



**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL
ECUADOR**

FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**DISEÑO DE UNA MÁQUINA CNC DE CORTE POR PLASMA CON
CONTROL DE ALTURA DE LA ANTORCHA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECATRÓNICA**

ERICK DAMIAN TORRES PEÑALOZA

DIRECTORA: ING. CRISTINA GISELLE OSCULLO NARANJO, MSc.

D.M. Quito

2020

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

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

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

f.....

Erick Damian Torres Peñaloza

C.I: 1715786750

CERTIFICACIÓN

La docente de la Facultad de Ciencias Técnicas Ingeniera Cristina Giselle Oscullo Naranjo encargada de la revisión del documento escrito final,

CERTIFICA QUE:

El proyecto de titulación “Diseño de una máquina CNC de corte por plasma con control de altura de la antorcha”, fue desarrollado por: Erick Damian Torres Peñaloza y ha sido debidamente revisado y está en condiciones de ser entregado para que siga lo dispuesto por la Facultad de Ciencias Técnicas, correspondiente a la sustentación y defensa del mismo.

.....
Ing. Cristina Giselle Oscullo Naranjo

DIRECTORA DEL PROYECTO

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. TEMA.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
2.1. GENERAL.....	1
2.2. ESPECÍFICOS.....	1
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
4. HIPÓTESIS.....	2
5. ESTUDIO TEÓRICO.....	2
5.1. CORTE POR PLASMA	2
5.1.1. PARTES DE UNA CORTADORA PLASMA.....	3
5.1.2. CARACTERÍSTICAS DEL CORTE POR PLASMA	4
5.1.3. TIPOS DE CORTE POR PLASMA	5
5.2. CONTROL NUMÉRICO POR COMPUTADORA.....	6
5.2.1. PARTES DE UNA MÁQUINA CNC.....	7
5.2.2. TIPOS DE CONTROL CNC.....	10
5.2.3. MÁQUINAS CNC DE CORTE PLASMA DISPONIBLES EN EL MERCADO	10
6. DISEÑO DE LA MÁQUINA CNC DE CORTE PLASMA CON CONTROL DE ALTURA DE LA ANTORCHA.....	11
6.1. DISEÑO CONCEPTUAL.....	11
6.1.1. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS.....	11
6.1.2. NORMATIVAS APLICABLES AL DISEÑO DE LA MÁQUINA.....	12
6.1.3. ESTRUCTURA FUNCIONAL.....	13
6.1.4. PARÁMETROS DE DISEÑO	13
6.2. DIMENSIONAMIENTO MECÁNICO.....	15
6.2.1. EJE Z.....	15
6.2.2. EJE X	28
6.2.3. EJE Y	36
6.2.4. MESA DE TRABAJO	41
6.3. DIMENSIONAMIENTO ELECTROMECAÁNICO	47
6.3.1. CORTADORA PLASMA	47
6.3.2. COMPRESOR DE AIRE.....	49
6.3.3. RESUMEN SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTROMECAÁNICOS	51

6.4.	DIMENSIONAMIENTO ELECTRÓNICO	51
6.4.1.	DRIVERS PARA MOTORES	51
6.4.2.	FINALES DE CARRERA	53
6.4.3.	CONTROLADOR DE ALTURA DE LA ANTORCHA	54
6.4.4.	MONITOR DE HMI	55
6.4.5.	CONTROLADOR CNC	56
6.4.6.	FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	59
6.4.7.	CALIBRE DE CABLES	60
6.4.8.	PULSADOR DE EMERGENCIA	62
6.4.9.	RESUMEN SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS	62
6.5.	DISEÑO INFORMÁTICO	63
6.5.1.	PROCESO DE CONTROL	63
6.5.2.	SOFTWARE DE CONTROL	64
6.5.3.	RESUMEN SELECCIÓN DE ELEMENTOS INFORMÁTICOS	65
7.	CONCLUSIONES	66
8.	RECOMENDACIONES	67
9.	REFERENCIAS	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Corte por plasma - partes básicas.....	3
Figura 2. Componentes de una antorcha de plasma	4
Figura 3: Ejes principales de una máquina CNC	7
Figura 4. Componentes de una máquina CNC.....	7
Figura 5. Diagrama de bloques del control de altura	9
Figura 6. Tipos de control CNC según trayectoria.....	10
Figura 7. Estructura funcional del proyecto	13
Figura 8. Estructura funcional de la máquina	13
Figura 9. Esquema de la máquina a diseñar	14
Figura 10. Modelo 3D del carro deslizante Z.....	15
Figura 11. Tornillo de potencia SR1605	17
Figura 12. Motor NEMA 23 STP-MTR-23055.....	19
Figura 13. Curva característica del motor a pasos STP-MTR-23055.....	20
Figura 14. Estructura del carro deslizante Z.....	21
Figura 15. Diagrama de cuerpo libre de la zona crítica eje Z.....	23
Figura 16. Diagrama de cuerpo libre para la viga en voladizo	24
Figura 17. Diagrama de cortantes de la viga en voladizo	24
Figura 18. Diagrama de momentos de la viga en voladizo	25
Figura 19. Esquema de inercia de una sección transversal rectangular.	25
Figura 20. Análisis de deflexión en zona crítica del carro deslizante Z.....	27
Figura 21. Modelo 3D del carro deslizante XY	28
Figura 22. Análisis de deformación del travesaño del eje X.	31
Figura 23. Guía lineal SBR20S con cojinetes lineales SBR20Luu.....	32
Figura 24. Movimientos de un mecanismo piñón - cremallera.....	33
Figura 25. Cremallera y piñón de diente recto KOOM.....	33
Figura 26. Curva característica del motor a pasos STP-MTR-23079.....	35
Figura 27. Modelo 3D de la mesa de trabajo.....	36
Figura 28. Longitud viga base de deslizamiento.....	37
Figura 29. Motor NEMA 34 STP-MTR-34066.....	40
Figura 30. Curva característica del motor a pasos STP-MTR-34066.....	41
Figura 31. Rejilla Grating tipo "S"	42
Figura 32. Esquema 3D de la bandeja de agua.	44

Figura 33. Dimensiones de la bandeja de agua	45
Figura 34. Alturas consideradas en la bandeja de agua.....	46
Figura 35. Válvula check y válvula de bola.....	46
Figura 36. Partes del soporte de la antorcha.....	48
Figura 37. Casos de cálculo de resistencia de soldadura.....	49
Figura 38. Compresor Siroco - 3M	50
Figura 39. Configuración interna de un final de carrera.....	53
Figura 40. Final de carrera Mech Endstop v1.2.....	53
Figura 41. Algoritmo de trabajo del controlador de altura THC.....	54
Figura 44. Controlador de altura Proma THC Compact 150.....	54
Figura 45. Diagrama pictográfico de conexión para el THC.....	55
Figura 42. Controlador MASSO CNC PLASMA HTG5A1S	58
Figura 46. Fuente de alimentación Mean Well S-350-24.....	60
Figura 47. Pulsador de emergencia TP-P22M-R.....	62
Figura 48. Diagrama de bloques de conexiones	63
Figura 49. Diagrama de flujo del proceso de corte	63
Figura 50. Pantalla principal del estado de la máquina CNC.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas entre corte por plasma, oxicorte y chorro de agua.....	5
Tabla 2. Dispositivos de control de altura.....	9
Tabla 3. Características de máquinas CNC cortadoras de plasma.....	11
Tabla 4. Requerimientos técnicos para el dimensionamiento y selección.	12
Tabla 5. Normativas aplicables a la máquina.....	12
Tabla 6. Masas consideradas para el movimiento del eje Z.	16
Tabla 7. Características del tornillo de potencia SR1605.....	17
Tabla 8. Especificaciones técnicas de motores paso a paso NEMA.....	19
Tabla 9. Masas consideradas para la obtención de fuerza aplicada en zona crítica Z.....	22
Tabla 10. Deflexión de la viga en voladizo según espesores normalizados. ...	26
Tabla 11. Recopilación de resultados del eje Z.....	28
Tabla 12. Masas consideradas para la obtención de fuerza máxima en el travesaño.....	29
Tabla 13. Deflexión del tubo estructural cuadrado para el eje X, según tamaños estándar.....	30
Tabla 14. Masa total real de los elementos del eje X.	35
Tabla 15. Resumen del dimensionamiento del eje X.....	36
Tabla 16. Masas aproximadas para obtener la fuerza total aplicada en el eje Y.	37
Tabla 17. Deflexión para la zona crítica del eje Y con tamaños de tubo estándar.....	38
Tabla 18. Resumen del dimensionamiento del eje Y.....	41
Tabla 19. Especificaciones de carga y deflexión de rejilla dentada tipo "S".....	42
Tabla 20. Resumen dimensionamiento estructura mesa de trabajo.	47
Tabla 21. Especificaciones técnicas de cortadoras plasma.....	47
Tabla 22. Características GIANT TECH CUT50D.....	48
Tabla 23. Especificaciones de compresores comerciales.	50
Tabla 24. Recopilación selección dispositivos electromecánicos.....	51
Tabla 25. Especificaciones técnicas de drivers para motores NEMA 23.	52
Tabla 26. Especificaciones técnicas de Drivers para motores NEMA 34.....	52

Tabla 29. Características técnicas del THC Compact 150	55
Tabla 33. Características de monitores táctiles	56
Tabla 27. Entradas y salidas requeridas	57
Tabla 28. Especificaciones técnicas del controlador MASSO CNC Plasma HTG5A1S	57
Tabla 30. Datos de corriente de los elementos utilizados.....	59
Tabla 31. Selección de calibre de cable para los diferentes elementos.....	61
Tabla 32. Recopilación selección de dispositivos electrónicos	62
Tabla 34. Recopilación de selección de componentes informáticos.	65

ÍNDICE DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

ASTM:	American Society of Testing Materials (Asociación Americana de Ensayo de Materiales)
AWG:	American Wire Gauge (Calibre de alambre estadounidense)
CAD:	Computer Aided Design (Diseño Asistido por Computadora)
CAM:	Computer Aided Manufacturing (Fabricación Asistida por Computadora)
CN:	Control Numérico
CNC:	Control Numérico Computarizado
CPU:	Central Processing Unit (Unidad Central de Procesamiento)
GTAW:	Gas Tungsten Arc Welding (Soldadura de Arco con Tungsteno)
HMI:	Human - Machine Interface (Interfaz Humano – Máquina)
INEN:	Instituto Ecuatoriano de Normalización
ISO:	International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización)
PC:	Personal Computer (Computadora Personal)
THC:	Torch Height Control (Control de altura de antorcha)

1. TEMA

Diseño de una máquina CNC de corte por plasma con control de altura de la antorcha.

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

Diseñar una máquina CNC de corte por plasma con control de altura de la antorcha.

2.2. ESPECÍFICOS

- Analizar alternativas y tecnologías para realizar cortes con máquinas CNC a planchas de acero.
- Diseñar la mesa de corte de acuerdo con el tamaño estándar de las planchas de acero de 1.220 x 2.440 mm, para satisfacer los requerimientos de corte de metal para el taller metalmecánico “La Alsacia”.
- Diseñar los sistemas electromecánicos para el desplazamiento de la antorcha del arco plasma en los ejes X, Y, Z.
- Seleccionar los dispositivos electrónicos que permitan el movimiento automático de los ejes de la máquina CNC.
- Seleccionar un dispositivo controlador de altura de la antorcha que permita regular automáticamente la distancia entre la antorcha y el material a cortar.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El taller metalmecánico “La Alsacia”, ubicado en la ciudad de Latacunga, realiza trabajos de corte y soldadura en todo tipo de aceros para diferentes empresas constructoras desde el año 2010. Actualmente los cortes se realizan de manera manual con operadores experimentados en corte por plasma. El garantizar cortes precisos de manera manual, en piezas de formas complejas, aumenta el tiempo de trabajo debido a que el operador varía la altura de la antorcha con respecto a la plancha, lo que provoca una pérdida de perpendicularidad del arco plasma con el material a cortar y genera un calentamiento de manera irregular. El calentamiento irregular ocasiona formación excesiva de escoria, un mal

acabado en el corte, y que la pieza requiera repetir el proceso alterando los tiempos de trabajo e incrementando la labor del operador. El taller ha tenido un incremento de la demanda en aproximadamente un 5% durante los últimos 6 meses y necesita garantizar cortes precisos para garantizar la calidad ante un posible incremento continuo de la demanda.

4. HIPÓTESIS

La máquina CNC de corte por plasma con control de altura de la antorcha permite cortar planchas de acero laminado en caliente de tamaño estándar comercial de 1.220 x 2.440 mm. Para garantizar el corte preciso y evitar la producción excesiva de escoria, se integra un sistema de control de altura automático entre 1 y 10 mm para la antorcha del arco plasma. La variación de la altura de la antorcha con respecto a la pieza de trabajo depende del espesor del material a cortar.

5. ESTUDIO TEÓRICO

5.1. CORTE POR PLASMA

El corte por plasma es un proceso de corte térmico en el que un gas inerte se transfiere a alta velocidad a través de una boquilla estrecha. Al mismo tiempo, se forma un arco eléctrico entre el electrodo y la pieza de trabajo que convierte el gas en plasma con temperaturas cercanas a los 16000 °C [1]. El plasma derrite el material y retira metal fundido de la zona de corte atravesando toda la sección transversal del material; se utiliza agua alrededor del plasma para evitar la acumulación de escoria en la pieza y limpiar el canal de metal fundido.

Los parámetros más comunes que influyen en la calidad del corte además de las características físico - químicas del material a cortar, son el espesor del material, el voltaje del arco, la presión del gas y la distancia de separación entre las superficies del material y la punta de la boquilla. La característica principal del plasma es la capacidad de trabajar con cualquier tipo de metal y no se limita a metales ferrosos como otros procesos de mecanizado que se dan por oxidación como el oxicorte [2].

5.1.1. PARTES DE UNA CORTADORA PLASMA

Las partes básicas de una cortadora por plasma se observan en la Figura 1, las mismas que son detalladas a continuación [3]:

- 1.- Gas plasmágeno: Los gases más usados son el aire, nitrógeno, argón, hidrógeno o una mezcla de estos.
- 2.- Fuente de energía: Las cortadoras utilizan generalmente un generador de alta frecuencia para ionizar el gas y estabilizarlo a través de un arco eléctrico.
- 3.- Pieza de trabajo: El material a ser cortado puede ser cualquier metal conductor como aceros al carbono simple, acero inoxidable, aluminio, hierro, cobre, latón, bronce, titanio, entre otros.
- 4.- Antorcha: La parte de la cortadora donde se produce el arco plasma que realiza el corte.

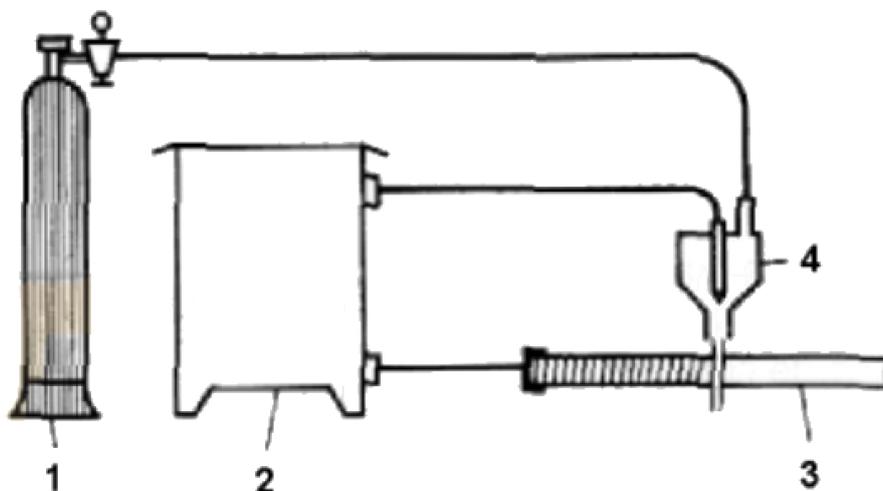


Figura 1: Corte por plasma - partes básicas

Fuente: demaquinasyherramientas.com [4].

5.1.1.1. Gas plasmágeno

El gas plasmágeno conformado de iones positivos, átomos neutros y electrones negativos se transforma en gas ionizado al calentarse rápidamente a temperaturas cercanas a los 27.000 °C [5]. Es importante que el gas sea ionizado para que pueda ser transferido en forma de plasma a través de un arco eléctrico hacia el metal a cortar. El arco plasma cuenta con suficiente energía y fuerza para fundir y remover el material.

5.1.1.2. Antorcha de plasma

El plasma se forma directamente en la antorcha, esta pieza cuenta con varios componentes que se presentan en la Figura 2, siendo:

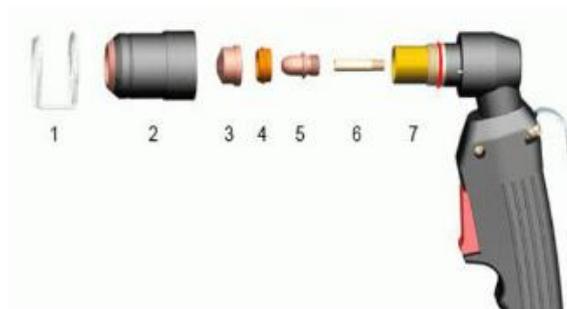


Figura 2. Componentes de una antorcha de plasma

Fuente: [6]

1. Espaciador Tobera
2. Tobera
3. Boquilla
4. Difusor de gas
5. Electrodo
6. Tubo de aire
7. Cabezal plasma

La boquilla y el electrodo se consideran consumibles y deben ser reemplazados en periodos de mantenimiento establecidos por el fabricante, con el fin de que el arco se produzca de manera eficiente y se mantenga la calidad en el corte. El tamaño del orificio de la boquilla determina la tolerancia de corte considerando que a menor diámetro se genera un arco más delgado y definido. Las boquillas con orificios anchos se usan en aplicaciones de acanalado, mientras que las boquillas de orificios estrechos se usan para cortes de características finas.

5.1.2. CARACTERÍSTICAS DEL CORTE POR PLASMA

La tecnología de corte por plasma cuenta con las siguientes características:

- Permite un corte instantáneo y produce una deformación mínima de la pieza con un acabado sin rugosidad.

- Disminución de los tiempos muertos entre cortes debido a la flexibilidad del proceso al trabajar con diferentes espesores.
- Permite cortes de orificios perfectamente cilíndricos sin conicidad.
- Permite cortar materiales ferrosos y no ferrosos mediante la generación de plasma proveniente de un gas inerte.

Industrialmente para el corte de metales existen otras tecnologías como el oxicorte, técnica de remoción del material por oxidación, corte por chorro de agua, técnica de remoción del material a través de chorros de agua a altas presiones; en la Tabla 1 se presenta una comparación de ventajas y desventajas entre estas tres tecnologías.

Tabla 1. Ventajas y desventajas entre corte por plasma, oxicorte y chorro de agua.

	Ventajas	Desventajas
Corte por plasma [7]	<ul style="list-style-type: none"> • El acabado obtenido mediante este proceso es prácticamente definitivo. • No necesita pre calentamiento • Permite cortar a mayores velocidades que el oxicorte. 	<ul style="list-style-type: none"> • La afectación de calor en trabajos con tolerancias estrechas puede deformar las piezas. • Riesgos de incendio o choque eléctrico ya que requiere energía eléctrica.
Oxicorte [8]	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo de adquisición y mantenimiento. • Alta efectividad en corte de materiales de espesores gruesos, de hasta 61 mm (24 pulg) de espesor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere trabajo adicional para obtener un buen acabado. • Problemas con espesores delgados. • Solo corta metales ferrosos.
Corte por chorro de agua [9]	<ul style="list-style-type: none"> • Corte frío que no afecta al material • No existen gases, humos ni radiaciones UV. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo elevado de corte en materiales de grandes espesores y dureza • Requiere un tiempo de calentamiento

5.1.3. TIPOS DE CORTE POR PLASMA

Existen cuatro tipos de corte por plasma [10], sus características se listan a continuación:

- Corte con plasma de aire: El gas plasmágeno utilizado es el aire, es el tipo de corte óptimo para aceros inoxidables y aluminio.
- Corte con inyección de oxígeno: El gas plasmágeno utilizado es el nitrógeno, una vez que el arco plasma se estabiliza, se introduce oxígeno como alrededor del mismo. Esta técnica admite aumentar la velocidad del corte, pero disminuye la vida útil del electrodo.
- Corte con plasma “doble flujo”: El gas plasmágeno se rodea por un gas de protección que permite aumentar la velocidad del corte, pero empeora la calidad del acabado. Como gas plasmágeno se usa nitrógeno y como gas de protección se puede usar aire, argón, dióxido de carbono o hidrógeno.
- Corte con “inyección de agua”: Se inyecta una capa laminar de agua alrededor del arco plasma, con el fin de concentrar el plasma produciendo un corte más fino y con menor deformación por el calor.

