

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Rediseño de un pantógrafo de oxicorte a un cortador de plasma CNC.

Proyecto Integrador

ING-2527

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Mecatrónica

Presentado por:

George Humberto Domínguez Silva

Medardo Jesús Garcés Mayor

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

El presente trabajo se lo dedico a todas las personas que forman parte de mi vida, a Rodrigo Domínguez, quien, además de ser mi hermano mayor, es una guía, un ejemplo a seguir y desde que tengo memoria siempre me ha apoyado en todo.

A mi abuela Luz Sosa, persona la cual admiro mucho y me ha sido una gran fuente de inspiración en mi vida, por siempre será mi profesora, directora y confidente favorita.

A mis padres George Domínguez y Karina Silva por apoyarme a lo largo de mi vida e inculcarme con buenos valores durante toda mi vida.

A todas mis mascotas que me han acompañado a lo largo de mi vida y que me recuerdan que jamás hay que rendirse y siempre hay que dar lo mejor de uno mismo.

A mi abuelo Gilberto Gustavo, quien no pudo acompañarme en este logro, pero su presencia me acompañará siempre.

Domínguez Silva G.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por la oportunidad que me dio al estudiar en esta prestigiosa universidad y me ha dado sabiduría para tomar las decisiones correctas.

A mi hermano que jamás se negó a ayudarme y siempre estaba presente cuando lo necesitaba, por llevarme a cualquier lugar que necesitaba, apoyándome en cualquier idea que tenía, aquella persona que jamás dudo de mí y siempre ha creído en mi potencial.

A mis abuelos, cuya presencia en cada enseñanza y sus valores sembrados en mí me acompañaron hasta este logro, siempre recordándome el poder de la dedicación y el amor incondicional.

A mis amigos que siempre mostraron su apoyo incondicional a lo largo de todo mi trayecto universitario, aligerando la carga de las clases y siendo motivo de felicidad en los momentos más difíciles de la carrera.

A los Ingenieros Jonathan León y Carlos Zúñiga por su apoyo en el proyecto de titulación.

Domínguez Silva G.

Dedicatoria

El presente trabajo se lo dedico a mi padre,
Medardo Garcés, quien, a pesar de hoy ya no
estar con nosotros, queda en mi memoria todo
el aliento, apoyo y consejos que me brindó
desde que era pequeño.

A mi madre Sandra Mayor y a mi hermana
Michelle quienes han sido mi guía y apoyo a
lo largo de este camino.

A mi familia, que siempre me brindo la mano
y me ayudó con un buen consejo

Medardo Garcés M.

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a mis padres, mi hermana, mi familia por cada gota de esperanza y anhelo que depositaron en mi para lograr ser un profesional.

A mi enamorada Fiorella, por estar ahí todos los días brindándome aliento, apoyo y fuerzas para culminar esta etapa universitaria a pesar de lo difícil que se tornen las cosas.

A los amigos que me dio la universidad, en especial a los que hice gracias al Carpool, Diana, Loyda, Jesús, quienes hacían que cada ida o vuelta de la universidad sea más amena.

A los Ingenieros Jonathan León y Carlos Zúñiga por su apoyo constante en la realización de este proyecto.

Medardo Garcés M.

Declaración Expresa

Nosotros George Humberto Domínguez Silva y Medardo Jesús Garcés Mayor acordamos y reconocemos que:

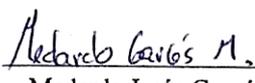
La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 28 de mayo del 2024.


George Humberto
Domínguez Silva


Medardo Jesús Garcés
Mayor

Evaluadores

Jonathan Roberto León Torres, M.Sc.

Profesor de Materia

Carlos Augusto Zúñiga Reyes, M.Sc.

Tutor de proyecto

Resumen

El sector industrial de manufactura en pequeñas y medianas empresas necesita mejorar la precisión y eficiencia en sus procesos, especialmente el corte por tanto una solución para este problema es la remodelación de los equipos de corte actualizando tanto su sistema de movimiento como su sistema de corte optando por CNC y corte por plasma. Este proyecto busca rediseñar un pantógrafo de oxicorte mediante la mejora a corte de plasma por CNC, mejorando la precisión y la eficiencia por medio de técnicas de automatización industrial.

Para lograr este objetivo, fue necesario realizar cambios en diversas partes del sistema. En la parte mecánica se realizaron cambios en los sistemas de movimiento, además se añadieron ciertos elementos para el correcto funcionamiento. En la parte eléctrica se cambiaron diversos controladores y equipos como el cortador de plasma, las tarjetas de control y el programa MACH 3.

Se cambiaron diversos elementos los cuales se encontraron disponibles en el mercado local, los mismos que tienen un mantenimiento sencillo en caso de ser necesario. Logrando la incorporación de todos los sistemas diseñados proporcionando una máquina funcional capaz de cortar materiales hasta de 26 mm con una buena precisión

Palabras Clave: Precisión, Eficiencia, CNC, Automatización

Abstract

The manufacturing sector in small and medium-sized enterprises needs to enhance the precision and efficiency of its processes, particularly in cutting. A proposed solution to this issue involves upgrading the cutting equipment by modernizing both the movement system and the cutting mechanism, opting for CNC and plasma cutting technologies. This project aims to redesign an oxy-fuel cutting pantograph by improving it with CNC plasma cutting, thereby increasing precision and efficiency through industrial automation techniques.

To achieve this goal, it was necessary to make changes in various parts of the system. Mechanically, adjustments were made to the movement systems, and additional components were added to ensure proper functionality. Electrically, various controllers and equipment, such as the plasma cutter, control cards, and the Match 3 program, were replaced.

Several components were sourced from the local market, chosen for their simplicity in maintenance if needed. This integration of all designed systems resulted in a functional machine capable of cutting materials up to 26 mm thick with high precision.

Keywords: Precision, Efficiency, CNC, Automation

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Índice general	III
Abreviaturas	VI
Simbología	VII
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas.....	X
Índice de planos.....	XII
Capítulo 1	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del Problema	3
1.3 Justificación del problema.....	4
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
1.5 Marco teórico	6
1.5.1 Pantógrafo.....	6
1.5.2 Modelado en 3D	7
1.5.3 Inventor Autodesk	7
1.5.4 Interfaz HMI.....	8
1.5.5 Programación CNC.....	8
Capítulo 2	10
2. Metodología.	11
2.1 Requerimientos de diseño	12
2.1.1 Diseño conceptual.....	12
2.2 Alternativas de solución.....	13

2.2.1 Transmisión de movimiento.	13
2.2.2 Sistema de guiado.	14
2.2.3 Sistema de motores	15
2.2.4 Cortador plasma.	15
2.3 Criterios de valoración.	16
2.4 Prototipos de diseño mecánico.	23
2.5 Sistema de Movimiento y Guías	25
2.5.1 Elección de materiales	25
2.5.2 Sistema de movimiento en el eje X	28
2.5.2.1 Cálculo para la selección del motor	30
2.5.2.2 Análisis de esfuerzos en la cremallera.	31
2.5.2.3 Análisis de esfuerzos en la rueda dentada	33
2.5.3 Sistema de movimiento en el eje Y.	34
2.5.3.1 Cálculo para la selección del motor	35
2.5.3.2 Análisis de esfuerzos en la cremallera	36
2.5.3.3 Análisis de esfuerzos en la rueda dentada	37
2.5.4 Sistema de movimiento en el eje Z.	38
2.5.4.1 Cálculo para la selección del motor	39
2.5.4.2 Análisis de esfuerzos en el tornillo sin fin.	40
2.6 Diseño electrónico.	41
2.6.1 Variables del sistema.	44
2.7 Diseño del sistema de control.	46
2.8 Tabla de materiales.	50
Capítulo 3	52
3. Resultados y análisis	53
3.1 Resultados del componente mecánico.	53
3.1.1 Soporte del motor para el movimiento en el eje X	54

3.1.1.1 Análisis estructural	56
3.1.2 Soporte del motor para el movimiento en el eje Z.....	57
3.1.2.1 Análisis estructural	59
3.2 Resultados del componente electrónico	60
3.2.1 Conexiones de la Tarjeta de Interfaz DB25-1205.....	61
3.2.2 Configuración de los drives de los motores para los ejes x, y, z.	63
3.2.3 Integración de los finales de carrera.	67
3.2.4 Conexión del controlador Proma THC compact 150.	68
3.3 Resultados del componente de control y programación.....	70
3.3.1 Configuración de los motores en el mach 3.....	70
3.3.2 Configuración de los puertos en el MACH 3	73
3.4 Simulaciones	77
3.5 Análisis de costos.....	80
Capítulo 4.....	83
4.1 Conclusiones y recomendaciones.....	84
4.1.1 Conclusiones	84
4.1.2 Recomendaciones.....	84
Referencias	86
Apéndice A.....	88
Apéndice B.....	89
Apéndice C.....	100

Abreviaturas

CAD Diseño Asistido por Computadora (Computer-Aided Design)

CNC Control Numérico Computarizado

D Dimensión

DWG Dibujo (acrónimo de Drawing)

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

SSC Electrodo de Plata Cloruro de Plata

IA Inteligencia Artificial

IIoT Internet Industrial de las Cosas (Industrial Internet of Things)

HMI Human Machine Interface

PID Proporcional-Integral-Derivativo

Simbología

C	Carbono
Cu	Cobre
Kg	Kilogramos
m	Metro
mg	Miligramo
mm	Milímetro
mil	Milésima de pulgada
Mn	Manganeso
mV	Milivoltio
Ni	Níquel
Nm	Newton metros
P	Fósforo
pH	Potencial de Hidrógeno

Índice de figuras

Ilustración 1.1: Pantógrafo CNC de Corte Plasma	7
Ilustración 1.2: Inventor autodesk.....	8
Ilustración 1.3: Interfaz HMI.....	8
Ilustración 2.1: Metodología del proceso de retrofitting	11
Ilustración 2.2: Diseño conceptual del funcionamiento del pantógrafo CNC por corte plasma...	13
Ilustración 2.3: Modelo 3D del primer diseño en Inventor 2024.	23
Ilustración 2.4: Modelo 3D del segundo diseño en Inventor 2024.	24
Ilustración 2.5: Modelo 3D del tercer diseño en Inventor 2024.....	24
Ilustración 2.6: Sistema de transmisión y guiado en Inventor 2024.	29
Ilustración 2.7: Rueda dentada en Inventor 2024.....	29
Ilustración 2.8: Esfuerzos de Von Mises en el primer punto en la cremallera del eje X	32
Ilustración 2.9: Esfuerzos de Von Mises en el segundo punto en la cremallera del eje X.....	32
Ilustración 2.10: Factor de seguridad en la cremallera del eje X.	32
Ilustración 2.11: Esfuerzo de Von mises en la rueda dentada.....	33
Ilustración 2.12: Coeficiente de seguridad en la rueda dentada.....	33
Ilustración 2.13: Sistema de transmisión y guías en el eje Y.....	34
Ilustración 2.14: Esfuerzo de Von mises en el primer punto de la cremallera en el eje Y.....	36
Ilustración 2.15: Esfuerzo de Von mises en el segundo punto de la cremallera en el eje Y.....	36
Ilustración 2.16: Factor de seguridad en la cremallera en el eje Y.	37
Ilustración 2.17: Esfuerzo de Von mises en la rueda dentada.....	37
Ilustración 2.18: Factor de seguridad en la rueda dentada.	38
Ilustración 2.19: Sistema de transmisión y guía en el eje Z.....	38
Ilustración 2.20: Esfuerzo de Von mises en el tornillo sin fin.	40
Ilustración 2.21: Factor de seguridad en el tornillo sin fin.....	41
Ilustración 2.22: Esquema del diseño electrónico del pantógrafo CNC por corte plasma.....	42
Ilustración 2.23: Pantalla de inicio del Programa Mach3.	46
Ilustración 2.24: Flujograma de la prueba de concepto del funcionamiento de los motores.	47
Ilustración 2.25: Prueba de concepto en LabView.....	48
Ilustración 3.1: Diseño final del pantógrafo.....	53
Ilustración 3.2 :Vista Explotada del sistema	54
Ilustración 3.3 soporte para el motor en el Eje X.....	55
Ilustración 3.4: Esfuerzo de Von Mises.	56

Ilustración 3.5: Desplazamiento.....	56
Ilustración 3.6: Factor de seguridad.....	57
Ilustración 3.7: Soporte de elementos en el eje Z.....	58
Ilustración 3.8: Tensión de Von mises.....	59
Ilustración 3.9: Desplazamiento.....	59
Ilustración 3.10: Factor de Seguridad.....	60
Ilustración 3.11: Distribución de puertos en la tarjeta de Interfaz DB25-1205 .	62
Ilustración 3.12: Conexiones de la tarjeta de interfaz DB25-1205.	63
Ilustración 3.13: Conexiones correspondiente al Driver del eje X, Z.	64
Ilustración 3.14: Configuración de los micro interruptores para el driver del eje X, Z .	65
Ilustración 3.15: Configuración para las conexiones de los drivers de los ejes Y .	66
Ilustración 3.16: Configuración de los micro interruptores para el driver del eje Y, Z .	67
Ilustración 3.17: Configuración y conexión de los finales de carrera.....	68
Ilustración 3.18: Conexión del controlador Proma TCH Compact 150.....	69
Ilustración 3.19: Conexión del controlador THC con la estación plasma	69
Ilustración 3.20: Configuración del motor del eje X.....	72
Ilustración 3.21: Configuración del motor del eje Y.....	72
Ilustración 3.22: Configuración del motor del eje Z.	73
Ilustración 3.23: Configuración del puerto de comunicación y velocidad de los datos.....	73
Ilustración 3.24: Asignación de las señales de salida de los motores de paso.	74
Ilustración 3.25: Configuración de los finales de carrera.....	75
Ilustración 3.26: Configuración del paro de emergencia y del controlador de altura de la antorcha.	75
Ilustración 3.27: Configuración del puerto para habilitación de los motores del pantógrafo.	76
Ilustración 3.28: Habilitar la opción de siempre utilizar el control de altura de la antorcha.	76
Ilustración 3.29: Movimiento manual de los ejes del pantógrafo.	77
Ilustración 3.30: Proceso de corte en el MACH 3.....	78
Ilustración 3.31: Herramienta de corte seleccionada.....	78
Ilustración 3.32: Otras pestañas importantes del MACH 3.....	79
Ilustración 3.33: Simulación del programa de prueba de concepto.	80

Índice de tablas

Tabla 1: Códigos de direcciones para el control numérico.....	9
Tabla 2.1: Requerimientos de diseño	12
Tabla 2.2: Alternativas para la transmisión de movimiento.....	14
Tabla 2.3: Alternativas para el sistema de guiado.....	14
Tabla 2.4: Alternativas para el sistema de motores.....	15
Tabla 2.5: Alternativas para el cortador plasma.....	16
Tabla 2.6: Criterios para los diferentes elementos del pantógrafo a evaluarse.....	16
Tabla 2.7: Criterios del sistema de guiado y su ponderación.....	18
Tabla 2.8: Resultados de la matriz de decisión para el sistema de guiado.....	19
Tabla 2.9: Criterios del sistema de motores y su ponderación.....	19
Tabla 2.10: Resultados de la matriz de decisión para el sistema de motores.....	20
Tabla 2.11: Criterios del sistema de transmisión de movimiento.....	20
Tabla 2.12: Resultados de la matriz de decisión para el sistema de transmisión de movimiento.....	21
Tabla 2.13: Criterios para el cortador plasma.....	21
Tabla 2.14: Resultados de la matriz de decisión para el cortador plasma.....	22
Tabla 2.15: Criterios de materiales del sistema del engranaje del sistema de movimiento.....	26
Tabla 2.16: Resultados de la matriz de decisión para elección del material de la rueda dentada.....	26
Tabla 2.17: Criterios de materiales del sistema del engranaje del sistema de movimiento.....	27
Tabla 2.18: Resultados de la matriz de decisión para el material de la cremallera.....	28
Tabla 2.19: Criterios para la tarjeta de interfaz.....	42
Tabla 2.20: Alternativas para la tarjeta de interfaz.....	43
Tabla 2.21: Resultados de la matriz de decisión para la tarjeta de interfaz.....	43
Tabla 2.22: Variables del Pantógrafo CNC por corte plasma.....	44
Tabla 2.23: Criterios para el control de altura de la antorcha de plasma.....	49
Tabla 2.24: Alternativas para el controlador de altura de la antorcha de plasma.....	49
Tabla 2.25: Resultados de la matriz de decisión para la tarjeta de interfaz.....	50
Tabla 2.26: Lista de materiales requeridos para la modernización del pantógrafo.....	51
Tabla 3.1 Tabla de propiedades de la pieza.....	55
Tabla 3.2 Tabla de resultados de los análisis.....	57
Tabla 3.3 Tabla de propiedades de la pieza.....	58
Tabla 3.4 Tabla de resultados.....	60

Tabla 3.5: Ecuación para obtener los pasos por revolución de cada eje en el MACH 3	70
Tabla 3.6: Datos de aceleración máxima para cada eje del pantógrafo	71
Tabla 3.7 : Análisis de costos del componente mecánico	81
Tabla 3.8: Análisis de costos del componente eléctrico.....	81
Tabla 3.9: Análisis de costos total.....	82

Índice de planos

PLANO 1 Plano de fabricación de soporte para el eje X

PLANO 2 Plano de fabricación de soporte para el eje Z

Capítulo 1

1.1 Introducción

Actualmente el sector asociado a las industrias metalúrgicas y manufactureras, la precisión y eficiencia durante el proceso de corte de metal son indispensables para la productividad y desempeño del trabajo por lo cual siempre deben estar a la vanguardia con las nuevas tecnologías que el mercado puede ofrecer. A menudo se incentiva a comprar nueva maquinaria y vender aquellas que se encuentran desactualizadas, sin embargo, no todas las empresas tienen los recursos o contactos para adquirir estas nuevas tecnologías, por lo que optan en realizar reacondicionamientos o “retrofitting” a los equipos que poseen, aprovechando las tecnologías emergentes como la inteligencia artificial (IA), el internet de las cosas (IIoT), impresiones 3D, entre otras más, para igualar el rendimiento de una maquinaria nueva [1].

Aprovechar las máquinas que no se están utilizando corresponde a la manufactura sustentable debido a que conlleva beneficios tanto financieros como medioambientales mediante la maximización de recursos existentes [2] porque se reutiliza y moderniza máquinas ya existentes, evitando que los equipos viejos se conviertan en chatarra o se desechen de manera permanente, reduciendo significativamente los residuos industriales, de igual manera, se maximiza el retorno de la inversión inicial en las máquinas al extender su vida útil y funcionalidad. Otras ventajas de modernizar un equipo son; la reducción del consumo de recursos al minimizar la necesidad de realizar adquisiciones de nuevos equipos que demandan grandes gastos de recursos naturales y energía para ser fabricados, el ahorro energético dado que al implementar nuevas tecnologías más eficientes energéticamente permitirá que se reduzca el consumo de energía durante su ciclo de trabajo, la disminución de huella de carbono y fomento de la economía circular.

Las empresas metalúrgicas poseen diferentes herramientas para cortar el metal, por ejemplo; sierra intermitente, sierra de cinta continua, oxicorte, plasma, chorro de agua abrasivo, por láser, entre otros más. La elección del tipo de herramienta depende de la necesidad que se quiera cubrir, para los procesos de corte por láser se necesita un mayor tiempo de capacitación del operario para

poder manejarlo y no tiene buen acabado superficial pero lo compensa con una mayor remuneración, el corte por plasma tiene un mejor acabado superficial pero adquirirla es costoso además de presentar un fuerte nivel de ruido, el oxicorte presenta poco nivel de ruido, el costo de la herramienta y su mantenimiento es económico en comparación a las otras herramientas y su proceso de corte es rápido pero no tiene buen acabado superficial para metales con mucho espesor dado que presenta quemaduras en el acabado superficial. [3]

La necesidad de mejorar el proceso de corte para hacerlo más eficiente implica utilizar nuevas tecnologías en conjunto con un sistema de corte más eficaz y preciso, por esta razón, la mayoría de las nuevas máquinas de corte cuentan con un control numérico computarizado CNC con el fin de automatizar los procesos de corte, gestionar secuencias impuestas por el usuario, realizar correcciones de errores y ajustes en tiempo real, ser fácil de manipular mediante su interfaz de usuario, entre otras ventajas que esta tecnología nos ofrece. Un control numérico por computadora es “un sistema que permite controlar y monitorear en todo momento los movimientos y la posición de una máquina herramienta mediante la utilización de una serie de dispositivos electrónicos y mecánicos.” [4]

1.2 Descripción del Problema

En la actualidad, las empresas manufactureras y metalúrgicas tienen equipo que no se usan porque son obsoletos en comparación de nuevas tecnologías del mercado, dado que las maquinarias modernas trabajan de manera más eficiente, permitiendo así reducir los costos operativos y aumentar la velocidad de producción a cambio de una gran inversión de capital, pero existe una alternativa que permite volver a vivir a las máquinas obsoletas modificando todo su sistema, abarcando la parte mecánica, eléctrica y computacional.

Para poder transformar una máquina en desuso a una funcional es necesario conocer su estado actual, como su funcionamiento, sus dimensiones, con qué corriente trabaja, cuanto voltaje soporta, cuáles son sus sensores y actuadores, que partes componen todo su sistema entre

parámetros operacionales. Luego de haber realizado la investigación respectiva de la máquina a rediseñar se necesita investigar sobre la tecnología actual que puede ser compatible con el sistema y como poder implementarla al sistema.

El presente caso de estudio se trata de modificar un pantógrafo de oxicorte marca ESAB modelo Silhouette 1000 a un cortador de plasma CNC mediante la propuesta de un rediseño tecnológico para su implementación en el lugar de trabajo. Con el fin de cumplir con el objetivo es necesario tener en cuenta el espacio que ocupa actualmente la máquina para que las modificaciones realizadas no excedan significativamente las dimensiones de trabajo, también se debe cambiar el sistema de corte de oxicorte a uno de plasma, el cual debe ser alimentado por aire comprimido. De igual forma, se requiere encontrar actuadores adecuados para el funcionamiento del nuevo sistema de corte, así como elegir una interfaz HMI para operación y configuración del sistema CNC a implementar. Con el propósito de disminuir la necesidad de comprar un nuevo equipo y apoyar el desarrollo sostenible industrial, se tiene la iniciativa de establecer los pasos a seguir, así como los planos, materiales, diagramas y programación necesaria para realizar el cambio de un pantógrafo de oxicorte a un cortador de plasma CNC mediante el uso del diseño mecatrónico en colaboración con una empresa que garantiza soluciones de alta calidad, seguridad y eficiencia en todos sus proyectos dado su trayectoria de más de 20 años de experiencia destacándose como un referente en el ámbito de la construcción.

1.3 Justificación del problema

Una empresa de construcción posee un pantógrafo de oxicorte marca ESAB modelo Silhouette 1000 que no está operativo desde los últimos 5 años, donde es necesario una repotenciación tecnológica usando equipos comerciales disponibles en el mercado nacional. Dado que el sistema de oxicorte del pantógrafo se encuentra obsoleto y el sensor óptico no es muy preciso, se requiere modificar ambos atributos del pantógrafo para convertirlo en una cortadora plasma CNC. Cabe recalcar que el pantógrafo ocupa un espacio considerable en el taller de la

empresa, por lo cual es indispensable poner en funcionamiento de nuevo a la máquina de corte, aprovechando y reutilizando todo el equipo actual para adecuar el nuevo sistema de corte de plasma y las adecuaciones necesarias para el control computarizado.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Rediseñar un pantógrafo de oxicorte mediante la mejora del sistema de corte de oxicorte a corte por plasma CNC para la mejora de la precisión y eficiencia del equipo utilizando técnicas de automatización industrial.

1.4.2 Objetivos específicos

- Diseñar las modificaciones mecánicas del pantógrafo que permitan acoplar el cortador de plasma a la estructura y añadir la nueva parte electrónica del sistema.
- Diseñar un sistema de control que gestione de manera precisa el posicionamiento CNC del cortador de plasma.
- Desarrollar una interfaz hombre-máquina (HMI) intuitiva y eficiente para la configuración y control del cortador de plasma CNC.
- Establecer un sistema de comunicación robusto entre los subsistemas del cortador de plasma CNC para coordinar todas las operaciones y mejorar la respuesta en tiempo real del equipo.
- Simular todas las modificaciones del rediseño del pantógrafo para corroborar el correcto funcionamiento del sistema en condiciones operáticas planificadas.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Pantógrafo

Un pantógrafo es una maquina industrial empleada para tareas de corte y grabado sobre diversos materiales, posee una gran precisión y es rápida. Entre los materiales que se procesan podemos encontrar el acero estructural, acero inoxidable, cobre, aluminio.

Existen diversos tipos de pantógrafos que utilizan o combinan tecnologías para poder realizar el corte tal y como el plasma, el láser y el oxicorte, adicionalmente incorporan distintos métodos de control, entre los más comunes el pantógrafo CNC el cual es sumamente utilizado en la industria debido a la efectividad y precisión que brinda al trabajar mediante un mando programable [5].

Pantógrafo de oxicorte: es el nombre utilizado para denominar a un dispositivo articulado que utiliza una antorcha de oxicorte para realizar el corte de materiales tanto metálicos como no metálicos de una manera precisa y muy eficiente, esta antorcha se ajusta a la forma de la pieza a cortar [6]. El oxicorte es un proceso en el cual mediante la combinación de gas y oxígeno se crea una llama de alta temperatura, utilizada para calentar el material y a su vez realizar el corte del metal por medio de una corriente de oxígeno, entre las piezas que comúnmente se cortan tenemos chapas metálicas, barras de acero al carbón de baja aleación y más elementos ferrosos [7].

En el proceso de corte con el oxicorte se utilizan diferentes tipos de gases, sin embargo, independientemente del gas utilizado el oxicorte siempre va a requerir oxígeno puro con un mínimo de 99,5% de pureza para poder generar el corte en el metal, entre los más utilizados se pueden encontrar el gas propano, el cual entre sus beneficios destacan la potencia, seguridad al momento de trabajar con el mismo. De la misma manera destaca el gas natural, adicionando la economía y la facilidad con la que se lo encuentra [8].

Pantógrafo CNC: Este equipo CNC (Control Numérico Computarizado) se centra en el corte automatizado, pues utiliza un software para programar y controlar el movimiento de la herramienta utilizada para cortar, uno de los beneficios más importantes es la alta precisión de

corte que este presenta y la variedad de materiales que puede cortar [9]. Este equipo es capaz de realizar el corte con plasma, pues una antorcha de plasma realiza el corte, debido a que es CNC presenta una alta precisión y puede ser utilizado en diferentes materiales y espesores [10].

Ilustración 1.1

Pantógrafo CNC de Corte Plasma [9]



Este proyecto refiere al corte de un pantógrafo CNC por plasma, se mencionan y describen principios, programas que forman parte de este proyecto

1.5.2 Modelado en 3D

El modelado 3D es el proceso de generar una representación digital tridimensional de un objeto o estructura utilizando software especializado. Esto se logra a través de algoritmos y técnicas de modelado que permiten crear una imagen digital en tres dimensiones. De esta manera, se puede visualizar y manipular el objeto en un entorno virtual. Ofrece varias ventajas, como la visualización detallada del diseño desde diferentes ángulos, el prototipado rápido utilizando impresoras 3D, la capacidad de realizar simulaciones y análisis virtuales, la optimización de recursos al detectar y corregir errores antes de la producción, y la generación de documentación técnica precisa [11].

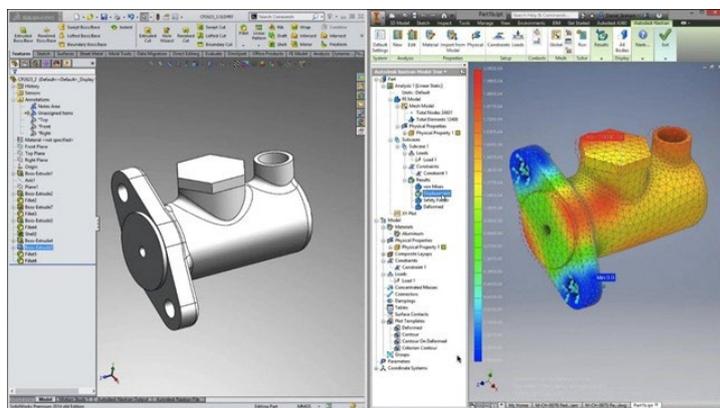
1.5.3 Inventor Autodesk

Es un software CAD (diseño asistido por computadora) 3D que proporciona una herramienta de diseño mecánico y simulación, incluye herramientas avanzadas de modelado. Puede modelar, simular y visualizar objetos 3D de manera precisa lo que hace que sea una herramienta fundamental en la industria de manufactura e ingeniería. Entre sus herramientas esta

la capacidad de elaborar dibujos en DWG lo que nos permite obtener planos en 2D a partir del isométrico [12].

Ilustración 1.2

Inventor Autodesk



1.5.4 Interfaz HMI

La interfaz HMI (Human Machine Interface) conecta a una persona con una máquina, sistema o dispositivo mediante un panel de operaciones que permite la comunicación hombre – máquina. Son utilizados en procesos industriales para controlar y monitorear máquinas de producción con su información en tiempo real. Actualmente se utilizan pantallas táctiles para una mayor accesibilidad [13].

Ilustración 1.3

Interfaz HMI



1.5.5 Programación CNC

En esta programación se hace referencia al proceso de elaboración de instrucciones o códigos para controlar las máquinas de control numérico computarizado, estos comandos están escritos en un lenguaje de programación llamado código G, que indica los movimientos o acciones que realizará la máquina CNC [14].

Estos comandos se representan mediante una combinación de números y letras, teniendo así una función específica indicando cortes, posicionamiento por coordenadas, movimientos circulares. Entre las instrucciones más comunes tenemos G00 para movimiento rápido. G01 para movimiento lineal a velocidad, G02 y G03 para movimientos circulares en sentido horario y antihorario, G17 G18 G19 para selección del plano de trabajo XY, XZ, YZ. Por ejemplo, para mover la herramienta a una posición específica, podría ser G00 X_ Y_ Z colocando las coordenadas a las que se desea mover [15]

Tabla 1

Códigos de direcciones para el control numérico.

