piezas cuadradas, el error mínimo es 0,16 mm. y el máximo 1,00 mm. En el corte de piezas circulares, el error mínimo es 0,27 mm. y el máximo 1,00 mm.
- La implementación de un sistema de transmisión por cadenas N°35 (paso 3/8 in), presenta un error en el corte de 0,35 mm.
- Para evitar el uso de dos motores en el desplazamiento del eje "Y", se coloca un eje de transmisión.
- El THC HC-SH30 permite controlar la altura de la antorcha durante el proceso de corte, evitando colisiones del de la antorcha de corte con la pieza de trabajo, aumentando la vida útil de los consumibles.
- Al configurar la resolución de los motores a 25600 pul/rev, se obtuvo un arranque en el sistema más suave y libre de vibraciones en los ejes "X" y "Y".
- Disminuyendo la velocidad de puesta en marcha y la aceleración del sistema, se logró evitar un movimiento brusco en el arranque, obteniendo una precisión de 0,49mm.
- En el tablero de control el uso de cables blindados para las conexiones del controlador CNC ADTECH HC-4500 y el THC Microstep SH-HC30, evita sufrir errores por interferencias eléctricas.

- El software Sheetcam permite generar los códigos G a partir de un archivo .DXF de manera sencilla, incluyendo parámetros de corte.
- El costo total de la máquina es: 14304,47 USD.

5.2. Recomendaciones

- Para mejorar la precisión se recomienda a futuro cambiar el sistema de transmisión por husillo de bolas.
- Para mayor control en el desplazamiento de los ejes “X” y “Y”, se recomienda cambiar los motores a pasos por servomotores.
- Con la incorporación de la cama de agua, se puede observar claramente que aún se desprende partículas de polvo de hierro al ambiente, se recomienda incluir un sistema de filtración por aire para controlar totalmente la polución generada por el corte.
- Para obtener un mejor corte en placas delgadas, se debe utilizar una boquilla de 45 A y para mayores espesores, una de 60 A.
- Se recomienda dar mantenimiento periódico a los elementos móviles, así como también lubricar las guías, para evitar fallos en el desplazamiento.
- Utilizar el equipo de seguridad en el laboratorio (casco, gafas protectoras, mandil, guantes de soldadura, zapatos de seguridad)
- Incentivar a las futuras generaciones a desarrollar mayor número de proyectos de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- *ADTECH*. (26 de Noviembre de 2014). Recuperado el 27 de Octubre de 2015, de http://www.machine-controller.com/uploadfile/downloads/HC4500%20English%20User%20Manual_DXYB09-QCH-PB.pdf
- Aguirre, J., & Sandoval, F. (2008). *Introducción a la robótica*. México: Mc Graw Hill.
- *Ali Express*. (14 de Marzo de 2015). Recuperado el 27 de Octubre de 2015, de http://es.aliexpress.com/store/product/discount-price-THC-Automatic-Electric-capacity-plasma-torch-height-controller-for-CNC-Flame-cutting-machine/1866268_32442003164.html
- Alibaba. (15 de Febrero de 2016). <https://spanish.alibaba.com>. Recuperado el 14 de Marzo de 2016, de <https://spanish.alibaba.com/product-gs/plasma-arc-torch-height-controller-adt-hca-1002-536068364.html>
- Angulo, J. (2005). *Introducción a la robótica*. Barcelona: Thompson.
- *Area Tecnología*. (10 de Febrero de 2014). Recuperado el 16 de Marzo de 2015
- Artiga, R., & Bolaños, G. (2015). *Diseño de un sistema para corte por plasma, usando técnicas de control numérico computarizado*. El Salvador: Universidad de El Salvador.
- *Balluff*. (23 de 11 de 2015). Recuperado el 13 de 10 de 2016, de <http://www.balluff.com/balluff/MES/es/products/overview-mechanical-sensors.jsp>
- *Balluff*. (23 de Noviembre de 2015). Recuperado el 15 de Octubre de 2016, de <http://www.balluff.com/balluff/MMX/es/products/overview-capacitive-sensors.jsp>
- Barragán, Á. A. (15 de Abril de 2009). <http://app.ute.edu.ec/>. Recuperado el 14 de Febrero de 2016, de <http://app.ute.edu.ec/content/3466-287-19-1-6-19/CADCAMCIM.pdf>
- Budynas, R., & Keith, N. (2010). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (Octava ed.). México: Mc Graw Hill.
- Calupiña, C., & Mauricio, O. (2012). *Mejoramiento de los parámetros de trabajo para una máquina de corte por plasma y oxiacetilénica tipo CNC*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- *catarina.udlap.mx*. (20 de Mayo de 2015). Recuperado el 03 de Octubre de 2016, de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/corona_v_m/capitulo5.pdf
- Colt, J. (24 de Abril de 2014). *The Fabricator*. Recuperado el 06 de Agosto de 2015, de <http://www.thefabricator.com/article/plasmacutting/la-evoluci-n-del-corte-con-plasma>
- Daza, A. (02 de Julio de 2010). *Aporrea*. Recuperado el 11 de Mayo de 2015, de <http://www.aporrea.org/actualidad/a103338.html>