5.2. CONTROL NUMÉRICO POR COMPUTADORA

A comienzos del siglo XX, se buscaban procesos que sean más eficientes en cuanto a tareas de corte industrial, que requerían una gran cantidad de obreros; sin embargo, la calidad y repetibilidad de los cortes no eran los requeridos, dejando la garantía de precisión de las diferentes piezas a la experiencia de cada uno de los trabajadores. En la década de 1950, se introdujo el concepto del control numérico (CN) con la incorporación de un control por medio de códigos en una fresadora; no obstante, fue en 1970 donde se introdujeron las computadoras sentando los pilares para la tecnología del control numérico computarizado (CNC) [11].

La característica principal de una máquina CNC es que los movimientos se dan a través de ejes, estos movimientos pueden ser lineales o rotatorios, considerando que, a mayor cantidad de ejes, mayor complejidad del control. Un sistema básico emplea tres ejes lineales (X, Y, Z) como se expone en la Figura 3, y pueden tener tres ejes giratorios (A, B, C) de forma opcional dependiendo del propósito de la máquina. El eje X y el eje Y permiten ubicar a la herramienta en la posición exacta en el espacio, mientras que el eje Z realiza la operación de mecanizado variando su profundidad. El eje Y siempre se ubica de frente hacia el operador [12].

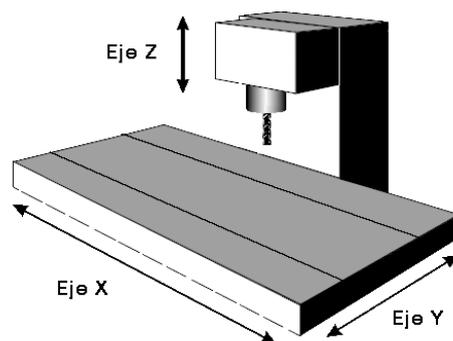


Figura 3: Ejes principales de una máquina CNC

Fuente: [12]

Los comandos de un sistema controlado por computadora vienen dados por instrucciones generales con los códigos G y misceláneas con los códigos M. Los códigos G envían señales de movimientos, avances, pausas, repeticiones y posicionamiento de la herramienta. Los códigos M envían señales de velocidad de giro de la herramienta, cambio de herramienta, activación de refrigerante, accionamiento de accesorios, entre otros. La combinación de estos códigos contiene la información suficiente para efectuar el mecanizado de la pieza. Cada bloque de código se lee en secuencia y contiene un comando individual.

5.2.1. PARTES DE UNA MÁQUINA CNC

Las máquinas CNC están conformadas por seis componentes principales [13], como se muestra en la Figura 4, siendo:

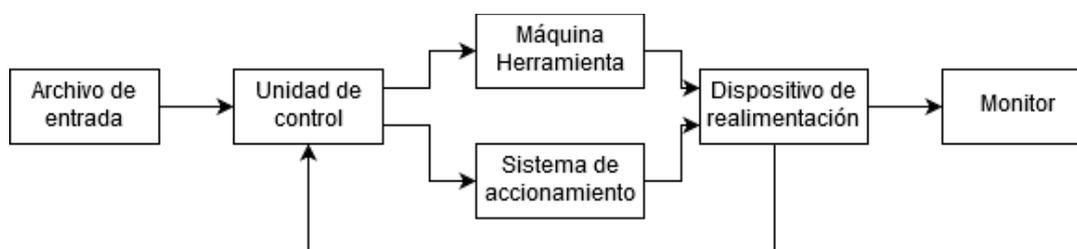


Figura 4. Componentes de una máquina CNC

Fuente: Martinov, Ljubimov y Martinova [14]

- Archivo de entrada: El archivo de entrada es una secuencia de códigos G y M, generados a partir de un software CAD/CAM, que contienen toda la información geométrica de la pieza a mecanizar.

- Unidad de control: También denominado controlador, es un dispositivo que decodifica el archivo de entrada en señales de voltaje y/o corriente que dependen del elemento a controlar. Las señales son enviadas hacia los actuadores del sistema de accionamiento y de la máquina herramienta. El controlador recibe la información de los dispositivos de realimentación.
- Máquina Herramienta: La parte que realiza el mecanizado dependiendo del trabajo que realice la máquina. En un corte por plasma, la máquina herramienta es la antorcha.
- Sistema de accionamiento: El movimiento lineal de la máquina es producido por actuadores motrices, los más utilizados son los servomotores y los motores paso a paso. La transmisión de potencia para movimientos giratorios se da a través de tornillos de potencia, mecanismos de piñón cremallera o transmisión por correa dentada.
- Dispositivo de realimentación: La realimentación de datos es fundamental al momento de realizar el control utilizando sensores y/o pulsadores. Estos dispositivos entregan información al controlador de distancias máximas en los ejes, puntos de partida, voltaje del arco plasma, entre otros.
- Monitor: El monitor o pantalla presenta la información del estado de la máquina en tiempo real. Desde esta pantalla, el operador interactúa enviando instrucciones a la máquina a través de una HMI.

5.2.1.1. Controlador de altura de la antorcha

La altura de la antorcha es la distancia entre la pieza de trabajo y la superficie de la boquilla. El control de esta altura es importante ya que si ambas superficies colisionan afectan directamente a la precisión del corte y a la durabilidad de los consumibles. Por otra parte, si las superficies se alejan demasiado, existirá un mayor bisel producido por el arco plasma aumentando la producción de escoria. La Tabla 2 presenta cuatro dispositivos de control de altura tomando en cuenta la precisión de los mismos.

Tabla 2. Dispositivos de control de altura

Dispositivos de control de altura	Descripción	Precisión
Dispositivo manual	Sistema mecánico con el que se posiciona manualmente la antorcha sobre el material. La principal desventaja es que no se asegura una altura uniforme en caso de deformación de la plancha.	Baja
Dispositivo de cabeza flotante	Mecanismo localizado en la punta de la antorcha de plasma que activa un switch al tocar la pieza de trabajo elevando el eje Z. La principal desventaja es que no detecta si el material se encuentra muy alejado de la distancia óptima para el corte.	Baja
Sensor de proximidad	Sensor que posee un palpador que indica al controlador la distancia entre el material y la antorcha para realizar las correcciones de altura en el eje Z. El palpador pierde precisión al desgastarse por el contacto con el material.	Media
THC: Control de altura de antorcha	El THC mide el voltaje del arco plasma para mantener el eje Z a la altura de referencia.	Alta

El THC (por sus siglas en inglés: Torch Height Control) es un dispositivo de control en lazo cerrado de alta precisión, en el que el voltaje de referencia con el que se realiza el corte, se compara con el valor de voltaje de salida de la antorcha, si este valor se encuentra fuera de la referencia, el controlador envía una señal al motor de la antorcha para que se compense el voltaje a través de la altura. La longitud del arco plasma varía de acuerdo a la altura de la antorcha con respecto a la pieza de trabajo y se relaciona directamente con el voltaje del arco. En el caso donde la antorcha se aleja del material, se produce un aumento de la longitud del arco y se eleva el voltaje. Por otra parte, si la longitud del arco se reduce, el voltaje del arco cae [15]. En la Figura 5 se presenta el diagrama de bloques del controlador.

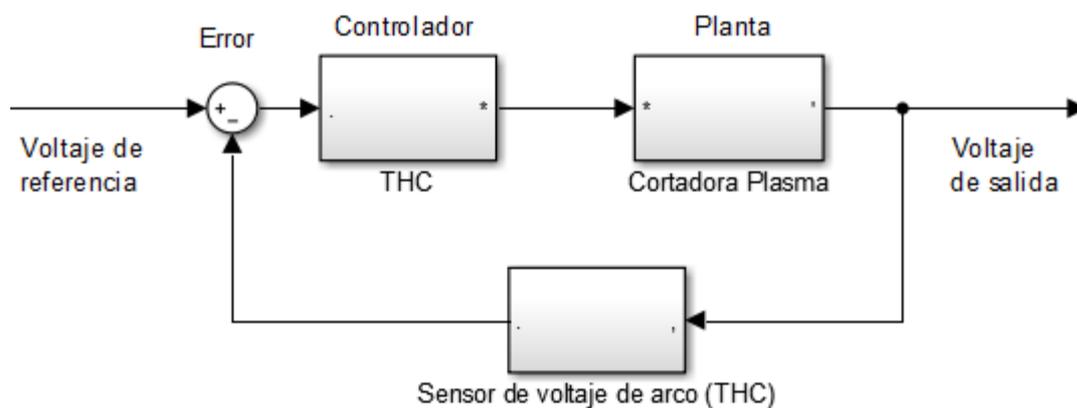


Figura 5. Diagrama de bloques del control de altura

5.2.2. TIPOS DE CONTROL CNC

Los tipos de control CNC se basan en la trayectoria del mecanizado según el trabajo que realiza la máquina [13]. Existen tres tipos de control como se indica en la Figura 6.

- Control punto a punto (a): La máquina CNC solo mecaniza puntos iniciales y finales, no la trayectoria.
- Control Paraxial (b): La máquina CNC permite programar desplazamientos de trayectorias paralelas a los ejes.
- Control interpolador o continuo (c): Las máquinas CNC realizan mecanizados a lo largo de cualquier tipo de trayectorias.

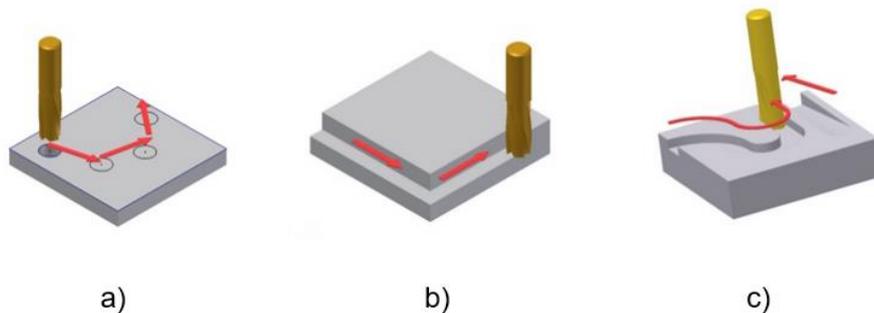


Figura 6. Tipos de control CNC según trayectoria

Fuente: Manual CNC para principiantes [13]

5.2.3. MÁQUINAS CNC DE CORTE PLASMA DISPONIBLES EN EL MERCADO

En el avance de la construcción de máquinas CNC cortadoras de metal se han desarrollado varias patentes, entre las cuales se encuentra una patente europea con configuración automática de la herramienta [16] y tres patentes referidas a los movimientos de los ejes [17] [18] y [19], según se muestra en el Anexo A.1. En el campo del mecanizado se pueden encontrar varios fabricantes de maquinaria industrial. En la Tabla 3 se muestran las características de tres (3) máquinas CNC cortadoras por plasma disponibles en el mercado con sus respectivos precios como referencia solamente.

Tabla 3. Características de máquinas CNC cortadoras de plasma

Característica	Lincoln Electric Torchmate 5100	ShopSabre Sidekick 8	Crossfire Pro CNC Plasma
Dimensión Ancho (X)	2.883 mm	2.134 mm	1.377 mm
Dimensión Largo (Y)	4.216 mm	2.819 mm	1.765 mm
Dimensión Alto (Z)	1.524 mm	1.524 mm	772 mm
Área de trabajo	1.524 x 3.048 mm	1.320 x 2.490 mm	1.225 x 845 mm
Voltaje alimentación	200–600 VAC /60Hz	220 VAC /60Hz	220 VAC / 60 Hz
Control de altura	THC	Ninguno	Sensor de Proximidad
Velocidad X e Y	0,635 m/s (1500 ipm)	0,42 m/s (1000 ipm)	0,127 m/s (300 ipm)
Precio aproximado	\$ 22.000,00	\$ 14.495,00	\$ 3.495,00

6. DISEÑO DE LA MÁQUINA CNC DE CORTE PLASMA CON CONTROL DE ALTURA DE LA ANTORCHA

En esta sección se realiza el dimensionamiento de los elementos que componen la máquina CNC a diseñar. Inicialmente se definen los parámetros de diseño a partir de los requerimientos y de las normativas aplicables a la máquina CNC; posteriormente, se realiza un diseño mecánico de las partes móviles de la máquina y de los elementos críticos de las estructuras de los ejes X, Y y Z. Más adelante se dimensionan los soportes del área de trabajo y la bandeja de agua; luego se seleccionan los componentes electromecánicos y electrónicos necesarios para el movimiento de los ejes de la máquina; finalmente se selecciona el software y se configura los parámetros del HMI para el proceso de corte que se va a realizar.

6.1. DISEÑO CONCEPTUAL

6.1.1. REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

Los requerimientos del usuario deben ser escuchados y solventados dentro del diseño conceptual, en la Tabla 4 se presenta la voz del usuario conjuntamente con la voz del ingeniero donde se establecen las principales especificaciones técnicas que debe tener la máquina a diseñar.

Tabla 4. Requerimientos técnicos para el dimensionamiento y selección.

Requerimientos	Especificaciones técnicas
Precisión en los cortes y acabado limpio de la pieza para evitar retrabajo.	Máquina CNC cortadora de plasma con movimientos lineales controlados por motores paso a paso y transmisión de potencia con mecanismo de piñón cremallera. Implementación de control de altura de la antorcha.
Cortar planchas de acero de tamaño estándar comercial y de espesor máximo 10 mm.	La máquina debe contar con una mesa de trabajo de dimensiones mayores a 1220 x 2440 mm.
Máquina resistente a movimientos y vibraciones.	Diseño de la estructura en base a máquinas de precisión moderada con un rango de flexión entre el 0.001 y el 0.0001 % de la viga crítica.
Operación amigable con el operador.	Implementación de un HMI.
Mínima generación de humos contaminantes.	Se considera aire como gas plasmágeno y una bandeja de agua como apaciguador de humos y vapores generados por el plasma para evitar contaminación del entorno de trabajo. Normativa ecuatoriana NTE INEN – ISO 12100.
Alimentación disponible de 220 VAC.	La selección de componentes con alimentación máxima de 220 VAC.

6.1.2. NORMATIVAS APLICABLES AL DISEÑO DE LA MÁQUINA

Las principales normativas a considerarse para el diseño de la máquina CNC cortadora por plasma con control de altura se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Normativas aplicables a la máquina

Norma	Título	Aplicación
NTE INEN - ISO 12100 [20]	Seguridad de las máquinas. Principios generales para el diseño. Evaluación del riesgo y reducción del riesgo.	Se considera la prevención de riesgos ante humos o vapores contaminantes y la seguridad del operador a través de la disposición de un paro de emergencia de fácil acceso.
NTE INEN - ISO 7250-1 [21]	Definiciones de las medidas básicas del cuerpo humano para el diseño tecnológico. Parte 1: definiciones de las medidas del cuerpo y referencias.	Se toma en cuenta las medidas del cuerpo humano para el diseño ergonómico de la máquina y consideración de la medida máxima para levantamiento de peso por encima de la cintura de un adulto.
NTE INEN 115:2008 [22]	Tolerancia para planchas y planchones de acero al carbono laminadas en caliente y/o frío.	Se considera las medidas de planitud de las planchas comercializadas bajo esta norma en el caso más desfavorable de deformación para la adaptación del control de altura automático.
NTE INEN 037-2009 [23]	Reglamento técnico ecuatoriano para el diseño, fabricación y montajes de estructuras de acero.	Se toma en cuenta las características de diseño por flexión para la realización de cálculos y validaciones de la estructura de la mesa de corte.

6.1.3. ESTRUCTURA FUNCIONAL

La estructura funcional del presente trabajo incluye el dimensionamiento y selección de los componentes, mecánicos y electrónicos para obtener como producto final la máquina cortadora por plasma CNC como se muestra en la Figura 7. La estructura funcional de esta máquina se presenta en la Figura 8, se basa en obtener de forma física piezas cortadas con alta precisión, siendo las entradas: material a cortar, alimentación eléctrica y gas plasmágeno, y la programación de códigos G.

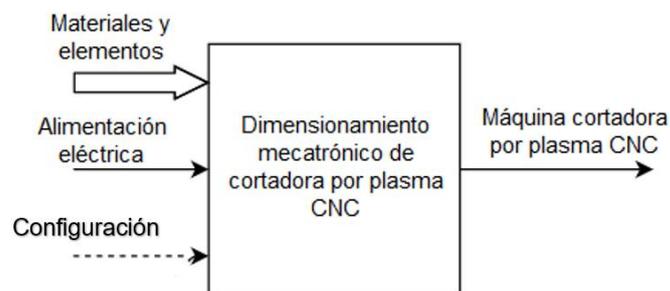


Figura 7. Estructura funcional del proyecto

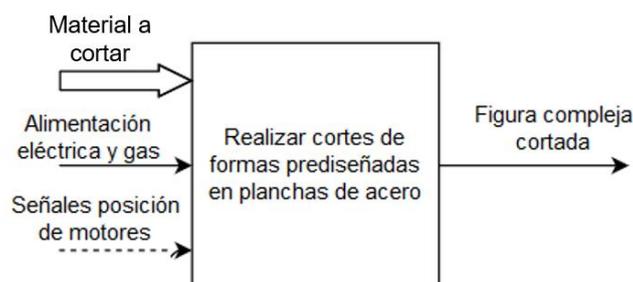


Figura 8. Estructura funcional de la máquina

6.1.4. PARÁMETROS DE DISEÑO

En base a los requerimientos técnicos, normativas aplicables y estructura funcional se diseñará la máquina CNC de corte por plasma con control de altura de la antorcha con las siguientes características:

- Movimiento lineal (carro deslizante) y transmisión de potencia de los ejes X, Y y Z.
- Control de altura THC.

- Mesa de trabajo rectangular con dimensiones superiores a 1220 x 2440 mm con panel de control incluido.
- Estructura bajo diseño por flexión para máquinas de trabajo de precisión moderada, tomando en cuenta un rango de flexión entre el 0,001 y el 0,0001 por ciento de la viga más larga entre dos apoyos.
- Corte por plasma de aire usando una cortadora plasma con alimentación de 220V / 60 Hz y un compresor de aire con presión adecuada para el trabajo de la cortadora.
- Bandeja de agua para reducir humos y vapores contaminantes en el entorno del taller.
- HMI táctil para interacción del operador.
- Controlador CNC para cortadoras de plasma.

En la Figura 9 se muestra el bosquejo de la máquina incluyendo los componentes principales modelado en un software CAD de diseño.

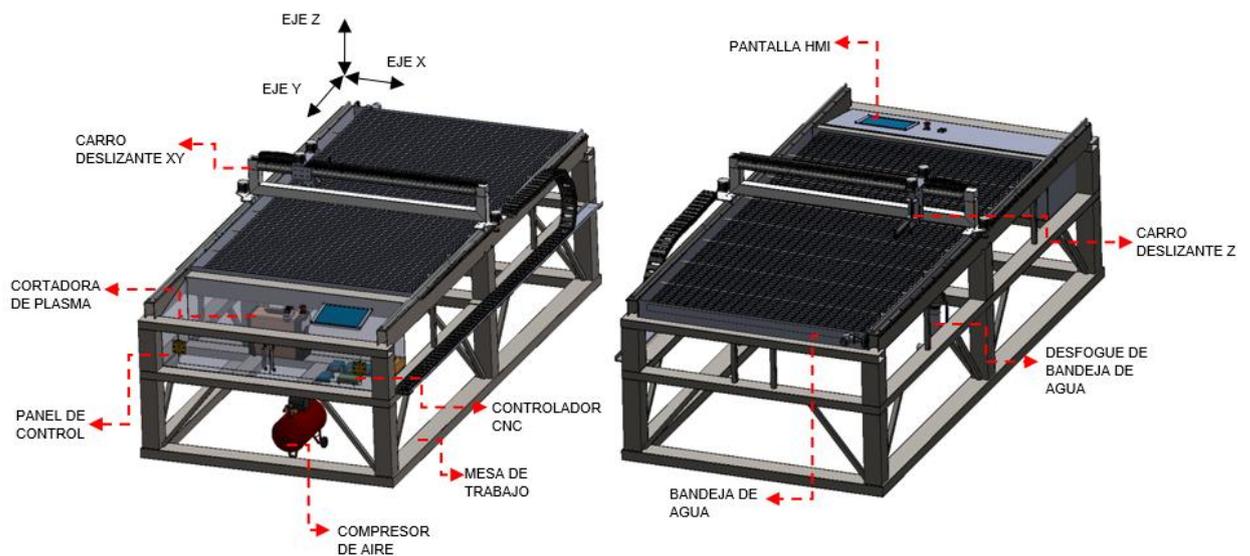


Figura 9. Esquema de la máquina a diseñar

6.2. DIMENSIONAMIENTO MECÁNICO

El diseño mecánico inicia dimensionando el eje Z, la parte móvil más pequeña de la máquina, considerando que las fuerzas generadas por este eje están directamente relacionados al resto de ejes.