Comando	Descripción
N	Número de secuencia o bloque
G	Funciones de movimiento
X	Comando para el eje X
Y	Comando para el eje Y
Z	Comando para el eje Z
R	Radio desde el centro previamente definido
I	Desplazamiento del centro del arco del eje X
J	Desplazamiento del centro del arco del eje Y
K	Desplazamiento del centro del arco del eje Z
F	Velocidad de corte
S	Velocidad de giro del husillo
T	Número de herramienta
M	Funciones preparatorias
A	Dimensiones angulares respecto al eje X
B	Dimensiones angulares respecto al eje Y
C	Dimensiones angulares respecto al eje Z
U	Dimensiones de movimiento secundario paralelo al eje X
V	Dimensiones de movimiento secundario paralelo al eje Y
W	Dimensiones de movimiento secundario paralelo al eje Z
D	Diámetro de la herramienta de corte

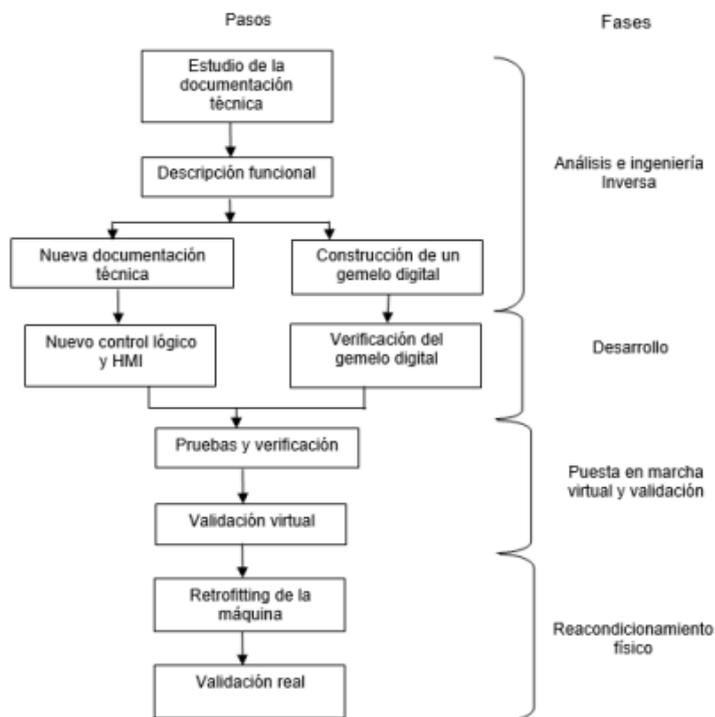
Capítulo 2

2. Metodología.

En el capítulo presente se expone los pasos que se suscitaron para la elaboración de un diseño que permita la modernización de un pantógrafo de oxicorte a un cortador de plasma CNC. Para ello se hace uso del proceso que se observa en la “ilustración 2.1”, en donde el alcance que abarcará el proyecto de estudio es hasta la fase de puesta en marcha virtual y validación.

Ilustración 2.1

Metodología del proceso de retrofitting [1]



Dado que el trabajo de investigación solo abarca hasta las simulaciones, se deberán realizar las fases de análisis e ingeniería inversa siguiendo los pasos estipulados en la “ilustración 2.1” como el estudio del manual del pantógrafo de Oxicorte, con videos e información del funcionamiento, luego de haber reconocido como es su funcionamiento y que partes son las que se requieren modificar, crear una nueva documentación técnica. La fase de desarrollo nos centraremos en la creación del controlador de posición e implementación de un HMI para el control del pantógrafo para finalmente concluir en la fase de puesta en marcha virtual y validación

mediante las simulaciones respectivas en los programas y softwares que ayuden a visualizar las modificaciones realizadas.

2.1 Requerimientos de diseño

Al comenzar el proceso de diseño de las posibles soluciones es necesario conocer las especificaciones que tiene el pantógrafo de oxicorte mediante el manual proporcionado por la empresa ESAB y las modificaciones que el cliente requiere para el producto final.

Tabla 2.1

Requerimientos de diseño

Espesor de corte	El cortador de plasma debe ser capaz de cortar hasta 22 mm de espesor de material metálico.
Mantenimiento	Que tenga un sencillo desmontaje de las piezas. Disponibilidad de piezas de recambio.
Uso	Horas de operación moderadas, aproximadamente 2 veces por semana.
Automatizado	Que todas las operaciones de corte sean controladas por CNC mediante programación CAM.
Movimiento	Tener control de posicionamiento y velocidad en los ejes x, y, z.
Acabado	Tener una calidad de corte aceptable con un grado de precisión excelente que se encuentre entre una tolerancia de ± 2.5 a ± 5 mm para espesores de 4 a 25 mm.

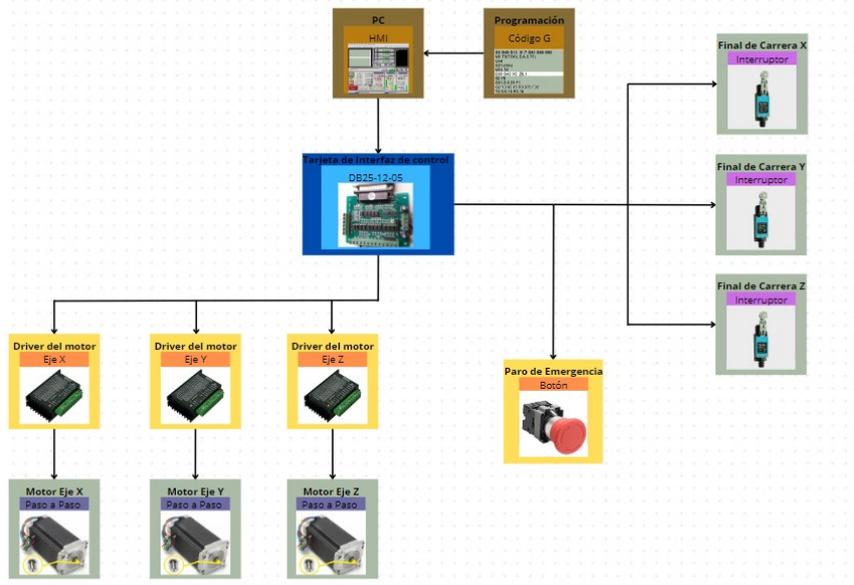
2.1.1 Diseño conceptual.

El propósito del presente proyecto es el rediseño de un pantógrafo de oxicorte a un pantógrafo CNC por corte plasma; teniendo en consideración las distintas partes que componen a un pantógrafo como su sistema de rieles, sistema de guiado, los motores, el cortador plasma, entre otros elementos más, se decidió desarrollar un diseño conceptual que sirva como referencia al funcionamiento que se desea alcanzar una vez realizado la modernización de la máquina. El diseño conceptual parte del funcionamiento de un cortador CNC por corte plasma casero realizado desde el principio [20], donde se hace uso de 3 motores, uno para cada eje de la máquina, asimismo la implementación de drivers para los motores, finales de carreras para cada eje de movimiento y

otros componentes electrónicos que permitan el correcto funcionamiento del pantógrafo a través del código G escrito por el operador en control del pantógrafo por corte de plasma mostrado en la “ilustración 2.2”.

Ilustración 2.2

Diseño conceptual del funcionamiento del pantógrafo CNC por corte plasma



2.2 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN.

En esta sección se analizó diferentes alternativas para realizar las modificaciones del pantógrafo de oxicrote, con la finalidad de lograr un diseño eficiente de cortadora de plasma CNC. Para esta etapa se propusieron diferentes alternativas de solución para las partes que conformarán la mesa de corte, en donde cada una de ellas cuenta con especificaciones y requerimientos descritos a continuación.

2.2.1 Transmisión de movimiento.

Para ser capaces de convertir el movimiento rotativo de un motor en movimiento lineal, esto es necesario para ser capaces de mover el cortador de plasma en los planos x, y, z. Las alternativas de mecanismos encontradas fueron las siguientes:

Tabla 2.2

Alternativas para la transmisión de movimiento

Opción 1	Ilustración	Opción 2	Ilustración	Opción 3	Ilustración
Cremallera- Piñón		Tornillo- Tuerca de bolas		Correas Dentadas	
	[16]		[17]		[18]

2.2.2 Sistema de guiado.

El sistema de guiado es el encargado de controlar y dirigir los movimientos que tienen los ejes del pantógrafo para que los ejes sigan un trayecto específico y mantengan una relación geométrica delimitado por su espacio de trabajo, es decir, guían el movimiento de las partes móviles de la máquina, asegurando precisión y exactitud en el proceso de corte. Para el sistema de guiado se pensaron en las siguientes opciones:

Tabla 2.3

Alternativas para el sistema de guiado

Opción 1	Ilustración	Opción 2	Ilustración	Opción 3	Ilustración
Guías Lineales de Riel y Carro		Guías Lineales de Rodillos		Guías Lineales de Bolas	
	[16]		[17]		[17]

2.2.3 Sistema de motores.

Con el propósito de movilizar los ejes x, y, z en todo el espacio de trabajo de corte se necesita un elemento que sea capaz de generar el movimiento mediante la alimentación que se le proporciona al pantógrafo, en el mercado existen diferentes opciones que nos brindan potencia y precisión, características fundamentales para esta aplicación de modernización de un pantógrafo. Para el sistema de motores se pensaron en las siguientes opciones:

Tabla 2.4

Alternativas para el sistema de motores

Opción 1	Ilustración	Opción 2	Ilustración	Opción 3	Ilustración
Motor Brushless DC (BLDC)		Motor Paso a Paso Híbrido		Servomotor AC Síncronos	
	[17]		[17]		[19]

2.2.4 Cortador plasma.

Debido a que se requiere que el método de corte del pantógrafo sea modificado, es necesario visualizar opciones de cortadores plasmas que se adapten a las necesidades del cliente, para esto se vieron diferentes opciones del mercado, siendo las más destacadas las siguientes:

Tabla 2.5

Alternativas para el cortador plasma

Opción 1	Ilustración	Opción 2	Ilustración	Opción 3	Ilustración
Hynade- CUT80 NP		Lotos- LTP7500 CNC		Thermal Dynamics (ESAB) Cutmaster 82	
	[17]		[17]		[17]

2.3 Criterios de valoración.

Luego de haber realizado la segmentación de las posibles soluciones para el pantógrafo de oxicorte, el siguiente paso fue de establecer pautas que permitan elegir la posible solución a implementar en las siguientes fases del proyecto de titulación.

Tabla 2.6

Criterios para los diferentes elementos del pantógrafo a evaluarse

Criterio	Elementos de la mesa del pantógrafo.			
	Transmisión de movimiento	Sistema de guiado	Sistema de motores	Cortador Plasma
Costo: El precio de los materiales para las modificaciones del pantógrafo consta de las características y rendimientos del elemento a implementar.	Aplica	Aplica	Aplica	Aplica
Precisión: El desempeño de los elementos del pantógrafo para realizar cortes con exactitud y	Aplica	No Aplica	Aplica	No Aplica

consistencia a lo largo de operaciones repetitivas.

Acabado:

La capacidad que los cortes realizados por plasma tengan un acabado superficial excelente, sin presentar quemaduras en los bordes o daños en la superficie de la pieza cortada.

No Aplica No Aplica No Aplica Aplica

Mantenimiento:

La facilidad y costo de mantener el equipo en funcionamiento además de la viabilidad de conseguir repuestos en caso de requerirlo.

Aplica Aplica Aplica Aplica

Disponibilidad operativa:

El tiempo de funcionamiento efectivo del pantógrafo durante una jornada laboral.

No Aplica No Aplica Aplica Aplica

Torque elevado:

Se necesita mover los ejes del pantógrafo x, y, z a lo largo del espacio de trabajo, provocando que se necesite un gran torque a distintas velocidades para brindar un producto final adecuado.

No Aplica No Aplica Aplica No Aplica

Potencia de corte:

Ser capaz de cortar espesores de 22 mm de material metálico.

No Aplica No Aplica No Aplica Aplica

Movimiento Fluido:

La fricción entre los componentes debe ser minimizada mediante la selección adecuada de guías permitiendo reducir significativamente el rozamiento.	Aplica	Aplica	No Aplica	No Aplica
Facilidad de montaje y desmontaje:				
Los mecanismos de movimiento de cada eje deben ser simples de ensamblar y en caso de ser requerido, también de desmontar.	Aplica	Aplica	No Aplica	No Aplica

La siguiente acción que se realizó fue la asignación de los pesos relativos dependiendo de la importancia del criterio conforme a los posibles elementos que conformarán la solución final.

Para el sistema de guiado:

Costo = Mantenimiento > Movimiento Fluido > Facilidad de montaje y desmontaje

Tabla 2.7

Criterios del sistema de guiado y su ponderación

Criterio	Peso $\sum+1$	Ponderación
Costo	3.5	35%
Mantenimiento	3.5	35%
Movimiento Fluido	2	20%
Facilidad de montaje y desmontaje	1	10%
Suma	10	100%

Luego de asignarle los respectivos pesos a los criterios para el sistema de guiado se procedió a calificar sobre 5 a las diferentes alternativas, dando como resultado los obtenidos en la “Tabla 2.8”, considerando que las guías lineales de bolas son la mejor opción para conformar el sistema guía del pantógrafo.

Tabla 2.8*Resultados de la matriz de decisión para el sistema de guiado*

Alternativa	Costo	Mantenimiento	Movimiento	Montaje	Σ	Prioridad
Guías Lineales						
de Riel y Carro	1.40 (4)	1.05 (3)	0.80 (4)	0.30 (3)	3.55	3
Guías Lineales						
de Rodillos	1.05 (3)	1.40 (4)	1.00 (5)	0.40 (4)	3.85	2
Guías Lineales						
de Bolas	1.75 (5)	1.05 (3)	0.80 (4)	0.50 (5)	4.10	1

Para el sistema de motores:

Precisión = Torque Elevado > Costo = Mantenimiento > Disponibilidad Operativa

Tabla 2.9*Criterios del sistema de motores y su ponderación*

Criterio	Peso $\Sigma+1$	Ponderación
Precisión	2.5	25%
Torque Elevado	2.5	25%
Costo	2	20%
Mantenimiento	2	20%
Disponibilidad Operativa	1	10%
Suma	10	100%

Después de haber realizado la tabla con los pesos respectivos a los criterios referentes al sistema de motores, se procedió a ponderar sobre 5 a las alternativas propuestas, obteniendo los resultados mostrados en la “Tabla 2.10”, la mejor opción para los motores entre los 3 ejes es de

tipo de motor paso a paso híbrido, esto se debe al factor de su alto torque a altas velocidades y al precio que estos pueden encontrarse.

Tabla 2.10

Resultados de la matriz de decisión para el sistema de motores

Alternativa	Precisión	Torque	Costo	Mantenimiento	Operatividad	Σ	Prioridad
Motor							
Brushless	1.00 (4)	1.00 (4)	0.60	0.60 (3)	0.4 (4)	3.60	3
DC (BLDC)			(3)				
Motor Paso							
a Paso	1.00 (4)	1.25 (5)	1.00	0.80 (4)	0.4 (4)	4.45	1
Híbrido			(5)				
Servomotor							
AC	1.25 (5)	1.00 (4)	0.60	0.80 (4)	0.3 (3)	3.95	2
Síncronos			(3)				

Para la transmisión de movimiento:

Costo = Precisión > Movimiento Fluido > Facilidad de montaje y desmontaje = Mantenimiento

Tabla 2.11

Criterios del sistema de transmisión de movimiento

Criterio	Peso $\Sigma+1$	Ponderación
Costo	3	30%
Precisión	3	30%
Movimiento Fluido	2	20%
Facilidad de montaje y desmontaje	1	10%
Mantenimiento	1	10%
Suma	10	100%

Seguido de haber construido la tabla con las ponderaciones de los criterios del sistema de transmisión de movimiento, se evaluó cada uno para otorgar una calificación a las 3 opciones mencionadas anteriormente, dando como resultado que el tornillo-tuerca de bolas sea la mejor opción para la transmisión de movimiento como se muestra en la “Tabla 2.12”.

Se planea utilizar el mecanismo de cremallera- Piñón en los 3 ejes para mejorar la precisión y movilidad del sistema actual.

Tabla 2.12

Resultados de la matriz de decisión para el sistema de transmisión de movimiento

Alternativa	Costo	Precisión	Fluidez	Montaje	Mantenimiento	Σ	Prioridad
Cremallera-							
Piñón	1.2 (4)	1.2 (4)	1.0 (5)	0.4 (4)	0.3 (3)	4.10	2
Tornillo-							
Tuerca de bolas	1.2 (4)	1.5 (5)	0.8 (4)	0.4 (4)	0.4 (4)	4.30	1
Correas							
Dentadas	1.5 (5)	0.9 (3)	0.6 (3)	0.4 (4)	0.5 (5)	3.90	3

Para el cortador plasma:

Costo = Acabado = Potencia de corte > Mantenimiento > Disponibilidad operativa

Tabla 2.13

Criterios para el cortador plasma

Criterio	Peso $\Sigma+1$	Ponderación
Costo	2.5	25%
Acabado	2.5	25%
Potencia de corte	2.5	25%
Mantenimiento	1.5	15%

Disponibilidad Operativa	1	10%
Suma	10	100%

Concluido con la asignación de los pesos para los criterios del cortador plasma, se procedió a evaluar cada una de las opciones para obtener el más adecuado al proyecto resultando en lo que se puede apreciar en la “Tabla 2.14”, donde la mejor opción teniendo en cuenta calidad-precio es el cortador Lotos-LTP7500 CNC.

Tabla 2.14

Resultados de la matriz de decisión para el cortador plasma

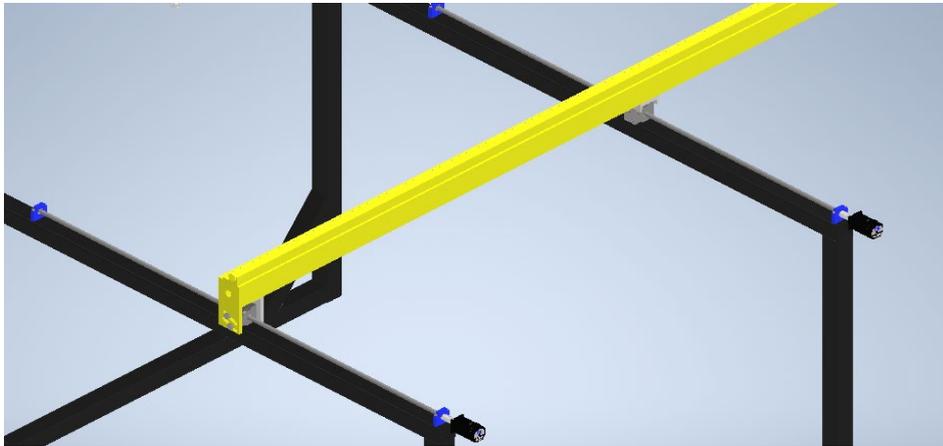
Alternativa	Costo	Acabado	Corte	Mantenimiento	Operativo	Σ	Prioridad
Hynade-	1.25	1.00					
CUT80 NP	(5)	(4)	1.00 (4)	0.45 (3)	0.30 (3)	4.0	2
Lotos-							
LTP7500	1.00	1.25 (5)	1.25 (5)	0.60 (4)	0.50 (5)	4.6	1
CNC	(4)						
Thermal							
Dynamics							
(ESAB)	0.50	1.25 (5)	1.25 (5)	0.60 (4)	0.40 (4)	4.0	2
Cutmaster	(2)						

2.4 Prototipos de diseño mecánico.

Diseño I

Ilustración 2.3

Modelo 3D del primer diseño en Inventor 2024



Inicialmente se eligió el tornillo sin fin como sistema de movimiento tanto para el eje x como para el Y, constando de dos mecanismos de tornillos sin fin exclusivamente para el eje X.

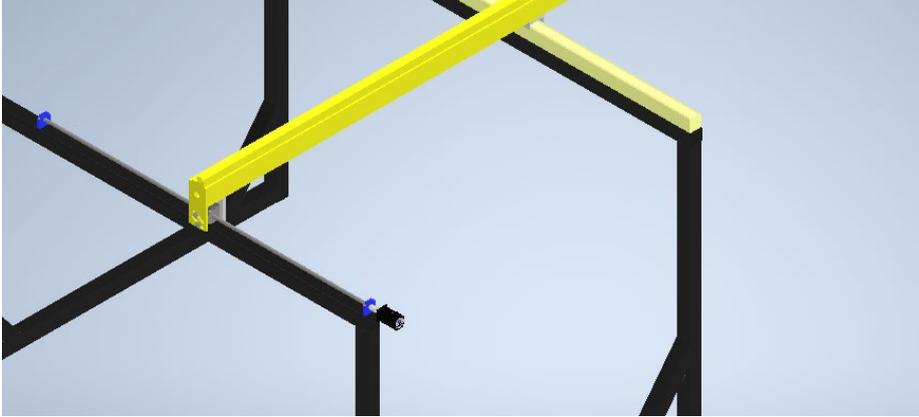
La elección se dio debido a su capacidad excepcional para posicionar con precisión coordenadas específicas. Este mecanismo es reconocido por su habilidad para realizar movimientos suaves y exactos, características ideales para aplicaciones que demandan alta precisión. Sin embargo, el elevado costo asociado con la fabricación y mantenimiento de sistemas basados en tornillo sin fin, asociado con la longitud que deberían llevar los mismos, y el gasto adicional en otro motor junto con los drivers para su control fueron un factor decisivo en la elección final.

A pesar de que este sistema iba a tener un poder considerable para el movimiento se consideraron otras opciones de movimiento más económicas y adecuadas para el presupuesto disponible como alternativas viables para el proyecto en cuestión.

Diseño II

Ilustración 2.4

Modelo 3D del segundo diseño en Inventor 2024

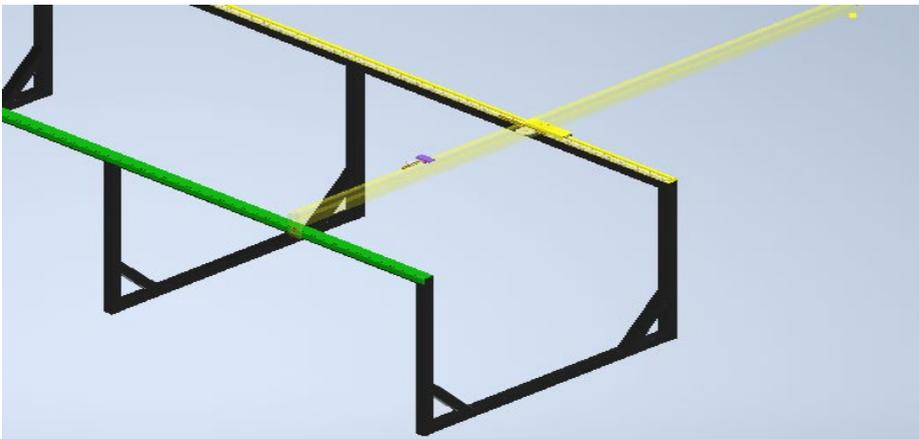


Para optimizar el diseño, se decidió prescindir de uno de los tornillos sin fin en el eje x, conservando el tornillo sin fin en el eje Y. Como complemento práctico, se incorporó un sistema de guía que incluía una barra con dos ruedas pequeñas para facilitar su desplazamiento. A pesar de estas mejoras en la funcionalidad, el costo y el mantenimiento asociados seguían siendo prohibitivamente altos para el alcance del proyecto.

Diseño III

Ilustración 2.5

Modelo 3D del tercer diseño en Inventor 2024



Se eligió emplear un sistema de piñón-cremallera para los movimientos en los ejes X y Y de la máquina debido a su costo accesible y su mantenimiento sencillo. En el eje X, el sistema incluye piñón-cremallera y guías con ruedas para el desplazamiento, mientras que en el eje Y, el mecanismo es similar, pero con una longitud reducida. Esta configuración garantiza un movimiento estable y preciso en ambos ejes, aspectos fundamentales para el rendimiento óptimo de la máquina.

2.5 SISTEMA DE MOVIMIENTO Y GUÍAS

Los sistemas seleccionados para los movimientos en cada eje consisten en: eje X: Cremallera y rueda dentada, guiada con ruedas de guía la cual es responsable de realizar el movimiento a lo largo de la mesa de trabajo.

Eje Y: cremallera y rueda dentada guiada con ruedas de guía, misma que lleva la antorcha de lado a lado de manera transversal en la plancha.

Eje Z: guiada con un sistema de tornillo sin fin

Para los desplazamientos en los ejes X, Y se considera la velocidad de 130 mm/s debido a que esta velocidad cubre cortes en espesores de hasta 35 mm en aceros, la velocidad y la precisión en estos ejes es esencial, mientras que para el eje Z nos enfocamos más en la posición.

Utilizando estos sistemas de transmisión se logró seleccionar los motores con las mejores características que a su vez fueron los más económicos para este proyecto.

2.5.1 Elección de materiales

Elección de materiales para la rueda dentada

Facilidad de maquinado > Costo > Resistencia a la Tracción = Resistencia al desgaste = peso > Dureza.

Tabla 2.15*Criterios de materiales del sistema del engranaje del sistema de movimiento*

Criterio	Peso $\Sigma+1$	Ponderación
Facilidad de maquinado	2.5	25%
Costo	2	20%
Resistencia a la tracción	1.5	15%
Resistencia al desgaste	1.5	15%
Peso	1.5	15%
Dureza	1	10%
Suma	10	100%

Concluido con la asignación de los pesos para los criterios de asignación de material , se procedió a evaluar cada una de las opciones para obtener el más adecuado al proyecto resultando en lo que se puede apreciar en la “Tabla 2.16”, donde la primera opción es el aluminio 7075 debido a que tiene una buena resistencia a la tracción y al desgaste, pero su costo es muy elevado por lo que se seleccionó el hierro gris ASTM A48 el cual mantiene la resistencia a la tracción y al desgaste y su costo es relativamente bajo en comparación a la primera opción.

Tabla 2.16*Resultados de la matriz de decisión para elección del material de la rueda dentada*

Criterio / material	Hierro gris ASTM A48	Acero al carbono 1045	Aleación de aluminio 7075
Resistencia a la tracción	0.45 (3)	0.25 (5)	1.0 (4)
Dureza	0.3 (3)	0.4 (4)	0.2 (2)

Resistencia al	0.3 (2)	0.6 (4)	0.45 (3)
Desgaste			
Costo	0.8 (4)	0.6 (3)	0.4 (2)
Peso	0.45 (3)	0.6 (4)	0.75 (5)
Facilidad de	0.5 (2)	0.75 (3)	1.25 (5)
maquinado			
Σ	2.80	3.2	4.05
Prioridad	3	2	1

Elección de materiales para la cremallera

Resistencia Mecánica > Dureza = Facilidad de fabricación > Costo > Peso

Tabla 2.17

Criterios de materiales del sistema del engranaje del sistema de movimiento

Criterio	Peso $\Sigma+1$	Ponderación
Resistencia Mecánica	3.5	35%
Dureza	2	20%
Facilidad de fabricación	2	20%
Costo	1.5	15%
Peso	1	10%
Suma	10	100%

Concluido con la asignación de los pesos para los criterios de asignación de material, se procedió a evaluar cada una de las opciones para obtener el más adecuado al proyecto resultando en lo que se puede apreciar en la “Tabla 2.18”, donde el acero AISI 1045 emerge como la elección más favorable para la aplicación de la cremallera. Este material obtuvo la puntuación más alta en

varios criterios clave como resistencia mecánica, dureza y facilidad de fabricación. En comparación con el acero inoxidable 316 y la aleación de aluminio 7075, el AISI 1045 demostró ser superior en resistencia mecánica y dureza, características cruciales para aplicaciones que requieren resistencia y durabilidad

Tabla 2.18

Resultados de la matriz de decisión para el material de la cremallera

Criterio / material	Acero AISI 1045	Acero Inoxidable 316	Aleación de aluminio 7075
Resistencia Mecánica	1.75 (5)	1.4 (4)	1.05 (3)
Dureza	1 (5)	0.6 (3)	0.4 (2)
Costo	0.45 (3)	0.3 (2)	0.6 (4)
Peso	0.3 (3)	0.4 (4)	0.5 (5)
Facilidad de fabricación	0.8 (4)	0.6 (3)	1 (5)
Σ	4.3	3.32	3.55
Prioridad	1	3	2

2.5.2 Sistema de movimiento en el eje X

Traslada la estructura de soporte y demás mecanismos, como se muestra en la ilustración 2.6, el peso de estas partes es de 63 kg y el material definido para los elementos 1,2 y 3 es el siguiente:

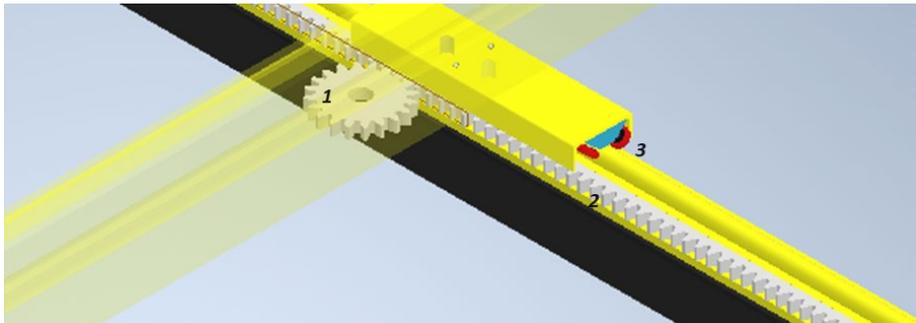
Rueda dentada (1): paso Diametral= 5. Ángulo de presión= 20°, Número de dientes= 20, material Hierro Gris ASTM48 con resistencia a la tracción de 610 MPa y resistencia a la compresión de 430 MPa.

Cremallera (2): paso diametral =5. Ángulo de presión = 20° , Material Acero AISI 1045, Resistencia última de 565 MPa y resistencia a la fluencia de 310 MPa, Longitud de 3.80 metros.

Ruedas de guías (3): Bronce SAE 65, Resistencia última 305 MPa y resistencia a la fluencia 150 MPa.

Ilustración 2.6

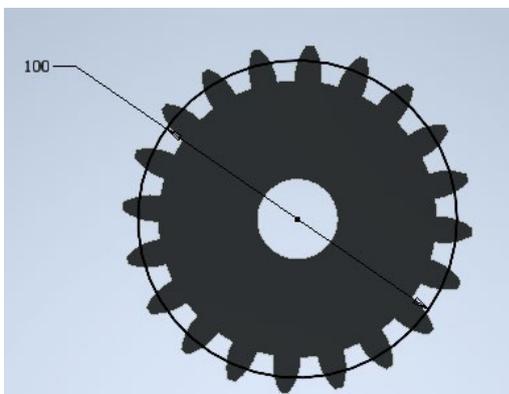
Sistema de transmisión y guiado en Inventor 2024



Como se puede apreciar en la “ilustración 2.6”, se realizó el ensamble del sistema de transmisión y guiado del eje X, donde se observa el sistema cremallera-piñón que será el encargado de mover el eje Y a lo largo del eje X, asimismo se implementa unas ruedas guías para un movimiento más fluido y preciso del sistema de movimiento en el eje X.

Ilustración 2.7

Rueda dentada en Inventor 2024



En la “ilustración 2.7” se observa de mejor manera el piñón que será utilizado en la transmisión de movimiento del eje X donde, el diámetro de la circunferencia primitiva es de 100 milímetros o 10 centímetros, esta medida es relevante dado que la línea visible de la circunferencia

en la imagen muestra el punto de contacto entre el engrane y la cremallera, además de ser utilizada para los cálculos de relación de transmisión.