- *De máquinas y herramientas.* (15 de Septiembre de 2013). Recuperado el 24 de Febrero de 2015, de <http://www.demaquinasyherramientas.com/maquinas/corte-por-plasma-generalidades>
- *De máquinas y herramientas.* (09 de Septiembre de 2015). Recuperado el 19 de Noviembre de 2015, de Qué tener en cuenta al elegir una mesa de corte por plasma: <http://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/que-tener-en-cuenta-al-elegir-una-mesa-de-corte-por-plasma-seleccion-del-sistema-mecanico>
- *De Máquinas y Herramientas.* (13 de Julio de 2015). Recuperado el 11 de Noviembre de 2015, de Introducción A La Tecnología De Corte Por Plasma Mecanizado: <http://www.demaquinasyherramientas.com/maquinas/maquinas-para-corte-por-plasma>
- Del Águila, R. (24 de Mayo de 2016). Recuperado el 15 de Agosto de 2016, de http://dibujo.ramondelaguila.com/?page_id=2699
- Díaz, J. (15 de Febrero de 2012). *tecnoedu.* Recuperado el 03 de Diciembre de 2015, de <https://tecnoedu.com/Denford/GM.php>
- Fitzgerald, A., Charles, K., & Stephen, U. (2004). *Máquinas eléctricas* (Sexta ed.). México: Mc Graw Hill.
- Gonzalez, M. (21 de Noviembre de 2012). *slideshare.* Recuperado el 08 de Julio de 2015, de Introducción al CNC: <http://es.slideshare.net/ingmariomellado/introduccion-al-cnc>
- Guangzhou, C. (2012). *Manual NEMA 17HS111.* Guangzhou Cheng.
- Hypertherm. (1999). *Manual de operación Hypertherm Powermax 1000.* Los Ángeles: Hypertherm.
- Hypertherm. (14 de Febrero de 2012). <http://www.hypertherm.com/>. Recuperado el 14 de Mayo de 2015, de http://www.hypertherm.com/es/Products/Automated_cutting/Torch_height_controls/arcGlide.jsp#2
- Hypertherm. (16 de Mayo de 2012). *Hypertherm.* Recuperado el 14 de Agosto de 2015, de http://www.hypertherm.com/es/Products/Automated_cutting/Torch_height_controls/
- Hypertherm. (10 de Febrero de 2015). *Hypertherm Corte con confianza.* Recuperado el 18 de Agosto de 2015, de http://www.hypertherm.com/es/Products/Products_by_industry/energy.jsp
- *Ingemecánica.* (11 de Septiembre de 2015). Recuperado el 16 de Junio de 2016, de <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn127.html>
- *IPAC.* (15 de Febrero de 2015). Recuperado el 14 de Mayo de 2016, de <http://www.ipac-acero.com/producto-detalle.php?id=9>
- *Keyence.* (15 de Octubre de 2013). Recuperado el 28 de Enero de 2016, de