6.2.1. EJE Z

El carro deslizante del eje Z se encarga de regular la altura de la antorcha respecto a la mesa de trabajo con un movimiento vertical. Los componentes del carro deslizante Z se observan en la Figura 10. Los elementos a seleccionar son el tornillo de potencia, y el motor paso a paso involucrados en el movimiento del eje Z. En la parte estructural del eje Z, se dimensionará el elemento crítico denominado platina base.

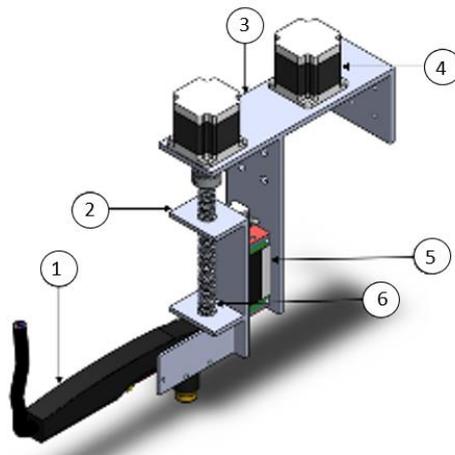


Figura 10. Modelo 3D del carro deslizante Z.

1. Antorcha
2. Elevador antorcha
3. Platina base
4. Motor paso a paso
5. Guía lineal
6. Tornillo de potencia

6.2.1.1. Tornillo de potencia

EL tornillo de potencia se encarga de realizar el movimiento vertical del eje Z. Las masas aproximadas de los elementos involucrados en este movimiento se indican en la Tabla 6, y se considera una masa de 5 kg como extras por seguridad.

Tabla 6. Masas consideradas para el movimiento del eje Z.

Elementos del eje Z	Masa aproximada [kg]
Antorcha	2,5
Elevador antorcha	2,5
Guía lineal	1
Extras	5
Masa total	11

Con la masa total igual a 11 kg, se calcula la fuerza máxima mediante (1) que soportará el tornillo de potencia durante el proceso de corte.

$$F = ma \quad (1)$$

Donde:

F : Fuerza máxima, en N;

m : Masa total, en kg;

a : Aceleración de la gravedad, igual a $9,8 \text{ m/s}^2$.

Para el caso del eje analizado, se denomina como F_Z a la fuerza máxima del eje Z y como m_Z a la masa total del eje Z.

$$F_Z = 11 \text{ kg} * 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_Z = 107,8 \text{ N}$$

Calculada la fuerza máxima en el eje Z igual a 107,8 N se procede a calcular el torque necesario para dar movimiento al tornillo de potencia. Inicialmente se selecciona el tornillo de potencia con recirculación de bolas modelo SR1605 del anexo A.2, ver Figura 11, y sus características técnicas mostradas en la Tabla 7.



Figura 11. Tornillo de potencia SR1605

Fuente: Catálogo NSB [24]

Tabla 7. Características del tornillo de potencia SR1605

	Diámetro (d)	Paso (p)	Entradas (n)	Coef. De fricción (μ)	Avance (l)
SR1605	16 mm	5 mm	4	0,15	50 mm

Para obtener el torque máximo requerido se debe conocer el diámetro medio del tornillo, calculado con (2).

$$d_m = d - \frac{p}{2} \quad (2)$$

Donde:

d_m : Diámetro medio del tornillo, en m;

d : Diámetro del tornillo, en m;

p : Paso, en m.

$$d_m = 0,016 - \frac{0,005}{2} = 0,0135 \text{ m}$$

Mediante (3) se calcula el torque requerido de subida y con (4) se calcula el torque requerido de bajada.

$$T_s = \frac{F_Z}{2} \left(\frac{\mu * \pi * d_m + 1}{\pi * d_m - \mu * 1} \right) * d_m \quad (3)$$

$$T_b = \frac{F_Z}{2} \left(\frac{\mu * \pi * d_m - 1}{\pi * d_m + \mu * 1} \right) * d_m \quad (4)$$

Donde:

T_s : Torque requerido de subida, en N/m;

T_b : Torque requerido de bajada, en N/m;

- F_Z : Fuerza máxima del eje Z, en N;
- μ : Coeficiente de fricción, adimensional;
- dm : Diámetro medio del tornillo, en m;
- l : Distancia de avance, en m.

$$T_s = \frac{107,8}{2} \left(\frac{0,15 * \pi * 0,0135 + 0,050}{\pi * 0,0135 - (0,15 * 0,050)} \right) * 0,0135$$

$$T_s = \mathbf{1,174 Nm}$$

$$T_b = 0,636 Nm$$

Con los datos obtenidos con (3) y (4) se selecciona el valor de torque requerido de subida dado que es la peor condición como el torque máximo que debe soportar el motor. Se calcula la eficiencia del tornillo mediante (5).

$$\eta = \frac{F_Z * l}{2\pi * T_s} \quad (5)$$

Donde:

- η : Eficiencia del tornillo de potencia, en porcentaje;
- F_Z : Fuerza máxima del eje Z, en N;
- l : Distancia de avance, en m;
- T_s : Torque requerido de subida, en N/m.

$$\eta = \frac{107,8N * 0,05}{2\pi * 1,174} = 0,73$$

$$\eta = \mathbf{73\%}$$

Se obtiene una eficiencia del 73% para el tornillo durante la elevación de la carga máxima del eje Z, siendo un valor aceptable para el movimiento lineal considerando que la eficiencia para los tornillos de potencia de bolas recirculantes se encuentra en un rango del 70 % al 95 % [25].

6.2.1.2. Motor paso a paso del eje Z

Con el torque máximo obtenido se selecciona el motor para mover el tornillo SR1605.

La Tabla 8 presenta las especificaciones técnicas de los motores NEMA 17, NEMA 23, NEMA 23 de alto torque y NEMA 34 [26].

Tabla 8. Especificaciones técnicas de motores paso a paso NEMA.

Números del Artículo	STP-MTR-17048	STP-MTR-23055	STP-MTR-23079	STP-MTR-34066
Flanje del motor	NEMA 17	NEMA 23	NEMA 23	NEMA 34
Torque del eje detenido	0,59 N-m	1,29 N-m	2,08 N-m	3,06 N-m
Torque del eje detenido máximo	5,2 libras-pulgada	11,4 libras-pulgada	18,4 libras-pulgada	27,1 libras-pulgada
Inercia del rotor	0,0000068 kg-m ²	0,000027 kg-m ²	0,000047 kg-m ²	0,00014 kg-m ²
Corriente nominal	2,0 A/fase	2,8 A/fase	2,8 A/fase	2,8 A/fase
Ángulo del paso básico	1,8° (motores bifásicos con cable con conector)			
Peso	210 gramos	457 gramos	1 Kg	1,17 Kg

El motor seleccionado es el NEMA 23 (STP-MTR-23055) mostrado en la Figura 12, cuyo torque máximo es de 1,29 Nm, superior al torque de subida máximo igual a 1,17 Nm calculado con (3). El motor NEMA 23 trabajaría al 90% de su capacidad en el caso que la carga sea máxima.



Figura 12. Motor NEMA 23 STP-MTR-23055

Fuente: Manual SureStep [26]

La validación del motor seleccionado se realiza comparando el área de trabajo del motor mediante la curva Torque – Velocidad, con el torque característico del motor. Inicialmente, se asume una velocidad lineal de diseño igual a 0,4 m/s tomando en cuenta la velocidad de las máquinas CNC comparadas en la Tabla 3, que es igual a una velocidad angular de 477 rpm y se grafica el área con el torque necesario para mover la carga desde el reposo obteniéndose un valor de 0,376 Nm. Se observa que el motor trabaja con estos datos por debajo de la curva característica del motor en la Figura 13, por lo tanto, el motor seleccionado cumple los requerimientos para dar movimiento al eje Z. Los cálculos y la hoja de datos del del motor mencionado se presentan en el anexo A.3

STP-MTR-23055

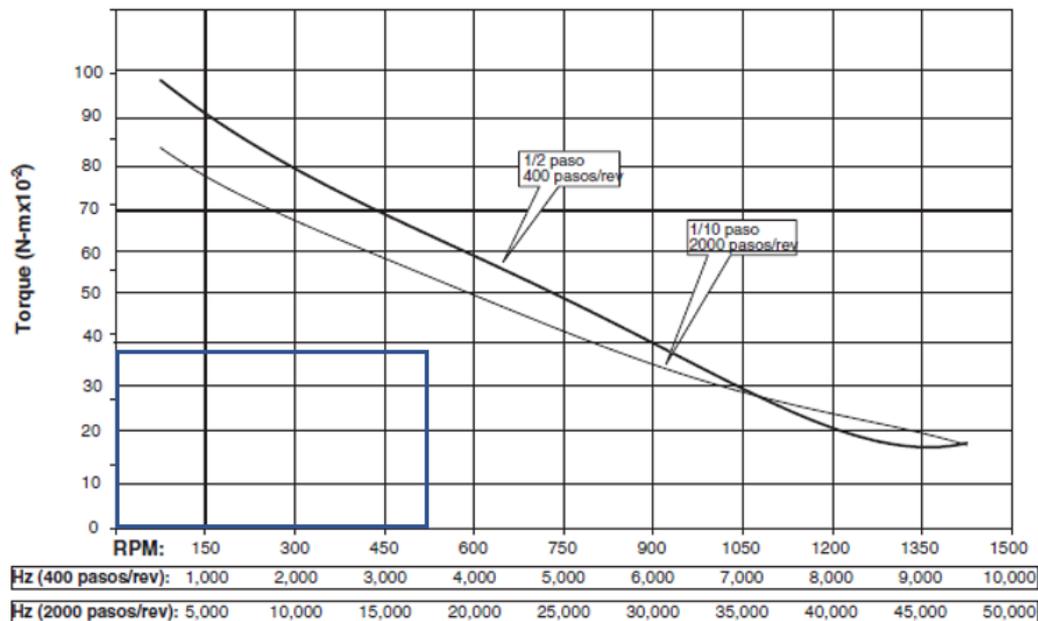


Figura 13. Curva característica del motor a pasos STP-MTR-23055.

Fuente: Manual SureStep [26].

6.2.1.3. Estructura del carro deslizante Z

Se considera como zona crítica en la platina base al espacio donde se encuentra el mecanismo de variación de altura, como se indica en la Figura 14. Se calculará el espesor de esta zona para garantizar que la misma no se deforme durante el movimiento del eje Z.

Mediante el modelo matemático de deflexión de Mott [27] se usa (6) para obtener el rango de deflexión admisible para el caso de máquinas de trabajo de precisión moderada. El rango definido está entre 0,00001 y 0,0005 multiplicado con la longitud de la viga más larga sin apoyos. Para el cálculo se considera a la zona crítica como una viga en voladizo debido a que sólo existe un apoyo. La longitud de esta zona es de 0,09 m.

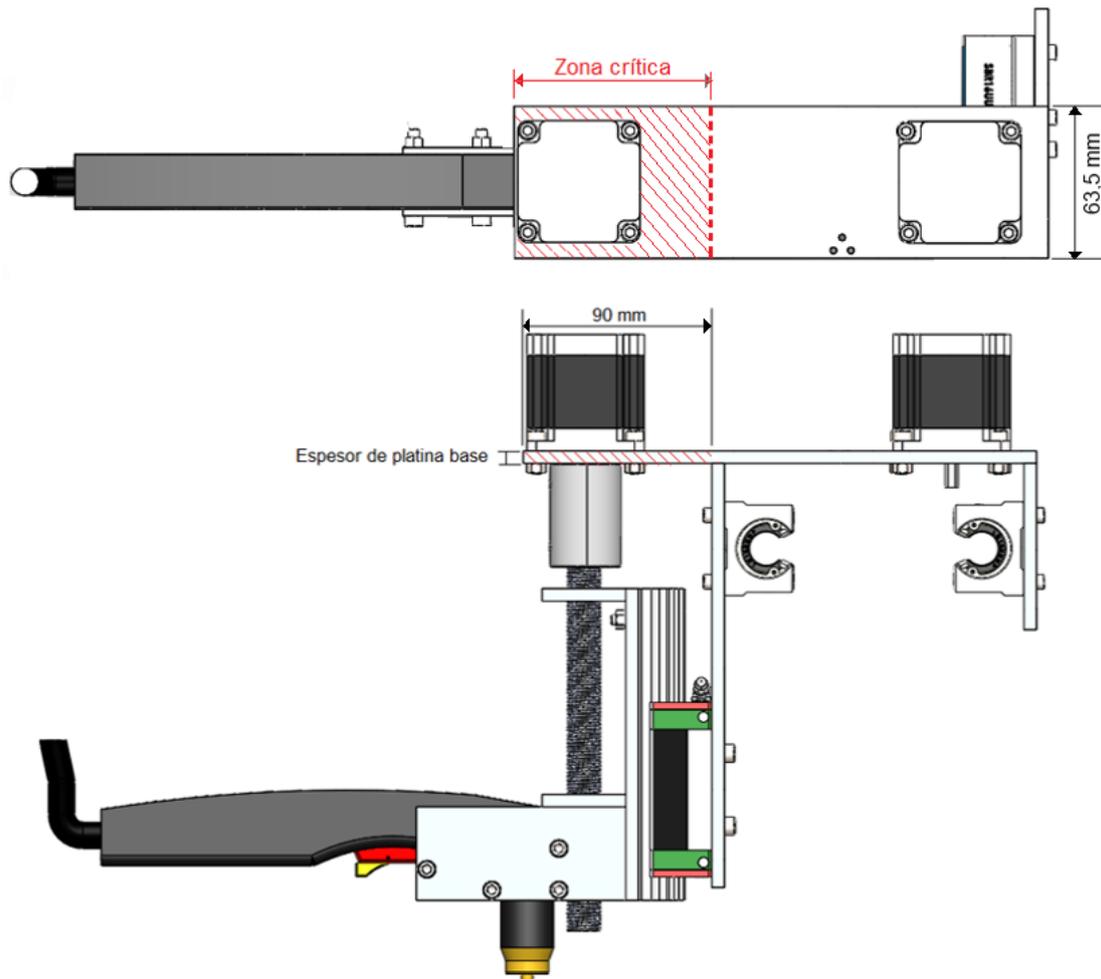


Figura 14. Estructura del carro deslizante Z.

$$Y_{adm_{P.M.}} = \frac{L_V}{100000} \text{ hasta } L_V * 0,0005 \quad (6)$$

Donde:

$Y_{adm_{P.M.}}$: Deflexión admisible máquinas de precisión moderada, en mm;

L_V : Longitud de la viga, en mm.

$$Y_{adm} = \frac{90}{100000} = 0,009 \text{ mm} \quad Y_{adm} = 90 * 0,0005 = 0,045 \text{ mm}$$

El rango de deflexión admisible para esta viga se encuentra entre 0,009 mm y 0,045 mm.

Para determinar la deflexión de una viga en voladizo se usa (7).

$$Y_{m\acute{a}x_{VV}} = -\frac{F_{VV}L_{VV}^3}{3EI} \quad (7)$$

Donde:

$Y_{m\acute{a}x_{VV}}$: Deflexi3n m\acute{a}xima para viga en voladizo, en m;

F_{VV} : Fuerza aplicada en viga en voladizo, en N;

L_{VV} : Longitud de la viga en voladizo, en m;

E : M3dulo de elasticidad del material, en Pa;

I : Inercia, en m^4 .

La fuerza aplicada en la viga (F_{VV}) se la obtiene con las masas aproximadas de los componentes que ejercen fuerza en la zona cr\acute{it}ica. En la Tabla 9 se muestran las masas mencionadas y se considera como masa extra a un apoyo eventual de alg\un elemento sobre el carro deslizando Z.

Tabla 9. Masas consideradas para la obtenci3n de fuerza aplicada en zona cr\acute{it}ica Z

Elementos de zona cr\acute{it}ica Z	Masa aproximada [kg]
Antorcha	2,5
Elevador antorcha	2,5
Gu\aa lineal	1
Motor NEMA 23	0,5
Extras	5
Masa total (m_{VV})	11,5

Para este caso, se denomina como F_{VV} a la fuerza m\acute{a}xima aplicada en la viga en voladizo y como m_{VV} a la masa total del eje Z. Utilizando (1) se obtiene la fuerza m\acute{a}xima aplicada en la viga (F_{VV}) dando como resultado 112,7 N.

La Figura 15 muestra el diagrama de cuerpo libre, siendo R_{AY} , la reacci3n vertical en el punto A y M_A , el momento flector en el punto A.

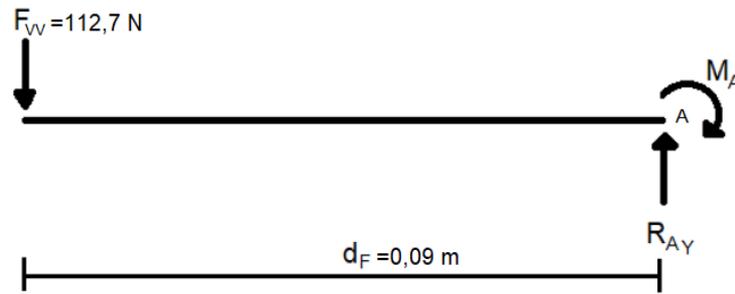


Figura 15. Diagrama de cuerpo libre de la zona crítica eje Z

Se utiliza (8) para determinar la reacción R_{AY} , y con (9) se puede establecer el momento flector de la misma.

$$\sum F_Y = R_{AY} - 112,7 = 0 \quad (8)$$

Donde:

$\sum F_Y$: Sumatoria de fuerzas en Y, igual a 0

R_{AY} : Reacción vertical en el punto A, en N;

$$R_{AY} = 112,7 \text{ N}$$

La reacción para la viga en voladizo es de 112,7 N,

$$\sum M_A = F_{VV} * d_F = 0 \quad (9)$$

Donde:

$\sum M_A$: Sumatoria de momentos de la viga en el punto A, igual a 0;

F_{VV} : Fuerza aplicada a la viga en voladizo, en N;

d_F : Distancia desde el apoyo a la fuerza aplicada, en m.

$$M_A = 112,7 * 0,09$$

$$M_A = 10,143 \text{ Nm}$$

El momento flector en el punto A es de 10,143 Nm.

Utilizando el software libre Skyciv [28], se generan el diagrama de cuerpo libre de la viga en voladizo, el diagrama de cortes y el diagrama de momentos para la zona crítica. Ver Figura 16, Figura 17, y Figura 18.