2.5.2.1 Cálculo para la selección del motor

$$\text{Desplazamiento lineal } X = 3800 \text{ mm}$$

$$\text{Diámetro de paso} = 100 \text{ mm}$$

$$\text{Desplazamiento angular} = \theta = \frac{2X}{dp} \quad (2.1)$$

$$\frac{2 * 3800}{100} = 76 \text{ rad}$$

$$\text{Velocidad lineal} = v = 130 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$\text{Velocidad angular} = \omega = \frac{v}{\frac{dp}{2}} \quad (2.2)$$

$$\frac{130}{\frac{100}{2}} = 2.60 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\text{Aceleración angular} = \frac{\omega^2}{2\theta} \quad (2.3)$$

$$\frac{2.6^2}{2 * 76} = 0.05 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Torque requerido} = \frac{\text{Fuerza} * \text{radio del piñón} * \text{coeficiente de fricción}}{\text{eficiencia}} \quad (2.4)$$

$$\frac{63 \text{ kg} * 9.8 \text{ N} * 0.05 * 0.1}{0.98} = 3.03 \text{ Nm}$$

$$\text{Inercia Total} = \text{inercia del pantógrafo} + \text{inercia de la carga} \quad (2.5)$$

$$\text{Inercia Total} = 103.01 \text{ kg. m}^2 + \text{inercia de la carga}$$

$$\text{Inercia Total} = 103.01 \text{ kg. m}^2$$

$$\text{Torque de aceleración} = \text{inercia total} * \text{aceleración angular} \quad (2.6)$$

$$\text{Torque de aceleración} = 103.01 \text{ kg. m}^2 * 0.05 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$\mathbf{Torque\ de\ aceleraci3n = 5.15\ Nm}$$

$$Torque\ fricci3n = Fuerza\ de\ Fricci3n * Radio\ del\ pi3n3n \quad (2.7)$$

$$Torque\ fricci3n = k * Fuerza\ de\ carga * 0.05\ m$$

$$Torque\ fricci3n = 0.1 * (63\ kg * 9.8\ N) * 0.05\ m$$

$$\mathbf{Torque\ fricci3n = 3.1\ Nm}$$

$$Torque\ De\ arranque = Torque\ de\ aceleraci3n + Torque\ de\ fricci3n \quad (2.8)$$

$$Torque\ De\ arranque = 5.15\ Nm + 3.1\ Nm$$

$$\mathbf{Torque\ De\ arranque = 8.25\ Nm}$$

Por lo que se eligi3 el motor **NEMA 34 DE PASO HIBRIDO Modelo 86HS9860A4J**, el cual tiene un torque nominal de 6.5 Nm y un torque pico de 9.5 Nm, siendo ambos superiores al torque de arranque necesario para empezar la operaci3n, este torque es regulable, este motor fue el que m3s se acerc3 a nuestras necesidades, teniendo disponibilidad inmediata en el pa3s.

2.5.2.2 An3lisis de esfuerzos en la cremallera.

El sistema de cremallera esta sujetado por pernos, Se realiz3 el an3lisis de tensi3n a unos cent3metros del inicio de la cremallera debido a que este es el punto de inicio del movimiento, aqu3 es donde se realiza el mayor esfuerzo cuando el pant3grafo empieza a funcionar a moverse, se realiz3 un segundo an3lisis en la mitad del recorrido.

Analizando los puntos tomados podemos notar que el esfuerzo no supera la resistencia del material por lo que va a funcionar correctamente, adicionalmente podemos observar los coeficientes de seguridad los cuales nos brindan una certeza durante el an3lisis de este proceso.

Ilustración 2.8

Esfuerzos de Von Mises en el primer punto en la cremallera del eje X

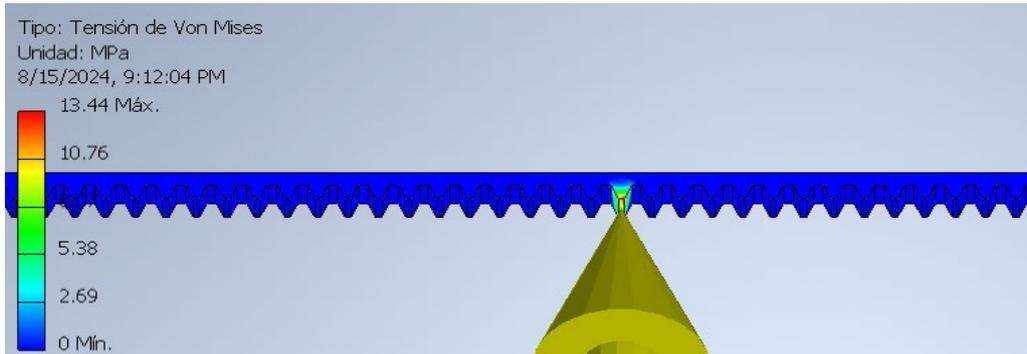


Ilustración 2.9

Esfuerzos de Von Mises en el segundo punto en la cremallera del eje X

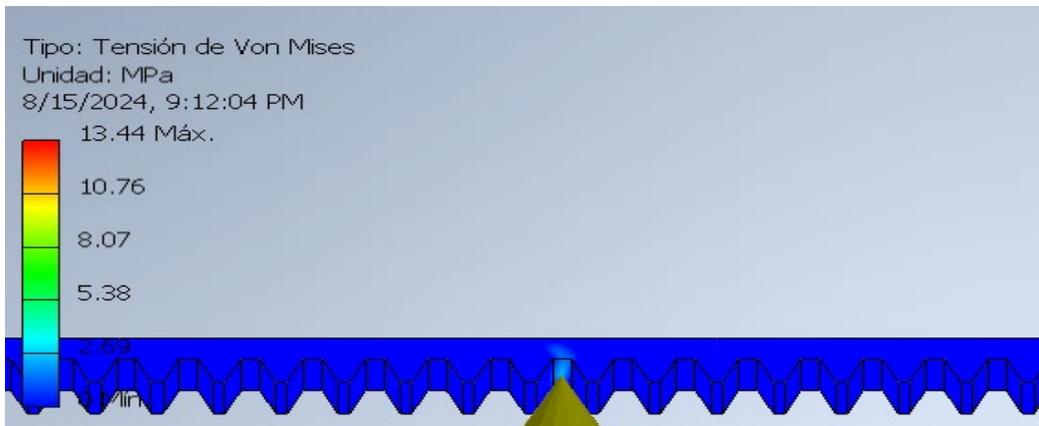
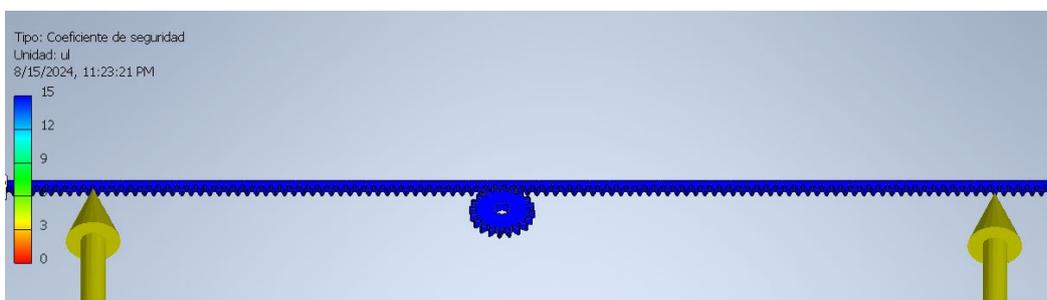


Ilustración 2.10

Factor de seguridad en la cremallera del eje X



En las ilustraciones 2.8 y 2.9 se realizó el análisis de tensión en distintas posiciones en la cremallera. El análisis incluyó el cálculo de los esfuerzos equivalentes y su comparación con el límite de fluencia del material seleccionado; mientras que en la “ilustración 2.10” se determinó el factor de seguridad, que actúa como un indicador adicional de la confiabilidad del diseño. Un

factor de seguridad superior a uno indica que el material puede soportar las cargas sin experimentar deformaciones permanentes o fallas. Los resultados revelaron que los esfuerzos máximos se mantienen dentro de los límites permisibles del material, lo que indica un rendimiento adecuado en las condiciones operativas previstas.

2.5.2.3 Análisis de esfuerzos en la rueda dentada

En la rueda dentada se aplicaron las mismas fuerzas que fueron aplicadas a la cremallera obteniendo los siguientes resultados en esfuerzo y factor de seguridad.

Ilustración 2.11

Esfuerzo de Von Mises en la rueda dentada

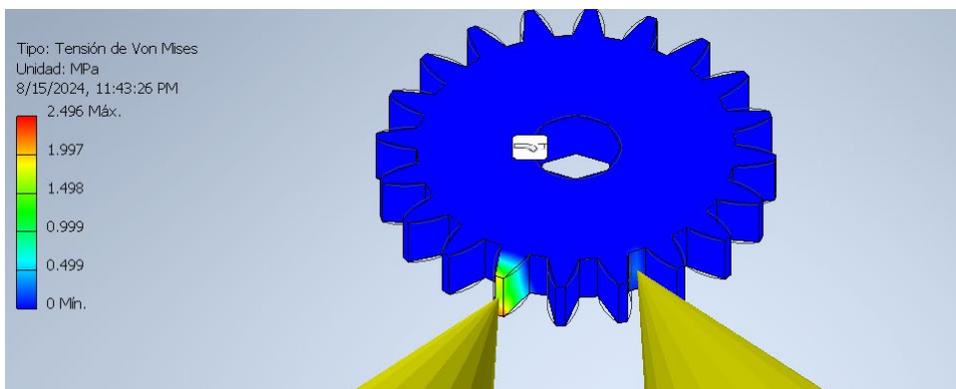
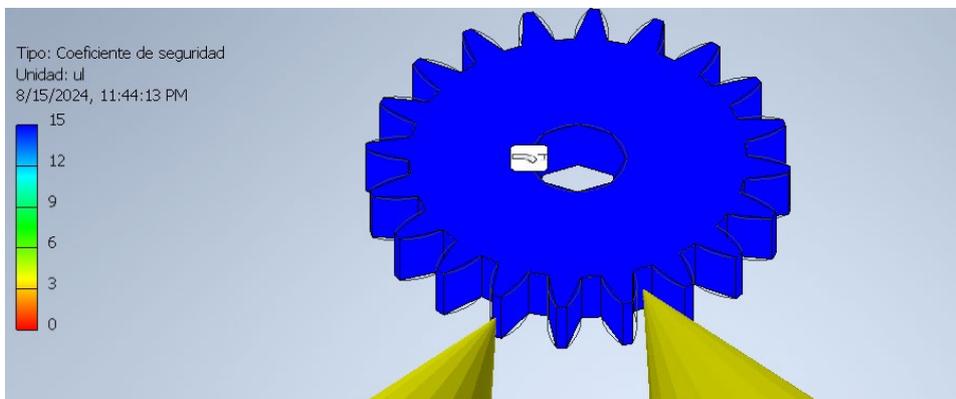


Ilustración 2.12

Coefficiente de seguridad en la rueda dentada



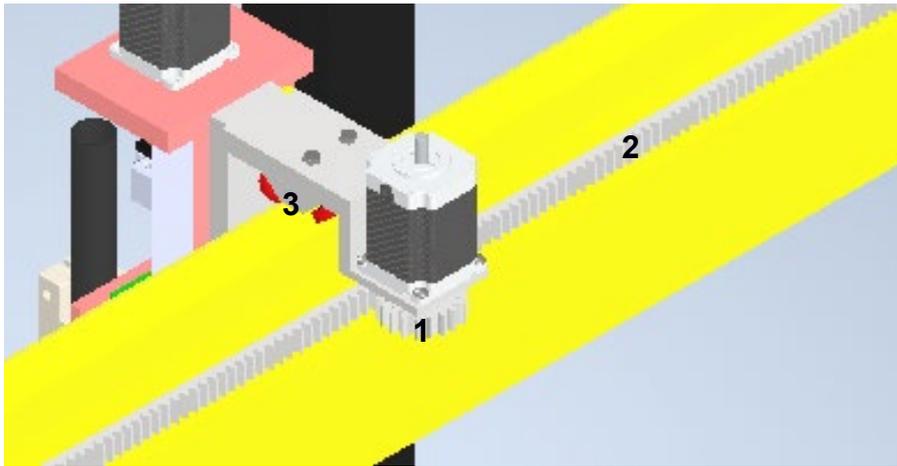
En las ilustraciones 2.11 y 2.12 podemos observar el análisis que previamente se realizó con los componentes anteriores, este tipo de análisis es fundamental para validar el diseño, ya que garantiza que se han considerado todos los factores relevantes, proporcionando una base sólida

para la fabricación y el uso de la pieza en su contexto operativo por lo que podemos concluir que tanto el diseño, como los materiales seleccionados son apropiados para la aplicación que esta va a tener.

2.5.3 Sistema de movimiento en el eje Y.

Ilustración 2.13

Sistema de transmisión y guías en el eje Y



Traslada los soportes del motor, la estructura del movimiento de la antorcha de plasma y demás mecanismos, como se muestra en la “ilustración 2.13”, el peso de estas partes es de 18 kg y el material definido para los elementos 1,2 y 3 es el siguiente:

Rueda dentada (1): paso Diametral= 2.5. Ángulo de presión= 20°, Número de dientes= 20, material Hierro Gris ASTM48 con resistencia a la tracción de 610 MPa y resistencia a la compresión de 430 MPa.

Cremallera (2): paso diametral =2.5. Ángulo de presión = 20°, Material Acero AISI 1045, Resistencia última de 565 MPa y resistencia a la fluencia de 310 MPa, Longitud de metros.

Ruedas de guías (3): Bronce SAE 65, Resistencia última 305 MPa y resistencia a la fluencia 150 MPa.

2.5.3.1 Cálculo para la selección del motor

Desplazamiento lineal $Y = 1800 \text{ mm}$

Diámetro de paso $= 50 \text{ mm}$

Se utiliza la ecuación 2.1 :

$$\frac{2 * 1800}{50} = 72 \text{ rad}$$

Velocidad lineal $= v = 130 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$

Se utiliza la ecuación 2.2:

$$w = \frac{130}{\frac{50}{2}} = 1.30 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Se utiliza la ecuación 2.3:

$$\text{Aceleración angular} = \frac{1.30^2}{2 * 72} = 0.07 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

Torque requerido = Fuerza * radio del piñón * coeficiente de fricción (2.9)

$$18 \text{ kg} * 9.8 \text{ N} * 0.025 * 0.1 = 0.44 \text{ Nm}$$

Inercia Total = *inercia del sistema* + *inercia de la carga* (2.10)

$$\text{Inercia Total} = 3.04 \text{ kg. m}^2$$

Se utiliza la ecuación 2.6:

$$\text{Torque de aceleración} = 3.04 \text{ kg. m}^2 * 0.07 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Torque de aceleración} = 0.22 \text{ Nm}$$

Se utiliza la ecuación 2.7 :

$$\text{Torque fricción} = 0.1 * (18 \text{ kg} * 9.8 \text{ N}) * 0.025 \text{ m}$$

$$\text{Torque fricción} = 0.44 \text{ Nm}$$

Se utiliza la ecuación 2.8:

$$\text{Torque De arranque} = 0.22 \text{ Nm} + 0.44 \text{ Nm}$$

$$\text{Torque De arranque} = 0.66 \text{ Nm}$$

Por lo que se eligió el motor NEMA 23 MODELO 57HD4016-01, el cual tiene un torque nominal de 1.80 Nm y un torque pico de 4.0 Nm, siendo ambos superiores al torque de arranque necesario para empezar la operación, este torque es regulable, este motor fue el que más se acercó a nuestras necesidades, teniendo disponibilidad inmediata en el país.

2.5.3.2 Análisis de esfuerzos en la cremallera

Este sistema esta añadido al pantógrafo por medio de pernos que lo sujetan, se realizó el análisis de tensión en dos puntos los cuales consideramos críticos, como primer punto tenemos la parte inicial de la cremallera ya que este es el punto de partida cuando inicia el desplazamiento en el eje Y, un segundo punto fue tomado en la mitad del movimiento, tomando en consideración que este ya ha iniciado su movimiento previamente.

Ilustración 2.14

Esfuerzo de Von Mises en el primer punto de la cremallera en el eje Y

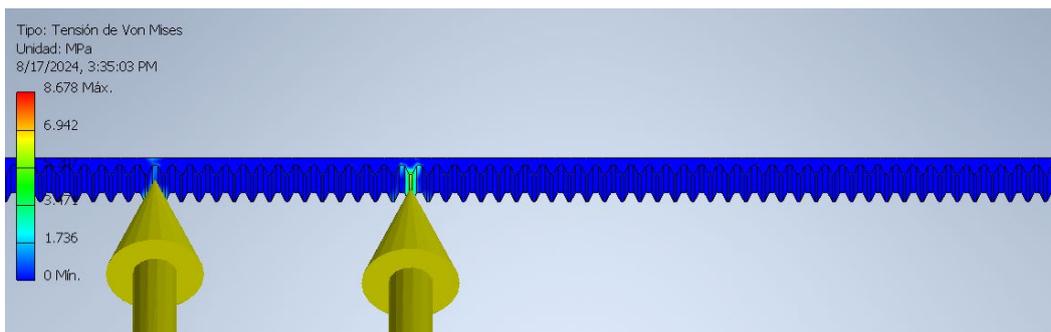


Ilustración 2.15

Esfuerzo de Von mises en el segundo punto de la cremallera en el eje Y

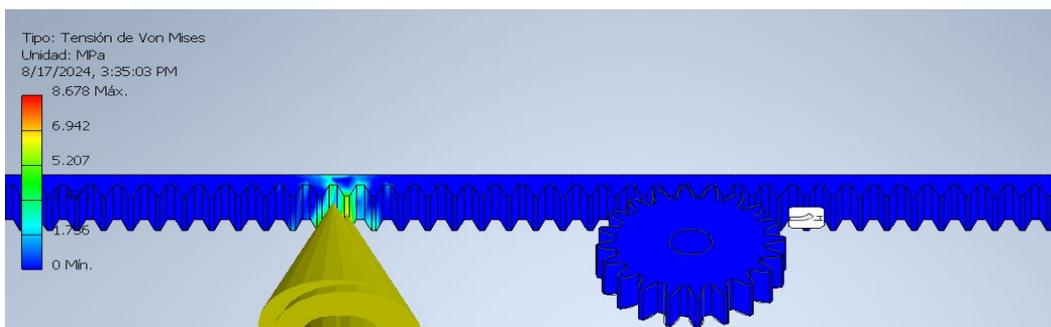
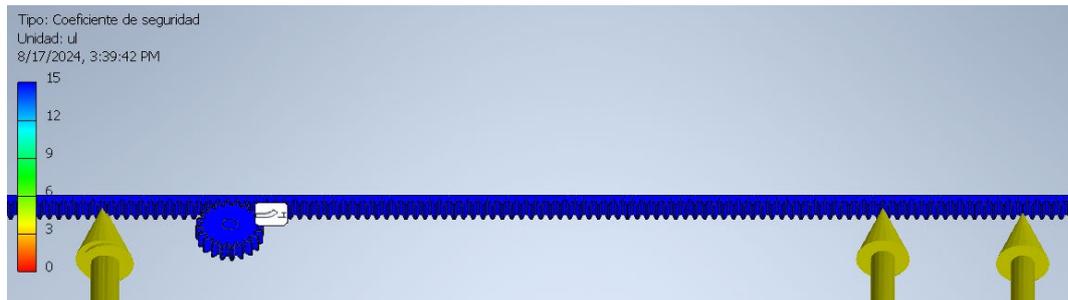


Ilustración 2.16

Factor de seguridad en la cremallera en el eje Y



Tomando en consideración las ilustraciones “2.14” y “2.15”, se hizo un análisis de los puntos considerados críticos se puede asegurar que el esfuerzo que se realiza no supera la resistencia del material, por lo que no va a tender a romperse u ocasionar algún otro percance que influya con el trabajo de este, mismo que se puede asegurar revisando los coeficientes de seguridad en la “ilustración 2.16”, los cuales nos sirven como un indicador para poder confirmar lo previamente analizado.

2.5.3.3 Análisis de esfuerzos en la rueda dentada

En la rueda dentada se aplicaron las mismas cargas que fueron aplicadas a la cremallera obteniendo los siguientes resultados en esfuerzo y factor de seguridad.

Ilustración 2.17

Esfuerzo de Von Mises en la rueda dentada

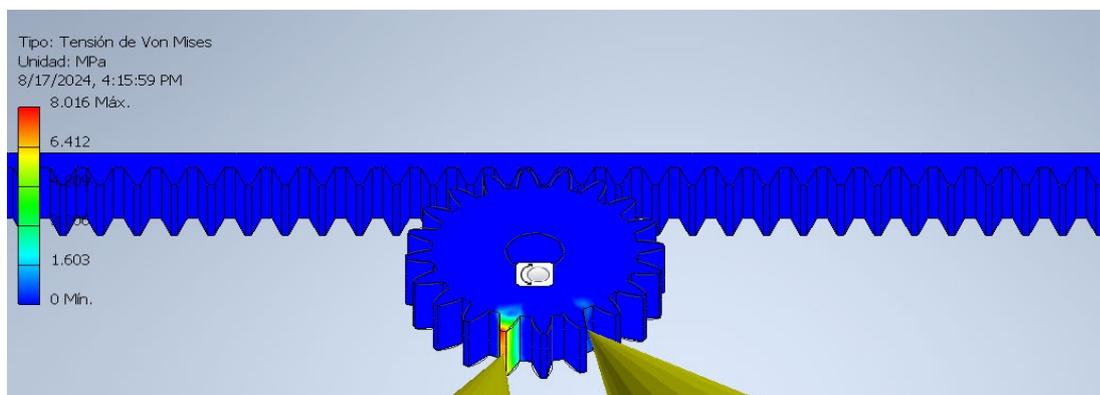
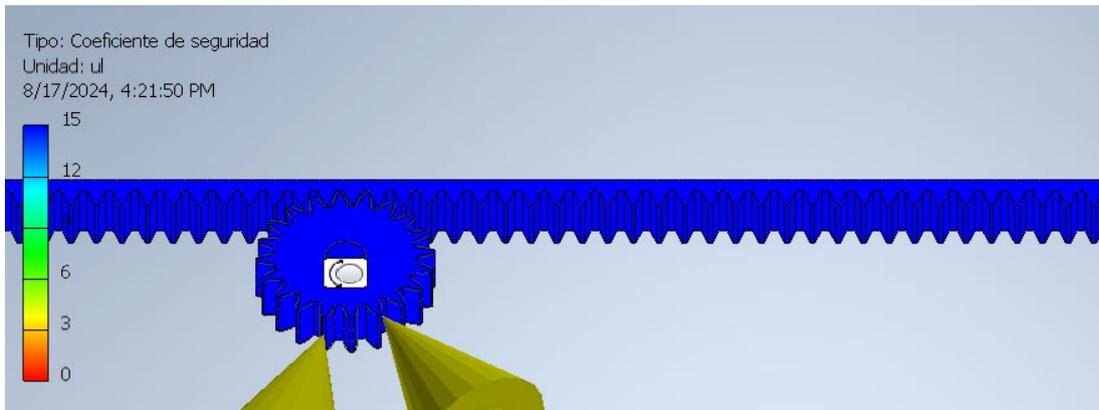


Ilustración 2.18

Factor de seguridad en la rueda dentada

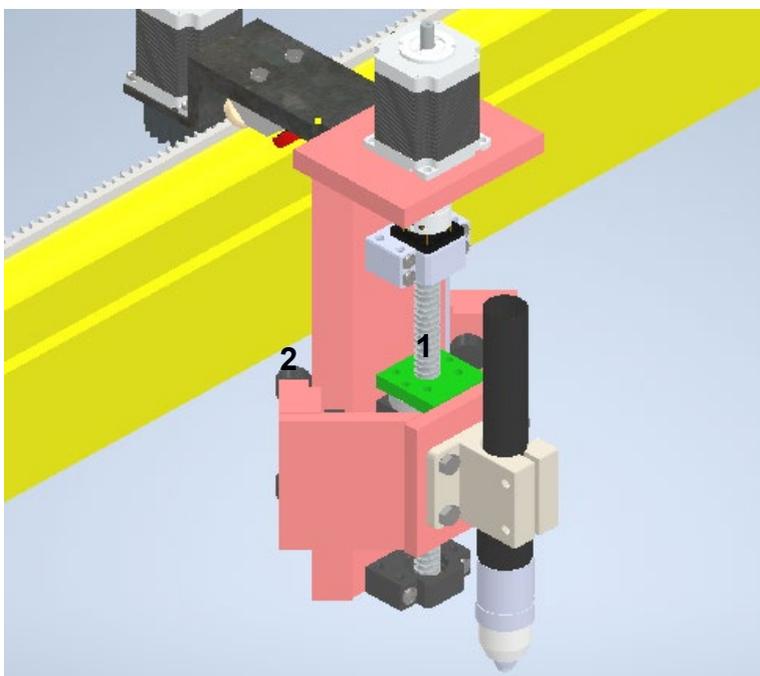


En la “ilustración 2.17” con el fin de observar el comportamiento, se le realizó el análisis de tensión en dos puntos diferentes, situación similar con la “ilustración 2.18” al momento de buscar el factor de seguridad, en donde los resultados revelaron que los esfuerzos máximos se mantienen dentro de los límites permisibles del material. por lo que se concluye que el movimiento en este eje se va a realizar sin ningún tipo de fallo.

2.5.4 Sistema de movimiento en el eje Z.

Ilustración 2.19

Sistema de transmisión y guía en el eje Z



Este sistema traslada la estructura del movimiento de la antorcha de corte de plasma subiéndola y bajándola en el eje Z de acuerdo con el requerimiento, como se muestra en la “ilustración 2.19”, el peso de la parte que sube y baja, incluyendo el peso de la antorcha es de 7 Kg y el material definido para los elementos 1 y 2 es el siguiente:

Tornillo sin fin (1): diámetro de paso = 14 mm. Número de Hilos por pulgada = 5, material Acero AISI 1045. Resistencia última de 565 MPa y resistencia a la fluencia de 310 MPa,

Ruedas de guías (2): Bronce SAE 65, Resistencia última 305 MPa y resistencia a la fluencia 150 MPa.

2.5.4.1 Cálculo para la selección del motor

Diámetro de paso = 14 mm= 0.55 in

Número de roscas por pulgada = 5

Masa para mover = 68.6 N

Coefficiente de fricción $f= 0.1$

$$\text{Ángulo de avance} = \tan \gamma = \frac{1}{n * \pi * dp} \quad (2.11)$$

$$\text{Ángulo de avance} = \tan \gamma = \frac{1}{5 * \pi * 0.55} = 0.1157$$

$$\text{Torque para subir la carga} = \frac{m * dp}{2} * \left[\frac{\tan \gamma + f}{1 - f \tan \gamma} \right] \quad (2.12)$$

$$\text{Torque para subir la carga} = \frac{68.6 * 0.55}{2} * \left[\frac{0.12 + 0.1}{1 - 0.1 * 0.12} \right] = 18.87 * 0.22 = 4.20 \text{ Nm}$$

$$\text{Torque para bajar la carga} = \frac{m * dp}{2} * \left[\frac{\tan \gamma - f}{1 + f \tan \gamma} \right] \quad (2.13)$$

$$\text{Torque para bajar la carga} = \frac{68.6 * 0.55}{2} * \left[\frac{0.12 - 0.1}{1 + 0.1 * 0.12} \right] = 18.87 * 0.02 = 0.4 \text{ Nm}$$

$$\text{Torque de fricción} = f * \frac{m * dp}{2} \quad (2.14)$$

$$\text{Torque de fricción} = 0.1 * 68.8 * \frac{0.55}{2} = 1.9 \text{ Nm}$$

Torque necesario para el arranque = torque para subir + torque de fricción (2.15)

$$\text{Torque necesario para el arranque} = 4.2 \text{ Nm} + 1.9 \text{ Nm} = 6.1 \text{ Nm}$$

Por lo que se eligió el motor **NEMA 34 DE PASO HIBRIDO Modelo 86HS9860A4J**, el cual tiene un torque nominal de 6.5 Nm y un torque pico de 9.5 Nm, siendo ambos superiores al torque de arranque necesario para empezar la operación, este torque es regulable, este motor fue el que más se acercó a nuestras necesidades, teniendo disponibilidad inmediata en el país.

2.5.4.2 Análisis de esfuerzos en el tornillo sin fin.

Para el análisis de esta parte del sistema se aplicó la carga a la que este va a estar sometido de manera axial con el fin de determinar si el material utilizado resistirá al momento de utilizarlo para subir y bajar la antorcha de corte por plasma como se muestra en la “ilustración 2.20”.