<http://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/proximity/feature/>

- KOIKE. (15 de Febrero de 2010). *KOIKE ARANZON*. Recuperado el 15 de Agosto de 2016
- *kubiec*. (10 de Agosto de 2015). Recuperado el 21 de Diciembre de 2015, de http://www.kubiec.com/index.php?option=com_k2&view=item&layout=item&id=40&Itemid=298#laminadas-al-fr
- Lobjois, C. (1984). *Tecnología de la calderería, trazado, corte, curvado y plegado*. Barcelona: Ediciones CEAC, S.A.
- Magallanes, C. R.-J. (10 de Febrero de 2014). www.dspace.espol.edu.ec. Recuperado el 10 de Abril de 2016, de [https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/31094/1/Implementaci%C3%B3n%20de%20un%20Sistema%20de%20Control%20para%20una%20M%C3%A1quina%20de%20Control%20Num%C3%A9rico%20Computarizado%20\(CNC\)%20sobre%20un%20Sistema%20Embebido%20utilizando%20Herramientas](https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/31094/1/Implementaci%C3%B3n%20de%20un%20Sistema%20de%20Control%20para%20una%20M%C3%A1quina%20de%20Control%20Num%C3%A9rico%20Computarizado%20(CNC)%20sobre%20un%20Sistema%20Embebido%20utilizando%20Herramientas)
- *Mecapedia*. (11 de Febrero de 2015). Recuperado el 16 de Noviembre de 2015, de http://www.mecapedia.uji.es/transmision_por_cadena.htm
- MEGACORD. (15 de Marzo de 2012). *MEGACORD*. Recuperado el 14 de Abril de 2015, de <https://www.google.com.ec/search?q=megacord&oq=megacord&aqs=chrome..69i57j69i65l3j69i60l2.1297j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>
- Microstep. (2014). *Manual del controlador HC-SH30*. New York: Microstep.
- Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson Educación.
- Pérez, A. (2012). *Diseño e implementación de un sistema de control numérico computarizado de corte por plasma para la empresa SERMATEX*. Quito: Universidad Tecnológica Equinoccial.
- *Personales.upv*. (31 de Noviembre de 2015). Recuperado el 15 de Febrero de 2016, de <http://personales.upv.es/fbardisa/Pdf/FormularioVigas.pdf>
- *plasmatech*. (27 de Octubre de 2015). Recuperado el 14 de Noviembre de 2015, de <http://www.plasmatech.co.uk/File/XPTH300II%20manual.pdf>
- Reinoso, M. (2012). *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*. Quito: Universidad San Francisco.
- Reyes, F., Cid, J., & Vargas, E. (2013). *Mecatrónica Control y Automatización*. México: Alfaomega.
- Solar1. (21 de 06 de 2012). *Solar1*. Recuperado el 2015 de 05 de 24, de https://solar1.net/drupal/plasma_cnc

- *soldgreat.com*. (29 de Febrero de 2015). Recuperado el 17 de Diciembre de 2015, de http://www.soldgreat.com/user_manual/SF_2012GC15.pdf
- *Wittenstein Alpha*. (25 de Octubre de 2015). Recuperado el 14 de Marzo de 2016, de http://www-alt.alphagetriebe.de/pdf/alpha_gk_14_ritzel-zahnstangees0614.pdf

ANEXOS



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERIA EN MECATRÓNICA**

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores: SANDRA MARICELA MOLINA MOLINA y CARLOS DAVID TERÁN VACA
En la ciudad de Latacunga, a los 24 días del mes de febrero del 2017.

Ing. Fausto Acuña
DIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:

Ing. Vicente Halle
DIRECTOR DE CARRERA



Dr. Rodrigo Vaca
SECRETARIO ACADÉMICO