Figura 16. Diagrama de cuerpo libre para la viga en voladizo

Fuente: Software libre Skyciv [28]



Figura 17. Diagrama de cortantes de la viga en voladizo

Fuente: Software libre Skyciv [28]

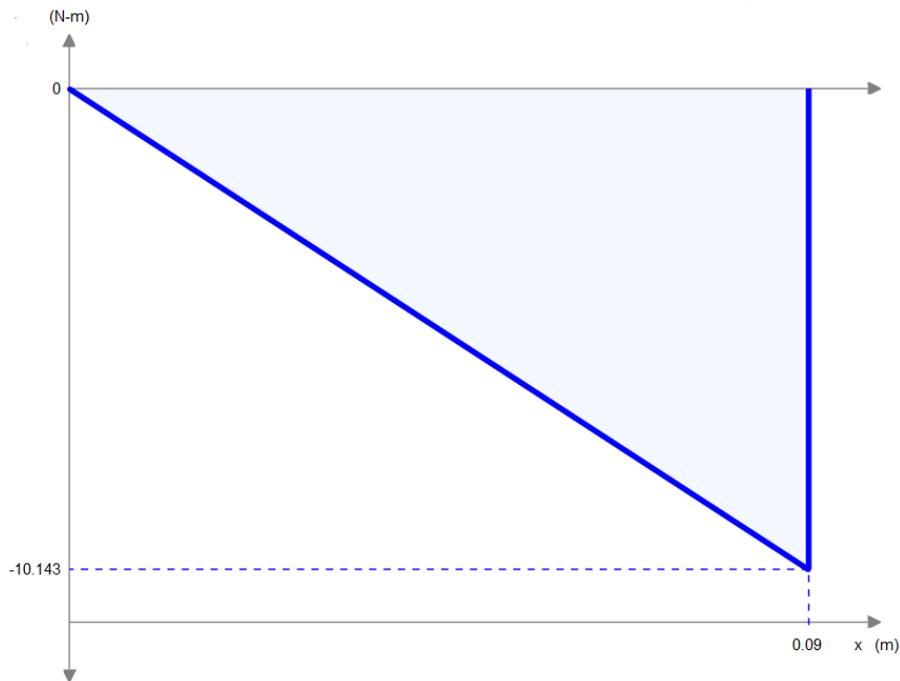


Figura 18. Diagrama de momentos de la viga en voladizo

Fuente: Software libre Skyciv [28]

Para calcular la inercia de la platina en la zona crítica, inicialmente se selecciona la platina de ancho $2 \frac{1}{2}$ pulgadas (0,0635 m) debido a que las dimensiones del motor NEMA 23 seleccionado son 0,0572 x 0,0572 mm.

La Figura 19 muestra las variables para obtener la inercia de una sección transversal rectangular, siendo G el centroide, h el espesor, y b el ancho.

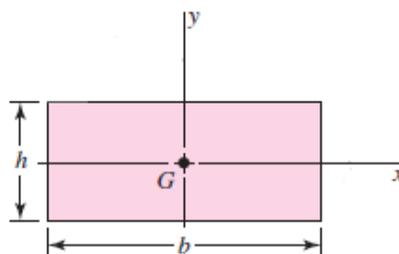


Figura 19. Esquema de inercia de una sección transversal rectangular.

Fuente: Diseño mecánico de Shigley [27]

Se usa (10) para calcular la inercia.

$$I_x = \frac{bh^3}{12} \quad (10)$$

Donde:

I_x : Inercia en x del rectángulo, en m^4 ;

b : Base del rectángulo, en m;

h : Altura del rectángulo, en m.

En la Tabla 10 se indican las inercias (10) y deflexiones máximas para una viga en voladizo (7), iterando h con los espesores normalizados mostrados en el anexo A.4.

Tabla 10. Deflexión de la viga en voladizo según espesores normalizados.

Platina IPAC (Anexo A.4)	Base del rectángulo (b) [m]	Altura del rectángulo (h) [m]	I_x (m^4)	Deflexión (m)	Deflexión (mm)
2 ½ x 1/4	0,0635	0,006	1,143E-09	0,000012	0,012
2 ½ x 3/8	0,0635	0,0095	4,5369E-09	0,000003	0,003

En ambos casos se obtiene una deflexión dentro del rango de 0,009 mm a 0,045 mm. Se selecciona la platina 2 ½ x 1/4 dado que cumple con la deflexión admisible y su costo es menor a la platina 2 ½ x 3/8.

Se realiza una simulación del análisis de elementos finitos en el software CAD SolidWorks Student Edition para la validación de datos de deformación. La Figura 20 muestra un análisis estático de deflexión para la zona crítica del carro deslizante Z.

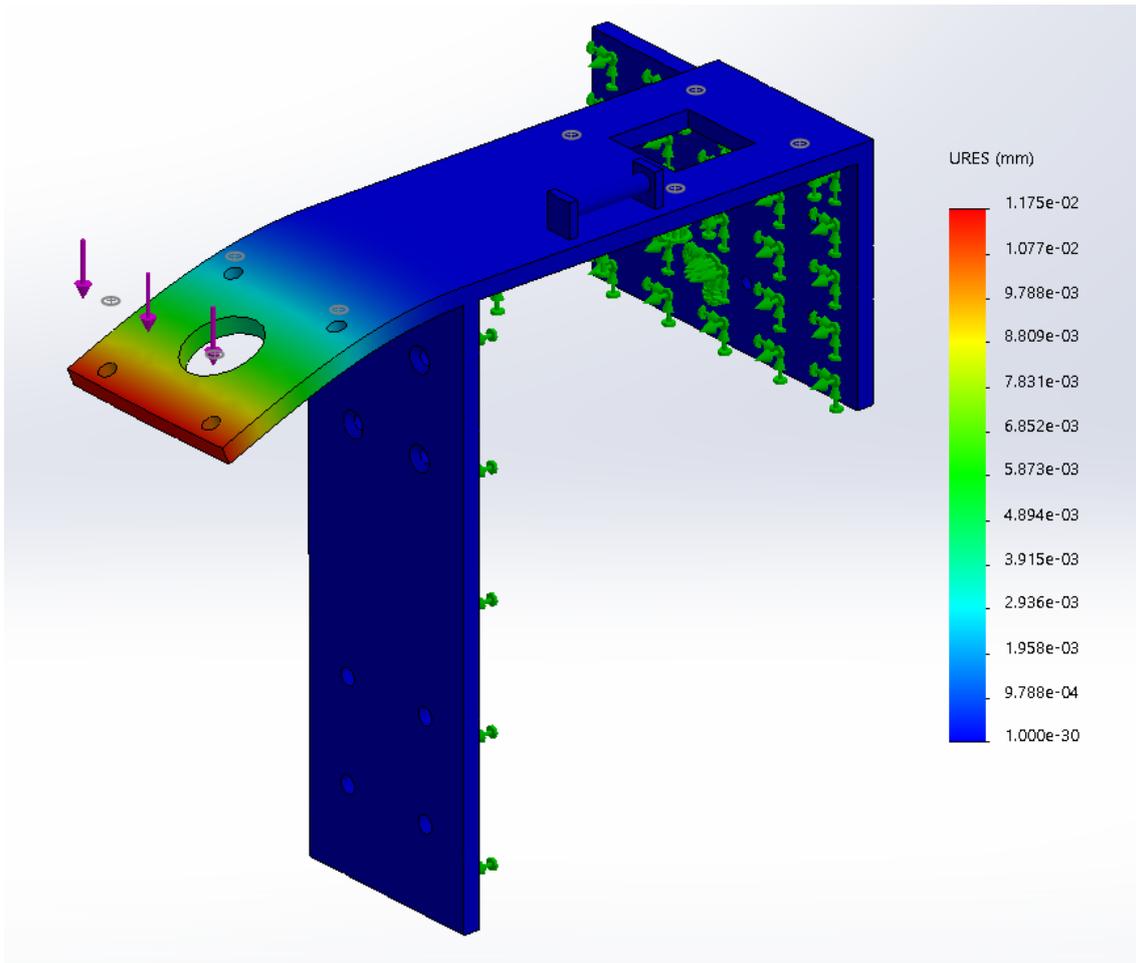


Figura 20. Análisis de deflexión en zona crítica del carro deslizando Z

La simulación muestra una deflexión máxima de 0,011 mm en la zona crítica. Se utiliza (11) para calcular el error porcentual.

$$e = \frac{Vt - Vex}{Vt} * 100 \quad (11)$$

Donde:

e : Error porcentual de valor teórico y experimental, en %;

Vt : Valor teórico de la deflexión máxima de la platina, en mm;

Vex : Valor experimental de la deflexión máxima de la platina, en mm.

$$e = \frac{0,0120 - 0,0117}{0,0120} * 100$$

$$e = 2,5\%$$

Al obtenerse un error porcentual menor al 5%, se determina que el software cuenta con las características de simulación calibradas para el diseño de elementos.

6.2.1.4. Resumen dimensionamiento del eje Z

Los resultados de los elementos dimensionados y seleccionados para el eje Z junto a sus especificaciones técnicas se los presenta en la Tabla 11.

Tabla 11. Recopilación de resultados del eje Z

Elemento	Especificaciones
Tornillo de potencia	"SR1605" - Paso:5 mm - Diámetro: 16 mm - Entradas: 4
Motor eje Z	"Nema 23 STP-MTR-23055" - Torque: 1,29 Nm
Platina Base	"Platina 2 1/2x1/4" Base:63 mm - Espesor:6 mm - Longitud: 245 mm

6.2.2. EJE X

Los elementos del carro deslizante XY se presentan en la Figura 21. Se denomina carro deslizante XY dado que los componentes deslizantes del eje X y del eje Y se encuentran en la misma estructura.

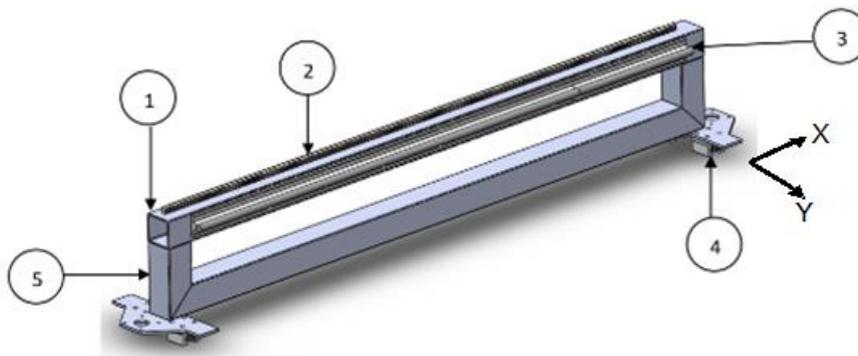


Figura 21. Modelo 3D del carro deslizante XY

1. Travesaño
2. Cremallera para eje X
3. Guía lineal para eje X
4. Cojinete lineal para eje Y
5. Base del travesaño

El travesaño será dimensionado para garantizar la rigidez del carro deslizante XY, se seleccionarán guías lineales para el desplazamiento del carro deslizante

Z, para la transmisión de potencia se seleccionará un mecanismo piñón – cremallera, y también el motor que dará el movimiento al eje X.

6.2.2.1. Travesaño

El elemento crítico de la estructura del carro deslizante XY es el travesaño porque en caso de deformación se pierde la precisión del corte. En la viga del travesaño se montan las guías lineales donde se moverá el carro deslizante Z con sus componentes y la cremallera para el deslizamiento en el eje X, cuyo movimiento se da por un piñón impulsado por un motor paso a paso. Se considera a la viga del travesaño como una viga doblemente empotrada debido a que sus extremos son fijados a las bases verticales.

La viga crítica tiene una longitud (L_X) de 1300 mm de largo con un rango de deflexión admisible entre 0,013 mm a 0,65 mm según (6). Para el dimensionamiento de la viga, se inicia determinando la masa total aproximada del eje X (m_X) que soportará el elemento, con una masa extra de 20 kg considerando que una persona se apoye en el carro deslizante XY. Ver Tabla 12.

Tabla 12. Masas consideradas para la obtención de fuerza máxima en el travesaño

Elementos Eje X	Masa aproximada [kg]
Carro deslizante Z	15
2 guías lineales	4
Cremallera	1
Masa extra	20
Masa total (m_X)	40

Se obtiene un valor de 40 kg para m_X y se calcula con (1) la fuerza máxima aplicada a la viga crítica del eje X (F_X), igual a 392 N. La viga a utilizar es un tubo estructural cuadrado para facilitar el posterior montaje de las guías lineales. Los tubos estructurales del catálogo IPAC cumplen la normativa de calidad ASTM A500, la cual indica una resistencia máxima a la fluencia (σ) igual a 320 MPa (46 ksi) [29] y un módulo de elasticidad (E) igual a 200 GPa [30].

Para calcular la deflexión máxima de la viga doblemente empotrada se usa la ecuación (12) e inicialmente se selecciona el tubo estructural cuadrado de 20 x 1,4 mm con una inercia de 0,56 cm⁴. Ver anexo A.5.

$$Y_{m\acute{a}x_{D.E}} = -\frac{F * L^3}{192 * E * I_{ST}} \quad (12)$$

Donde:

$Y_{m\acute{a}x_{D.E}}$ Deflexión máxima para una viga doblemente empotrada, en N;

F : Fuerza máxima aplicada a la viga, en N;

L : Longitud de la viga, en m;

E : Módulo de elasticidad del tubo estructural cuadrado, en Pa;

I_{ST} : Inercia de la sección transversal del tubo, en m⁴.

$$Y_{m\acute{a}x_{D.E-X}} = -\frac{F_X * L_X^3}{192 * E * I_{ST}}$$

$$Y_{m\acute{a}x_{D.E-X}} = -\frac{392 \text{ N} * (1,3\text{m})^3}{192 * 200 \times 10^9 \text{ Pa} * 5,6 \times 10^{-9} \text{ m}^4}$$

$$Y_{m\acute{a}x_{D.E-X}} = 0,0040 \text{ m} = 4 \text{ mm}$$

El valor obtenido de deformación máxima para el tubo estructural cuadrado de 20 x 1,4 mm es de 4 mm y se encuentra fuera del rango esperado (1,3 mm a 0,13 mm), por lo que se realiza ocho iteraciones con diferentes tamaños de tubo estructural cuadrado para calcular las deflexiones máximas de la viga (13) como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Deflexión del tubo estructural cuadrado para el eje X, según tamaños estándar

Dimensiones (mm)	Inercia(cm ⁴)	Deflexión(m)	Deflexión(mm)
20x1,4	0,56	0,00400	4,005
20x2	0,7	0,00320	3,204
25x2	1,49	0,00151	1,505
30x2	2,73	0,00082	0,822
40x3	9,36	0,00024	0,240
50x3	19,5	0,00012	0,115
60x3	35,17	0,00006	0,064
70x3	57,56	0,00004	0,039

El tubo estructural cuadrado de 50 x 3 mm con una deformación máxima de 0,115 mm se acerca al rango admisible esperado de deformación; sin embargo, por disponibilidad en el mercado, se selecciona el tubo estructural cuadrado de medidas 60 x 3 mm con una deformación máxima de 0,064 mm. Los datos técnicos se muestran en el anexo A.5.

Se simula en un software CAD el escenario donde la fuerza máxima del eje X se ubica en la mitad de la viga mostrando un valor de deflexión de 0,065 mm, mostrado en la Figura 22.

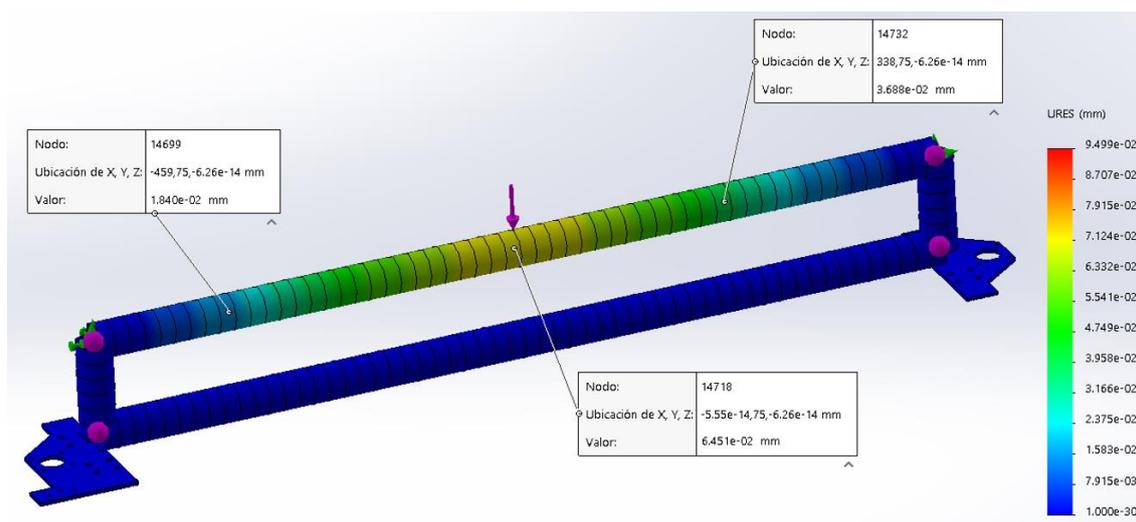


Figura 22. Análisis de deformación del travesaño del eje X.

Se calcula el error porcentual según (11) obteniendo un error del 1,5%; al ser menor al 5%, se acepta el valor de la deflexión máxima.

Para calcular el factor de seguridad de la viga dimensionada, se calculará el momento flector del eje X en un apoyo empotrado y el esfuerzo máximo. El momento flector del eje X calculado matemáticamente y validado en el software libre AmesWeb, mostrado en el anexo A.6, es igual a 63,703 Nm. Para calcular el esfuerzo máximo que tendrá la viga se usa la ecuación (13). El módulo de resistencia del tubo seleccionado según el anexo A.5 es igual a 11,72 cm³.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_A}{W_{T.C.}} \quad (13)$$

Donde:

$\sigma_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo máximo que soporta la viga del eje X, en Pa;

M_A : Momento flector del eje X en un apoyo empotrado, en Nm;

$W_{T.C.}$: Módulo de resistencia del tubo cuadrado en m^3 .

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{63,703}{11,72E^{-6}} = 5,43 \text{ MPa}$$

Con el valor de esfuerzo máximo obtenido se establece un factor de seguridad calculado con (14).

$$n = \frac{S_{fy}}{\sigma_{m\acute{a}x}} \quad (14)$$

Donde:

n : Factor de seguridad, adimensional;

S_{fy} : Resistencia a la fluencia del material, en Pa;

$\sigma_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo máximo en Pa

$$n = \frac{320 \times 10^6 \text{ Pa}}{5,43 \times 10^6 \text{ Pa}} = 58,93$$

Se obtiene un factor de seguridad de 58,93 que indica que el tubo estructural cuadrado está sobredimensionado, asegurando que el elemento mantendrá su rigidez ante cualquier perturbación.

6.2.2.2. Guía Lineal eje X

Una vez determinado el tubo estructural cuadrado (lado = 60 mm), se procede a seleccionar dos guías lineales cilíndricas SBR20S de 45 mm de ancho y 1300 mm de longitud con un diámetro de guía de 20 mm [31]. Los cojinetes lineales adecuados para estas guías son los SBR20Luu, cuya dimensión de ancho es de 48 mm como se muestra en la Figura 23. Las especificaciones técnicas se muestran en el anexo A.7.

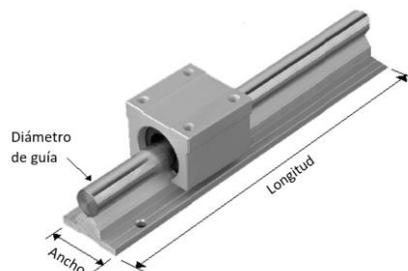


Figura 23. Guía lineal SBR20S con cojinetes lineales SBR20Luu

Fuente: Catálogo guías lineales [31].

6.2.2.3. Mecanismo Piñón – Cremallera del eje X

El mecanismo piñón cremallera es muy utilizado cuando se necesitan movimientos de alta precisión, debido a que convierte el movimiento rotacional de un motor en un desplazamiento longitudinal. En la Figura 24 se indican los componentes y movimientos del mecanismo piñón – cremallera.

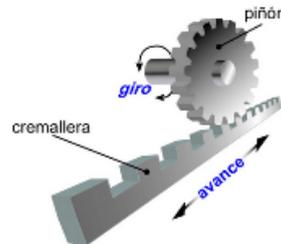


Figura 24. Movimientos de un mecanismo piñón - cremallera.

Fuente: Mecanismos [32].

La selección de la cremallera inicia determinando un factor de carga de 2,5 debido que la máquina podrá trabajar durante las 24 horas con una carga moderada. Se obtiene la fuerza tangencial real horizontal con un valor igual a 73,575 N considerando una velocidad lineal de diseño de 0,4 m/s. Con el valor de la fuerza tangencial real se selecciona un módulo M2 para una cremallera de diente recto de material F114 (AISI 1045) con los dientes templados por inducción, este material logra notables prestaciones de traslación y errores de paso individual de 0,003 mm [33]. Posteriormente se selecciona la cremallera de longitud 1.500 mm con paso de diente de 6,28 mm y 240 dientes. Con el valor de modulo M2 se selecciona un piñón de 24 dientes y diámetro primitivo 48 mm. El procedimiento de selección y cálculos se muestran en el anexo A.8, determinando finalmente una cremallera KOOM CKR-CT 200/1500 de diente recto, módulo 2 y 240 dientes, y un piñón de diente recto PKR-200 con 24 dientes como se muestra en la Figura 25.