Ilustración 2.20

Esfuerzo de Von mises en el tornillo sin fin

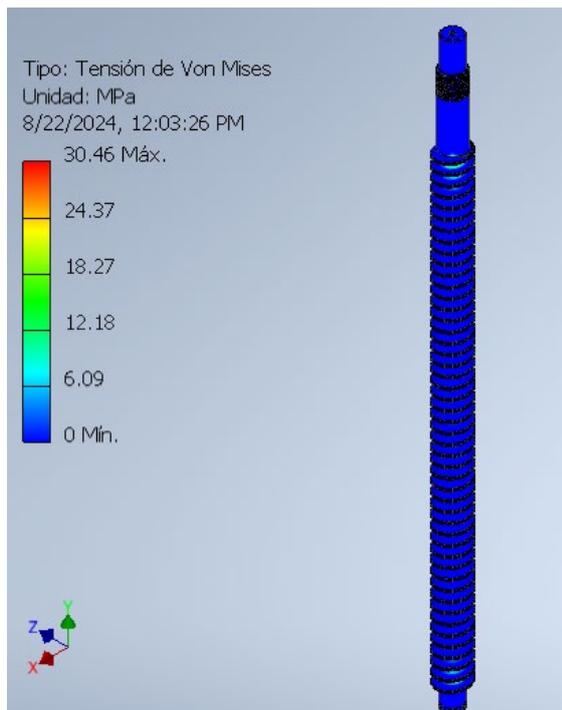
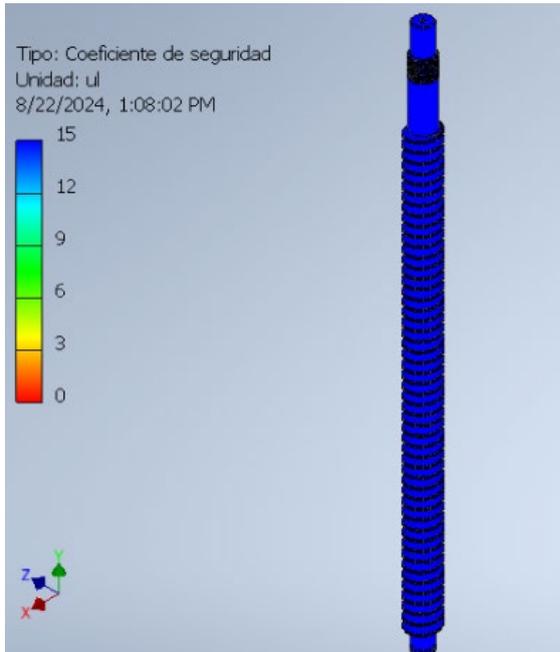


Ilustración 2.21

Factor de seguridad en el tornillo sin fin



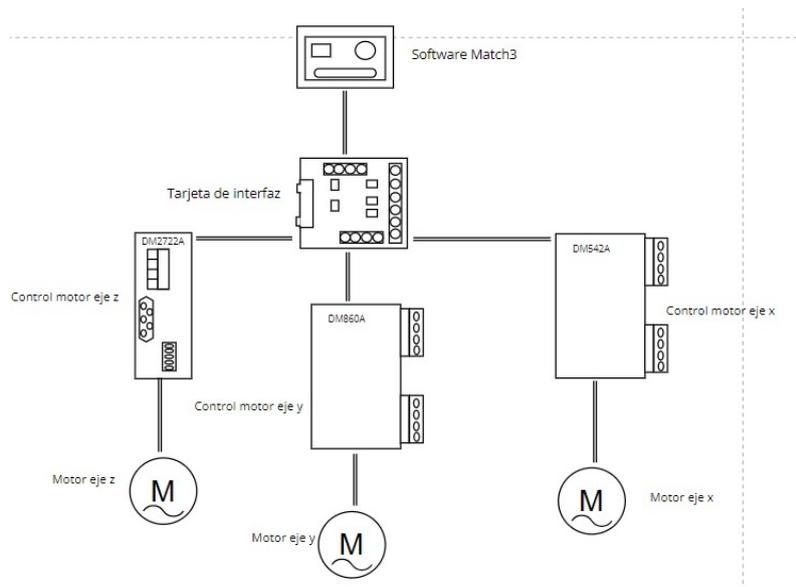
Se realizó el análisis de tensión y factor de seguridad correspondiente como se puede observar en las ilustraciones “2.20” y “2.21”, en donde, después de analizarlos detenidamente se concluyó que tanto el material elegido como el diseño de la pieza son apropiados para las aplicaciones a las que estará expuesta, reduciendo así el riesgo de fallos y asegurando un funcionamiento seguro y eficiente.

2.6 DISEÑO ELECTRÓNICO.

El diseño electrónico abarca la conexión de los motores de los 3 ejes con los que cuenta el pantógrafo con los drivers de cada motor, en conjunto con la placa encargada de controlar en todo momento su comportamiento, como su velocidad, su sentido de giro y el torque proporcionado. Todo el movimiento del pantógrafo será controlado mediante el software Match 3, el cual es el encargado de leer los códigos M, para que, con ayuda de la placa de control, pueda realizar los movimientos en los 3 ejes del área de trabajo, como se presenta en la “Ilustración 2.22”

Ilustración 2.22

Esquema del diseño electrónico del pantógrafo CNC por corte plasma



Para poder ser capaces de interpretar las instrucciones de posición que son dadas dentro del programa Mach 3 a través de la programación G, es necesario un componente electrónico capaz de recibir las señales eléctricas de dichas instrucciones y las pueda distribuir en todo el sistema, con el objetivo de posicionar correctamente a los 3 ejes del pantógrafo, por este motivo, se optó por implementar una tarjeta de interfaz que sea compatible con el software Mach 3, para elegir la mejor opción se realiza una matriz de decisión priorizando los criterios de la siguiente manera:

Compatibilidad = Costo = Complejidad > Capacidad de ejes > Número de I/O Digitales

Tabla 2.19

Criterios para la tarjeta de interfaz

Criterio	Peso $\sum+1$	Ponderación
Compatibilidad	2.5	25%
Costo	2.5	25%
Complejidad	2.5	25%
Capacidad de ejes	1.5	15%
Número de I/O Digitales	1	10%

Suma	10	100%
-------------	----	------

Las posibles alternativas de tarjetas de interfaz se muestran en la “Tabla 2.20”

Tabla 2.20

Alternativas para la tarjeta de interfaz

Opción 1	Ilustración	Opción 2	Ilustración	Opción 3	Ilustración
Control Universal CandCNC UBOB III		Control (DB25-1205)		Ethernet Smooth-Stepper	
	[21]		[21]		[17]

Una vez establecidos los pesos para los criterios, se procedió a calificarlos para dar como resultado los mostrados en la “Tabla 2.21”, donde la alternativa ganadora es la tarjeta de interfaz de control DB25-1205, esto se debe a sus características y su costo en comparación a sus competidores, esta tarjeta es capaz de controlar hasta 6 ejes, tiene una gran compatibilidad con el software Mach 3, tiene 12 salidas digitales y 5 entradas digitales. Adicionalmente la tarjeta de interfaz DB25-1205 no requiere de instalaciones de drivers internos en el computador para realizar la comunicación con el programa Mach 3 [21].

Tabla 2.21

Resultados de la matriz de decisión para la tarjeta de interfaz

Alternativa	Compatible	Costo	Complejidad	# Ejes	# I/O	Σ	Prioridad
CandCNC				0.60			
UBOB III	1.00 (4)	0.75 (3)	0.75 (3)	(4)	0.5 (5)	3.60	2

				0.75			
DB25-1205	1.25 (5)	1.25 (5)	1.00 (4)	(5)	0.4 (4)	4.65	1
Smooth-				0.45			
Stepper	0.75 (3)	1.00 (4)	1.00 (4)	(3)	0.3 (3)	3.50	3

2.6.1 Variables del sistema.

Para poder ser capaces de controlar el correcto funcionamiento del pantógrafo CNC es necesario identificar todas las variables que participan en el sistema, en los cuales se incluyen los finales de carreras, los parámetros de velocidad y voltaje de los motores que se deben especificar en el programa del Mach 3, la retroalimentación que tiene el sistema para lograr el control de posición en todo momento, y los motores que se encargan del movimiento de todo el sistema, las variables que intervienen en el sistema son apreciadas en la “Tabla 2.22”.

Tabla 2.22

Variables del Pantógrafo CNC por corte plasma

Variable	entrada/salida	tipo de dato	Descripción
X++	Entrada	Digital	Final de carrera para el eje X (positivo respecto a referencia)
X--	Entrada	Digital	Final de carrera eje X (negativo respecto a referencia)
Y++	Entrada	Digital	Final de carrera eje Y (positivo respecto a referencia)
Y--	Entrada	Digital	Final de carrera eje Y (negativo respecto a referencia)

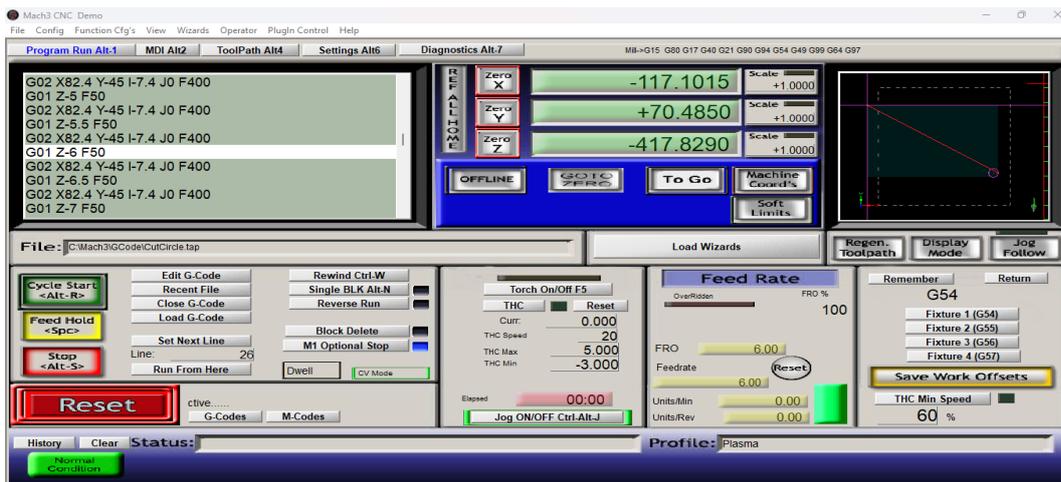
Z++	Entrada	Digital	Final de carrera eje Z (positivo respecto a referencia)
Z--	Entrada	Digital	Final de carrera eje Z (positivo respecto a referencia)
Botón de referencia (xyz) home	Entrada	Digital	Permite posicionar la antorcha en el home seteado
Paro de emergencia	Entrada	Digital	Desactiva la alimentación del proceso
Voltaje del arco del plasma [0-300]	Entrada	Analógica	Rango de voltaje para la antorcha. Proporcional a la distancia de la pieza
Señal de retroalimentación eje z [0-1] [0-1] [0-1]	Entrada	Analógica	Proporciona la posición actual del eje Z
Corriente de los drivers de los motores [0-6]	Entrada	Analógica	Ajusta la velocidad de los motores
Motor eje x	Salida	Digital	Direcciona el movimiento del plasma en el eje X
Motor eje y	Salida	Digital	Direcciona el movimiento del plasma en el eje Y
Motor eje z	Salida	Digital	Direcciona el movimiento del plasma en el eje Z

2.7 Diseño del sistema de control.

Para el HMI, se decidió utilizar el programa MATCH 3 dado su masivo uso en máquinas CNC de corte de plasma, como referencia al cortador de plasma realizado desde 0 [20], este programa ofrece muchos beneficios tales como; una interfaz de usuario intuitiva que permite la navegación y operación de la máquina, así como su personalización según el operador, la compatibilidad que tiene con varios sistemas operativos, en caso que se desee migrar el programa a otro dispositivo electrónico, permite controlar múltiples ejes, hasta un máximo de seis ejes, otra de las ventajas que ofrece es la configuración de parámetros de corte, la cual es útil para el ajuste de velocidades, aceleraciones y otros parámetros de los motores que se utilizan en la máquina CNC, también permite la automatización de operaciones mediante scripts que contienen código G para realizar tareas repetitivas.

Ilustración 2.23

Pantalla de inicio del Programa Mach3

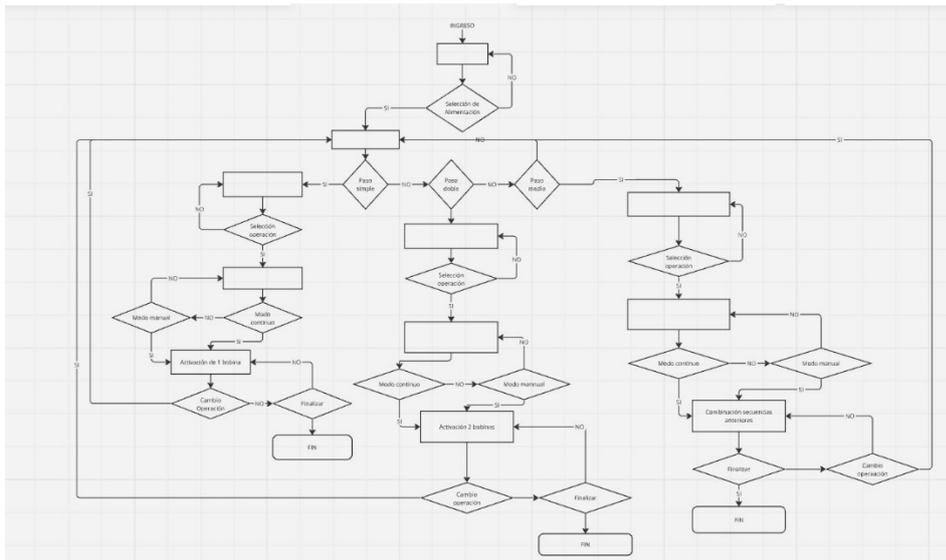


El programa Mach 3 es compatible con la tarjeta de Interfaz de control elegida, lo que facilita el poder realizar un control de posición de los 3 ejes, sin embargo, no es posible observar en la simulación como se realiza el control de los motores en el software, solo se puede indicar los parámetros y características que los motores poseen, por este motivo se hace uso del programa de LabVIEW para realizar una prueba de concepto sobre como los motores son activados para llegar

a la posición requerida según lo haya indica la línea de código en la programación G. Por tal motivo, se ha generado un flujograma del funcionamiento de la prueba de concepto del funcionamiento de los motores del pantógrafo CNC por corte plasma que se puede apreciar en la “Ilustración 2.24”.

Ilustración 2.24

Flujograma de la prueba de concepto del funcionamiento de los motores

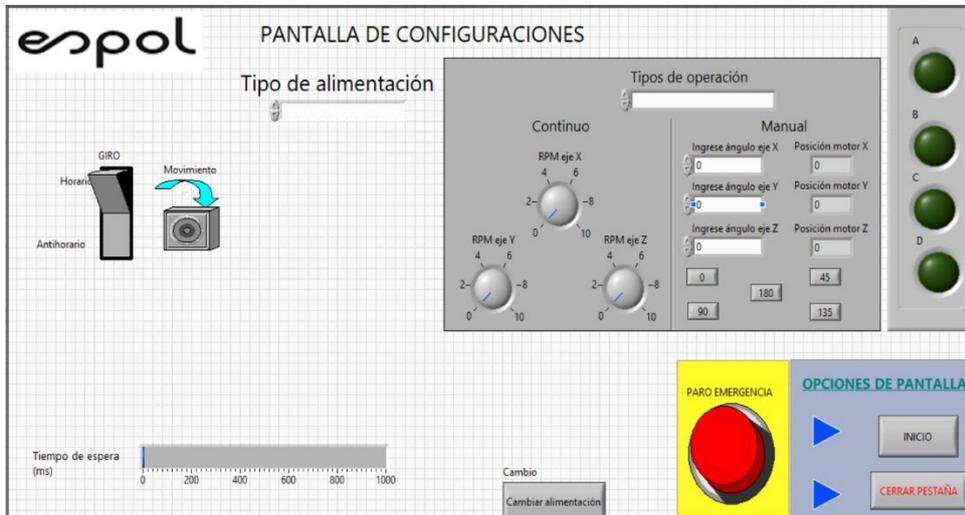


En el programa de la prueba de concepto se simplifica el contenido que se puede observar en la pantalla de inicio del Mach 3 con solo la información que se desea mostrar, como lo es el comportamiento de los 3 motores, la prueba de concepto muestra el sentido de giro que tienen los motores al momento de simular una línea de código de la programación G, asimismo, muestra que los motores trabajan según el comando establecido en el programa. Adicionalmente, se establece un modo manual con el objetivo de probar el funcionamiento de los motores por separados o en conjunto, en este modo se puede establecer un punto en específico del espacio de trabajo del pantógrafo al cual se desea mover al cortador plasma. Para modo didáctico se colocó un juego de leds permitiéndonos observar la secuencia de la activación de las bobinas dependiendo de la configuración de la alimentación. La velocidad de la transición estará dispuesta por la

modificación del tiempo de espera (mientras menor sea el tiempo de espera más rápido se hará la transición de las bobinas).

Ilustración 2.25

Prueba de concepto en LabView



El pantógrafo de oxicorte actual utiliza un sensor óptico para controlar la trayectoria de corte y altura que la antorcha debía tener durante el proceso de corte, sin embargo, al realizar la modernización, no se puede hacer uso del sensor óptico dado que las operaciones de corte deben ser controladas por CNC mediante el código G, por ello, se necesita un elemento capaz de realizar un control de altura del cortador plasma, es necesario contar con un control de altura para la antorcha dado que el material a ser cortado puede tener variaciones en la superficie y en caso de ignorar este factor, influirá de manera negativa a la calidad de corte, llegando a casos que incluso la antorcha no haya penetrado lo suficiente en el material y deje secciones sin cortar o casos en donde el material se encuentra demasiado cerca a la boquilla de la antorcha que termine dañando la boquilla o sus consumibles, como el electrodo o la misma antorcha al sufrir colisiones por no haber implementado un sistema de control de altura de la antorcha.

Con la finalidad de mantener una excelente calidad de corte, se procede a buscar alternativas de controladores de altura para la antorcha de plasma, por este motivo se establecen los criterios con los que deben contar los controladores para nuestro proyecto.

Complejidad = Precisión > Costo > Facilidad de Montaje.

Tabla 2.23

Criterios para el control de altura de la antorcha de plasma

Criterio	Peso $\sum+1$	Ponderación
Complejidad	3.5	35%
Precisión	3.5	35%
Costo	2.0	20%
Facilidad de Montaje	1.0	10%
Suma	10	100%

Las alternativas que se encuentran en el mercado para controlar la altura de la antorcha se aprecian en la “Tabla 2.24”.

Tabla 2.24

Alternativas para el controlador de altura de la antorcha de plasma

Opción 1	Ilustración	Opción 2	Ilustración	Opción 3	Ilustración
Proma		THC Lifter		Plasma	
Compact		JYKB-100		Torch	
THC 150				Height	
	[22]		[17]	Control	[17]
				(CNC4PC)	

Luego de haber otorgado las respectivas calificaciones según las categorías requeridas en el controlador de altura para la antorcha de plasma, la alternativa seleccionada fue el controlador “Proma Compact THC 150” como se muestra en la “Tabla 2.25”. Adicionalmente para este

controlador existe documentación muy detallada para sus conexiones y configuración con el software Mach 3, lo que facilitará el desarrollo del proyecto.

Tabla 2.25

Resultados de la matriz de decisión para la tarjeta de interfaz

Alternativa	Complejidad	Precisión	Costo	Montaje	Σ	Prioridad
Proma						
Compact	1.75 (5)	1.40 (4)	0.80	0.5 (5)	4.45	1
THC 150			(4)			
THC Lifter			0.60			
JYKB-100	1.05 (3)	1.40 (4)	(3)	0.4 (4)	3.45	3
Plasma						
Torch						
Height	1.40 (4)	1.05 (3)	0.80	0.5 (5)	3.75	2
Control			(4)			
(CNC4PC)						

2.8 Tabla de materiales

Los motores para los ejes “Y” y “Z” están siendo considerados entre un rango de 4 a 6 Nm, debido a que se busca realizar un análisis más profundo tomando en cuenta ciertas consideraciones para elegir el modelo correcto de motor.

Tabla 2.26*Lista de materiales requeridos para la modernización del pantógrafo*

Q	Objeto	Características
3	Motor de paso híbrido.	Tener un torque de 4 Nm hasta 8.5 Nm y que requiera una corriente entre 2 a 6 A.
3	Engranajes / Piñón.	Están elaborados con hierro gris ASTM A48.
3	Cremalleras.	Elaboradas con Acero AISI 1045.
12	Ruedas Guías.	Elaboradas con Bronce SAE 65 y recubrimiento de caucho.
3	Driver de motor.	Necesarios para regular la velocidad, la dirección, y la posición del motor.
1	Controlador de altura de la antorcha de plasma.	Compatible con el software Mach 3 y Linux CNC para el control de la antorcha.
1	Tarjeta de Interfaz.	Compatible con el programa Mach 3 sin necesidad de instalación de programa de terceros, puede controlar hasta 6 ejes.
6	Finales de carrera.	De tipo interruptor para asegurar que los movimientos de los ejes no excedan el límite del espacio de trabajo.
1	Botón de Paro de Emergencia.	Botón con enclavamiento como dispositivo de seguridad diseñado para detener de inmediato el funcionamiento del pantógrafo.

Capítulo 3

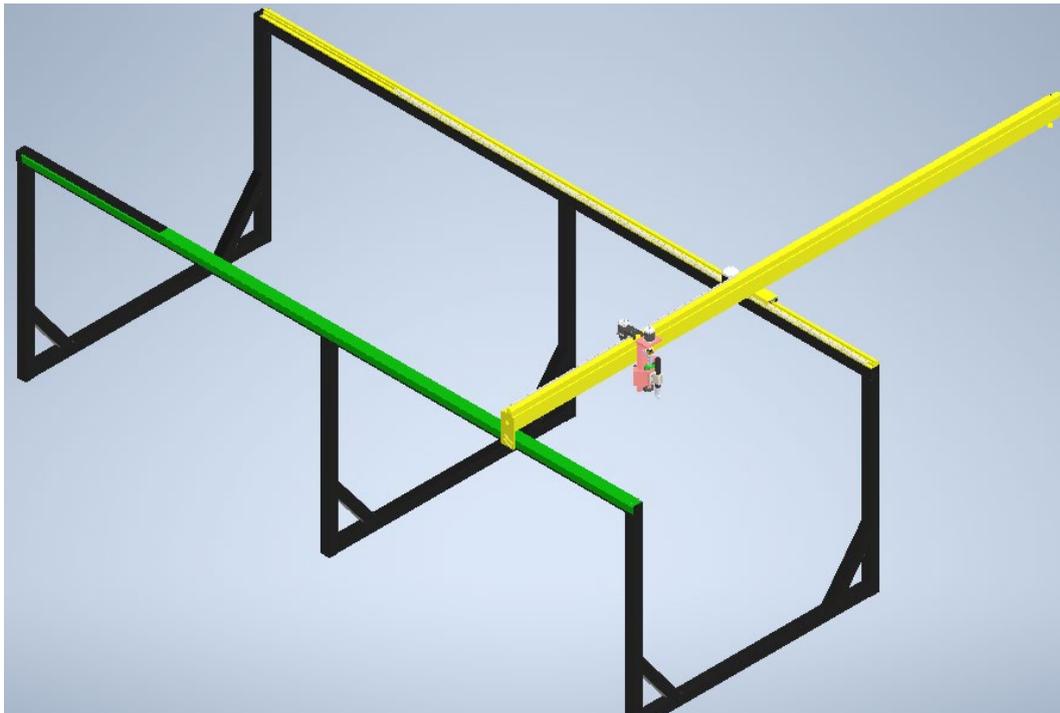
3. Resultados y análisis

A continuación, se detallan los resultados obtenidos en los diseños finales, mismos que corresponden a la solución del problema planteado.

3.1 Resultados del componente mecánico.

Ilustración 3.1

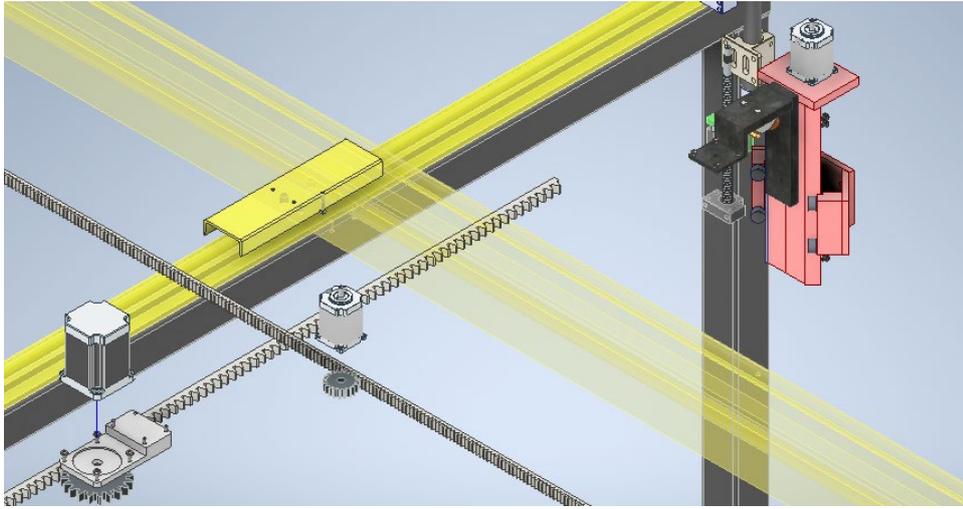
Diseño final del pantógrafo



La ilustración 3.1 representa el rediseño del pantógrafo, en donde tenemos los sistemas de movimiento en el eje X, Y, Z, constituidos por un sistema de piñón cremallera en el eje “Y” y “X”, y un sistema de tornillo sin fin para el movimiento en el eje “Z” y un sistema de guías para cada movimiento.

Ilustración 3.2

Vista Explotada del Sistema



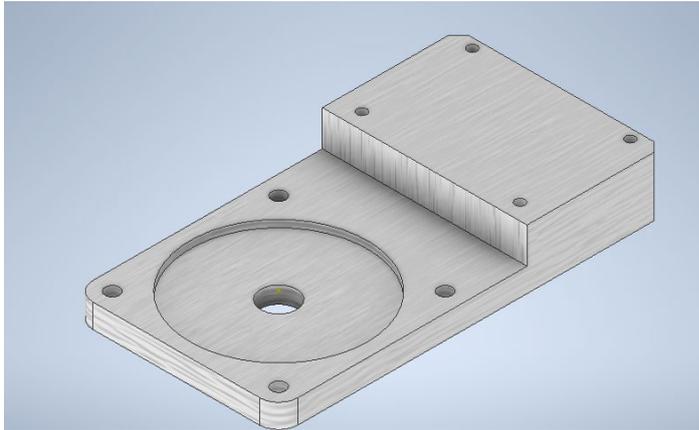
Como se mencionó en la metodología, se realizó una réplica de tamaño real en inventor, por lo que se decidió dejar los sistemas de cremallera originales del pantógrafo, después de previa revisión y verificación, elaborando así solo las ruedas dentadas.

3.1.1 Soporte del motor para el movimiento en el eje X

Con el fin soportar el peso de motor y mantenerlo fijo se fabricó una pieza para el motor nema, el cual puede ser visualizado en la “ilustración 3.3”, la misma tiene 4 agujeros roscados para empernarlos en el pantógrafo utilizando pernos métricos M5 x35, asimismo, consta con 4 agujeros roscados para la sujeción del motor los cuales utilizan pernos métricos M6 x 25.

Ilustración 3.3

Soporte para el motor en el Eje X



La pieza mostrada en la “ilustración 3.3” se diseñó de esta manera dado las dimensiones del motor Nema del eje X, se optó por este diseño al ser más fácil de fabricar y ocupar el menor espacio posible en la estructura, adicionalmente se optó elaborarla en aluminio porque el material cumplía con los requisitos necesarios para un correcto funcionamiento. La decisión del material para la construcción de la pieza es por los beneficios mecánicos que nos ofrece el aluminio como se aprecia en los datos de la “tabla 3.1”.

Tabla 3.1

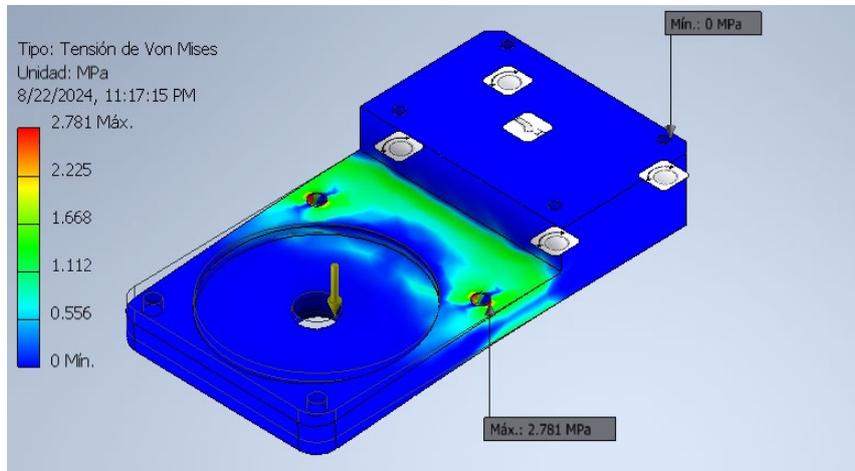
Tabla de propiedades de la pieza

Material:	Aluminio 7075
Densidad:	2.810 g/cm ³
Masa:	0.544 kg
Área:	388.532 cm ²
Volumen:	193.462 cm ³
Centro de gravedad:	X: 0.000 cm Y: 5.977 cm Z: 0.057 cm
Límite de elasticidad:	145 MPa
Resistencia Máxima a la tracción:	276 MPa
Módulo de Young:	71.700 GPa
Coefficiente de Poisson:	0.33
Modulo cortante:	26900 MPa

3.1.1.1 Análisis estructural

Ilustración 3.4

Esfuerzo de Von Mises



En la “ilustración 3.4” podemos observar los valores de la tensión de Von Mises necesaria para los análisis estructurales de la pieza. Además, es notoria una deformación que sufrirá la pieza al momento de estar funcionando, misma que se puede comprobar con la “ilustración 3.5”, en donde, se aprecia que existe un desplazamiento de la pieza, este desplazamiento es minúsculo por lo que se lo puede considerar despreciable al tener un valor de 0.01786 mm o 1.79×10^{-3} cm.

Ilustración 3.5

Desplazamiento

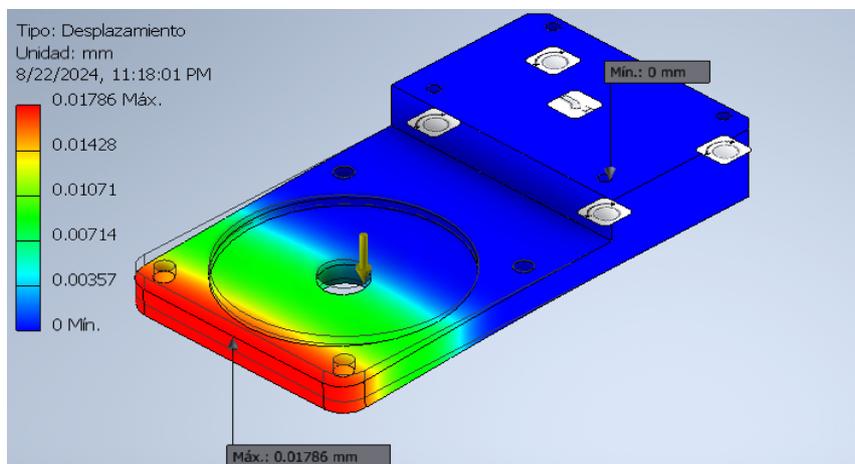
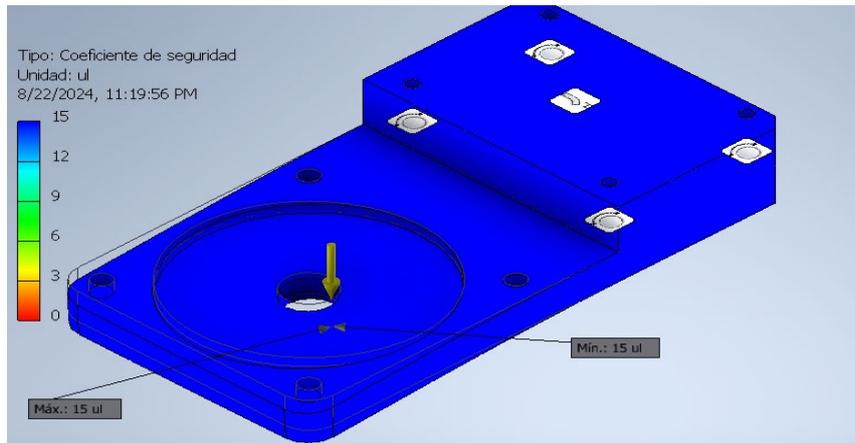


Ilustración 3.6

Factor de seguridad



En la “ilustración 3.6” se observa que toda la pieza tiene un factor de seguridad de 15, tanto máximo como mínimo, lo que nos indica que la pieza cumplirá con los parámetros críticos para su correcto funcionamiento.