Figura 25. Cremallera y piñón de diente recto KOOM

Fuente: Catálogo Koom [33]

6.2.2.4. Motor paso a paso del eje X

Para seleccionar el motor que moverá el piñón se debe calcular el torque necesario mediante (15).

$$T_p = F_{TH} * \left(\frac{D_p}{2}\right) \quad (15)$$

Donde:

T_p : Torque requerido para mover el piñón, en Nm;

F_{TH} : Fuerza tangencial real horizontal, en N;

D_p : Diámetro primitivo, en m.

$$T_p = 73,575 \text{ N} * \left(\frac{0,048 \text{ m}}{2}\right) = 1,76 \text{ Nm}$$

El torque requerido para mover el piñón es de 1,76 Nm. Se selecciona de la Tabla 8 el motor NEMA 23 de alto torque (STP-MTR-23079) cuyo torque máximo con el eje detenido es de 2,08 Nm; el motor trabajará al 84% de su capacidad al mover el piñón desde el reposo. La validación del motor seleccionado se realiza de igual manera que en la sección 6.2.1.2, comparando el torque requerido para mover el piñón obtenido con (16) igual a 1,76 Nm y la velocidad angular de valor 160 rpm debido al radio del piñón. El área de trabajo y la curva característica del motor se muestran en la Figura 26, se concluye que el motor seleccionado cumple los requerimientos para el movimiento del eje X. Los cálculos y la hoja de datos del motor mencionado se presentan en el anexo A.9.

STP-MTR-23079

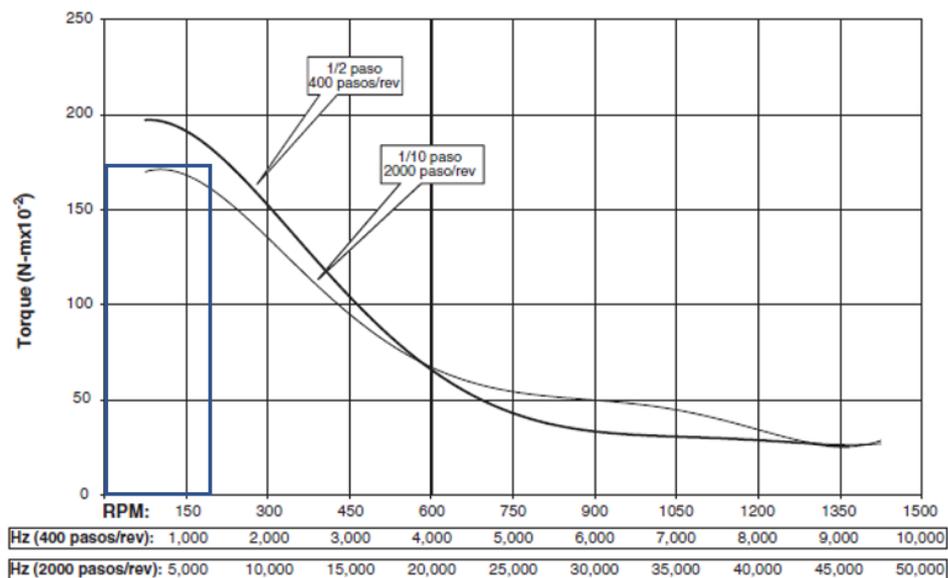


Figura 26. Curva característica del motor a pasos STP-MTR-23079.

Fuente: Manual SureStep [26].

6.2.2.5. Resumen del dimensionamiento del eje X

Una vez seleccionado los componentes del eje X se procede a verificar si las masas consideradas para los cálculos tienen similitud con las masas reales de los componentes seleccionados; la masa total de 38 kg mostrada en la Tabla 14 tiene una variación menor al 20% con la masa total aproximada de 40 kg; por lo tanto, se aceptan los cálculos realizados.

Tabla 14. Masa total real de los elementos del eje X.

Elementos Eje X	Masa real [kg]
Carro deslizante Z [34]	10
Dos guías lineales [31]	6
Cremallera [33]	2
Masa extra	20
Masa total	38

Las especificaciones de cada uno de los componentes dimensionados y seleccionados para el eje X se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Resumen del dimensionamiento del eje X

Elemento	Especificaciones
Travesaño	"Tubo estructural A36 cuadrado 60x3 mm"
Guía lineal	"SBR20S" – Longitud: 1300 mm (2 unidades)
Cojinete lineal	"SBR20Luu" (3 unidades)
Cremallera	"CKR-CT-200/1500" – Longitud total: 1500 mm
Piñón	"PKR-200-24/PH3" - Diámetro primitivo: 48 mm
Motor eje X	"Nema 23 STP-MTR-23079" - Torque: 2,08 Nm

6.2.3. EJE Y

De igual forma que el eje X, el eje Y debe tener un movimiento preciso debido a que por este eje se desplazará el carro deslizante XY. La estructura del eje Y se presenta en la Figura 27.

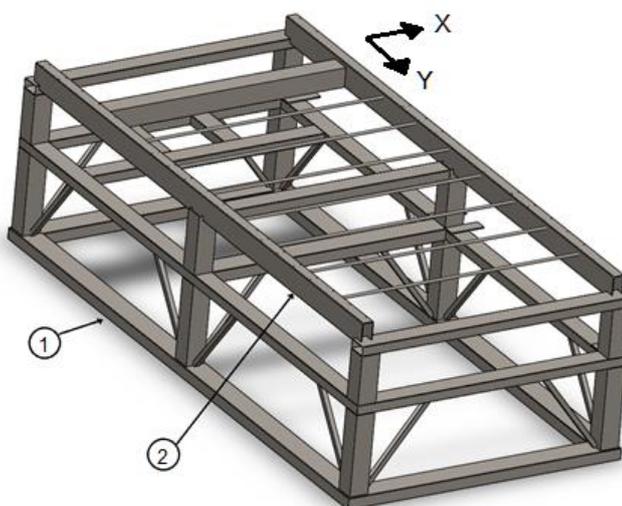


Figura 27. Modelo 3D de la mesa de trabajo.

Los componentes de la mesa de trabajo son:

1. Estructura de la mesa de trabajo.
2. Base de deslizamiento, eje Y.

La base de deslizamiento del eje será dimensionada para garantizar que la estructura no se deforme durante el proceso de corte. Se seleccionará las guías lineales junto a sus cojinetes para el deslizamiento sobre el eje Y. Para la transmisión de potencia se seleccionará un mecanismo piñón – cremallera, y también el motor que dará el movimiento por el eje Y al carro deslizante XY.

6.2.3.1. Base de deslizamiento del eje Y

La zona crítica en el eje Y, es la viga base de deslizamiento donde se montarán las guías lineales. Esta viga va a soportar en el peor de los casos que toda la masa del carro deslizante XY y del carro deslizante Z se encuentre apoyada sobre la mitad de la viga sin apoyos. De igual forma que en el dimensionamiento del travesaño del eje X, se considera como masa extra a una persona adulta de 82 kg de pie sobre la viga, con el fin de garantizar la rigidez de la estructura. Las masas aproximadas se encuentran señaladas en la Tabla 16.

Tabla 16. Masas aproximadas para obtener la fuerza total aplicada en el eje Y.

Elementos zona crítica del eje Y	Masa Aproximada [kg]
Carro deslizante Z	10
Carro deslizante XY	28
Extras	82
Masa total (m_Y)	120

La masa total aproximada del eje Y (m_Y) es de 120 kg, con (1) se calcula la fuerza máxima aplicada sobre la viga crítica del eje Y (F_Y) obteniéndose un total de 1.176 N. La viga es considerada como doblemente empotrada debido a que cuenta con dos apoyos fijos entre el extremo y la mitad de la estructura de la mesa de trabajo. La longitud sin apoyos es de 1400 mm como se muestra en la Figura 28. El rango de deflexión admisible obtenido mediante (6) se encuentra entre 0,7 mm y 0,014 mm.

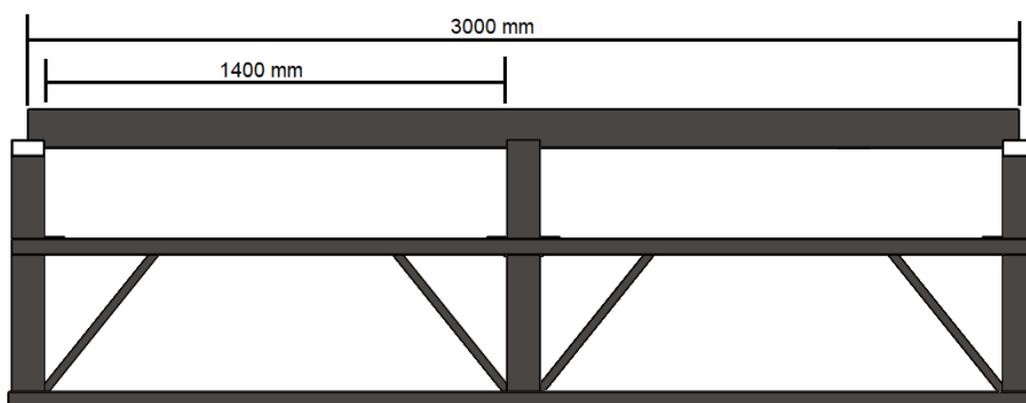


Figura 28. Longitud viga base de deslizamiento

La viga a utilizar es un tubo estructural rectangular del catálogo IPAC mostrado en el anexo A.10 elaborado bajo la normativa ASTM A500, estandarizado con el tubo estructural cuadrado utilizado en el eje X en la sección 6.2.2.1.

Inicialmente selecciona el tubo de 25 x 50 x 1,4 mm con una inercia de $6,28 \text{ cm}^4$ y se obtiene mediante (12) una deflexión máxima de 13,38 mm. La deformación máxima para la viga con las dimensiones seleccionadas se encuentra fuera del rango de deflexión admisible esperado (1,4 mm a 0,14 mm), por lo que se realizan iteraciones con diferentes dimensiones de tubo estructural rectangular como se indica en la Tabla 17, para calcular las deflexiones máximas de la viga (12).

Tabla 17. Deflexión para la zona crítica del eje Y con tamaños de tubo estándar.

Dimensiones	Inercia(cm ⁴)	Deflexión(m)	Deflexión(mm)
25x50x1,4	6,28	0,01273	12,728
25x50x3	11,2	0,00714	7,137
30x50x3	12,86	0,00622	6,215
40x60x3	25,41	0,00315	3,146
30x70x3	30,61	0,00261	2,611
40x80x3	52,28	0,00153	1,529
50x100x3	106,49	0,00075	0,751
50x150x3	298,58	0,00027	0,268
60x120x3	189,15	0,00042	0,423
70x200x3	749,71	0,00011	0,107

Las dimensiones del tubo rectangular que se acercan más al límite inferior del rango (0,14 mm) son 50 x 150 x 3 milímetros. Pero debido al costo y accesibilidad en el mercado local, se selecciona el tubo rectangular de 60 x 120 x 3 milímetros, cuya deflexión máxima está dentro del rango de precisión moderada y garantiza rigidez en la estructura de la máquina. Los datos técnicos se muestran en el anexo A.10.

Para calcular el factor de seguridad se sigue el mismo procedimiento que en el eje X. En primer lugar, se determina el momento flector de la viga del eje Y cuyos cálculos y validación mediante el software libre AmesWeb se muestran en el anexo A.11, obteniendo un momento flector máximo de 205,8 Nm. El módulo de resistencia del tubo estructural rectangular seleccionado es de $31,53 \text{ cm}^3$. Dando como resultado un esfuerzo máximo calculado con (13) igual a 6,52 MPa.

El factor de seguridad obtenido mediante (14) es de 49,07 que indica sobredimensionamiento, asegurando rigidez en la estructura del eje Y.

6.2.3.2. Guía lineal del eje Y

Dado que el tubo estructural rectangular seleccionado es de 60 x 120 x 3 mm y las guías lineales se ubicarán en la cara de 60 mm, se selecciona la guía lineal SBR20S con cojinetes lineales SBR20Luu mostrados en el anexo A.7, siendo las mismas guías lineales y los mismos cojinetes lineales utilizados en el eje X estandarizando el diseño.

Para este eje se necesitan 2 guías lineales de 2.700 mm de longitud y 4 cojinetes lineales SBR20Luu para dar estabilidad al carro deslizante XY durante el movimiento.

6.2.3.3. Mecanismo piñón – cremallera del eje Y.

Con el mismo procedimiento de dimensionamiento utilizado en la sección 6.2.2.3 se realizan los cálculos y selección de la cremallera y del piñón para el eje Y mostrados en el anexo A.12. Se calcula una fuerza tangencial real horizontal igual a 186,39 N para posteriormente seleccionar un módulo M2 de diente recto en material F114 con dientes templados por inducción. La longitud de la viga base de deslizamiento del eje Y es de 3.000 mm, por lo que se seleccionan cuatro cremalleras de longitud 1.500 mm con paso de diente de 6,28 mm y 240 dientes, dos para cada base de deslizamiento. Con el valor de modulo M2 se selecciona dos piñones de 26 dientes y diámetro primitivo 52 mm, uno para cada base de deslizamiento.

6.2.3.4. Motor paso a paso del eje Y

Con el mismo procedimiento que la sección 6.2.2.4 reemplazando los valores del mecanismo piñón cremallera del eje Y en (15) para obtener el torque requerido en el movimiento del piñón a lo largo del eje; sin embargo, para este caso se divide el torque requerido en dos ya que se usarán 2 motores para el movimiento de este eje, uno en cada costado; de esta forma, se evitan perturbaciones en el movimiento lineal del carro deslizante Y.

$$T_p = 186,39 \text{ N} * \left(\frac{0,052 \text{ m}}{2} \right) = 4,84 \text{ Nm}$$

$$T_p = \frac{4,84}{2} = 2,42 \text{ N m}$$

Cada motor debe vencer un torque de 2,42 Nm para mover el carro deslizante Y. Se selecciona de la Tabla 8, el motor NEMA 34 (STP-MTR-34066) mostrado en la Figura 29 que tiene un torque máximo de 3,06 Nm con el eje detenido que es suficiente para vencer el torque calculado. El valor de 2,42 Nm indica que el motor NEMA 34 trabajará al 79% de su capacidad. Su hoja de datos se presenta en el anexo A.13



Figura 29. Motor NEMA 34 STP-MTR-34066

Fuente: Manual SureStep [26]

La validación del motor seleccionado se realiza de igual forma que en la sección 6.2.1.2, se compara la velocidad angular máxima de valor igual a 147 rpm con el torque requerido para mover el piñón igual a 2,42 Nm. El área de trabajo y la curva característica del motor se muestran en la Figura 30, se concluye que el motor seleccionado cumple los requerimientos de movimiento del eje Y. Los cálculos y la hoja de datos del motor seleccionado se presentan en el anexo A.13

STP-MTR-34066

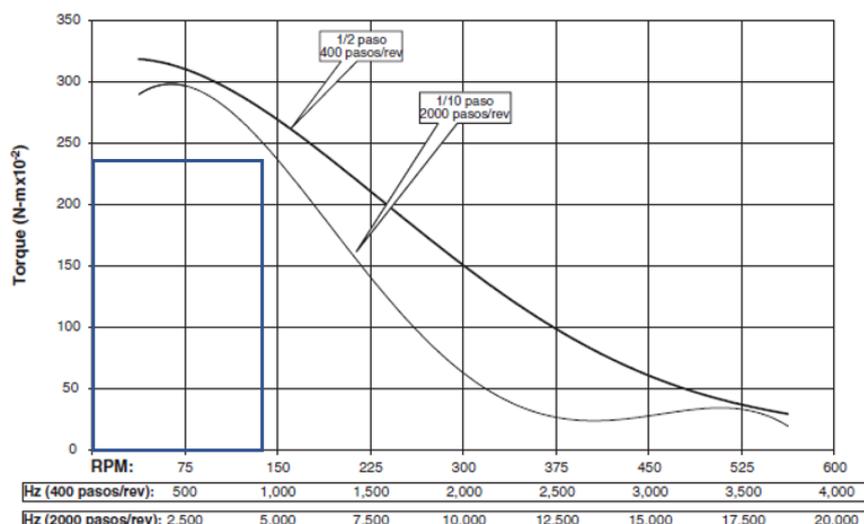


Figura 30. Curva característica del motor a pasos STP-MTR-34066

Fuente: Manual SureStep [26].

6.2.3.5. Resumen del dimensionamiento del eje Y

En la Tabla 18 se indican los elementos dimensionados y seleccionados para el eje Y, junto con sus especificaciones técnicas comerciales.

Tabla 18. Resumen del dimensionamiento del eje Y.

Elemento	Especificaciones
Base de deslizamiento	"Tubo estructural A36 rectangular 60x120x3 mm" – Longitud: 3 m
Guía lineal	"SBR20S" – Longitud: 2700 mm (2 unidades)
Cojinete lineal	"SBR20Luu" (4 unidades)
Cremallera	"CKR-CT-200/1500" - Longitud total: 6000 mm (4 unidades)
Piñón	"PKR-200-26/PH3" - Diámetro primitivo: 52 mm (2 unidades)
Motor eje Y	"Nema 34 STP-MTR-34066" - Torque: 3,06 Nm (2 unidades)

6.2.4. MESA DE TRABAJO

Las partes de la mesa de trabajo que deben ser seleccionadas son los soporte para la pieza de trabajo y la bandeja de agua encargada de apaciguar humos contaminantes.

6.2.4.1. Soporte para pieza de trabajo

El soporte para la pieza de trabajo será dimensionado para soportar planchas de acero laminado en caliente de hasta 10 mm de espesor por requerimiento del

taller, siendo el peso de estas planchas igual a 233,68 kg [34] como se indica en el anexo A.14.

Los soportes considerados son planchas de rejillas dentadas Grating tipo "S" mostrados en la Figura 31.

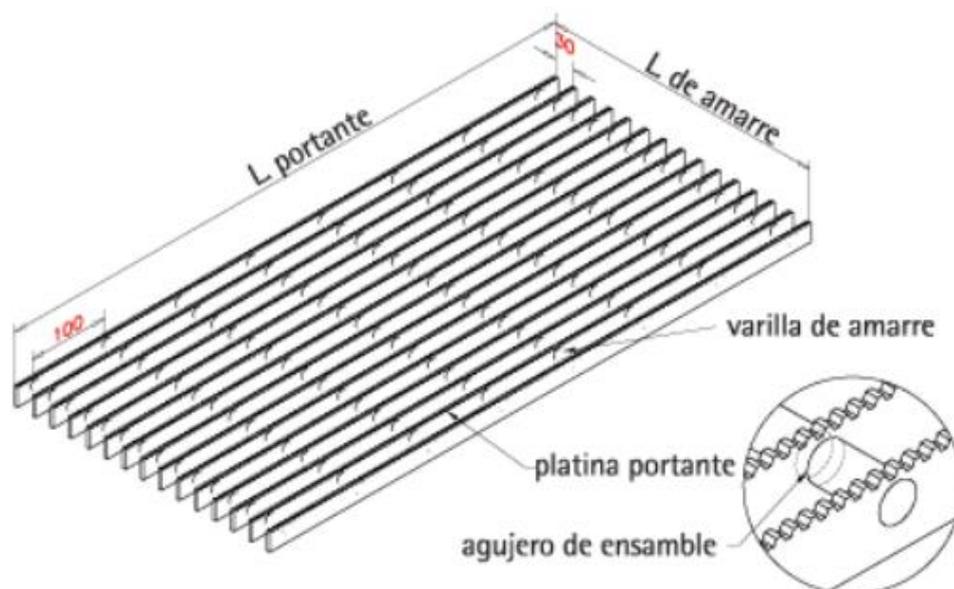


Figura 31. Rejilla Grating tipo "S"

Fuente: Catálogo SEDEMI [35]

Para la selección de las planchas portantes, se inicia determinando una plancha portante de 40 x 3 mm, donde para una longitud de 2.400 mm la carga admitida (Q) es de 352 kg/m². Ver Tabla 19.

Tabla 19. Especificaciones de carga y deflexión de rejilla dentada tipo "S"

Platinas Portantes		600	750	900	1050	1200	1350	1500	1650	1800	1950	2100	2400
25 X 3	D	2,40	3,81	5,48	7,46	9,70	12,31	-	-	-	-	-	-
	Q	2515	1610	1118	821	630	498	403	333	278	-	-	-
25 X 4	D	1,82	2,84	4,11	5,58	7,34	9,27	11,45	13,84	16,40	-	-	-
	Q	3777	2416	1679	1232	942	744	605	498	418	-	-	-
30 X 3	D	1,82	2,84	4,11	5,58	7,34	9,27	11,45	13,84	16,40	-	-	-
	Q	3931	2515	1749	1283	982	777	630	520	436	374	322	-
30 X 4	D	1,47	2,28	3,30	4,47	5,84	7,41	9,14	11,04	13,10	15,41	17,88	-
	Q	5904	3781	2625	1929	1478	1166	946	781	656	557	480	-
40 X 3	D	1,21	1,90	2,74	3,73	4,87	6,17	7,62	9,22	10,97	12,85	14,90	19,43
	Q	5662	3623	2515	1848	1415	1118	905	748	630	535	462	352
40 X 4	D	1,21	1,90	2,74	3,73	4,87	6,17	7,62	9,22	10,97	12,85	14,90	19,43
	Q	8508	5446	3781	2779	2127	1679	1360	1125	946	806	693	531
50 X 4	D	0,91	1,42	2,05	2,79	3,65	4,62	5,71	6,90	8,22	9,65	11,20	14,63
	Q	15128	9682	6722	4940	3781	2989	2420	1998	1679	1430	1235	946

Fuente: Catálogo SEDEMI [35]

El área total de trabajo se calcula con (16) tomando en cuenta el tamaño comercial de las planchas de acero de 1.220 x 2.440 mm.

$$A_T = b_R * h_R \quad (16)$$

Donde:

A_T : Área total de trabajo, m²;

b_R : Base del área de trabajo, en m;

h_R : Altura del área de trabajo, en m.

$$A_T = 1,220 * 2,440$$

$$A_T = 2,97 \text{ m}^2$$

Al multiplicar la carga admitida de 352 kg/m² y un área total de 2,97 m², se obtiene una carga admitida total de 1047,83 kg, logrando soportar hasta 4,48 planchas de 10 mm de espesor; esto quiere decir que, con las platinas seleccionadas de 40 x 3 mm, es posible apoyar hasta 4 planchas de acero de 10 mm al mismo tiempo sobre los soportes cuando la máquina CNC no se encuentre en operación. Durante el proceso de corte, el número de planchas que pueden apoyarse se limita a la profundidad permitida por la cortadora de plasma.

6.2.4.2. Bandeja de agua

Las cortadoras de plasma generan vapor y humo al momento de cortar la pieza, por esta razón, si no se cuenta con la ventilación o contención adecuada se genera contaminación del entorno de trabajo, además afecta directamente a la calidad del acabado final de la pieza. Según la norma ISO 12100:2012 de seguridad en maquinaria, se debe tener en cuenta los riesgos que pueden causar los gases expulsados de una máquina hacia un operador.

Se diseña una bandeja de agua ubicada debajo del soporte para la pieza de trabajo, con el fin de que el polvo y las chispas generadas por el arco plasma sean atrapadas en el agua, y de esta manera disminuir los humos y vapores generados en el proceso de corte. La Figura 32 muestra un esquema de la bandeja de agua.

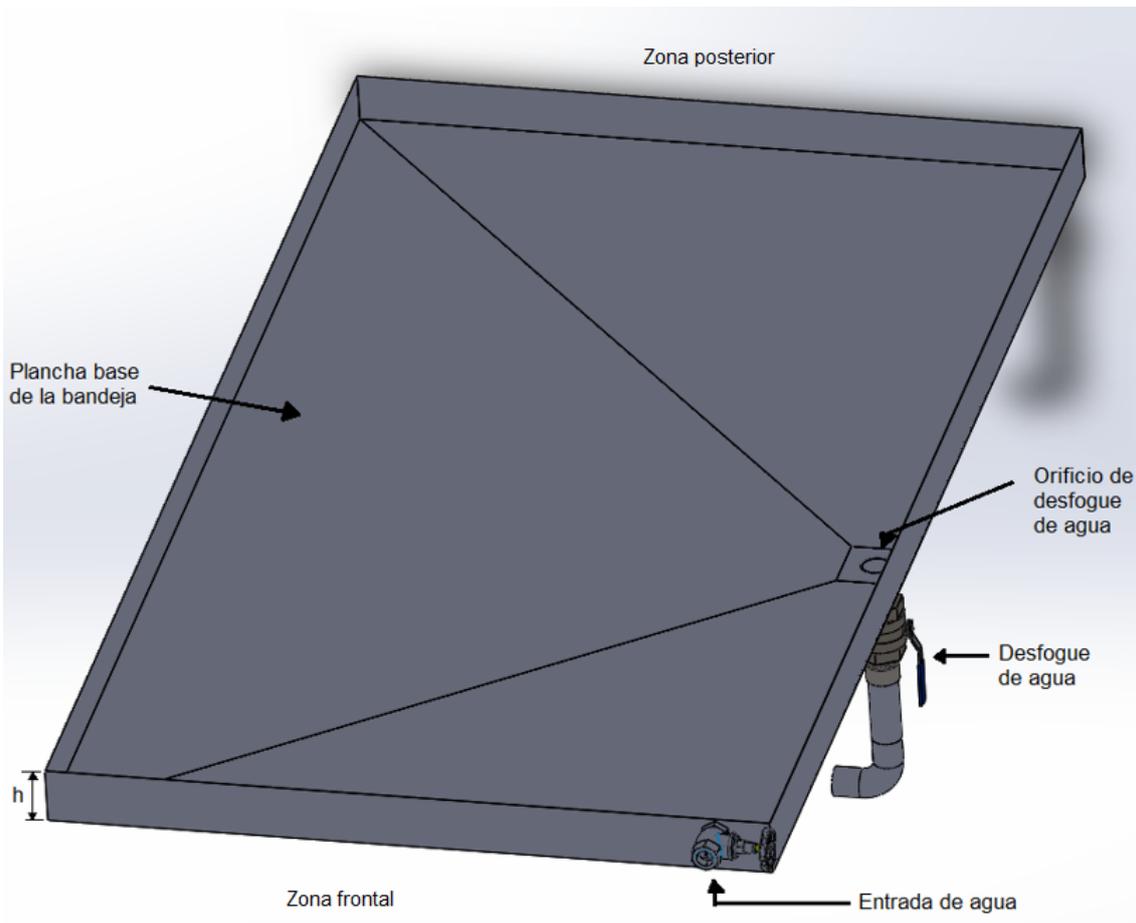


Figura 32. Esquema 3D de la bandeja de agua.

Las dimensiones aproximadas de la bandeja de agua serán de 1220 x 2440 mm cubriendo toda el área de trabajo y por diseño se considera una altura (h) de 100 mm. Para evitar el estancamiento del agua se considera una pendiente del 1% ($0,57^\circ$) hacia el orificio de desfogue, en la plancha base de la bandeja. Se seleccionará una válvula check para la entrada de agua y una válvula de bola para el desfogue de agua.

La ubicación del orificio de desfogue se muestra en la Figura 33 y tiene un diámetro de 50,8 mm (2 pulgadas) por diseño.

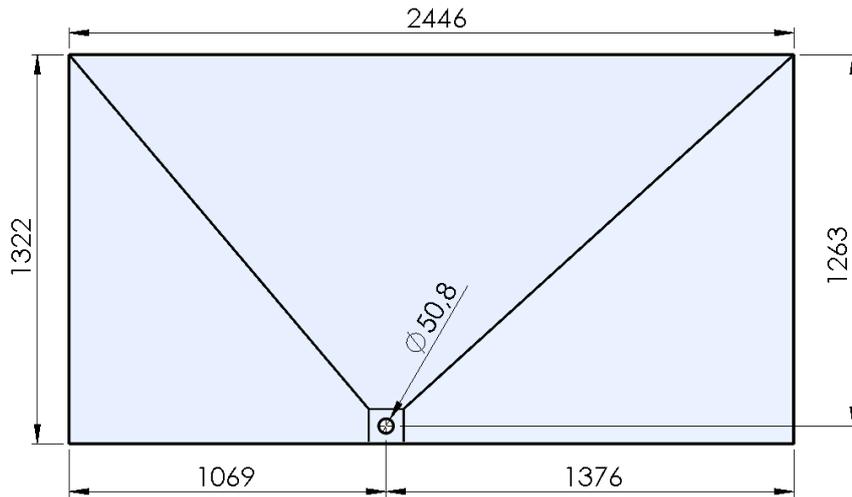


Figura 33. Dimensiones de la bandeja de agua

Para conocer la altura que debe tener la plancha en las paredes alejadas del orificio de desfogado con la pendiente de $0,57^\circ$, se utiliza (17) considerando la distancia de 1376 mm como la condición más desfavorable.

$$m_{desfogue} = \frac{h_d}{d_H} * 100 \quad (17)$$

Donde:

$m_{desfogue}$: Pendiente de la plancha, en porcentaje;

h_d : Altura de pendiente, en mm;

d_H : Distancia horizontal hacia el orificio, en mm.

$$1 = \frac{h_d}{1376} * 100$$

Despejando h_d :

$$\frac{1376}{100} = h_d = \mathbf{13,76 \text{ mm}}$$

La diferencia de alturas con la pared más distante es de 13,76 mm, como se muestra en la Figura 34.

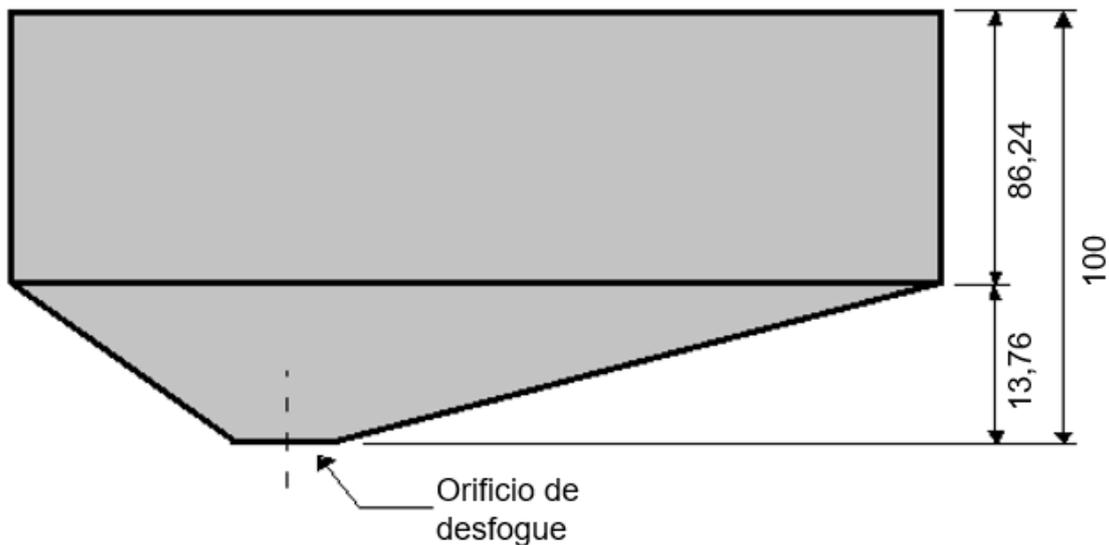


Figura 34. Alturas consideradas en la bandeja de agua.

Para conocer el volumen en litros con el que se llena la bandeja de agua, se debe sumar los volúmenes de un prisma rectangular con el volumen de una pirámide truncada como se muestra en el cálculo del anexo A.15 obteniendo un volumen total de 294,75 L de agua. Para la entrada de agua se utilizará una válvula check de 1 pulgada (25,4 mm) ubicada en la zona frontal de la bandeja como se muestra en la Figura 32, con el fin de evitar que un retorno del agua de llenado. Para el desfogaje de agua se instala una válvula de bola de 2 pulgadas (50,8 mm) en el orificio de desfogaje, como referencia se muestran en la Figura 35 una válvula check y una válvula de bola.



Figura 35. Válvula check y válvula de bola

Fuente: American Water Works Association [36].

6.2.4.3. Resumen dimensionamiento de la estructura mesa de trabajo

En la Tabla 20 se indican los elementos dimensionados y seleccionados para el eje Y, junto con sus especificaciones técnicas comerciales.

Tabla 20. Resumen dimensionamiento estructura mesa de trabajo.

Elemento	Especificaciones
Soporte planchas de acero	"Rejilla dentada tipo S" - Platina portante: 40 x 3 mm - Longitud: 2400 mm
Válvula entrada	"Válvula check" - Diámetro: 1 " (25,4 mm)
Válvula desfogue	"Válvula de bola" - Diámetro: 2 " (50,8 mm)

6.3. DIMENSIONAMIENTO ELECTROMECAÁNICO

Los componentes electromecánicos son fundamentales para el funcionamiento de la máquina porque sin estos componentes, la máquina no es capaz de realizar el proceso de corte. Se debe seleccionar la cortadora de plasma y el compresor de aire.

6.3.1. CORTADORA PLASMA

El principal componente de la máquina es la cortadora, en el mercado existen muchas opciones con algunas variantes, el criterio de selección se basa en la corriente de trabajo y capacidad de realizar cortes con una profundidad mayor al espesor máximo de 10 mm. La Tabla 21 presenta las características de tres cortadoras plasma comerciales.

Tabla 21. Especificaciones técnicas de cortadoras plasma.

Modelo	Caudal de Aire	Presión de aire	Ciclo de trabajo	Espesor de corte (recomendado)	Espesor de corte (máximo)	Imagen	Precio aproximado (\$)
Lotos LTP5000D	3,6 cfm 102 l/min	65 psi 4,48 bar	60% @ 50A	12mm	19mm		448,99
Giant Tech CUT50D	3,6 cfm 102 l/min	65 psi 4,48 bar	60% @ 50A	12mm	19mm		299,99
Porten EconoCUT 40	6 cfm 170 l/min	90 psi 6,2 bar	60% @ 40A	8mm	10mm		409,99

La cortadora plasma seleccionada es la GIANT TECH CUT50D de caudal 102 l/min y presión 4,48 bar debido a su capacidad para cortar hasta 19 mm y su costo reducido. Las características de esta cortadora se observan en la Tabla 22. El manual de operación de la cortadora se muestra en el anexo A.16

Tabla 22. Características GIANT TECH CUT50D

DATOS	CUT-50D
	220 VAC
TASA DE POTENCIA DE ENTRADA (KVA)	5,5
VOLTAJE SIN CARGA (V)	250
TASA DE CORRIENTE DE SALIDA (A)	50
TASA DE VOLTAJE DE SALIDA (V)	110
CICLO DE TRABAJO (%)	30
ESPESOR DE CORTE (MM)	14
PESO (KG)	11
DIMENSIONES (MM)	327*250*150

Fuente: Catálogo Giant Tech [37]

6.3.1.1. SOPORTE DE LA ANTORCHA

Una vez seleccionada la cortadora de plasma con sus accesorios incluidos, se debe garantizar que las platinas de ajuste mantengan la estabilidad de la antorcha durante el proceso de corte y cuando la máquina se encuentre en reposo. La platina de ajuste de la antorcha va soldada al soporte elevador como se muestra en la Figura 36, se usa una platina de ajuste a cada lado de antorcha. La cortadora CUT50D tiene una antorcha de masa 1,5 kg [37].

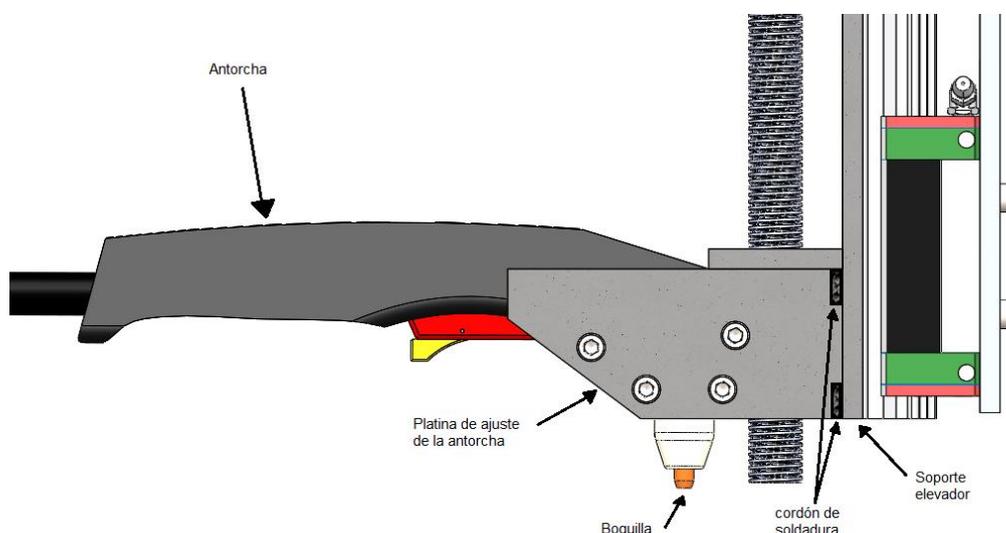


Figura 36. Partes del soporte de la antorcha.

El cordón de soldadura entre la platina y el soporte debe resistir el esfuerzo cortante producido en la junta. Se calcula asumiendo una longitud de cordón de 0,02 m con un electrodo E6011 de 1/8 de pulgada (0,00317 m) que tiene un límite a la fluencia de 345 MPa [38]. Para el primer caso, en el que la antorcha esté en reposo, se considera una carga puntual de tres veces la masa de la antorcha ubicada en el extremo más distante al soporte elevador mostrado en la Figura 37 (a), obteniendo un esfuerzo cortante de 152,04 MPa. Para el segundo caso, cuando salga el arco de plasma hacia la pieza de trabajo, se considera una carga puntual de 5 veces la masa de la antorcha ubicada de forma perpendicular a la boquilla como se muestra en la Figura 37 (b) y se obtiene un esfuerzo cortante de 52,03 MPa. Al ser ambos esfuerzos menores al límite a la fluencia de la soldadura, se valida el diseño de los soportes, los cálculos matemáticos se presentan en el anexo A.17.

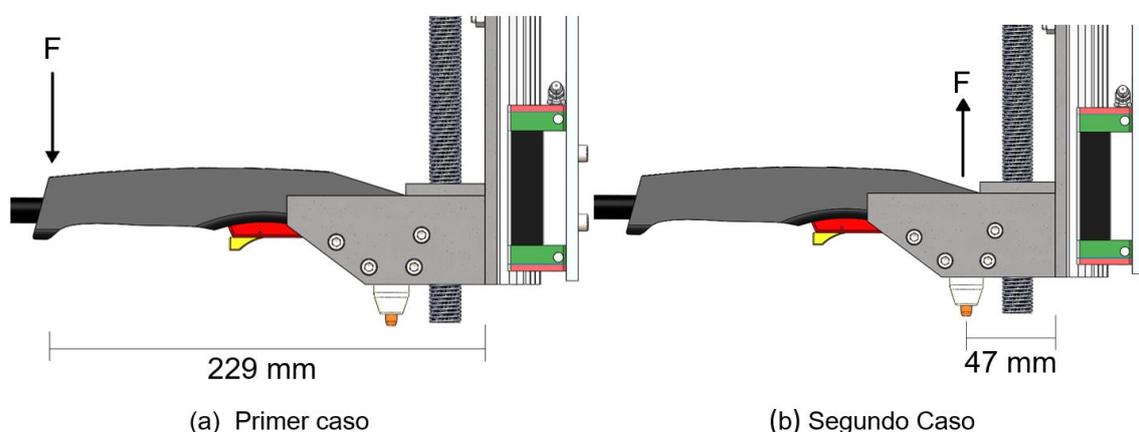


Figura 37. Casos de cálculo de resistencia de soldadura.

6.3.2. COMPRESOR DE AIRE

La alimentación de aire de la cortadora plasma, se basa en enviar aire comprimido hacia la cortadora por medio de un compresor de aire. Los criterios de selección de un compresor de aire son la presión, el caudal y el tipo de fluido. La presión y el caudal requeridos por la cortadora son 4,48 bar y 102 l/min; el fluido requerido por la cortadora es aire común no filtrado. En el procedimiento de selección existen algunos coeficientes de corrección de consumo como: los coeficientes de uso, simultaneidad y ciclo de funcionamiento, para considerar estos coeficientes se usa (18) aumentando el 30% al consumo requerido.

$$Q_{Tot} = Q_{req} + (Q_{req} * 0,3) \quad (18)$$

Donde:

Q_{Tot} = Caudal total en l/min

Q_{req} = Caudal requerido en l/min

$$Q_{Tot} = 102 \text{ l/min} + (102 \text{ l/min} * 0,3)$$

$$Q_{Tot} = 132,6 \text{ l/min}$$

Se selecciona el compresor con el caudal obtenido de 132,6 l/min en la Tabla 23. Sus características se muestran en el anexo A.18.