Tabla 3.2

Tabla de resultados de los análisis

Nombre	Mínimo	Máximo
Tensión de Von mises	0 MPa	2.78 MPa
Primera Tensión Principal	-1.49 MPa	2.99 MPa
Tercera Tensión Principal	-3.74 MPa	0.62 MPa
Desplazamiento	0 mm	0.001 mm
Coeficiente de seguridad	15 MPa	15 MPa

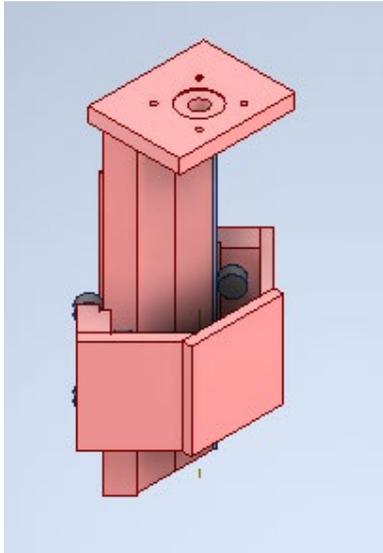
Se obtuvo la tabla de resultado de los análisis “tabla 3.2” en donde están presentes los límites obtenidos mediante el análisis estructural

3.1.2 Soporte del motor para el movimiento en el eje Z

Para lograr el movimiento en el Eje Z se hizo uso de un tornillo sin fin conectado a un motor nema 23, para esto se necesitaba una estructura que de soporte a todos los elementos que eran necesarios para el movimiento en este eje, el mismo que está compuesto por dos partes como se puede observar en la ilustración 3.7, la primera parte que se adhiere a la base preexistente del movimiento en el eje Y, la segunda parte que se mueve por el tornillo sin fin subiendo y bajando apoyado por unas ruedas guías , en donde va sujeta la antorcha de corte por plasma.

Ilustración 3.7

Soporte de elementos en el eje Z



Propiedades de la pieza:

Tabla 3.3

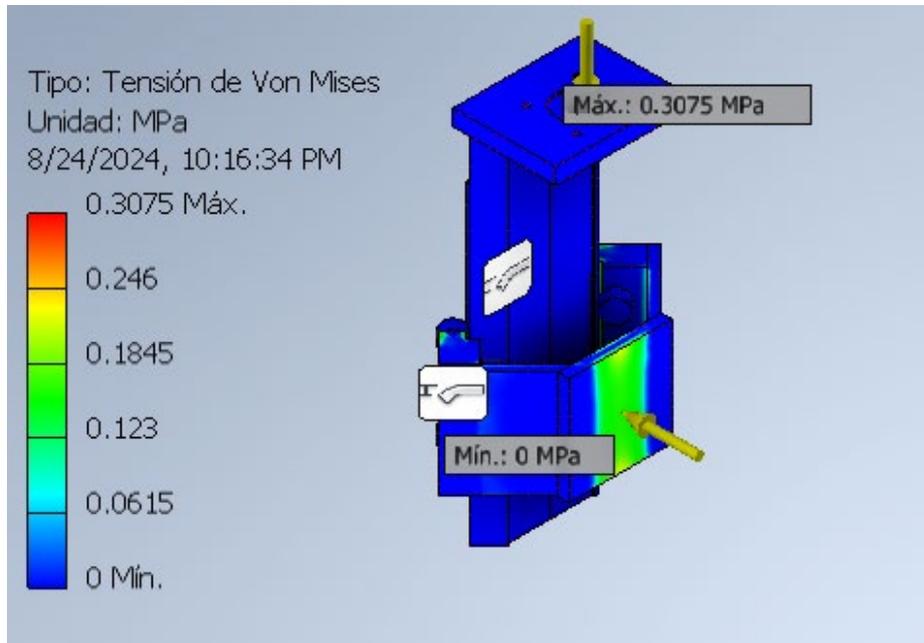
Tabla de propiedades de la pieza

Material:	Hierro, fundido gris ASTM A-48
Densidad:	7.395 g/cm ³
Masa:	10 kg
Área:	2576.23 cm ²
Volumen:	1.217.03 cm ³
Centro de gravedad:	X: 9.570 cm Y: 46.620 cm Z: -20.151cm
Límite de elasticidad:	361.973 MPa
Resistencia Máxima a la tracción:	503.315 MPa
Módulo de Young:	143.479 GPa
Coefficiente de Poisson:	0.37
Modulo cortante:	52399.900 MPa

3.1.2.1 Análisis estructural

Ilustración 3.8

Tensión de Von Mises de la pieza de soporte del eje Z



En la “ilustración 3.8” podemos notar como primer punto que a pesar de que la tensión de Von Mises es pequeña, existe un punto en donde va a existir una ligera deformación la cual se puede visualizar en la “ilustración 3.9” con el desplazamiento, en donde se observó que esta deformación es extremadamente pequeña, por lo que se vuelve despreciable.

Ilustración 3.9

Desplazamiento de la pieza de soporte del eje Z

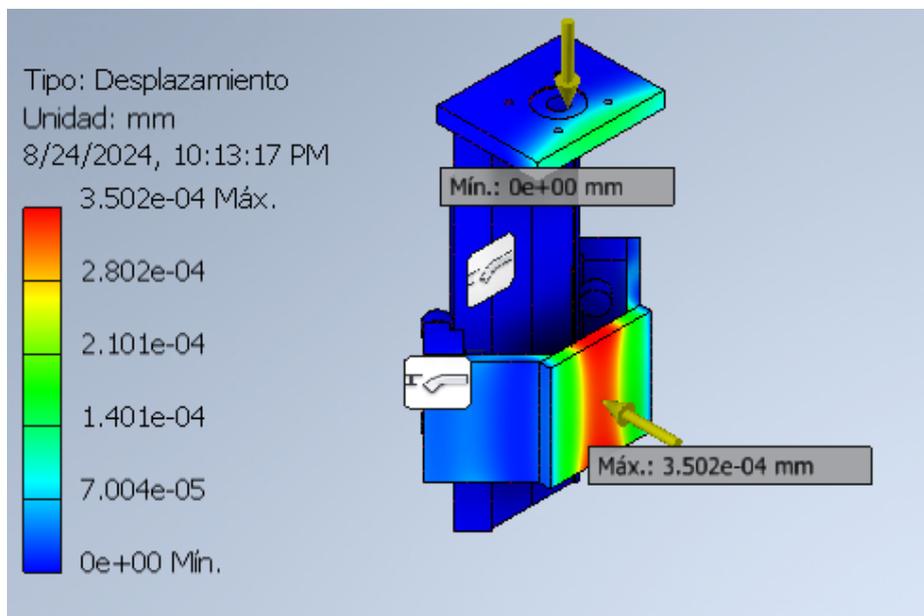
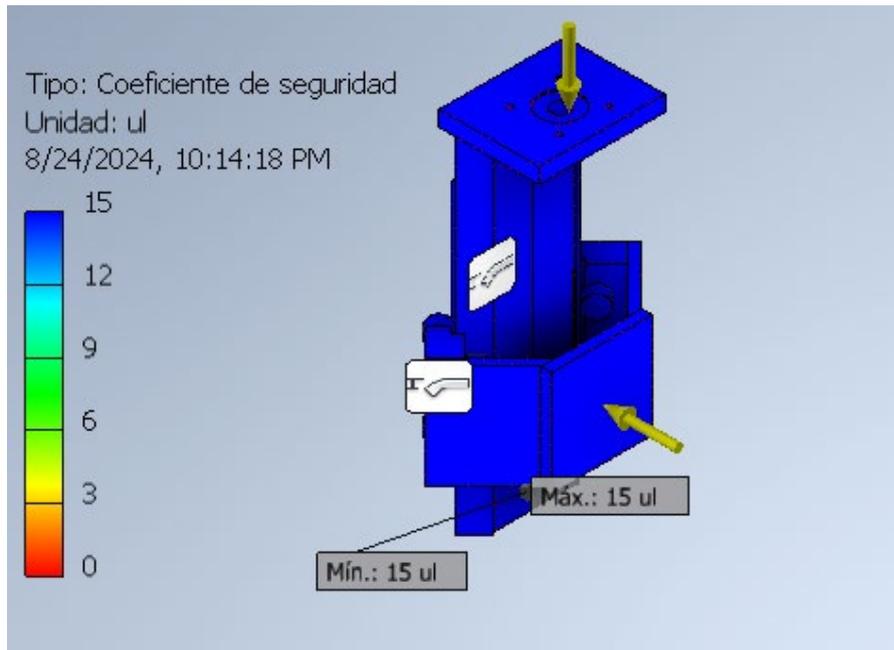


Ilustración 3.10

Factor de Seguridad



Adicionalmente al analizar los coeficientes de seguridad de la pieza que se presentan en la “ilustración 3.10” podemos notar que este nos arroja un valor de 15 unidades en toda la pieza por lo que la pieza no va a tener problemas mayores en su estructura que afecten su funcionalidad.

Tabla 3.4

Tabla de resultados

Nombre	Mínimo	Máximo
Tensión de Von mises	0 MPa	0.30 MPa
Primera Tensión Principal	-0.18 MPa	0.32 MPa
Tercera Tensión Principal	-0.39 MPa	0.10 MPa
Desplazamiento	0 mm	0.003 mm
Coeficiente de seguridad	15 MPa	15 MPa

La “tabla 3.4” hace referencia a los límites máximos y mínimos a los que está sometido la pieza al momento de realizar el análisis estructural

3.2 Resultados del componente electrónico

En la presente sección se presentan las conexiones finales de los componentes necesarios resultados para la modificación de pantógrafo de oxicorte a un CNC por corte plasma.

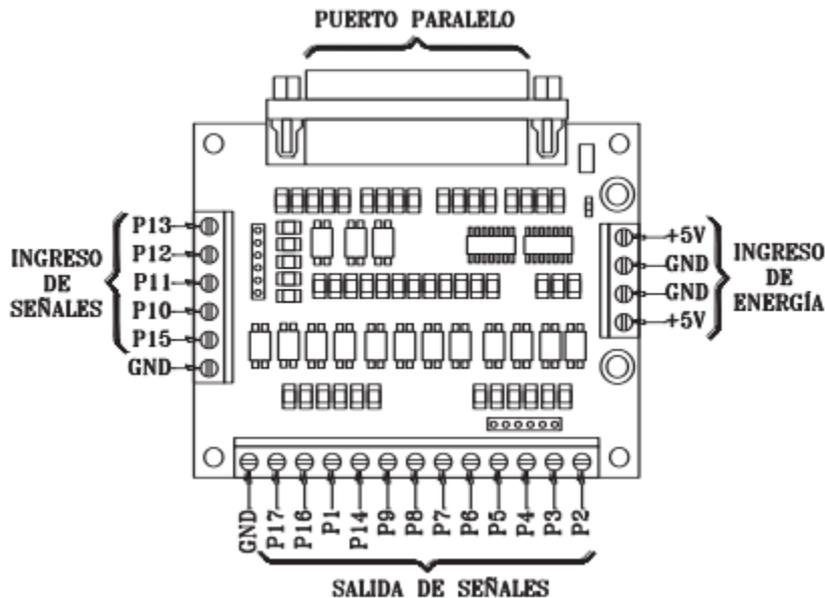
3.2.1 Conexiones de la Tarjeta de Interfaz DB25-1205

La tarjeta de Interfaz DB25-1205 es un componente electrónico que actúa como un puente de comunicación entre los distintos elementos electrónicos presentes en el proyecto, su función para el sistema es la de facilitar la conexión y el control de los componentes necesarios para el movimiento de los 3 ejes y su comunicación con el software MACH 3, al igual que permite la comunicación con los motores, los finales de carrera y el controlador de altura de la antorcha. Se eligió el modelo DB25-1205 al ser compatible con el HMI que se utilizará en el pantógrafo dado que sirve para traducir las señales de control enviadas desde el software MACH3 hacia los componentes físicos como los drivers de los motores, además de gestionar que cada componente reciba las instrucciones correctas para el funcionamiento en sincronía.

La tarjeta de interfaz de control DB25-1205 posee un conector de puerto paralelo, es decir, un conector de 25 pines en forma de D, necesario para la conexión con una computadora, cuenta con 17 puertos para señales, en donde, el puerto P2 es reservado para enviar la señal de pulso del eje X, el puerto P3 es para establecer la dirección del eje X, el puerto P4 es reservado para enviar la señal de pulso del eje Y, el puerto P5 es para establecer la dirección del eje Y, el puerto P6 es reservado para enviar la señal de pulso del eje Z, el puerto P7 es para establecer la dirección del eje Z. Como se puede apreciar en la “ilustración 3.11”, hay puertos asignados para el ingreso de señales, las cuales serán ocupadas por los finales de carreras de los ejes, el botón de paro de emergencia y el controlador de altura de la antorcha, puertos para la salida de señales, los cuales estarán reservados para los drivers de los motores y puertos para el ingreso de energía de 5V para alimentar componentes electrónicos que requieran de este tipo de alimentación [23].

Ilustración 3.11

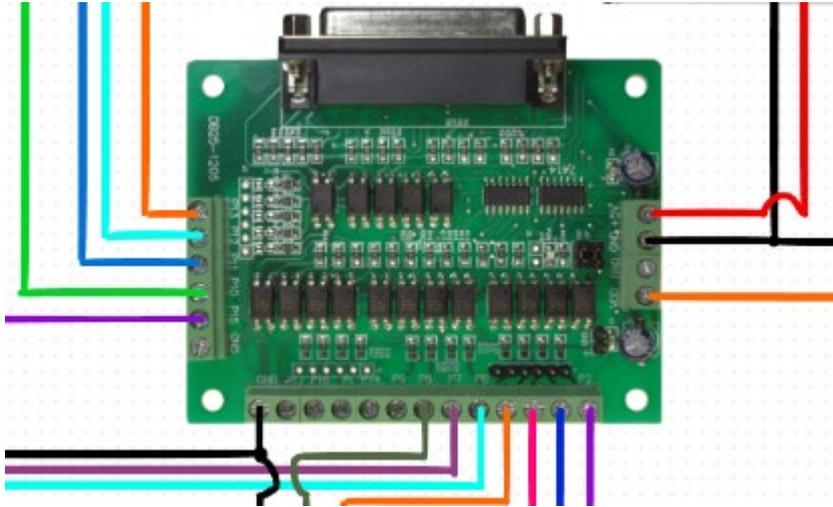
Distribución de puertos en la tarjeta de Interfaz DB25-1205 [22]



Las conexiones realizadas a la tarjeta de interfaz DB25-1205 se pueden apreciar en la “ilustración 3.11”. El puerto P13 fue conectado para recibir la señal del botón de paro de emergencia, el puerto P12 fue conectado en serie con los 6 finales de carrera del sistema, los puertos P11, P10 y P15 fueron designados para la conexión del Proma Compact THC 150 los cuales se conectaron a sus puertos UP, ARC y DWN respectivamente, se utiliza una fuente de voltaje para alimentar un puerto de 5V y a su vez que energicen el botón de paro de emergencia y los finales de carrera en una configuración Pull-Down, finalmente se utilizan los puertos P2 y P3 para el driver del motor X, el puerto P4 y P5 para el driver del motor Y, el puerto P6 y P7 para el driver del motor Z, adicionalmente se utiliza el puerto P8 para habilitar la opción de “enable” a los drivers de los motores, para ser capaces de desactivar a todos los motores desde una instrucción del MACH3, los drivers y el controlador de altura de la antorcha son conectados a la misma tierra, las conexiones se aprecian de mejor manera en el “APÉNDICE A”.

Ilustración 3.12

Conexiones de la tarjeta de interfaz DB25-1205



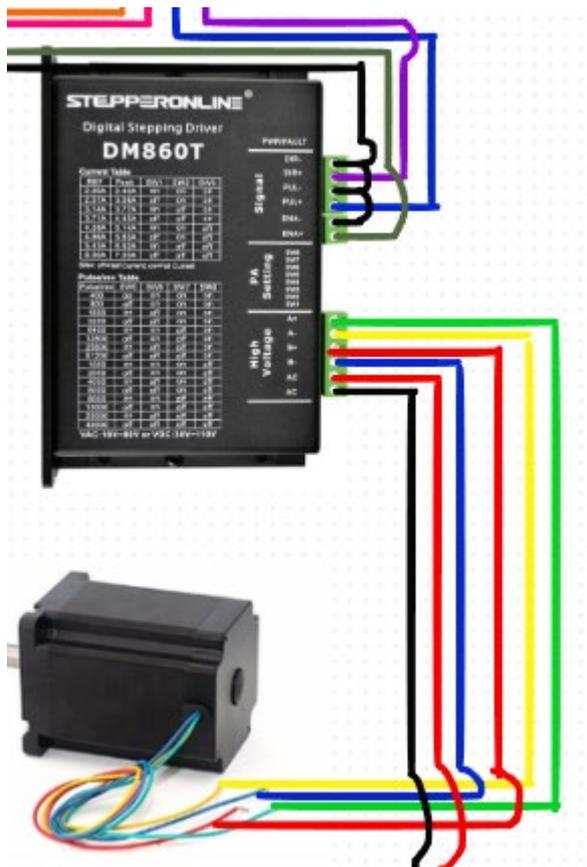
3.2.2 Configuración de los drives de los motores para los ejes x, y, z.

Debido que se requería en el sistema anterior que el sensor óptico siguiera la línea de un dibujo hecho con tinta especial, la velocidad de rastreo que tenía era de 2 a 118 ipm (pulgadas por minuto) siendo equivalente a 50-3000 mm/min [24], sin embargo, gracias a la modernización, no es necesario tener una velocidad limitada al procesamiento del sensor óptico dado que las instrucciones de corte vienen dadas en la programación en código G, por este motivo se optó por tener una velocidad máxima de movimiento de 130 mm/s o 7800 mm/min, mejorando significativamente la velocidad de movimiento de los ejes.

Para el controlador del motor del eje X y Z, al tener los dos un motor Nema 34 Modelo 86HS9860A4J, el cual posee una corriente nominal de 6 A, se requiere de un driver capaz de soportar y controlar las especificaciones del motor. El driver seleccionado fue el DM860T de la marca Stepperonline, para la correcta conexión entre la tarjeta de interfaz y el motor es necesario conectar el P2 de la tarjeta de interfaz con el puerto DIR+, el puerto P3 con el puerto PUL+ y tanto el puerto DIR-, PUL- y ENA- a la tierra de la tarjeta de interfaz, adicionalmente es necesaria la conexión al puerto P8 de la tarjeta de interfaz a la entrada ENA+ del driver tener la capacidad de activar o desactivar el motor mediante el MACH 3. Las conexiones del driver con el motor se pueden apreciar en la “ilustración 3.12” donde se diferencian por colores, y las entradas AC y AC corresponden a las conexiones con la fuente externa necesaria para la alimentación de los motores.

Ilustración 3.13

Conexiones correspondientes al Driver del eje X, Z

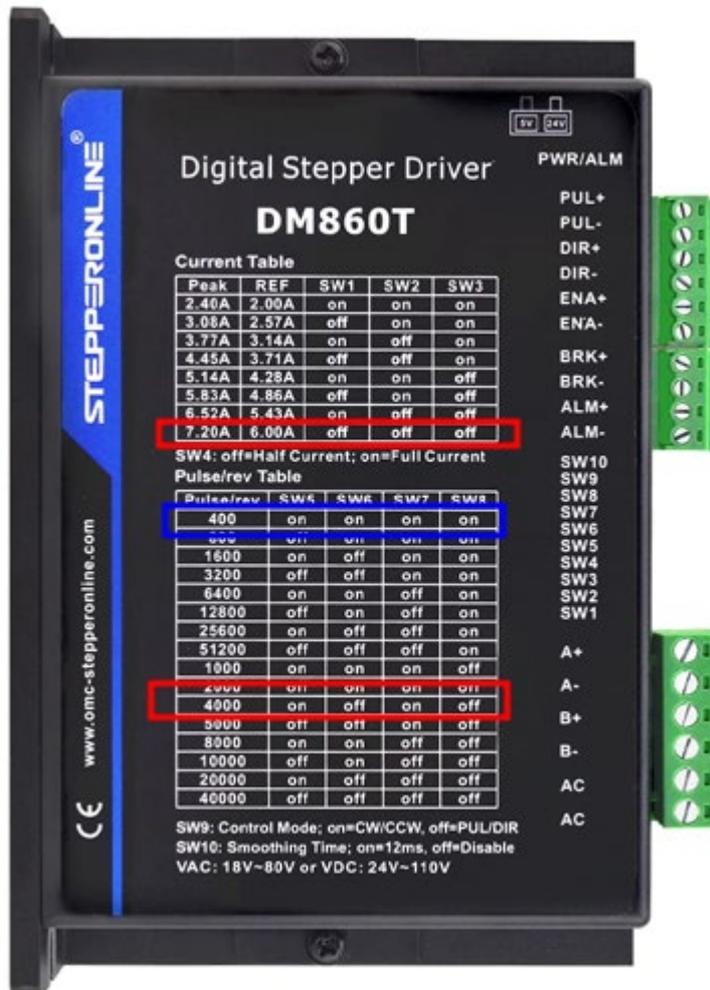


Para la selección de los micro interruptores que posee el driver, en el aspecto de corriente a todos los micro interruptores se los deja en off, dado que el motor Nema 34 Modelo 86HS9860A4J necesita de 6 A de corriente, acorde a la configuración mencionada, el driver proporcionará de la corriente necesaria para el correcto funcionamiento del motor. El motor del eje X cuenta con 200 pasos por revolución dado que cada paso es de 1.8° , dado que requerimos movimientos precisos, realizamos uso de microsteps con la finalidad de aumentar la resolución del motor, de tal forma que para cada paso del motor se realicen 20 micro pasos con ayuda del driver, es decir, el eje X tendría una resolución de 4000 pasos/revolución y se debe realizar la configuración del recuadro de color rojo mostrada en la “ilustración 3.13”.

El motor del eje Z al no tener un recorrido lineal muy grande y solo estar a cargo de mover el cortador plasma, se optó por dividir cada paso del motor en 2 micro pasos, teniendo una resolución final de 400 pasos/revolución, para lograr esta configuración se debe realizar la configuración del recuadro de color azul mostrada en la esto se logra configurar con los micro interruptores del 5 al 8 como se muestra en la “ilustración 3.13”.

Ilustración 3.14

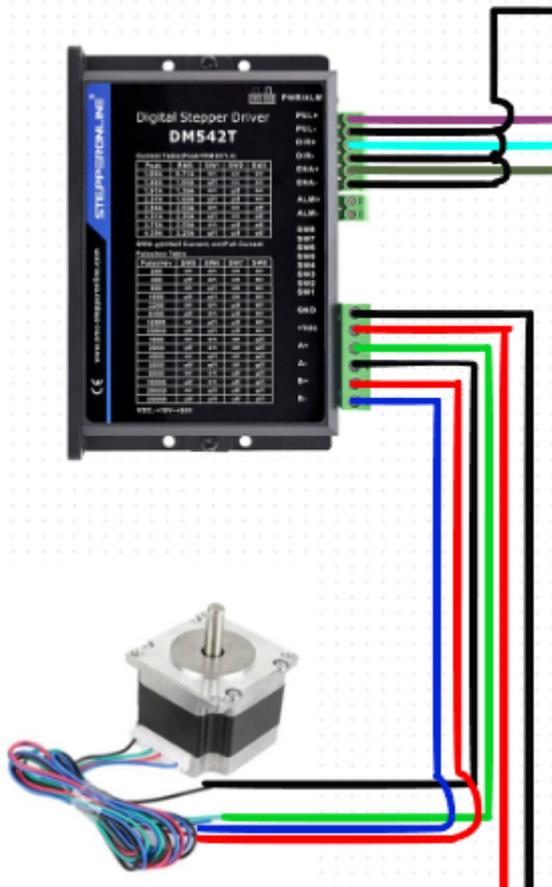
Configuración de los micro interruptores para el driver del eje X, Z [17]



Para los controladores de los motores del eje Y, se optó por el driver DM542T de la marca Stepperonline al tener un motor Nema 23 57HD4016-01. El driver del motor del eje Y fue conectado su puerto DIR+ al puerto P4 de la tarjeta de interfaz, el puerto PUL+ al puerto P5 de la tarjeta de interfaz, por otro lado, para el driver del motor Z, se conecta su puerto DIR+ al puerto P6 de la tarjeta de interfaz, el puerto PUL+ al puerto P7 de la tarjeta de interfaz. Los puertos ENA+ de los drivers fueron conectados al puerto P8 mientras que los puertos DIR-, PUL- y ENA- de ambos drivers a la tierra en común de la tarjeta de interfaz, es necesario recalcar que no se usaron los puertos adicionales denominados ALM dado que no requerimos del uso de una alarma en nuestro sistema. Las conexiones de los drivers con los motores se pueden apreciar en la “ilustración 3.14” donde se diferencian por colores, y las entradas AC y AC corresponden a las conexiones con la fuente externa necesaria para la alimentación de los motores.

Ilustración 3.15

Configuración para las conexiones de los drivers de los ejes Y [17]



Para la selección de los micro interruptores los dos primeros se los deja en off y el tercero se lo deja en on, dado que el motor Nema 23 57HD4016-01 necesita de 2 A de corriente, acorde a la configuración mencionada, el driver proporcionará 1.69 A, en este caso no se seleccionó la corriente RMS con valor de 2.03 A porque supera a los 2 A establecidos por el fabricante del motor y así evitar una reducción considerable en la vida útil de los motores.

El motor del eje Y cuenta con 200 pasos por revolución y se configura el driver para que cada paso cuente con 25 micro pasos, provocando que la resolución final del motor sea de 5000 pasos/revolución, para lograr esta configuración se debe realizar la configuración mostrada en la “ilustración 3.15”.

Ilustración 3.16

Configuración de los micro interruptores para el driver del eje Y, Z [17]

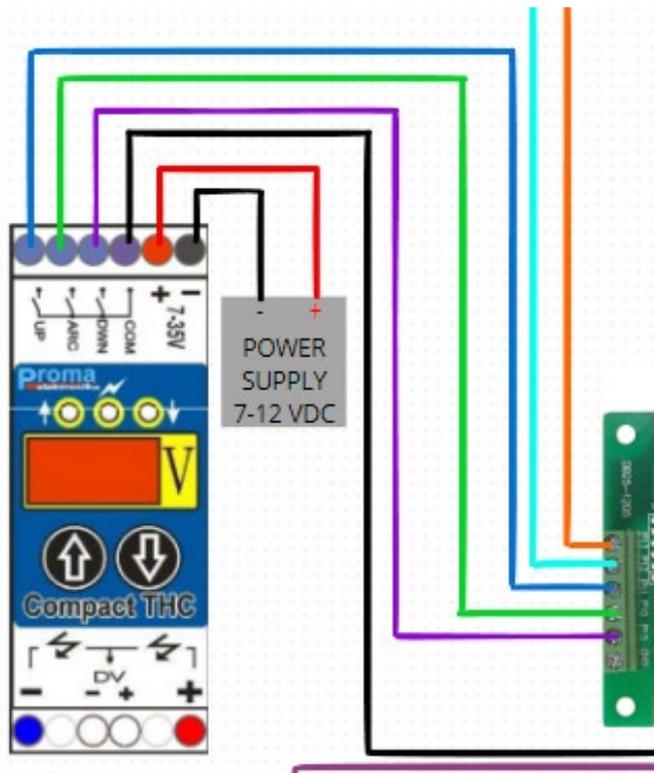


3.2.3 Integración de los finales de carrera.

Dado que nuestro sistema implica movimientos en diferentes ejes, los cuales son controlados mediante código G, existe la posibilidad que se carguen archivos que trabajen sobre dimensiones más grandes del espacio de trabajo del pantógrafo, por este motivo, se optó por colocar 6 finales de carrera de tipo interruptor de modelo ME-8108 de la marca Taiss, para la configuración de los finales de carrera fue necesario una conexión en serie Pull-Down, debido a que se requiere que todos actúen como un normalmente cerrado, para en caso de activar uno de los finales de carrera, el circuito se abra y envíe esta información a la tarjeta de Interfaz mediante el puerto P12, que indicará al software MACH3 que se encuentra en uno de los límites de los ejes, la conexión de puede apreciar en la “ilustración 3.17”.

Ilustración 3.18

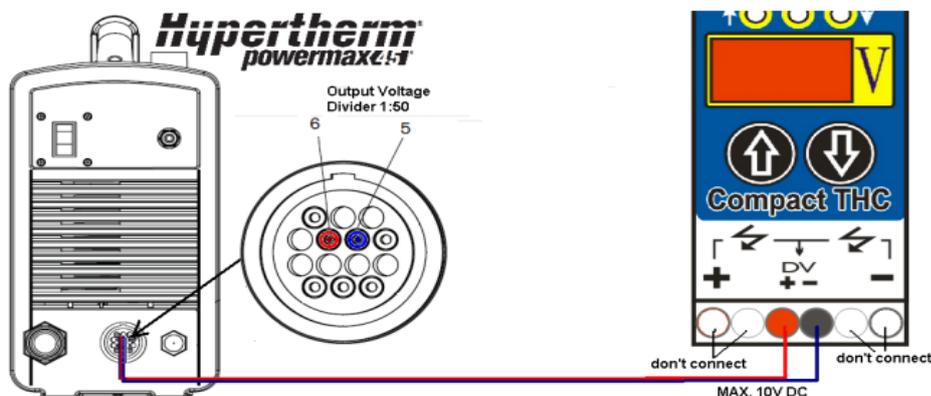
Conexión del controlador *Proma TCH Compact 150*



Para la conexión del controlador con la estación del plasma de nuestro cortador, es necesario utilizar la salida de voltaje baja del divisor 1:50 con la que cuenta el controlador Proma THC Compact 150, para ello se muestra un ejemplo en la “ilustración 3.19”, donde se puede apreciar que el puerto positivo irá conectado al pin 6 de la estación de plasma mientras que el puerto negativo se conectará al pin 5.

Ilustración 3.19

Conexión del controlador THC con la estación plasma [25]



3.3 Resultados del componente de control y programación

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones del MACH 3 y el programa de prueba de concepto realizado en LabView cuando el pantógrafo CNC por corte plasma entra en funcionamiento. Las simulaciones son ambientadas a un proceso de corte por plasma donde se muestra el funcionamiento del lazo de control de posición, enfocándose en la velocidad y posición de los 3 ejes que conforman al pantógrafo.