Tabla 23. Especificaciones de compresores comerciales.

	CV	Kw	Litros	Nivel sonoro dB(A)	Presión Máx. Bar	l/min	Kg	L x W x H mm
SIROCO-3 M	3(II)	2,2	-	65	8	300	39	610 x 340 x 370
SIROCO-3 T	3(III)	2,2	-	65	10	300	39	610 x 340 x 370
SIROCO-4 T	4(III)	3	-	70	10	400	43	650 x 425 x 416
SIROCO-3100 M	3(II)	2,2	100	65	8	300	76	1200 x 440 x 880
SIROCO-3100 T	3(III)	2,2	100	65	10	300	76	1200 x 440 x 880
SIROCO-4100 T	4(III)	3	100	70	10	400	78	1200 x 440 x 880

Fuente: Catálogo FISALIS [39]

El compresor de tornillo SIROCO – 3M presentado en la Figura 38 es alimentado por 220 VAC y cumple los requisitos de funcionamiento, otorgando un caudal de 300 l/min y una presión máxima de 8 bar, la ventaja de este compresor es su tamaño compacto, permitiendo ubicarlo en el espacio de la estructura de la máquina CNC bajo el panel de control.



Figura 38. Compresor Siroco - 3M

Fuente: Catálogo FISALIS [39]

6.3.3. RESUMEN SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTROMECAÑICOS

La recopilación de datos de los componentes electromecánicos se presenta en la Tabla 24.

Tabla 24. Recopilación selección dispositivos electromecánicos

Elemento	Especificaciones
Cortadora Plasma	"GIANT TECH CUT50D" - Presión: 4,48 bar - Espesor de corte: 12mm
Compresor de aire	"SIROCO-3M" - Caudal: 300l/min - Presión máx.: 8 bar

6.4. DIMENSIONAMIENTO ELECTRÓNICO

Los componentes electrónicos a seleccionar son: drivers que controlan la corriente de los motores. Finales de carrera que enviarán la señal de longitud mínima y máxima para el carro deslizante XY y el carro deslizante Z, un controlador CNC que será el dispositivo que envíe y reciba señales a todos los componentes electrónicos, un módulo THC de control de altura para la antorcha y una fuente de alimentación para los componentes previamente diseñados y el calibre de los cables para las conexiones.

6.4.1. DRIVERS PARA MOTORES

Para amplificar las señales desde la placa de control hacia las bobinas del motor, es necesario la utilización de controladores de los motores, estos permitirán energizar las bobinas de los motores a pasos seleccionados de acuerdo con los comandos indicados por el usuario mediante el código G.

Los controladores del motor o drivers necesitan las siguientes conexiones para que su funcionamiento sea adecuado: conexión a la fuente de alimentación, señal de paso, señal de dirección, conexión a tierra de la fuente de alimentación.

Es recomendable utilizar controladores digitales por sobre los analógicos, debido a que estos conmutan la lógica que viene de la placa hacia los motores, provocando que la transmisión de los pulsos eléctricos que van al motor se traslade con mejor optimización de frecuencia sin activar micropasos innecesariamente, lo que ocasionaría pérdidas de torque. Esto hace que el trabajo del motor tenga una vibración mínima; no así con los drivers analógicos, que al activar cada micropaso, el motor pierde el torque y la resolución varía.

En base a los motores seleccionados para el eje Z y eje Y, que son motores NEMA 23, se selecciona un driver entre los mostrados en la Tabla 25.

Tabla 25. Especificaciones técnicas de drivers para motores NEMA 23.

Modelo	Voltaje de alimentación (VDC)	Corriente de salida(A)	Micropasos (pasos/rev.)	Imagen referencial	Precio aprox. (\$)
DM556S	DC 24 - 60	1,4 - 5,6	400 - 25600		29,18
DM332T	DC 10 - 30	1 - 3,2	400 - 12800		21,73
DM556N	DC 20 - 55 AC 15 - 36	1,4 - 5,2	400 - 25600		22

El Driver DM556N es el seleccionado para los dos motores NEMA 23 debido a que la relación costo – beneficio es la más adecuada. Su hoja de datos se muestra en el anexo A.19.

Para los motores NEMA 34 seleccionados para el eje X que moverán el carro deslizante XY se realiza una comparación en la Tabla 26, seleccionando el Driver DM860N, cuya hoja de datos se indica en el anexo A.20

Tabla 26. Especificaciones técnicas de Drivers para motores NEMA 34.

Modelo	Voltaje de alimentación (VDC)	Corriente de salida(A)	Micropasos (pasos/rev.)	Imagen	Precio aprox. (\$)
DM860N	DC 24 - 110 AC 18 - 80	2,6 – 6,2	400 - 25000		34,16
DM860T	DC 36 - 110 AC 18 - 80	2,4 - 7,2	400 - 51200		51,98
DM556T	DC 24 - 50	1,4 – 6,2	400 - 25600		35,75

6.4.2. FINALES DE CARRERA

Los finales de carrera son pulsadores que al activarse indican una posición de referencia para las máquinas automáticas enviando una señal al controlador. Los ejes de la máquina CNC cuentan con un final de carrera en su posición mínima y máxima. La posición mínima, también conocida como cero máquina, es el punto desde donde partirá el proceso de corte. La posición máxima indica el punto más distante al que se puede desplazar el carro deslizante de cada eje. En la Figura 39 se observa la configuración de un final de carrera, se debe considerar realizar la conexión en reposo al pin normalmente cerrado (NC) para que en caso de que el cable se rompa, no llegue ninguna señal al controlador alertando al operador.

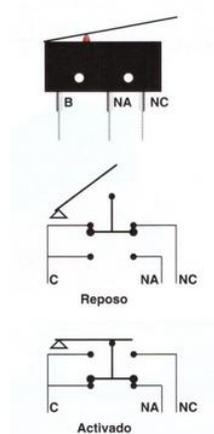


Figura 39. Configuración interna de un final de carrera.

Se seleccionan los módulos finales de carrera Mech Endstop v1.2, mostrado en la Figura 40, para obtener las señales de X e Y máximo y mínimo; el eje Z sólo contará con final de carrera mínimo, debido a que el máximo desplazamiento se lo configura mediante software.

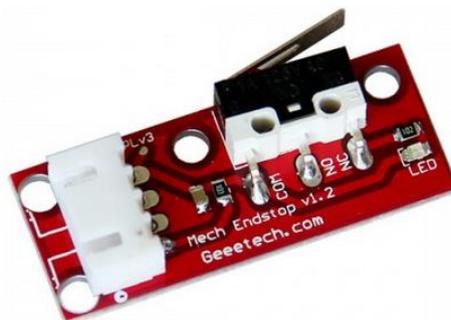


Figura 40. Final de carrera Mech Endstop v1.2

6.4.3. CONTROLADOR DE ALTURA DE LA ANTORCHA

El dispositivo seleccionado para el control de altura de la antorcha es un THC debido a que controla la altura con alta precisión en comparación con otros dispositivos como se indica en la Tabla 2. El THC cuenta con un microprocesador análogo que hace determinaciones para elevar o descender la antorcha en base a la fuerza de la señal del voltaje que está siendo leído. En la Figura 41 se indica el algoritmo de funcionamiento del THC mostrando como eleva o descende la antorcha según un rango establecido.

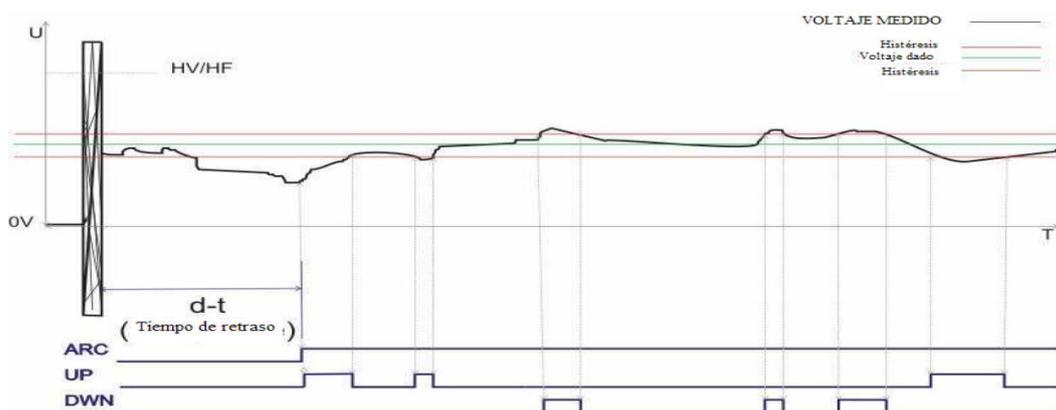


Figura 41. Algoritmo de trabajo del controlador de altura THC.

Fuente: Manual Proma THC [40]

El THC seleccionado es el Proma THC Compact 150 mostrado en la Figura 42, debido a su alta precisión en detección de voltaje del arco plasma. Las características técnicas se muestran en la Tabla 27.



Figura 42. Controlador de altura Proma THC Compact 150.

Fuente: Manual Proma THC [40]

Tabla 27. Características técnicas del THC Compact 150

Características técnicas	PROMA THC compact 150
Alimentación	7 – 35 VDC
Salidas	3 relay (UP, DOWN, ARC)
Rango de medida	30 – 300 VDC
Divisor de voltaje	1:50

Fuente: Manual Proma THC [40]

A continuación, se indica el esquema de conexión del THC con la cortadora plasma y con el controlador CNC en la Figura 43. La configuración del THC permite la configuración de tres parámetros, el primero de ellos es la Histéresis que es el rango de actuación del THC; el segundo parámetro es el tiempo de retraso cuando se detecta la salida del arco plasma; el tercer parámetro es un límite de alto voltaje para detener el proceso. La configuración del THC se indica en el anexo A.21

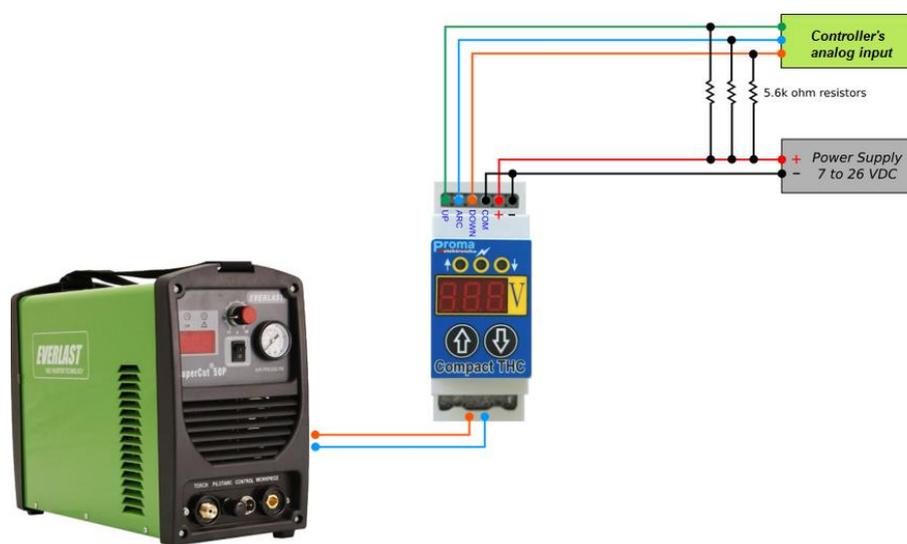


Figura 43. Diagrama pictográfico de conexión para el THC.

Fuente: Documentación MASSO [41]

6.4.4. MONITOR DE HMI

El usuario debe interactuar con la máquina a través de una interfaz donde sea posible enviar comandos y recibir información del funcionamiento de la máquina. El controlador seleccionado permite la conexión de una HMI táctil para un manejo más amigable con el usuario. Por esta razón se realiza una comparación de

monitores táctiles mostrados en la Tabla 28 para dotar a la máquina de una interfaz gráfica.

Tabla 28. Características de monitores táctiles

Marca	Tamaño	Precio referencial (\$)	Imagen referencial
UPERFECT	12,3 " (0,31m)	\$174,99	 12.3 inch monitor
UPERFECT	15,6 " (0,39m)	\$314,99	 15.6 inch monitor
GeChic	15,6 " (0,39m)	\$288	

El monitor seleccionado tiene una pantalla táctil de 12,3 pulgadas de la marca UPERFECT. Sus especificaciones técnicas se muestran en el anexo A.22

6.4.5. CONTROLADOR CNC

La máquina CNC necesita un controlador que permita el manejo de sensores, drivers, actuadores y demás elementos según el trabajo a realizar. La elección del controlador se realiza analizando las entradas y salidas necesarias para la operación en conjunto de toda la máquina. Para el caso de esta máquina CNC cortadora de plasma con control de altura de la antorcha, el controlador debe contar con los puertos necesarios para controlar 4 motores, 5 finales de carrera, el THC y el monitor de la HMI. Las entradas y salidas necesarias se indican en la Tabla 29.

Tabla 29. Entradas y salidas requeridas

Elementos de entrada	Cantidad	Tipo
Final de carrera Z	1	Digital
Final de carrera Y	2	Digital
Final de carrera X	2	Digital
Cortadora	2	Digital
Total entradas digitales	7	
THC	3	Analógica
Total entradas analógicas	3	
Elementos de salida	Cantidad	Tipo
Motor Z	4	Digital
Motor Y	4	Digital
Motor X	4	Digital
Monitor HMI	2	Digital
Antorcha	2	Digital
Total salidas digitales	16	

El requerimiento total de entradas digitales son 10 y de entradas analógicas son 3; mientras que las salidas necesarias son 16 del tipo analógico. En el mercado existen algunos fabricantes de controladores CNC, por ejemplo la empresa MASSO que ofrece el controlador MASSO CNC Plasma Controller G3-5A1SI desarrollado para corte por plasma mostrado en la Figura 44, y sus especificaciones técnicas se indican en la Tabla 30.

Tabla 30. Especificaciones técnicas del controlador MASSO CNC Plasma HTG5A1S

Especificaciones técnicas	MASSO CNC PLASMA
Número de ejes	Hasta 5
Entradas	24 digitales - 6 analógicas
Salidas	10 digitales- 8 analógicas 12 salidas digitales para ejes X, Y y Z
Alimentación	12-24 VDC
Corriente máxima	1,5 A
Frecuencia de control	110 kHz por eje
Compatibilidad motores	Servomotor y Paso a paso
Puerto THC	Si
Salida VGA	Si
Entrada de código G	USB
Sistema Operativo	Software propio

El controlador MASSO CNC Plasma permite que se realice las conexiones de los motores directamente en los pines X Axis, Y Axis y Z Axis, de tal manera que los pines de salida del 1 al 18 pueden ser utilizados para conexión de la antorcha u otros accesorios, las entradas digitales pueden conectarse a cualquiera de los pines 1 a 24 de entrada. Los números de los pines de conexión del controlador MASSO se presentan en el anexo A.23

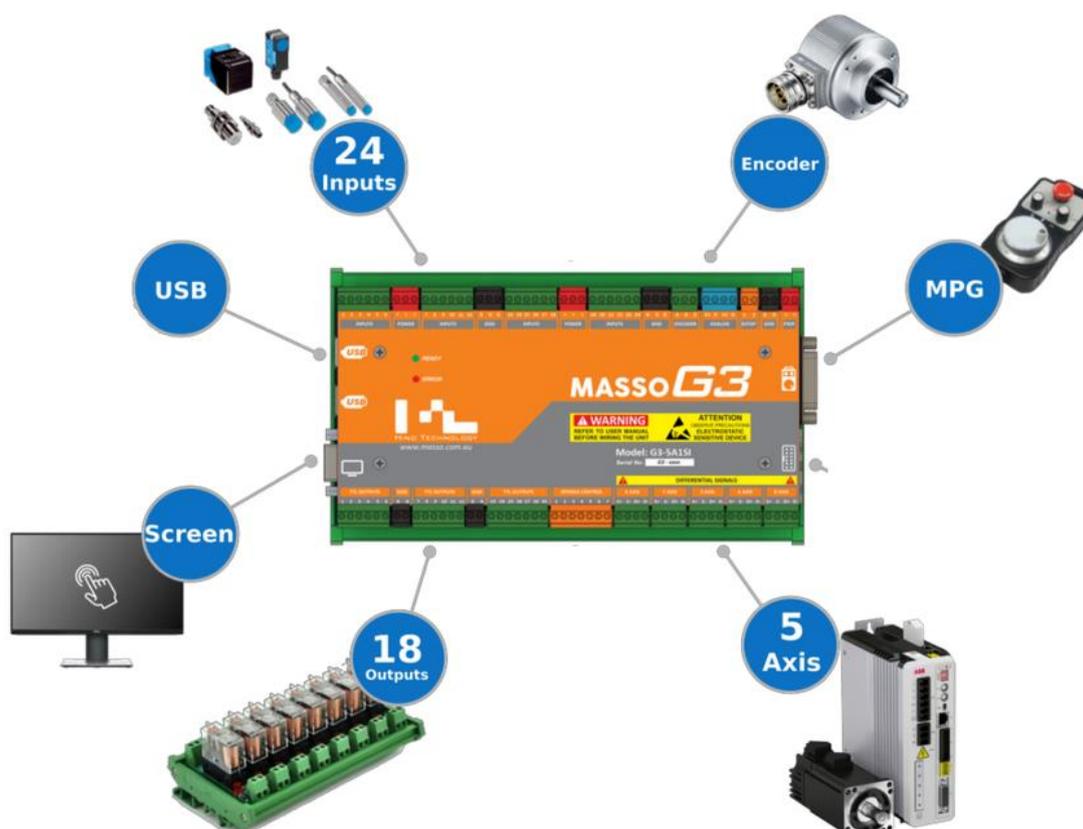


Figura 44. Controlador MASSO CNC PLASMA HTG5A1S

Fuente: Documentación MASSO [41]

El controlador MASSO CNC Plasma Controller HTG5A1S satisface los requerimientos técnicos de entradas y salidas; y además presenta las siguientes ventajas [41].

- No requiere conexión con una PC, debido a que la placa actúa como CPU controlando las entradas y salidas.
- Cuenta con un software propio, incluido al adquirir el controlador con una licencia de 15 años.

- Permite un control táctil mediante un monitor touchscreen, facilitando el trabajo del operador al tener una interfaz amigable con el usuario.
- Permite la lectura de archivos de código G en formato: .nc, .cnc, .tap, .wiz, .txt, .eia

6.4.6. FUENTE DE ALIMENTACIÓN

La alimentación para todo el circuito de la máquina CNC se realiza mediante fuente de alimentación capaz de otorgar el voltaje requerido por los componentes dimensionados. Los elementos conectados directamente a la fuente de alimentación serán los motores con sus respectivos Drivers, las corrientes requeridas se indican en la Tabla 31.

Tabla 31. Datos de corriente de los elementos utilizados.

Dispositivo	Modelo	Cantidad	Volt. de alimentación (V)	Corriente (A)
Motor Eje Z	NEMA 23	1	24	2,8
Motor Eje Y	NEMA 23	1	24	2,8
Motor Eje X	NEMA 34	2	24	2,8
Driver	DM556N	2	24	1,4 - 5,2
Driver	DM860N	2	24	2,6 - 6,2
Controlador	MASSO CNC	1	24	1,5
THC	Compact150	1	24	0,12

Con estos datos, se calcula la corriente de suministro de energía mediante (19) utilizando como peor condición la máxima corriente de cada elemento.

$$I_s = \frac{2}{3} * (\sum I_f) \quad (19)$$

Donde:

I_s : Corriente total de suministro de energía, en A;

I_f : Corriente por fase, en A.

$$I_s = \frac{2}{3} * (2,8 + 2,8 + 2,8 + 5,2 + 6,2 + 1,5 + 0,120)$$

$$I_s = 14,28 \text{ A}$$

La potencia mínima que debe proporcionar la fuente se la calcula con (20) multiplicando la corriente total de suministro de energía (I_s) por el voltaje de alimentación a utilizar (V_s), siendo para este caso 24V.

$$P_s = I_s * V_s \quad (20)$$

Donde:

P_s : Potencia de alimentación, en W;

I_s : Corriente total de suministro de energía, en A;

V_s : Voltaje de alimentación, en V.

$$P = 14,28 * 24$$

$$P = 342,72 \text{ W}$$

La selección de la fuente de alimentación se la realiza tomando en cuenta el voltaje de 24 V, la corriente máxima de 14,28 A y la potencia de 342,72 W. La fuente de poder seleccionada que cumple con los requerimientos es la Mean Well S-350-24 mostrada en la Figura 45, las especificaciones técnicas se las muestra en el anexo A.24.