3.3.1 Configuración de los motores en el mach 3

Para ser capaces de utilizar de manera correcta la interfaz humano-máquina se debe realizar ciertas configuraciones en el programa referentes a las especificaciones de los motores, para ingresar la resolución de los motores en el programa, hay que ubicarnos en el menú Config, opción Motor Tuning y colocar los datos requeridos por el programa.

Adicionalmente tenemos que calcular las aceleraciones que los motores van a experimentar durante su funcionamiento. En el eje X hay una longitud neta de traslación de 3800 mm, por eso se define que la distancia prudencial para que se pueda realizar la acción de aceleración y desaceleración es de 200 mm. Para el eje Y hay una longitud neta de traslación de 1800 mm, por esta razón se define que la distancia prudencial para que realice la acción de aceleración y desaceleración sea de 100 mm. Finalmente para el eje Z, luego de haber realizado las simulaciones respectivas, se midió que su desplazamiento lineal por revolución es de 5 milímetros. Una vez obtenidas todos los datos se procedió a calcular los pasos por revolución que se deben colocar en el programa MACH 3, así como su aceleración y resolución del motor, estos datos se pueden apreciar en la “tabla 3.5”

Tabla 3.5

Ecuación para obtener los pasos por revolución de cada eje en el MACH 3 [21]

Eje	Datos	Ecuación	Resultados $\left[\frac{\text{pasos}}{\text{mm}}\right]$
X	Número de dientes de la rueda del eje X (Paso diametral 5)	$n=20$	Pasos por revolución para el MACH 3 del eje X
	Paso de la rueda del eje X	$p= 15.959 \text{ mm}$	
	Resolución del motor	$R= 4000 \left[\frac{\text{pasos}}{\text{rev}}\right]$	
Y	Número de dientes de la rueda del eje Y (Paso diametral 2,5)	$n=20$	Pasos por revolución para el
	Paso de la rueda del eje X	$p= 31,918 \text{ mm}$	

	Resolución del motor	$R= 5000 \left[\frac{\text{pasos}}{\text{rev}} \right]$		MACH 3 del eje Y	
Z	Paso del tornillo rosca del eje Z	$p= 5 \text{ mm}$	$\text{PRM3} = \frac{R}{p}$	Pasos por revolución para el MACH 3 del eje Z	80
	Resolución del motor	$R= 400 \left[\frac{\text{pasos}}{\text{rev}} \right]$			

Recordando que la velocidad de los ejes X, Y es de 130 mm/s o 7800 mm/min y la velocidad en el eje Z es de 80 mm/s o 4800 mm/min, se procedió a encontrar las aceleraciones máximas de cada eje con las fórmulas mostradas en la “tabla 3.6”, donde se encuentran los resultados calculados.

Tabla 3.6

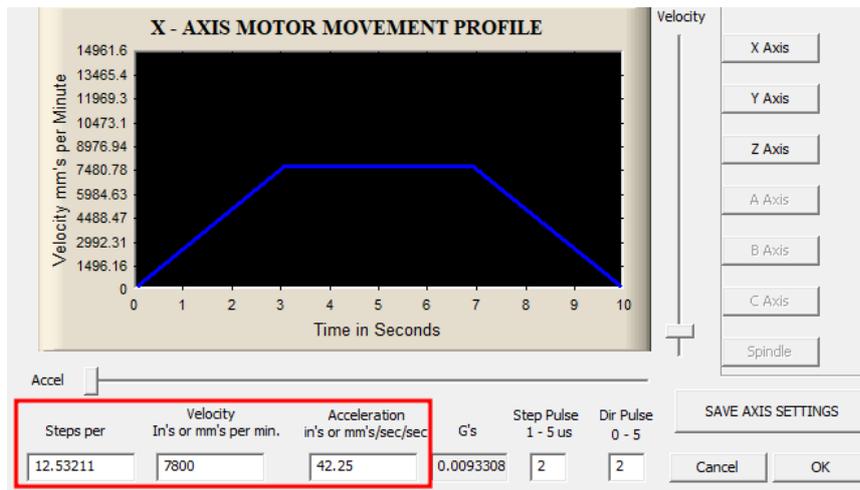
Datos de aceleración máxima para cada eje del pantógrafo [21]

Datos		Eje	Ecuación de aceleración	Resultado $\left[\frac{m}{s^2} \right]$	Resultado $\left[\frac{mm}{s^2} \right]$
Desplazamiento lineal	$X= 0,2 \text{ m}$	Eje X	$a = \frac{v^2}{2X}$	0.04225	42.25
Velocidad lineal	$V= 0,13 \frac{m}{s}$				
Desplazamiento lineal	$X= 0,1 \text{ m}$	Eje Y	$a = \frac{v^2}{2X}$	0.0845	84.50
Velocidad lineal	$V= 0,13 \frac{m}{s}$				
Desplazamiento lineal	$X= 0,05 \text{ m}$	Eje Z	$a = \frac{v^2}{2X}$	0.064	64.00
Velocidad lineal	$V= 0,08 \frac{m}{s}$				

Se procede a colocar los valores calculados de los parámetros de cada motor en el programa de MACH 3 para comenzar la integración del programa de interfaz con nuestro sistema, a continuación, se observa como quedan las gráficas de funcionamiento de los motores para cada eje.

Ilustración 3.20

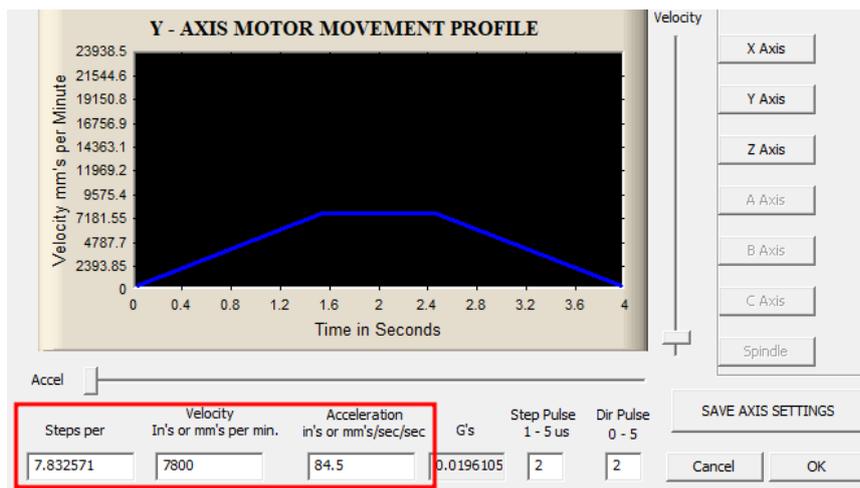
Configuración del motor del eje X



Al abrir el menú de configuración de los motores en el MACH 3, se selecciona la opción del eje X, se procede a cambiar los parámetros como se muestra en el recuadro rojo de la “ilustración 3.20” con los valores antes obtenidos en las “tabla 3.5” y “tabla 3.6”.

Ilustración 3.21

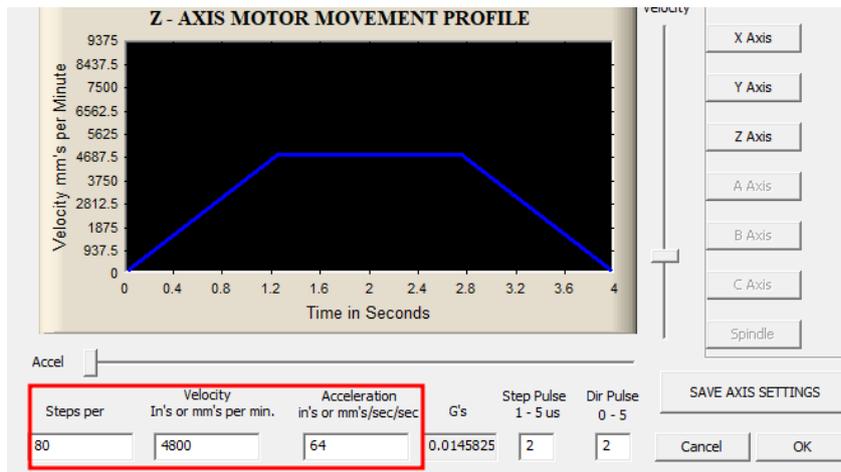
Configuración del motor del eje Y



Al abrir el menú de configuración de los motores en el MACH 3, se selecciona la opción del eje Y, se procede a cambiar los parámetros como se muestra en el recuadro rojo de la “ilustración 3.21” con los valores antes obtenidos en las “tabla 3.5” y “tabla 3.6”.

Ilustración 3.22

Configuración del motor del eje Z



Al abrir el menú de configuración de los motores en el MACH 3, se selecciona la opción del eje Z, se procede a cambiar los parámetros como se muestra en el recuadro rojo de la “ilustración 3.22” con los valores antes obtenidos en las “tabla 3.5” y “tabla 3.6”.

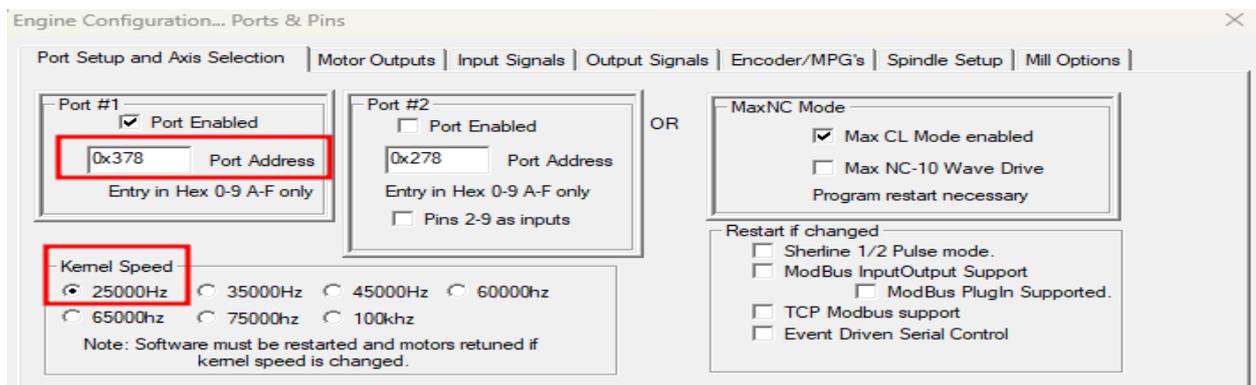
3.3.2 Configuración de los puertos en el MACH 3

El programa MACH 3 es el encargado de transmitir las señales de control mediante la conexión del puerto paralelo del computador con la tarjeta de interfaz DB25-1205, por este motivo, se necesita designar los pines del puerto que van a utilizarse en nuestro sistema con el fin que el programa pueda reconocerlos y realizar el respectivo control de cada motor del pantógrafo.

Para ser capaces de realizar la asignación de puertos, en el programa de inicio seleccionamos la opción Config y elegimos el botón de Ports and Pins, en la ventana emergente saldrá el apartado de seleccionar el puerto de trabajo y la velocidad de transmisión de datos, la configuración realizada para esta sección se puede apreciar en la “ilustración 3.23”.

Ilustración 3.23

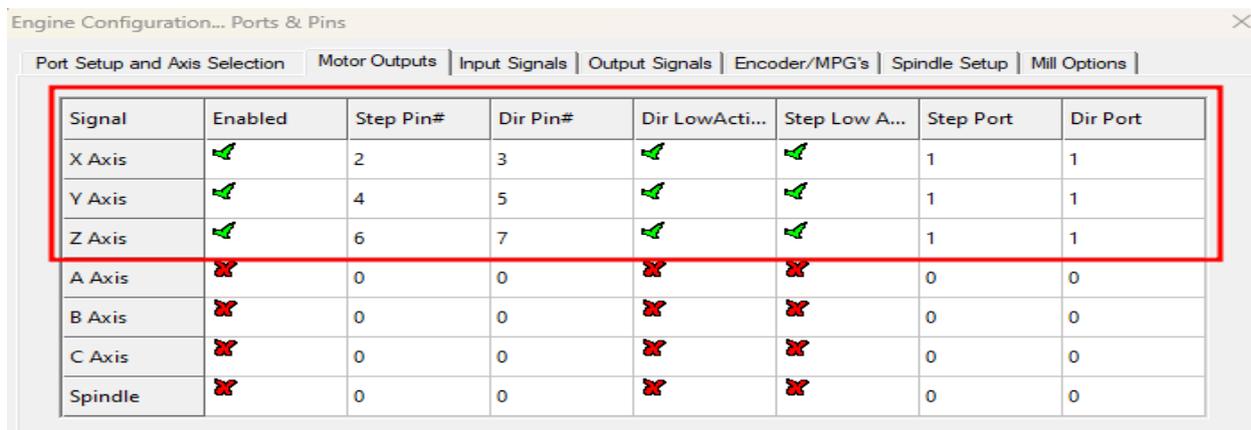
Configuración del puerto de comunicación y velocidad de los datos



En la siguiente sección se configuran las salidas de señales de los motores de paso, dado que los puertos deben ser exactamente los realizados en las conexiones eléctricas realizadas, se colocan los puertos 2 y 3 para el eje X, los puertos 4 y 5 para el eje Y, los puertos 6 y 7 para el eje Z. Adicionalmente, dado que estamos trabajando con un controlador que dispone de entradas activas por bajo, las casillas que se encuentran a lado de la asignación de puertos, Dir Low Active y Step Low Active deberán ser marcadas con el visto verde como se observa en la “ilustración 3.23”. Finalmente, debemos tener en cuenta que la señal Step hace referencia a los pasos del motor mientras que Dir hace referencia a la dirección que llevará el motor.

Ilustración 3.24

Asignación de las señales de salida de los motores de paso



Signal	Enabled	Step Pin#	Dir Pin#	Dir LowActi...	Step Low A...	Step Port	Dir Port
X Axis	✔	2	3	✔	✔	1	1
Y Axis	✔	4	5	✔	✔	1	1
Z Axis	✔	6	7	✔	✔	1	1
A Axis	✘	0	0	✘	✘	0	0
B Axis	✘	0	0	✘	✘	0	0
C Axis	✘	0	0	✘	✘	0	0
Spindle	✘	0	0	✘	✘	0	0

Luego de haber realizado la configuración de las señales de salida de los motores, es necesario configurar las entradas de señales que tiene nuestro sistema, nuestro sistema cuenta con 6 finales de carreras conectadas en serie, además del paro de emergencia y el controlador de altura Proma THC Compact 150. Una de las limitaciones que teníamos en el proyecto es que la tarjeta de interfaz contaba solo con 5 puertos de entradas, por este motivo, los finales de carrera fueron conectados en serie y configurados como normalmente cerrados para en caso de que un eje vaya a exceder los límites, sin importa cuál de ellos fuera, el sistema de finales de carrera se abra y mande una señal a la tarjeta de configuración para que detenga la operación de los motores y corregir la trayectoria, con este razonamiento se pudo crear la opción de retorno al origen, mediante la tecla “h” o como se muestra en el programa como hotkey 72, se definió a la instrucción de “Home” para llevar al sistema a las coordenadas 0,0,0 como se presenta en la “ilustración 3.25”. Las entradas configuradas en este apartado corresponden al puerto 13 para el paro de emergencia, al puerto 12 a los finales de carrera, al puerto 10, 11 y 15 para el encendido, ascenso y descenso de la antorcha de plasma, teniendo una configuración final como se muestra en la “ilustración 3.26”.

Ilustración 3.25

Configuración de los finales de carrera

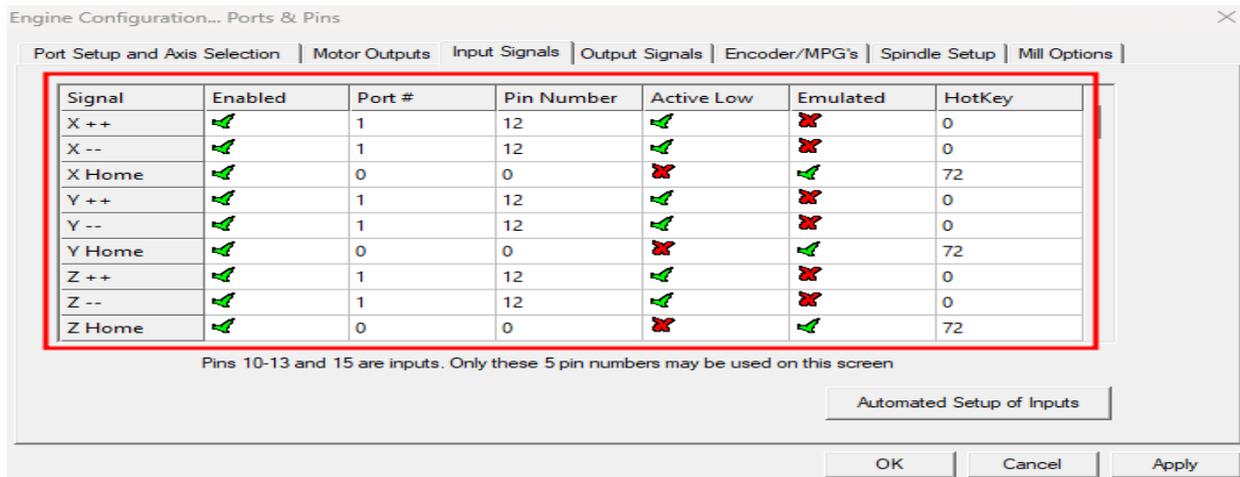
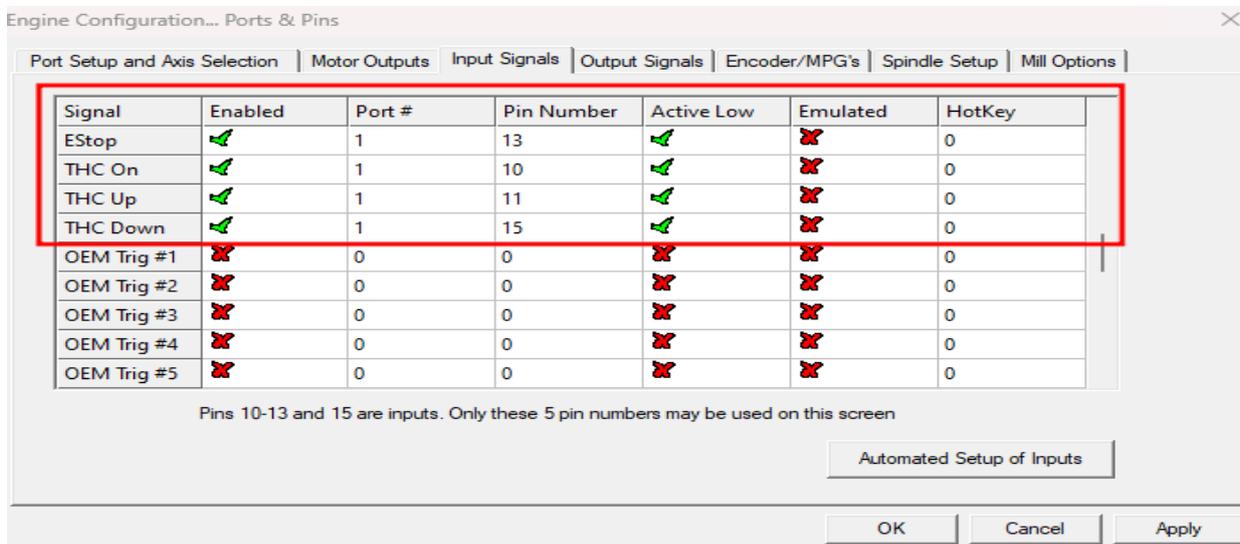


Ilustración 3.26

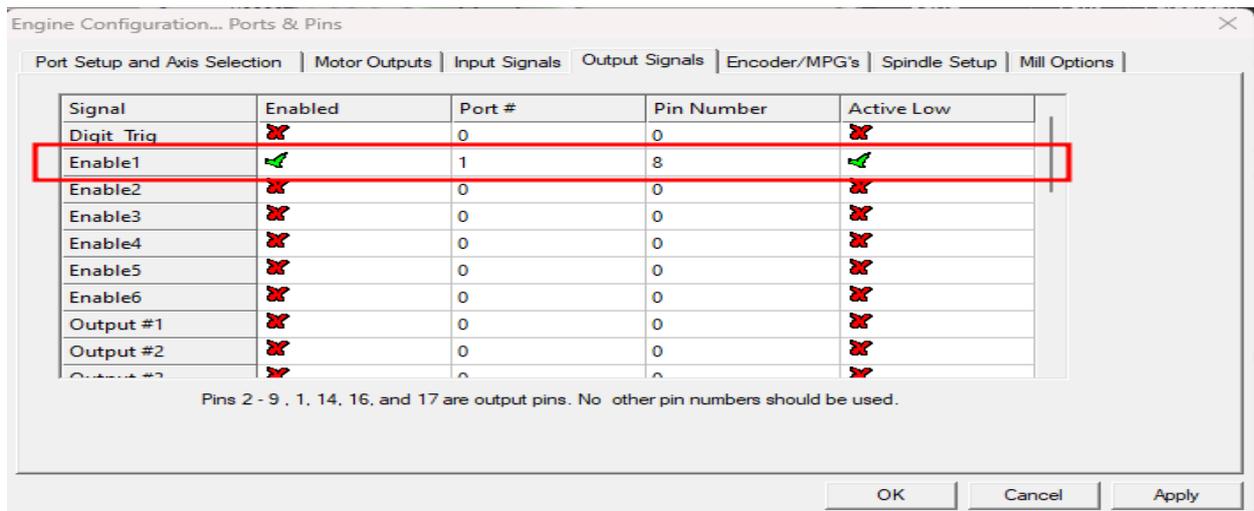
Configuración del paro de emergencia y del controlador de altura de la antorcha



Finalmente se configura la salida de “enable”, la cual es necesaria para activar o desactivar el funcionamiento de los motores, como se había explicado en la sección de resultados de conexiones eléctricas, al utilizar una sola señal de salida, ayuda a optimizar el uso de puertos para en un futuro añadir más elementos como una alarma u otro eje adicional, esta configuración es dada en la “ilustración 3.27”. Adicionalmente, es necesario tener la opción activa de permitir al controlador de altura de la antorcha entrar en funcionamiento sin la necesidad de activar esta opción en la pantalla de inicio como en la “ilustración 3.28”.

Ilustración 3.27

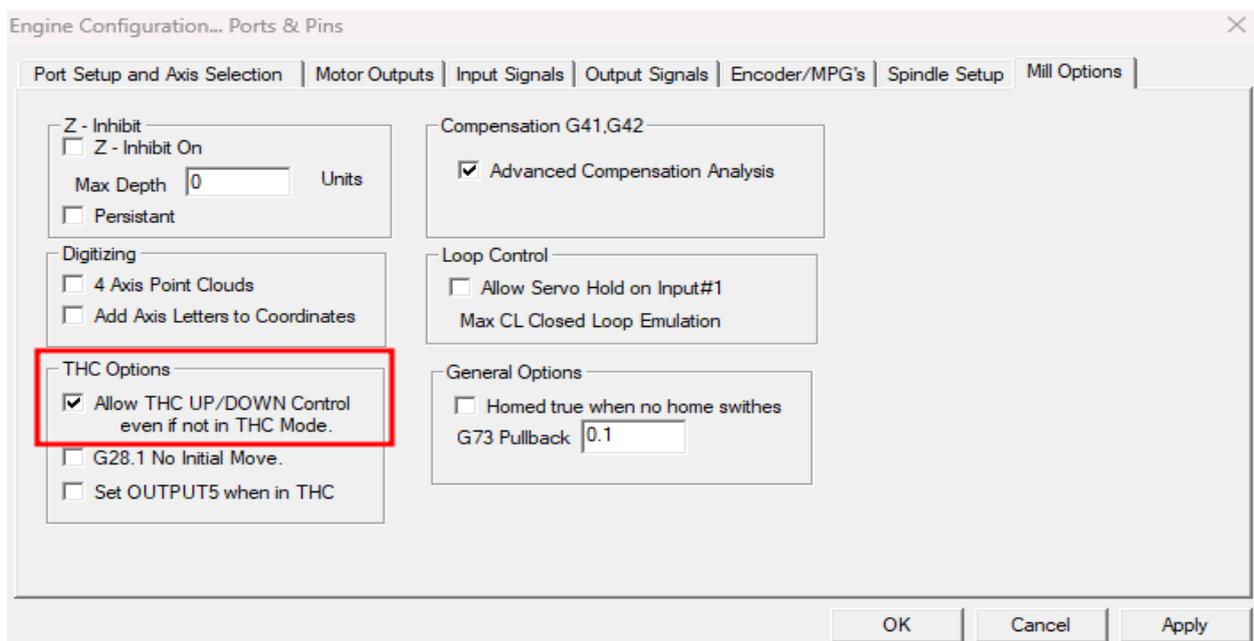
Configuración del puerto para habilitación de los motores del pantógrafo



Para el correcto funcionamiento del sistema se debe configurar el puerto para el funcionamiento de los motores como se muestra en la “ilustración 3.27”.

Ilustración 3.28

Habilitar la opción de siempre utilizar el control de altura de la antorcha



Es de suma importancia realizar lo presentado en la “ilustración 3.28” con el objetivo que siempre se controle la altura de la antorcha con el controlador, lo que permite una retroalimentación al software MACH 3 para realizar cortes precisos.

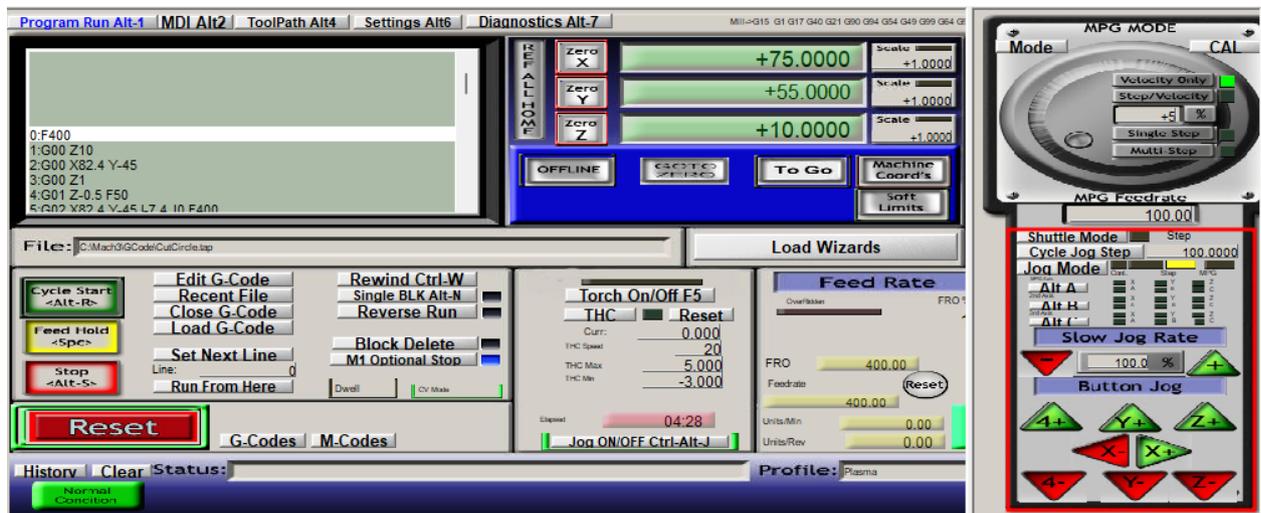
3.4 Simulaciones

Luego de haber realizado las configuraciones necesarias y haber terminado el programa de concepto de prueba, se comienza con las respectivas simulaciones para verificar que las modificaciones realizadas son consistentes y permiten el cambio de pantógrafo de oxicorte a una máquina CNC por corte plasma.

Para la primera parte de la prueba se realiza movimientos manuales de los 3 ejes para verificar que se puede manipular el pantógrafo desde el HMI, asimismo, la velocidad de avance de los ejes puede ser controlado en el MACH 3 con una precisión milimétrica como se puede apreciar en la “ilustración 3.29”.

Ilustración 3.29

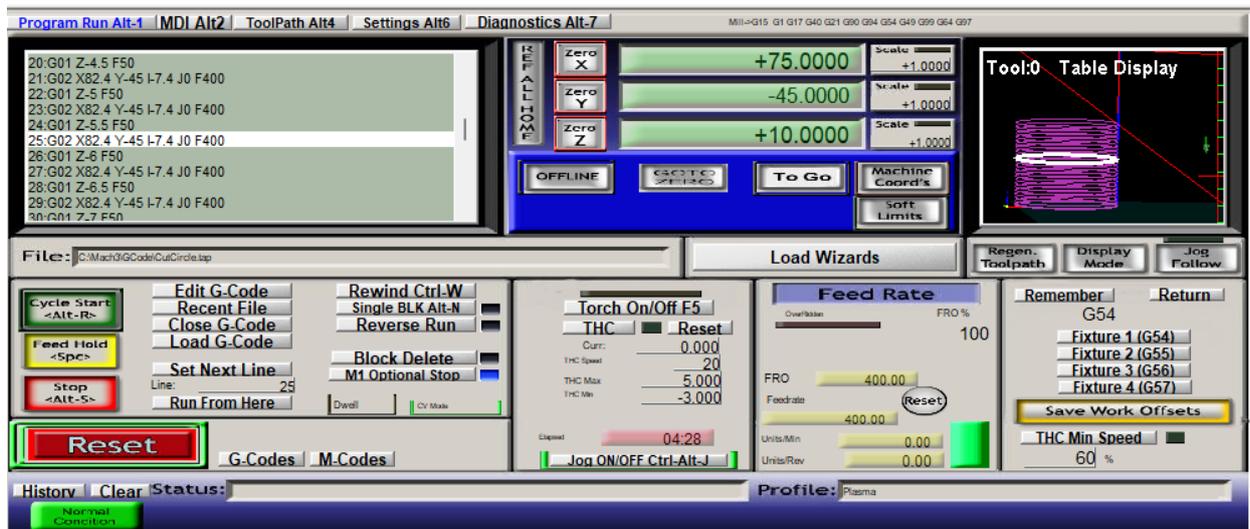
Movimiento manual de los ejes del pantógrafo



Se cargó un programa G para el corte de un agujero en una placa de metal y se observa como el programa MACH 3 dibuja la trayectoria a seguir y realiza los movimientos de manera precisa de los 3 ejes para realizar el corte que se puede apreciar en la “ilustración 3.30” mostrando en que línea del código está y como se va moviendo la antorcha en el espacio de trabajo mientras realiza el proceso de corte por plasma.