Figura 45. Fuente de alimentación Mean Well S-350-24

Fuente: Catálogo Mean Well [42]

La ventaja de esta fuente es que incluye protección contra sobrecargas, contra corto circuitos y contra sobre tensión, salvaguardando los componentes conectados ante cualquier situación imprevista.

6.4.7. CALIBRE DE CABLES

Según la norma AWG, se escoge el calibre del cable adecuado para la corriente que vaya a fluir por el mismo. Para esto se utiliza el valor de potencia dado por

el fabricante para cada uno de los elementos electrónicos aplicando la ecuación (21).

$$I_C = \frac{P_e}{V_e} \quad (21)$$

Donde:

I_C : Corriente que atraviesa el cable, en A;

P_e : Potencia del elemento, en W;

V_e : Voltaje de alimentación del elemento, en V.

La potencia de la cortadora plasma dada por el fabricante es de 11 kW [37] y su suministro de voltaje es igual 220 voltios.

$$I = \frac{11000 \text{ W}}{220 \text{ V}}$$

$$I = 50 \text{ A}$$

La potencia del compresor de aire dado por el fabricante es de 2,2 kW [39] y el voltaje de alimentación es de 220 voltios.

$$I = \frac{2200 \text{ W}}{110 \text{ V}}$$

$$I = 10 \text{ A}$$

Los valores de corriente máxima de los drivers y motores ya vienen dados por el fabricante. La Tabla 32 muestra los calibres seleccionados para cada una de las conexiones según la Norma AWG presentada en el anexo A.25.

Tabla 32. Selección de calibre de cable para los diferentes elementos.

Especificación	Modelo	Corriente máxima(A)	Factor de diseño (A) [1,5]	Calibre de cable
Motor Eje Z	Nema 23	2,8	4,2	15
Motor Eje Y	Nema 23	2,8	4,2	15
Motor Eje X	Nema 34	2,8	4,2	15
Driver	DM556N	5,6	7,8	12
Driver	DM860N	7,2	9,3	12
Cortadora Plasma	CUT50D	50	75	4
Compresor	Siroco - 3M	20	15	11

Al utilizar estos calibres se asegura que las conexiones no sufran pérdidas de energía ni se recalienten durante la operación de la máquina.

6.4.8. PULSADOR DE EMERGENCIA

La normativa NTE INEN 121200 [20] indica que toda máquina de trabajo industrial requiere por seguridad contar con un botón de paro de emergencia que detenga todos los procesos que se encuentren activos e incluso que corten la alimentación a elementos motrices. Para este caso, se selecciona el pulsador de emergencia TP-P22M-R del fabricante Tekno Powers [43] mostrado en la Figura 46.



Figura 46. Pulsador de emergencia TP-P22M-R.

Fuente: Catálogo Tekno Powers [43]

6.4.9. RESUMEN SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

La Tabla 33 presenta las especificaciones técnicas de los componentes electrónicos seleccionados.

Tabla 33. Recopilación selección de dispositivos electrónicos

Elemento	Especificaciones
Driver Nema 23	"DM556N" - Alimentación: 24 VDC (2 unidades)
Driver Nema 34	"DM860N" - Alimentación: 24 VDC (2 unidades)
Finales de carrera	"Mech Endstop v1.2" (5 unidades)
Controlador CNC	"MASSO CNC Plasma HTG5A1S"
Controlador de altura	"PROMA THC compact 150"
Fuente de alimentación	"Mean Well S-350-24" - Salida: 24 VDC - Potencia: 350W
Pulsador de emergencia	"Tekno Power TP-P22M-R"

La Figura 47 muestra como son las conexiones en un diagrama de bloques

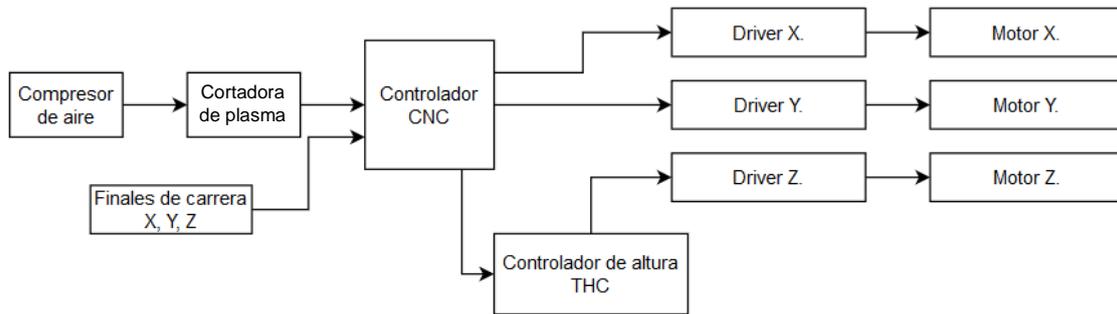


Figura 47. Diagrama de bloques de conexiones

6.5. DISEÑO INFORMÁTICO

Para el funcionamiento de la máquina CNC se requiere determinar el proceso de trabajo, conjuntamente con la selección del software y de una HMI con el fin de permitir la interacción entre el humano y la máquina.

6.5.1. PROCESO DE CONTROL

El proceso del trabajo de la máquina CNC de corte por plasma se lo establece mediante el diagrama de flujo mostrado en la Figura 48, abarcando desde el diseño CAD/CAM, el mecanizado y la salida de la pieza cortada.

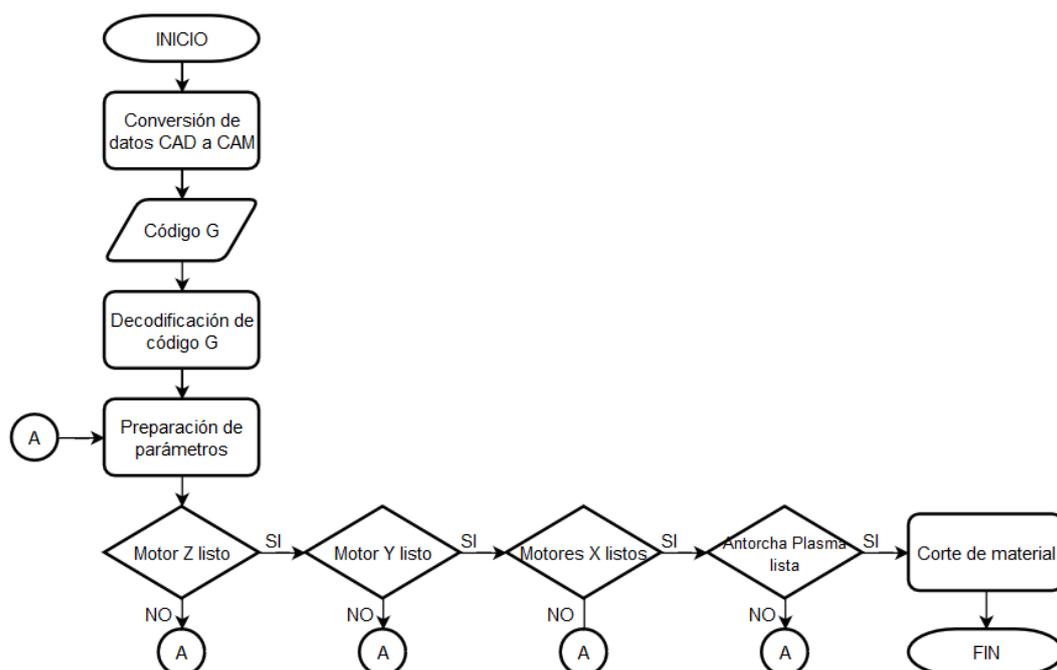


Figura 48. Diagrama de flujo del proceso de corte

6.5.2. SOFTWARE DE CONTROL

El software seleccionado para el control de todas las variables de la máquina CNC es el “PLASMA GEN II” de la marca MASSO, que se incluye al adquirir la placa, con una licencia de 10 años. La principal ventaja de este software es que permite el control para los motores de desplazamiento y control de antorcha sin necesidad de utilizar softwares de terceros, además cuenta con una interfaz intuitiva para todo tipo de usuario, e incluso cuenta con la posibilidad de operación mediante un HMI táctil. El software mencionado cuenta con 6 pantallas de operación, cuyo acceso se encuentra en la parte inferior de la pantalla como se muestra en la Figura 49.



Figura 49. Pantalla principal del estado de la máquina CNC.

La pestaña F1-SETUP cuenta con las configuraciones para las entradas, salidas, acceso al sistema y calibración. La pestaña F2-PROGRAM & MDI permite la entrada manual de datos para la edición de coordenadas de un código G. La pestaña F3-JOG muestra la posición y estado de la máquina mientras se realiza el proceso de corte. La pestaña F4-TOOL & WORK OFFSETS permite guardar configuraciones de tolerancias para determinados tipos de corte. La pestaña F5-

CONVERSATIONAL permite ordenar y dejar almacenados los códigos G hasta su utilización, finalmente la pestaña F6-LOAD FILE es la pantalla donde se cargan los códigos G a través de un dispositivo USB.

La configuración de parámetros al iniciar el sistema y su operación se indican a detalle en el anexo A.26.

6.5.3. RESUMEN SELECCIÓN DE ELEMENTOS INFORMÁTICOS

Los componentes seleccionados dentro del diseño informático se presentan en la Tabla 34 conjuntamente con sus especificaciones.

Tabla 34. Recopilación de selección de componentes informáticos.

Elemento	Especificaciones
Software	"MASSO Plasma GEN II"

7. CONCLUSIONES

- Las dimensiones de la máquina CNC cortadora de plasma de tres ejes con control de altura de la antorcha son 3151 mm de largo, 1576 mm de ancho y 1254 mm de altura y tiene la capacidad de cortar planchas de acero de hasta 10 mm de espesor y sobre el área de trabajo de 1320 x 2460 mm.
- Para el corte por plasma se considera la utilización de aire como gas plasmágeno proveniente de un compresor Siroco 3M de 65 psi conectado a una cortadora de plasma CUT50D de 50 A al 60% de ciclo de trabajo para cortes de hasta 12 mm.
- El diseño de la estructura de la mesa de trabajo y de los ejes considera el criterio de flexión admitida para máquinas de precisión moderada, validándose los resultados con el software de simulación de deformación por elementos finitos SOLIDWORKS Student Edition.
- El sistema electromecánico de desplazamiento para el eje “Z” está diseñado con un tornillo de potencia acoplado a un motor a pasos NEMA 23 con un torque de 1,29 Nm; para los desplazamientos de la herramienta en los ejes “X” e “Y”, se transmite la potencia mediante mecanismos piñón – cremallera impulsado por un motor NEMA 23 de alto torque igual a 2,08 Nm para el eje “X”, y dos (2) motores a pasos NEMA 34 con un torque de 3,06 Nm para el eje “Y”. Estos ejes se desplazan a través de guías lineales SBR20S con cojinetes lineales SBR20uu.
- Para el control de la máquina se selecciona el controlador CNC Plasma MASSO G3, que satisface el requerimiento de 10 entradas digitales, 3 entradas analógicas y 16 salidas digitales. El controlador posee un sistema operativo propio sin necesidad de conexión a un CPU externo; además este controlador es adaptable a dispositivos de control de altura de la antorcha y cuenta con una interfaz gráfica amigable con el usuario, con un monitor HMI de 12,3 pulgadas.
- Para la alimentación eléctrica del monitor HMI, finales de carrera, controlador de altura de antorcha, motores de paso y drivers para cada eje, se selecciona una fuente de 24 VDC y 15 A de capacidad.

- El controlador de altura de la antorcha seleccionado es el PROMA THC Compact 150 con una capacidad de trabajar con rangos de ± 1 V, en arcos plasma de hasta 300V, con una respuesta mínima de 0,1 segundos.
- La mesa de trabajo dispone de una bandeja de agua de 100 mm de profundidad total y con una pendiente de $0,54^\circ$ hacia el orificio de desfogue, con el fin de disminuir o eliminar los humos y vapores producidos por el corte plasma y evitar o reducir la contaminación del entorno de la máquina, como se establece en la norma de seguridad industrial ISO 12100:2012, precautelando la salud del operador.

8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda al constructor debe poner especial atención en tolerancias geométricas y dimensionales de las piezas de la estructura, para garantizar la rigidez diseñada de la máquina; además se recomienda colocar protecciones herméticas en el panel de control con el fin de evitar ingreso de agua y polvo.
- Previo a la decisión de la construcción de la máquina CNC cortadora de plasma con control de altura de la antorcha diseñada, se recomienda realizar un análisis económico en base a los precios de los materiales y mano de obra para disponer de la máquina y los beneficios esperados.
- Se recomienda que el aire a utilizarse en el corte, pase previamente por filtros y trampas de agua y aceite.
- Es recomendable que el constructor genere manuales de operación y mantenimiento de la máquina CNC, para determinar los tiempos de limpieza y cuidado según el tiempo de uso de la misma.

9. REFERENCIAS

- [1] S. Bhowmick, J. Basu, G. Majumdar y A. Bandyopadhyay, «Experimental study of plasma arc cutting of AISI 304 stainless steel,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, 2017.
- [2] R. H. Todd y D. Allen, *Manufacturing processes reference guide*, New York: Industrial Press, 1994.
- [3] E. Paul, *Plasma cutting handbook hp1569*, New York: HP Books, 2014.
- [4] «De máquinas y herramientas,» 15 Agosto 2013. [En línea]. Available: <https://www.demaquinasyherramientas.com/maquinas/corte-por-plasma-generalidades>. [Último acceso: 8 Noviembre 2019].
- [5] I. Harris, *Plasma Arc Cutting of Bridge Steels*, National Research council, 1997.
- [6] Hypertherm, «Sistemas de enfriamiento de antorchas para corte por arco de plasma,» de *Corte por arco de plasma Hypertherm*, 2016.
- [7] K. Weman, «Cutting Methods,» de *Welding Processes Handbook (Second edition)*, Woodhead Publishing Series, 2012, pp. 143-149.
- [8] S. Cicero, T. García, J. Álvarez, A. Bannister, A. Klimpel, A. Martín-Meizoso y J. Aldazabal, «Fatigue behaviour of structural steels with oxy-fuel, plasma and laser cut straight edges. Definition of Eurocode 3 FAT classes,» *Engineering Structures*, vol. 111, pp. 152-161, 2016.
- [9] D. Krajcarz, «Comparison Metal Water Jet Cutting with Laser and Plasma Cutting,» *Procedia engineering*, vol. 69, pp. 838-843, 2014.
- [10] F. Orozco Roldán y C. López Gálvez, *Fabricación Mecánica: Trazado, corte y conformado*, Madrid: Paraninfo, 2013.
- [11] J. Valentino y J. Goldenberg, *Introduction to Computer Numerical Control (CNC)*, Prentice Hall, 2013.
- [12] R. Arguelles, «Procesos industriales: Códigos G y M,» Universidad Tecnológica de Torreón, Coahuila, 2015.
- [13] J. Salinas, A. Flores y J. Montes, *Manual CNC para principiantes*, Puebla: Estudioscala.
- [14] G. Martinov, A. Ljubimov y L. Martinova, «From classic CNC systems to cloud-based technology and back,» *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 63, 2019.

- [15] A. Yudin y B. Baranov , «Optimal Automatic Maintenance of the Arc Voltage in the Plasma Cutting of Metal,» *Russian Engineering REsearch*, vol. 37, pp. 651-654, 2017.
- [16] A. I. Varga, «CNC machine for cutting with plasma, oxygen and water jet used as a cutting tool with automatic setting up a precise position of a cutting tool in a cutting head by autocalibration and method thereof». Eslovaquia Patente EP 2 584 419 B1, 15 Noviembre 2017.
- [17] L. Wood y R. K. Worth, «PLASMA CUTTING METHOD AND SYSTEM». E.E.U.U. Patente US 9 321 120 B2, 26 Abril 2016.
- [18] M. Fagan, «METAL ANALYZING PLASMA CNC CUTTING MACHINE AND ASSOCIATED METHODS». E.E.U.U. Patente US 2017/0246703 A1, 31 Agosto 2017.
- [19] R. T. Flaig y G. J. Tischler, «BEVEL HEADATTACHMENT FOR PLASMA AND OXYFUEL CUTTING MACHINES». E.E.U.U. Patente US 8 378 250 B2, 19 Febrero 2013.
- [20] INEN, *Norma NTE INEN-ISO 12100: SEGURIDAD DE LAS MÁQUINAS. PRINCIPIOS GENERALES PARA EL DISEÑO. EVALUACIÓN DEL RIESGO Y REDUCCIÓN DEL RIESGO*, 2013.
- [21] INEN, *Norma NTE INEN-ISO 7250-1: DEFINICIONES DE LAS MEDIDAS BÁSICAS DEL CUERPO HUMANO PARA EL DISEÑO TECNOLÓGICO. PARTE 1: DEFINICIONES DE LAS MEDIDAS DEL CUERPO Y REFERENCIAS (ISO 7250-1:2008, IDT)*, 2014.
- [22] INEN, *Norma NTE INEN 115:2008: TOLERANCIA PARA PLANCHAS Y PLANCHONES DE ACERO AL CARBONO LAMINADAS EN CALIENTE Y/O EN FRÍO*, 2017.
- [23] INEN, *Norma NTE INEN 037:2009 REGLAMENTO TÉCNICO ECUATORIANO PARA EL DISEÑO, FABRICACIÓN Y MONTAJES DE ESTRUCTURAS DE ACERO*, 2013.
- [24] NBS, *Catálogo Técnico General: Sistemas de guiado lineal*, Alicante, 2012.
- [25] J. Collazo, L. Correa Zuñiga, G. Calet y R. Aguillón Reyes, «Aplicación de tornillo de potencia rosca ACME en mesa cartesiana 2D,» *Memorias del XXII Congreso de la SOMIM y XIV Congreso IBEROMAT*, 2016.
- [26] AutomationDirect, *Sistema de motores paso a paso, Manual STP-SYS-MSP*, 2007.
- [27] R. Budynas y K. Nisbett, «Apéndice A,» de *Diseño de ingeniería mecánica de Shigley*, México D.F., McGraw-Hill Interamericana, 2008, pp. 993-1000.

- [28] «Calculadora de vigas en voladizo,» Skyciv, [En línea]. Available: <https://skyciv.com/es/free-beam-calculator/>. [Último acceso: 13 Noviembre 2019].
- [29] SUMITEC, *ACERO ESTRUCTURAL ASTM A-500*, Cartago, 2018.
- [30] M. Hanif Chaudry, *Applied Hydraulic Transients*, New York: Van Nostrand Reinhold , 1989.
- [31] CNC4You, *CNC: Linear Shafts and Bearings*, NY, 2016.
- [32] M. Torres Búa, *Mecanismos*, Xunta Edu, 2014.
- [33] KOOM, *Transmisiones de potencia por cremallera piñón*, Nueva Jersey, 2016.
- [34] IPAC, «Planchas laminadas en caliente y en frío,» de *Acero estructural*, Guayaquil, www.ipac-acero.com, p. 63.
- [35] SEDEMI, *Pisos industriales GRATING*, 2015.
- [36] A. American Water Works, «Water Transmission and Distribution,» de *Principles and Practices of Water Supply Operations*, Denver, CO, 200, pp. 109-114.
- [37] GiantTech, *Manual de usuario para cortadora plasma 50D*, New York, 2014.
- [38] R. Budynas y K. Nisbett, «Resistencia de las uniones soldadas,» de *Diseño de ingeniería mecánica de Shigley*, México D.F., McGraw-Hill Interamericana, 2008, pp. 471-472.
- [39] FISALIS Compresores, *Catálogo - Tarifa Compresores*, Zaragoza, 2018.
- [40] *Manual de operación Controlador de altura de la antorcha de plasma THC Compacto 150*, 2016.
- [41] MASSO, *Masso Documentation*. [En línea] Disponible en: <https://www.massoc.com.au/massoc-documentation/> [Consultado el: 18-01-2020].
- [42] M. Well, *Catálogo fuentes de alimentación conmutadas*, GUANGZHOU, 2018.
- [43] TEKNOPOWERS, *Catálogo Tekno Powers*, Guadalajara, 2019.