Ilustración 3.30

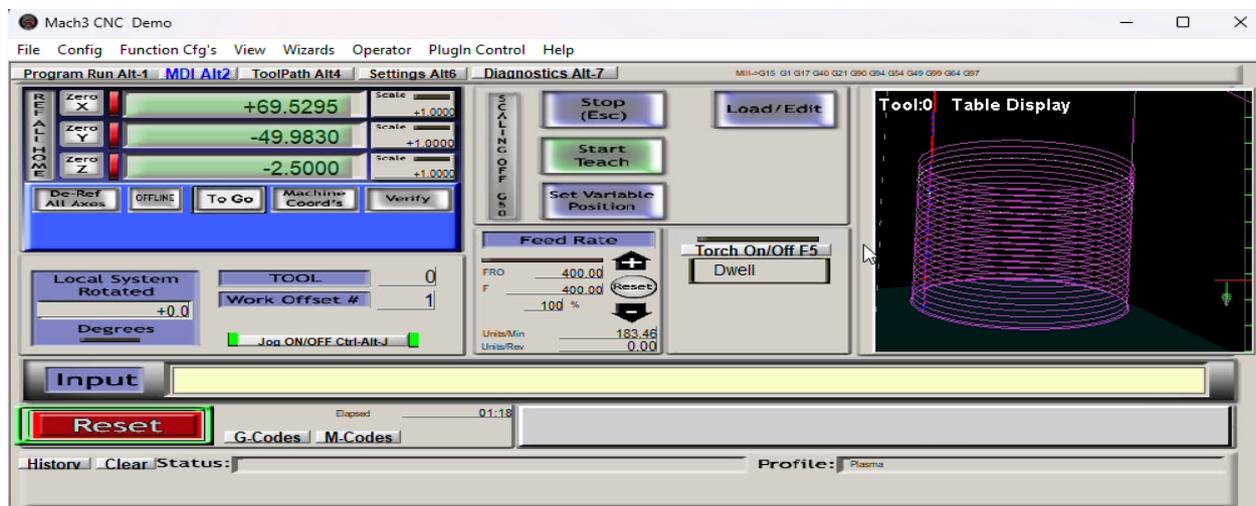
Proceso de corte en el MACH 3



Mientras se realiza el proceso de corte también es posible ver la perspectiva de la mesa de trabajo donde se realiza el corte, el MACH 3 nos da información sobre el progreso de corte que se realiza a lo largo del código G que se subió al software, también nos indica la herramienta que se utiliza en el proceso, dado que la modernización del pantógrafo solo se utilizó una herramienta de corte, sale por defecto que el corte se realiza con la herramienta número 0, como se visualiza en la “ilustración 3.31”.

Ilustración 3.31

Herramienta de corte seleccionada

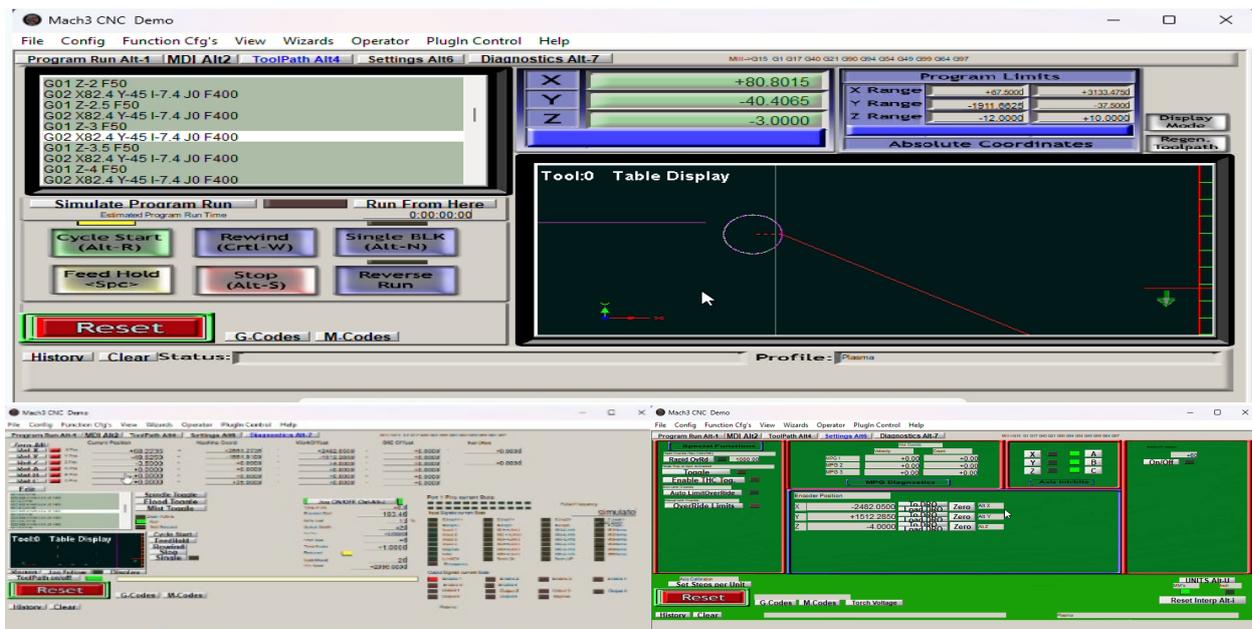


Finalmente se explora otras ventanas extras que ofrece el MACH 3, las cuales podemos observar en la “ilustración 3.32”, en la cual se incluye una perspectiva de la herramienta de trabajo mientras realiza el corte, las coordenadas en tiempo real de los 3 ejes, una de las peculiaridades del software MACH 3 es la posibilidad de definir los límites del área de trabajo que ayuda a

optimizar los movimientos de los ejes al centrarse solo en el lugar donde se va a realizar el corte, otras de las pestañas que es apreciable en la ilustración son la de configuración, en donde se encuentran los datos antes configurados al momento de correr el programa y la pestaña de diagnóstico que indica la posición de los ejes, si se encuentra activa la opción de control de altura de antorcha, las coordenadas de trabajo y actuales del sistema durante todo el corte por plasma. Una vez terminado el programa, se determinó que todo se el corte se realizó de manera correcta y el control de los ejes con el MACH 3 es muy preciso y eficiente, además de tener una precisión de corte que ronda entre los ± 3 mm.

Ilustración 3.32

Otras pestañas importantes del MACH 3

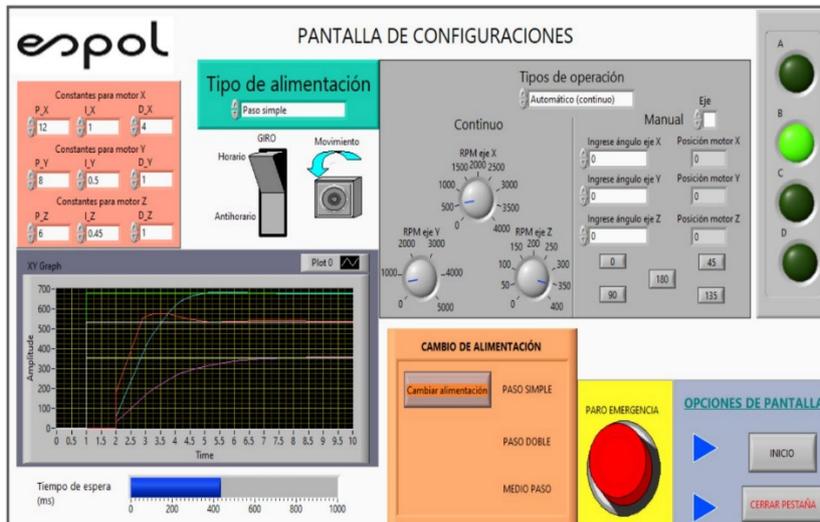


Para una mejor explicación de funcionamiento de los motores se había realizado un programa de prueba de concepto, durante el desarrollo del proyecto se fue mejorando diversos apartados hasta llegar al punto donde se observa en la “ilustración 3.33”, se desarrollaron controladores PID para el control de posición de cada motor, asimismo, se crearon dos tipos de operación al igual que el MACH 3, uno es la operación manual, el donde el operador es el encargado del movimiento de cada uno de los ejes para corroborar el funcionamiento correcto del sistema. En el modo automático se simula una línea de código para el movimiento de los motores según la instrucción dada, mientras se llega al setpoint es posible visualizar el tipo de alimentación del motor que hace referencia a que tipo de movimiento realiza el motor, si se mueve a gran velocidad, si necesita mucho torque y poca velocidad o si necesita un poco de torque y una velocidad media. Adicionalmente en el programa de prueba de concepto es posible visualizar la

secuencia de activación de las bobinas dentro de los motores y el sentido de giro de este para conocer más a fondo el trabajo realizado por los motores durante el proceso de corte por plasma.

Ilustración 3.33

Simulación del programa de prueba de concepto



3.5 Análisis de costos

En esta sección se realizó en análisis de costos de los materiales requeridos tanto en la parte eléctrica como mecánica para este proyecto, con el fin de comprobar la viabilidad del estudio realizado.

Se llevó a cabo un análisis detallado para cotizar los componentes mecánicos necesarios para el proyecto. Se exploraron diferentes opciones de proveedores, evaluando aspectos como precios, calidad de los productos y plazos de entrega. Después de este exhaustivo proceso, se eligió al proveedor que ofrecía las condiciones más convenientes y que mejor se adaptaba a nuestras necesidades específicas.

Además, durante la evaluación, se identificaron ciertos componentes que resultaba más ventajoso adquirir a través de proveedores internacionales. En esta sección también se incluyó el costo de elaboración de algunos componentes necesarios dándonos un valor de costo total de \$1014.73

Tabla 3.7*Análisis de costos del componente mecánico*

Pieza	Descripción	Proveedor	C	C/U	Total
Ruedas dentadas	Maquinada, elaborada con hierro negro ASTM46	Aceros Catbol	1	\$361.03	\$361.03
Soporte del eje Z	Maquinada, elaborada con hierro negro ASTM46	Aceros Catbol	-	-	-
Soporte de motor eje X	Soporte para el eje X, Z, maquinada elaborada con aluminio 7075	Online Metal supply	1	\$28.87	\$28.78
Motor nema 34 86HS9860A4J	Para el movimiento en el eje X	Innovatech	2	\$128.60	\$257.20
Motor nema 23 57HD4016-01	Para el movimiento en los ejes Y, Z	Electronics tienda de robótica	1	\$59.98	\$59.98
Kit para el tornillo sin fin	Incluye soportes, rodamientos y acoples	XIQI	1	\$38.99	\$38.99
Pernos	Pernos de ajuste y sujeción	La casa del perno	15	\$1.25	\$18.75
Taller de torno y soldadura	Fabricación de piezas necesarias	Torno en Prosperina	1	\$250	\$250
TOTAL					\$1014.73

Luego de enlistar todos los componentes electrónicos que son necesarios para cambiar el pantógrafo de oxicorte por un cortador plasma CNC, incluido el cortador plasma, la computadora de escritorio necesaria para visualizar el software MACH 3 y el valor de la licencia para nuestro HMI, se detalla en la “tabla 3.8” con las respectivas cantidades y valor por unidad para finalmente tener un total para este apartado de \$1570.98, siendo un valor bajo en comparación a todos los cambios realizados en el sistema y que cumplan con los requerimientos del cliente asignado.

Tabla 3.8*Análisis de costos del componente eléctrico*

Elemento	Proveedor	C	C/U	Total
Lotos Supreme LTP7500CNC	Amazon	1	\$799.00	\$799.00
Fuente conmutada de 5 VCD a 10^a	Electrostore	1	\$13.00	\$13.00
Driver DM542T marca STEPPERONLINE	Tiendamia	1	\$31.38	\$31.38

Driver DM860T marca STEPPERONLINE	STEPPERONLINE	2	\$35.25	\$70.50
Tarjeta de Interfaz DB25-1205	Amazon	1	\$15.00	\$15.00
Final de carrera tipo interruptor Modelo ME-8104	Amazon	6	\$4.50	\$27.00
Pulsador de paro de emergencia ELE314	Novatronic	1	\$7.70	\$7.70
Fuente de Voltaje Mean Well RSP- 1000-48	Octopart	1	\$236.90	\$236.90
Cable de conexión PC a tarjeta de interfaz	Novatronic	1	\$11.50	\$11.50
Computadora de escritorio MACH 3	MaxxiComp Frs-cnc	1	\$184.00	\$184.00
TOTAL				\$1570.98

La tabla de costos totales presenta el valor total de los componentes mecánicos y eléctricos, adicionando costos por ensamblaje, importaciones y transporte de un punto a otro dándonos un total de \$2865.71 valor que comparado al de otros pantógrafos disponible en el mercado, los cuales los modelos más simples rondan entre los \$4000 a \$8000 mientras que los modelos más sofisticados y de alto rendimiento están entre los \$10000 a \$30000, lo que vuelve viable este proyecto de modernización.

Tabla 3.9

Análisis de costos total

Descripción	Costo
Componente Mecánico	\$1014.73
Componente eléctrico	\$1570.98
Ensamblaje mecánico	\$70.00
Ensamblaje Eléctrico	\$55.00
Importaciones	\$75.00
Transporte	\$80.00
TOTAL	\$2865.71

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

- Se realizaron las diferentes modificaciones mecánicas mediante el uso de mecanismos de transmisión de movimiento como piñón-cremallera y tornillo sin fin que fueron aplicados para el funcionamiento de los ejes, para soportar todas las fuerzas mecánicas del mecanismo luego de la modernización.
- Se diseñó un sistema de control mediante el uso en conjunto del controlador de altura de antorcha ProMa THC Compact 150, la tarjeta de interfaz DB25-1205 y el Software MACH 3 que permitieron realizar el control de posición de los 3 ejes durante el proceso de corte por plasma.
- Se simuló la implementación del rediseño del pantógrafo CNC por corte plasma mediante una prueba de concepto y el software MACH 3 para corroborar la integración de todos los sistemas diseñados y proporcionar una máquina capaz de cortar materiales hasta de 26 mm con una buena precisión

4.1.2 Recomendaciones

- Se recomienda tener a la mano un catálogo de velocidades de corte para los diferentes materiales que usualmente cortan en la empresa, para configurar en la programación G la velocidad requerida según el espesor y material a cortar.
- Se recomienda utilizar reguladores de voltaje, fusibles, relés térmicos u otro aparato de protección conectado a la fuente de voltaje principal para no exponer a los demás componentes a sobrevoltaje y evitar que se dañe el sistema de control.
- En caso de requerir aumentar la capacidad del equipo, sea en aspecto de corte, velocidad de los ejes u otro requerimiento que se desee, consultar a los planos entregados del proyecto para

confirmar que componente del sistema debe ser cambiado, en caso de requerir una mayor capacidad de corte, el equipo generador de plasma deberá ser cambiado.

Referencias

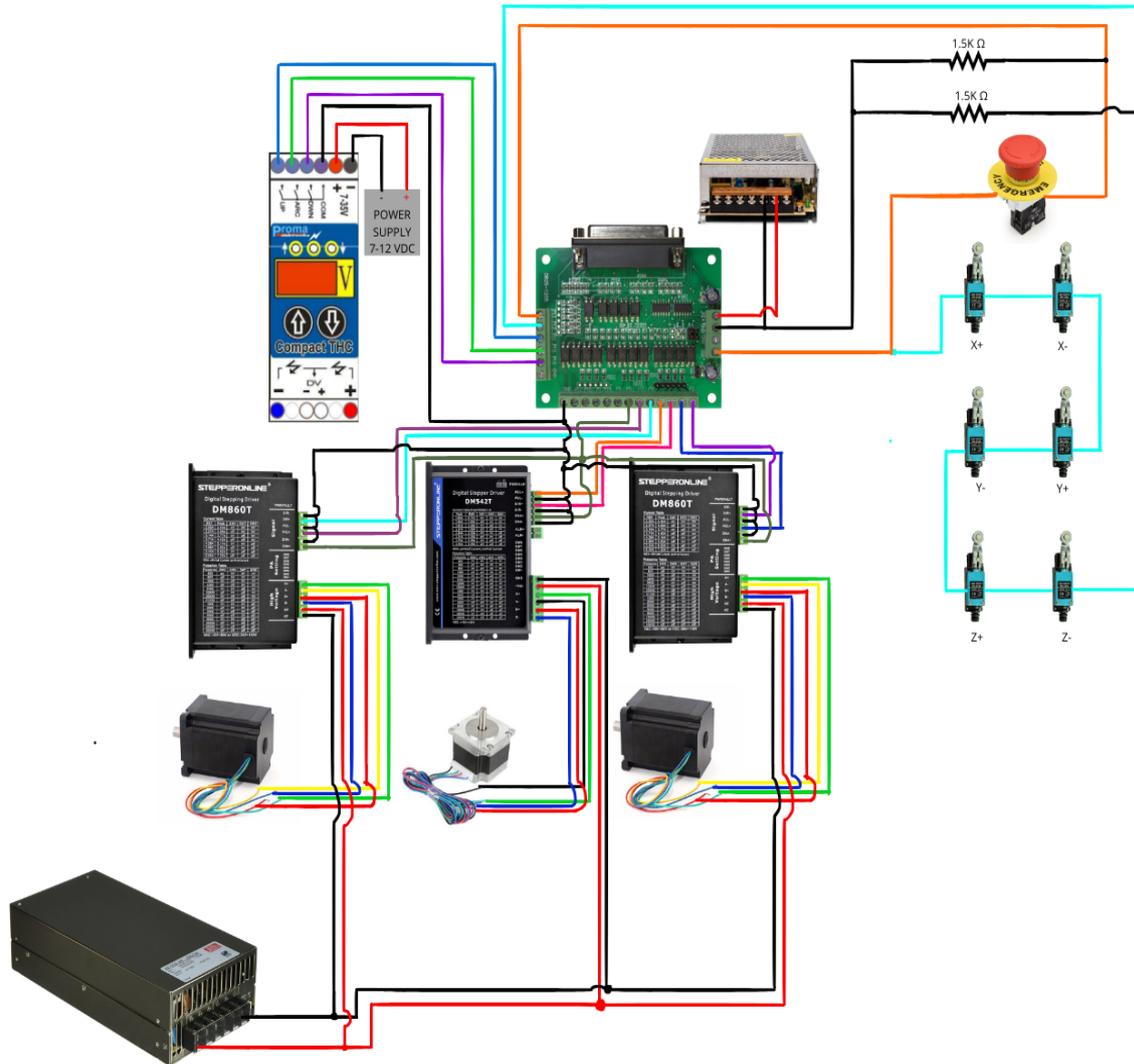
- [1] J. L. Eusebio et al. (2022, noviembre) “La Importancia del Reacondicionamiento (retrofitting) para la Transición Tecnológica de la Manufactura 3.0 a la Industria 4.0”, *Diseño y Planeación Mecatrónica*, 1st ed., pp. 251-261. [Online]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Eusebio-Jimenez-Lopez/publication/378550392_La_Importancia_del_Reacondicionamiento_retrofitting_para_la_Transicion_Tecnologica_de_la_Manufactura_30_a_la_Industria_40/links/65dfba13c3b52a1170fec448/La-Importancia-del-Reacondicionamiento-retrofitting-para-la-Transicion-Tecnologica-de-la-Manufactura-30-a-la-Industria-40.pdf
- [2] Ghosh, S., & Rao, P.V. (2015). Application of sustainable techniques in metal cutting for enhanced machinability: a review. *Journal of Cleaner Production*, 100, 17-34.
- [3] M. de Q. Murad, J. A. G. de Sousa, M. G. de Ataíde, G. H. N. Fernandes, L. L. T. Vaughan, y F. R. Cangue, “Selected metal cutting processes with focus on sustainability”, *Cad. Pedagógico*, vol. 20, n. ° 9, pp. 3845–3878, dic. 2023.
- [4] A. Overby, “The Physical Architecture” in *CNC Machining Handbook*, San Francisco, Estados Unidos: Mc Graw Hill, 2010.
- [5] Alfaro Ruiz, J. A. (2023). PANTÓGRAFO DE PLASMA CNC. +Ciencia, (32), Página 25.
- [6] Air Liquide España. (s.f.). El proceso de oxicorte. Disponible en: <https://es.airliquide.com/soluciones/corte-industrial/el-proceso-de-oxicorte>
- [7] Carburos Metálicos. (2024). Guía para la selección de gases para oxicorte. <https://www.carburos.com/-/media/files/es/231/231-21-006-es-guia-seleccion-gases-oxicorte.pdf>
- [8] Álvarez San Miguel. (2024). ¿Qué gases pueden usarse en un proceso de oxicorte? <https://alvarezsanmiguel.com/gases-pueden-usarse-en-proceso-de-oxicorte/>
- [9] Alfaro Ruiz, J. A. (2023). PANTÓGRAFO DE PLASMA CNC. +Ciencia, (32), Página 26.
- [10] WOLF 3D. (s.f.). Esto es un [Pantógrafo CNC] y sus Características. <https://wolf3d.tech/blog/caracteristicas-de-un-pantografo-cnc/>
- [10] WOLF 3D, "Características de un pantógrafo CNC," [En línea]. Disponible en: <https://wolf3d.tech/blog/caracteristicas-de-un-pantografo-cnc/>.
- [11] Ebac, "Conceptos de modelado 3D y su funcionamiento," 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ebac.mx/blog/que-es-el-modelado-3d>.
- [12] Autodesk, "Autodesk Inventor," 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.autodesk.com/latam/products/inventor/overview>.

- [13] W. Bolton, Controladores lógicos programables, Newnes, 2015.
- [14] Autodesk, "Software y soluciones para programación CNC," [En línea]. Disponible en: <https://www.autodesk.com/es/solutions/cnc-programming>.
- [15] "Introducción al G-code en programación CNC," OpenAI, [En línea]. Disponible en: <https://www.openai.com/cnc-programming-g-code>.
- [16] Alibaba, "Sitio web oficial de Alibaba.com - Mercados en línea de China," 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.alibaba.com>.
- [17] Amazon, "Amazon.com: Compras en línea para electrónicos, ropa, computadoras, libros, DVDs y más," 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.amazon.com>.
- [18] De Máquinas y Herramientas (2015, septiembre 22). ¿Qué tener en cuenta al elegir una mesa de corte por plasma? Parte III [Online]. Disponible en: <https://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/que-tener-en-cuenta-al-elegir-una-mesa-de-corte-por-plasma-parte-iii>
- [19] HVH Industrial Solutions (2024). Servomotores síncronos rotativos | Servomotores eléctricos. [Online]. Disponible en: <https://hvhindustrial.com/es/sub-category/servomotores-s%C3%ADncronos-rotativos/18552>
- [20] Making Stuff. DIY CNC Plasma Build – Playlist. (Mar. 2, 2018). Accessed: Jun. 8,2024. [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=dYmKRFXfb4I&list=PL4lExYUFHSPy926ACka0Rf6WGTWqWWXS4&index=1>
- [21] F. A. Peña y A. G. Zúñiga, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA CORTE DE PLANCHAS CON PLASMA OPERADO POR COMPUTADOR", Tesis de Magíster, Dept. Ing Mec., Univ. Politécnica Nacional, Quito, Ec., 2015.
- [22] ManualsLib. (2021, junio 03). "PROMA COMPACT THC 150 MANUAL DE OPERACIÓN" (1rst ed.) [Online]. Disponible en: <https://www.manualslib.es/manual/253986/Proma-Compact-Thc-150.html>

APÉNDICE A

Ilustración A.1

Conexiones eléctricas del sistema

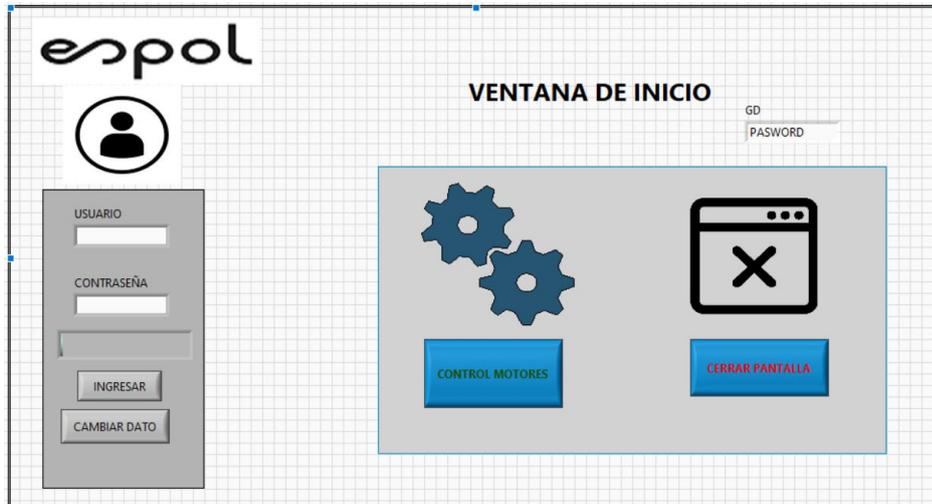


APÉNDICE B

Explicación del programa de prueba de concepto:

Ilustración B.1

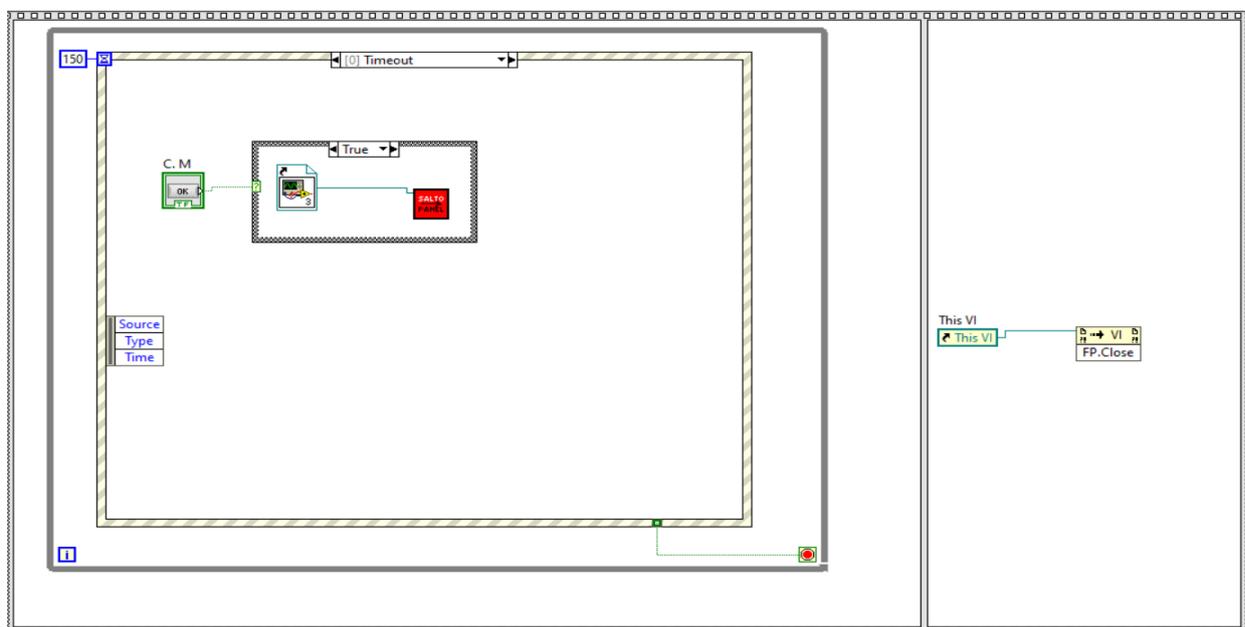
Ventana de inicio programa de prueba



En la ilustración de arriba se puede apreciar la ventana de inicio, por donde el programa empezará a ejecutarse. Consta de USUARIO y CONTRASEÑA para que sólo el personal autorizado pueda ingresar y configurar el control de los motores. Existe la opción de poder cambiar nombre, así como el salto de ventana emergente donde se procede a controlar la velocidad de los motores de los ejes de la máquina. Luego se dará una mayor explicación.

Ilustración B.2

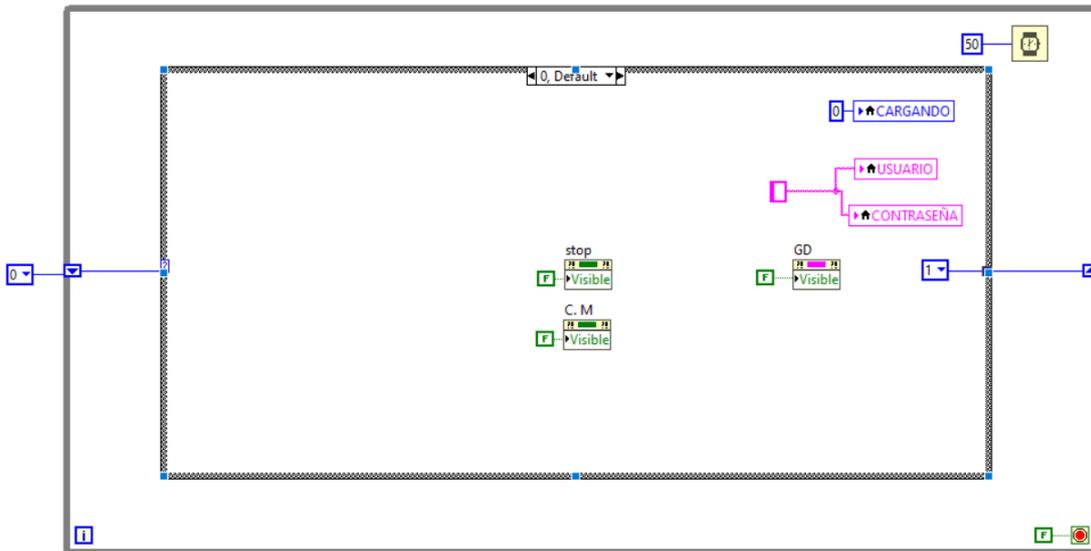
Programación de ventana emergente



En la parte de programación de la VENTANA DE INICIO, utilizamos una sucesión de secuencias para poder pasar de una ventana (subVI) a otra ventana y viceversa. Por ende, la ventana de PANTALLA DE CONFIGURACIONES.

Ilustración B.3

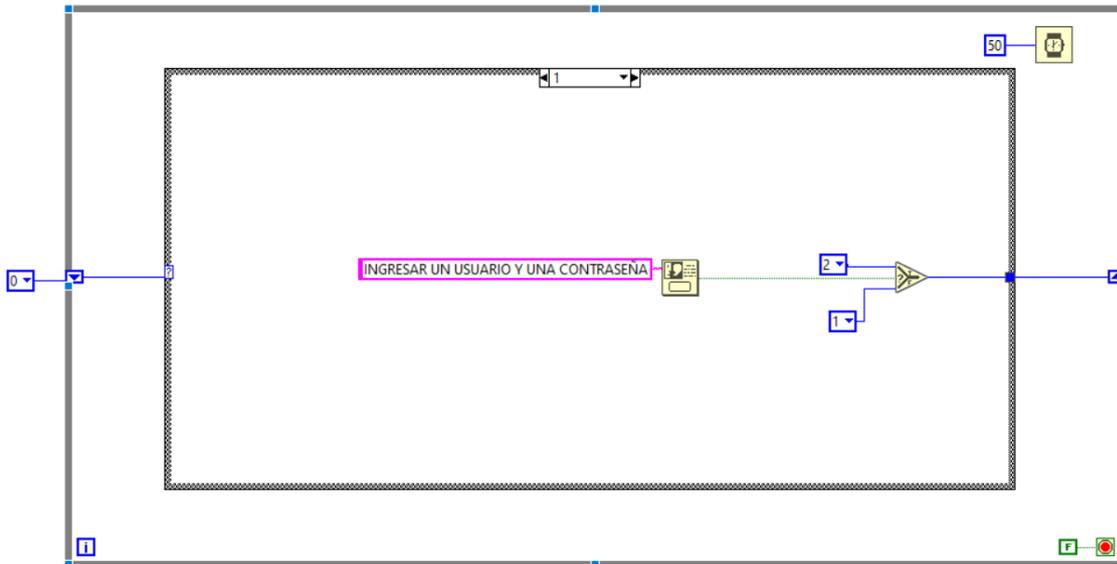
Iniciación de variables de la ventana inicio



Centrándonos en la parte de programación de USUARIO y CONTRASEÑA seteamos o inicializamos por defecto el valor que cada una de las variables queremos que empiecen. Usamos un ciclo WHILE eterno con un CASE STRUCTURE en su interior y con la ayuda del SHIFT REGISTER proporcionado por el lazo WHILE, realizamos una máquina de estado (quiere decir que para poder pasar a otra instancia necesita la orden de un controlador para pasar a la siguiente fase, de no recibir la señal del controlador, el programa se ejecutará cíclicamente en ese estado).

Ilustración B.4

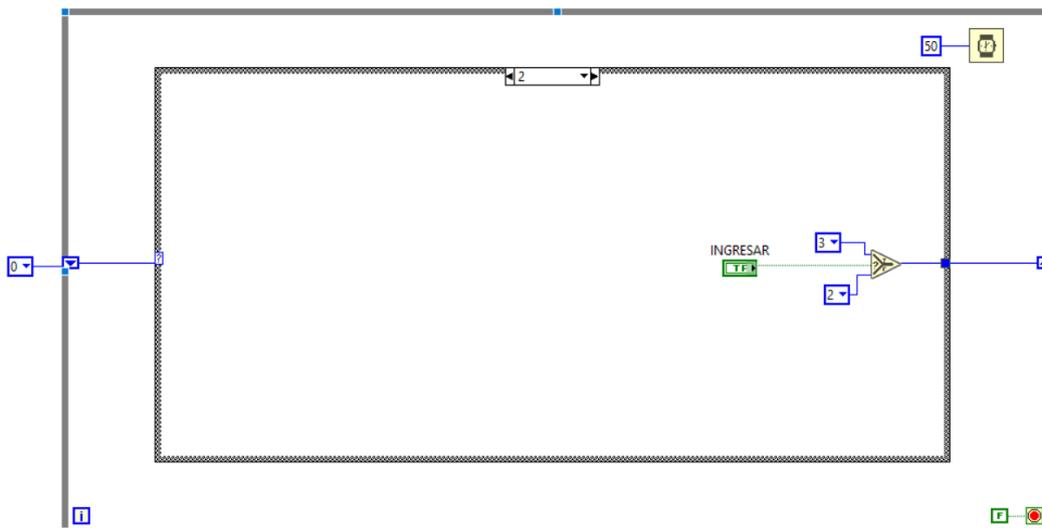
Mensaje al usuario



Entramos al siguiente Estado. Hacemos un diálogo donde para dar a conocer al usuario sobre los procedimientos que debe seguir para poder ejecutar de forma adecuada el programa. Con la ayuda de un SELECT o selector permitimos el cambio de estados.

Ilustración B.5

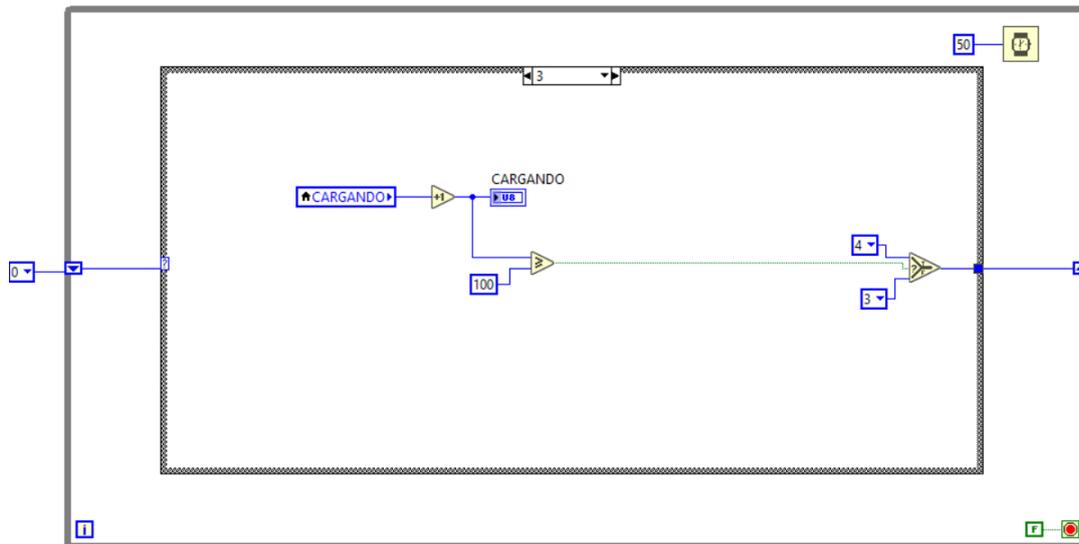
Ingreso de información al programa



En la figura podemos visualizar sólo un botón denominado INGRESAR, éste permitirá al programa conocer que el usuario previamente ya ha rellenado los casilleros de USUARIO y CONTRASEÑA.

Ilustración B.6

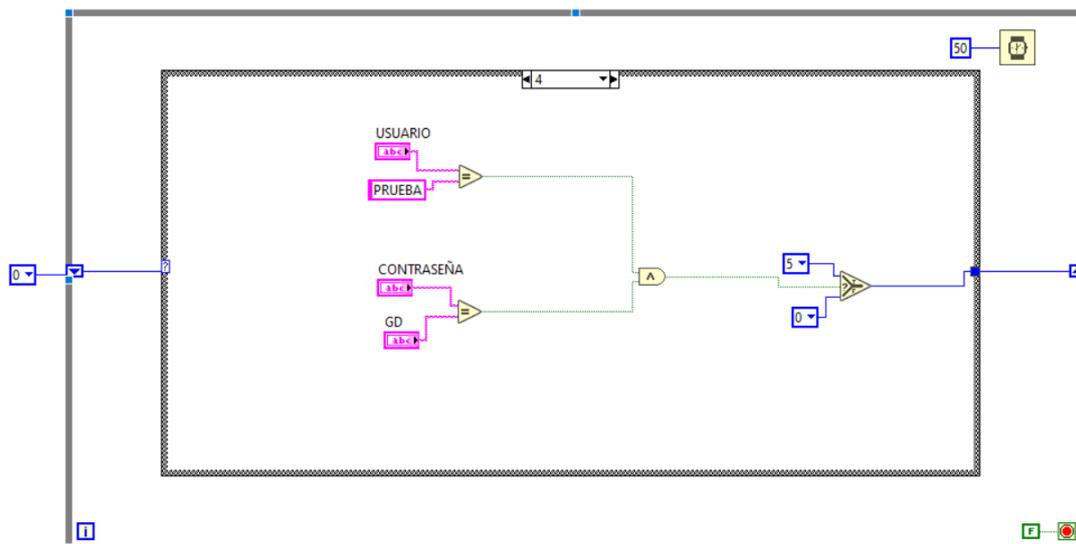
Procesamiento de los datos ingresados



Programación de la barra de progreso, una vez que llegue al 100 éste indique que el programa cargó los datos del usuario, y pasamos al siguiente estado.

Ilustración B.7

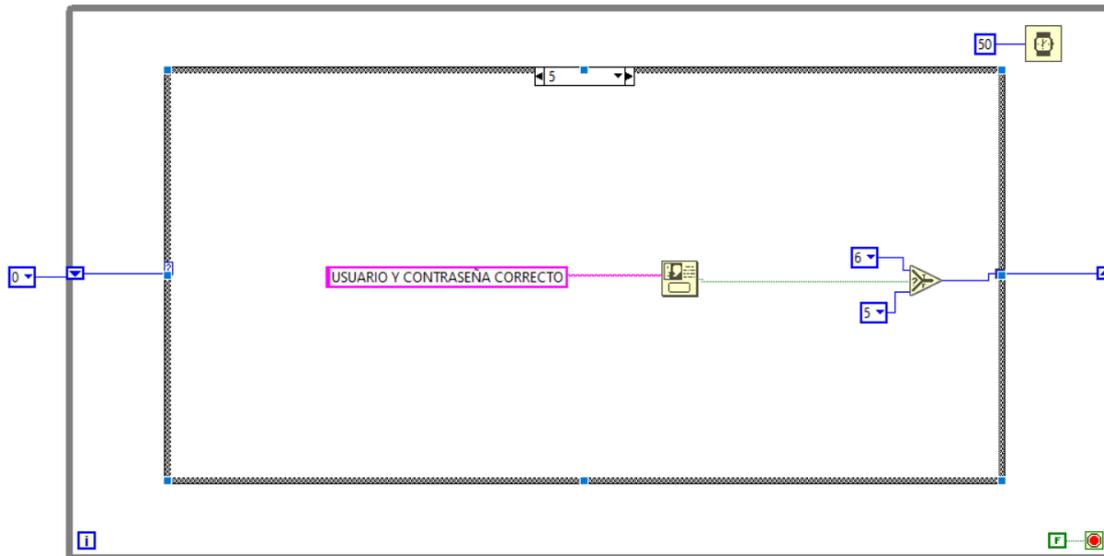
Comprobación de los datos dado por el usuario con los datos guardados en el programa



En esta sección el programa realizará la comparación tanto si coincide el usuario con el usuario otorgado que en este caso es PRUEBA, y si coincide contraseña ingresada con la contraseña guardada en el programa. Si tanto USUARIO y CONTRASEÑA coinciden el programa permitirá que uno pueda cambiar a la ventana de configuraciones y acceder al cambio de contraseña si el encargado lo deseara, caso contrario si uno de los datos ingresados no coincide, el programa se reinicia y comienza en el estado “0”.

Ilustración B.8

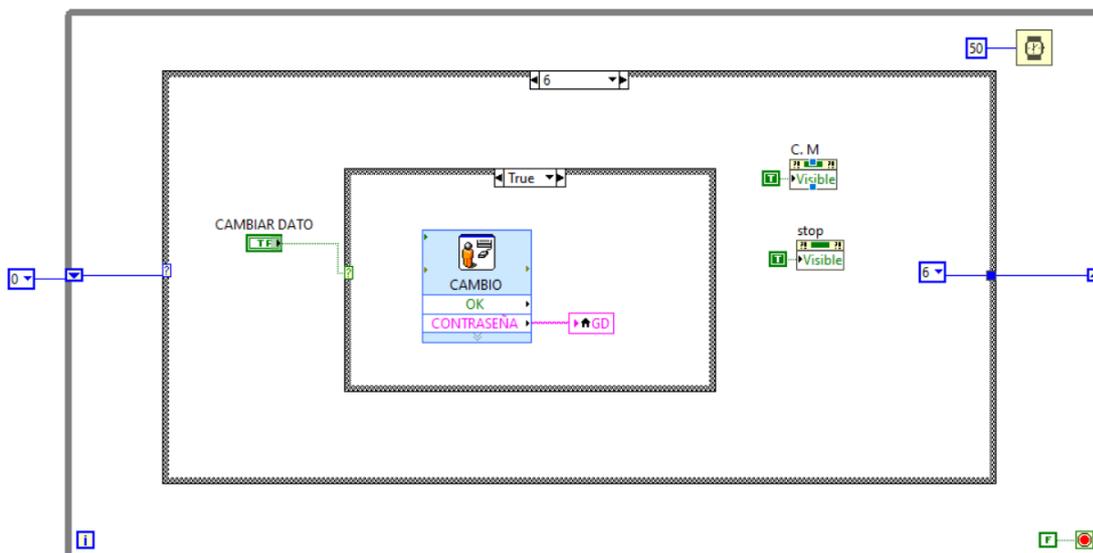
Datos correctos



Mensaje al usuario que todos los datos ingresados son los correctos.

Ilustración B.9

Cambio de contraseña

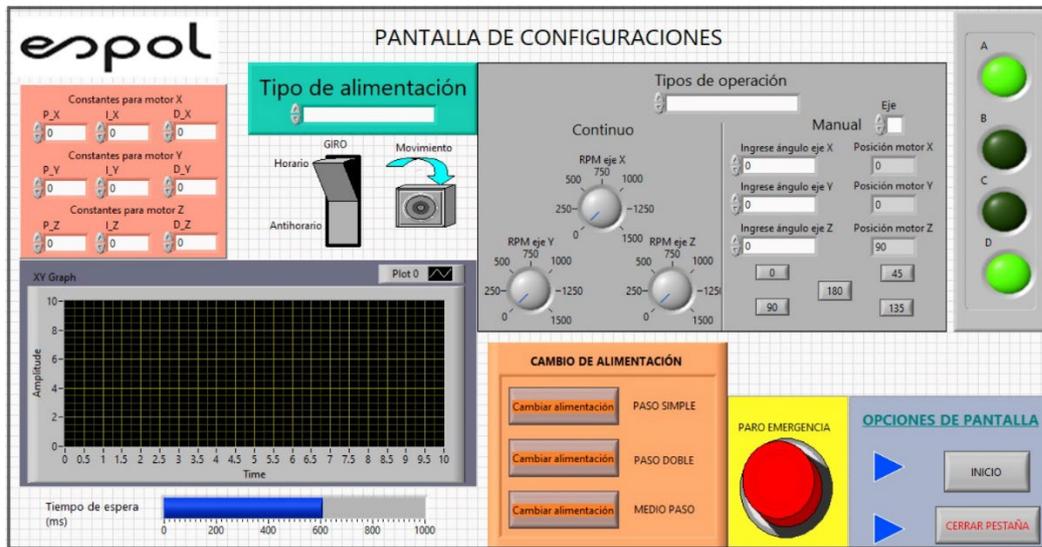


Parte de la programación que permite realizar el cambio de contraseña y los botones de cambio de ventana y cerrar ventana se visualizan.

PANTALLA DE CONFIGURACIONES

Ilustración B.10

Ventana de configuraciones



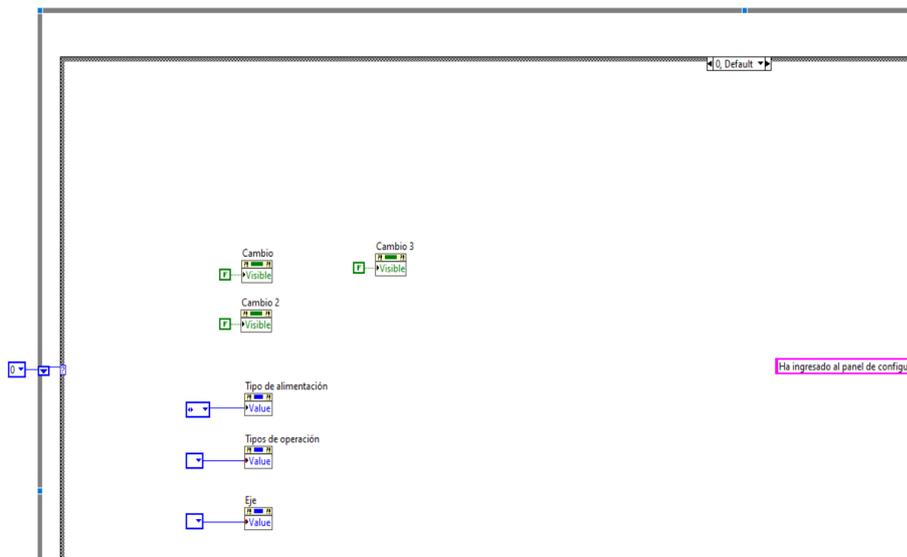
Esta ventana trata de simular las características básicas del MATCH 3. En la parte izquierda de la ventana observamos las constantes para colocar las constantes necesarias del PID de cada uno de los motores. Continuamente en la parte inferior observamos un graficador, en éste podremos visualizar la curva de las revoluciones entregadas por cada uno de los motores. En tiempo de espera permitirá simular la velocidad (tipo PWM o ancho de pulso) con el cual las bobinas del motor serán activadas, esto en el programa de MATCH 3 los valores del PWM dará cada uno de los drivers de los motores, y éste a su vez realizará el proceso de PID que ya viene incluido.

En la pantalla observamos que debemos seleccionar el tipo de alimentación que requerirán los motores para realizar el trabajo indicado. Así mismo como el sentido del giro que el rotor realice. En tipo de operación seleccionamos si queremos que el programa se ejecute de manera continua o si por su defecto el usuario quiere posicionar el motor en un sitio determinado al hacer uso de la opción manual, cabe mencionar que en este caso se moverán los motores uno por uno y no de manera secuencial.

En cambios de alimentación se tiene un botón de cambio para cada caso de alimentación seleccionado. Así como un paro de emergencia y los cambios de pantalla a la ventana de inicio y la de cerrar pestaña.

Ilustración B.11

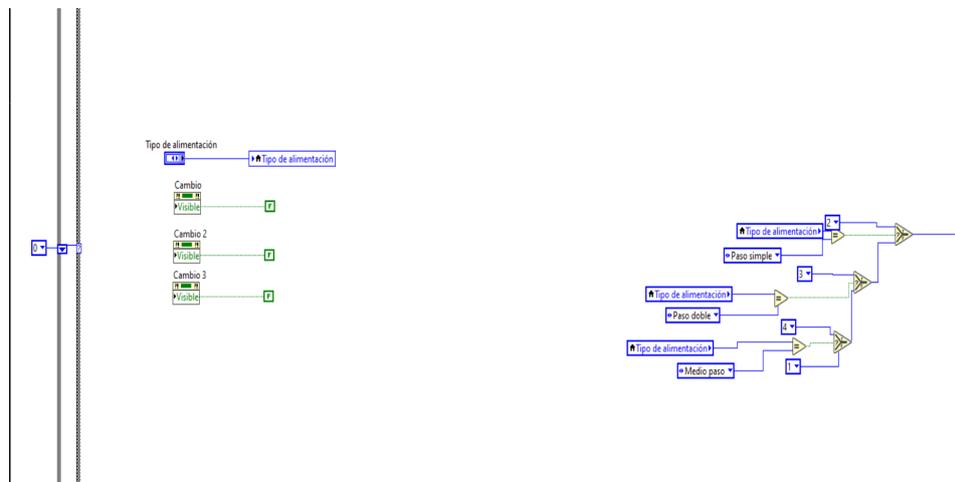
Inicialización de las variables



Así mismo como en la pantalla de inicio, el programa está regido por una máquina de estados. En el inicio colocamos los valores de arranque de las variables con la finalidad de que el usuario pueda seleccionar el tipo de alimentación o el tipo de operación y a su vez el eje en el cual quiere interactuar, claro si se encuentra en modo manual.

Ilustración B.12

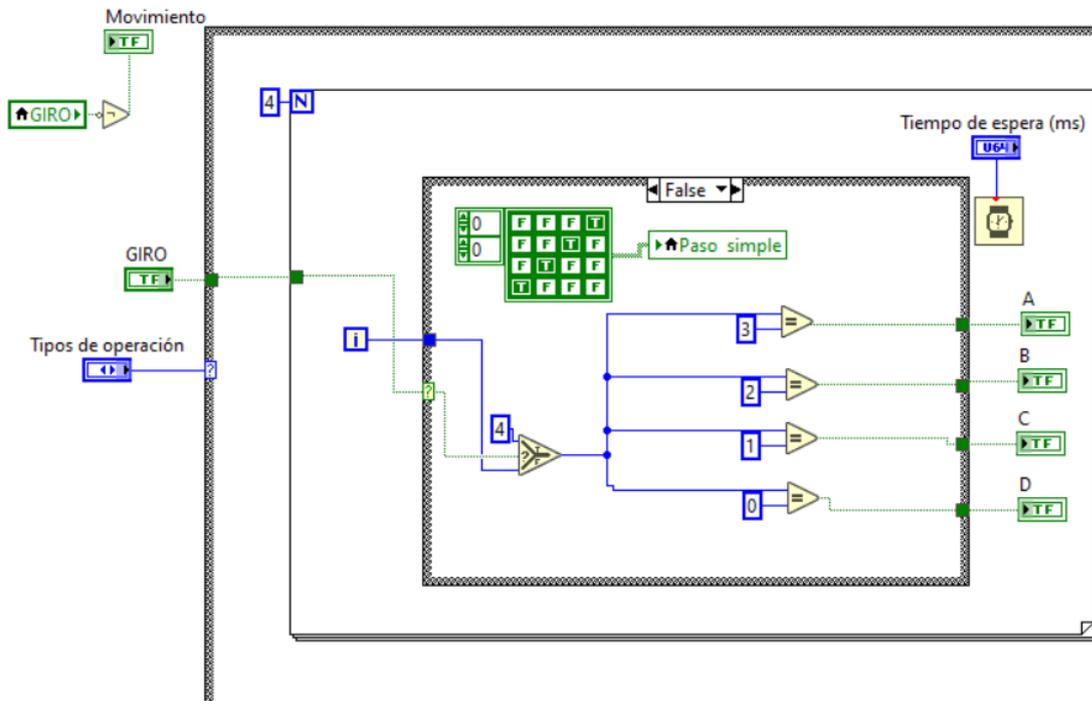
Selección del tipo de alimentación



Para continuar con el programa ocultamos los botones de cambio de alimentación debido a que todavía el usuario no ha seleccionado ninguno. Una vez que el usuario haya seleccionado nos llevará a los distintos estados del programa. Por ejemplo, si escogemos la alimentación PASO SIMPLE, nos dirigiremos al estado “2” en ella se podrá seleccionar cómo serán controlados los motores, ya sea por el programa o por manipulados por él.

Ilustración B.13

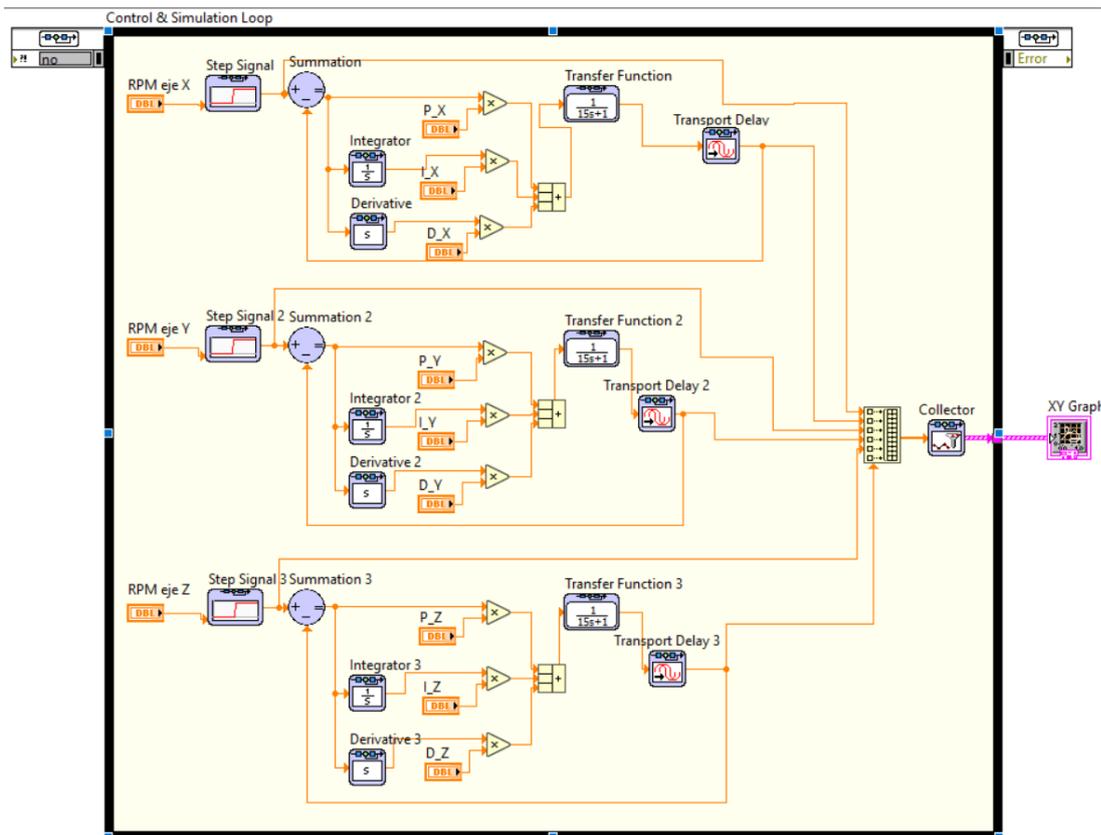
Secuencia de alimentación de las bobinas de cada motor



Dependiendo del sentido del rotor, las bobinas del motor serán activadas y éstas podrán ser visualizadas por medio de unos indicadores leds colocados en la parte derecha de la ventana de configuraciones. Esto es visible en la opción AUTOMÁTICO.

Ilustración B.14

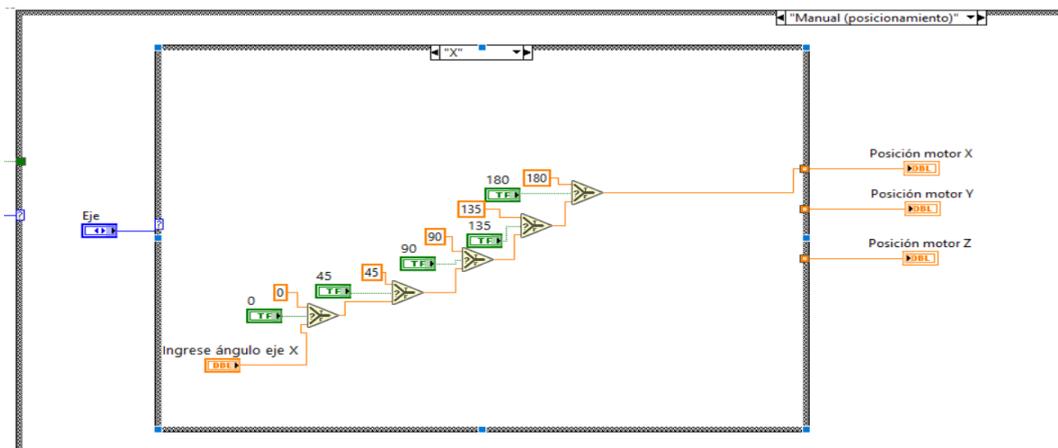
PID valores de entrada



En la misma sección automático al no poseer un controlador físico, dentro de LabVIEW se puede simular la conexión de este. Utilizamos esto para poder hacer el proceso de control de los RPM del motor. Por medio de un DIAL o perilla setear el RPM requerido por cada uno de los motores y con la ayuda del PID poder llegar a ese valor lo más cercano posible.

Ilustración B.15

Selección del ángulo de los motores forma manual

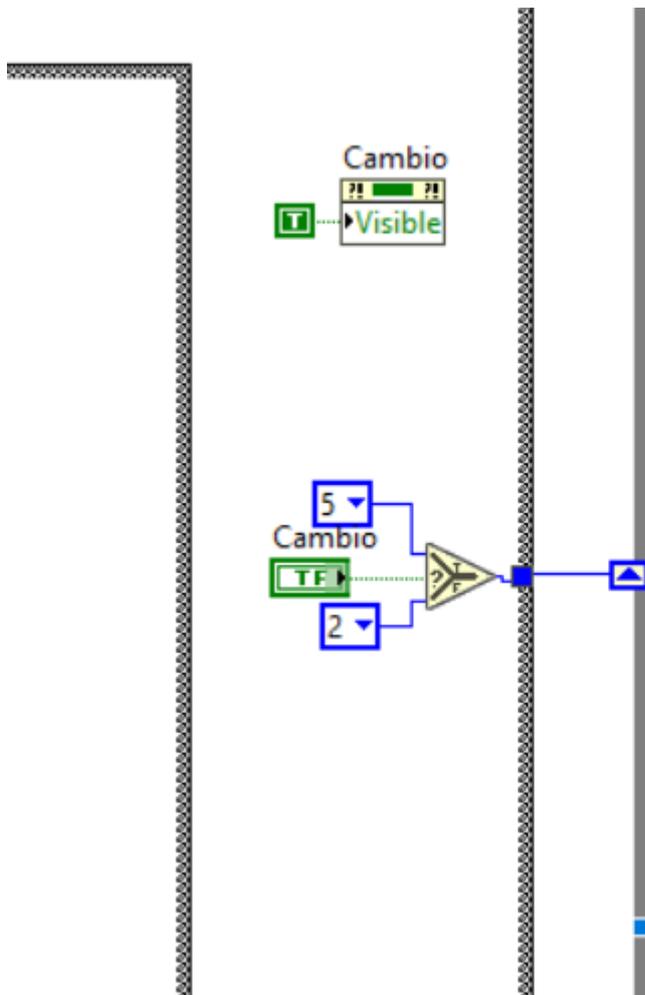


Para la parte MANUAL en este caso observamos que nos encontramos en el eje X, se puede mover el motor ya sea por los grados escritos directamente en el recuadro o por medio de los

botones desplegados en la pantalla. Para efectos de simulación estos botones cumplen función de interruptores, pero en caso de tener conectado un controlador al ordenador, este botón daría una señal digital al controlador y el contenido de dicho botón se direccionará en la programación del controlador (MATCH 3, Arduino, PLC, driver, entre otros) haciendo el movimiento del rotor al punto deseado.

Ilustración B.16

Activación de botón cambio de alimentación



Para poder salir de cada uno de los distintos tipos de alimentación se visualiza un botón de cambiar alimentación para poder salir del bucle, caso contrario se permanecerá en el estado y ejecutándose hasta que este controlador sea activado.

Ilustración B.17

Ejecución del programa prueba

The screenshot displays the 'espol' configuration interface. Key elements include:

- Motor Constants:** Parameters for motor X (P_X=9, I_X=0.6, D_X=0), motor Y (P_Y=8.5, I_Y=0.75, D_Y=0), and motor Z (P_Z=8, I_Z=0.4, D_Z=0).
- Power Type:** Set to 'Paso simple'.
- Operation Modes:** 'Automático (continuo)' is selected. RPM scales are shown for X (0-3000), Y (0-4000), and Z (0-400).
- Graph:** An 'XY Graph' showing Amplitude (0-800) over Time (0-10). A 'Tiempo de espera (ms)' slider is set to approximately 200ms.
- Emergency Stop:** A prominent red 'PARO EMERGENCIA' button.
- Control Panel:** Includes 'CERRAR PESTAÑA' and 'INICIO' buttons, and a vertical stack of indicator lights A, B, C, and D.

Ejemplo de la ejecución de los motores en la sección automática. Donde modificamos los valores del PID para que el motor entregue los RPM deseados.

APÉNDICE C

