



DISEÑO Y ANÁLISIS DE UNA MÁQUINA CNC DE 3 EJES PARA CORTE EN EMPRESAS TEXTILES.

Leidy Briyithe Fajardo Castro

Wilmer Jhoan Hernández García

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Bogotá, Colombia
2020

DISEÑO Y ANÁLISIS DE UNA MÁQUINA CNC DE 3 EJES PARA CORTE EN EMPRESAS TEXTILES.

Leidy Briyithe Fajardo Castro

Wilmer Jhoan Hernández García

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero mecatrónico

Director (a):

Julián David Pareja Garzón M. Sc

julian.pareja@uan.edu.co

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2020

“Recuerda mirar arriba, a las estrellas, y no abajo, a tus pies.

Intenta encontrar el sentido a lo que ves y pregúntate qué es lo que hace que el Universo exista. Sé curioso. Por muy difícil que te parezca la vida, siempre hay algo que puedes hacer y en lo que puedes tener éxito. Lo único que cuenta es no rendirse”

Stephen Hawking

Agradecimientos

Son pocas las palabras con las que podemos expresar la gratitud que tenemos por el esfuerzo, sacrificios y el apoyo incondicional de nuestros padres pues sin ellos no estaríamos hoy culminando esta etapa en nuestras vidas y dando inicio con la realización de nuestros sueños. Al director de este proyecto y a los docentes que participaron en la formación de los nuevos ingenieros que presentan este documento, les agradecemos por brindarnos su tiempo, compartir sus experiencias y sobre todo por incentivar aún más la chispa de la investigación y el aprendizaje continuo. Por último y no menos importantes damos gracias a nuestra institución por acogernos, proporcionarnos los espacios y permitimos aprender de cada miembro de ella con lo cual podemos ser mejores personas y profesionales.

Resumen

En el presente proyecto se desarrolló el diseño y análisis de una máquina CNC de 3 ejes a bajo costo para el corte de tela (Huracán y tempestad) en empresas textiles, con el objetivo de mejorar la productividad en la empresa Creaciones Rolando. Con este diseño se pretendió garantizar una mayor eficiencia, disminuir el riesgo operativo para los trabajadores de la empresa durante la fabricación de prendas para entidades de seguridad privada en su proceso de corte, además que fuera asequible para microempresas, a partir de la simulación en Mach 3 se observó una reducción del número de horas empleadas en la producción de los patrones, por lo tanto la empresa va a requerir de menos empleados para el proceso de corte, además la probabilidad de que los operarios padecieran de algunas enfermedades como túnel de Carpo, amputación de falanges u otras enfermedades provocadas por el excesivo trabajo manual podría disminuir.

Para el desarrollo del proyecto fue importante considerar los requerimientos de la empresa para seleccionar correctamente la instrumentación y elementos mecánicos, además con los resultados obtenidos en simulación de cargas en Solidworks de Tensión nodal y desplazamiento dónde se obtuvieron resultados favorables comparando con el límite elástico de los materiales seleccionados, también se realizó el análisis y adquisición de los componentes electrónicos para implementar la máquina, lo cual implicó realizar las conexiones de los motores a los drivers, al controlador Mach3 y a la fuente de alimentación. Siendo el inicio para realizar algunas pruebas en el software Mach 3, de este modo se obtuvieron los tiempos estimados de corte sobre cada patrón para una posterior tabulación con los datos obtenidos de corte manual y de esta manera se comprobó que aumento la productividad en el proceso de corte con la máquina CNC hasta en un 31,2% teniendo como base los tiempos de trabajo arrojados por el software y de esta manera reduciendo el tiempo de trabajo del operario.

Palabras clave:

CAD, Código G, Control numérico computarizado (CNC), Drag knife, Industria textil, Máquina CNC.

Abstract

In this project, the design and analysis of a low-cost 3-axis CNC machine for cutting fabric (Hurricane and Tempest) in textile companies was developed, with the aim of improving productivity at Creaciones Rolando. This design was intended to guarantee greater efficiency, reduce the operational risk for the company's workers during the manufacture of garments for private security entities in their cutting process, as well as make it affordable for micro-companies, based on the simulation in Mach 3 a reduction in the number of hours used in the production of the patterns was observed, therefore the company will require fewer employees for the cutting process, in addition to the probability that the operators suffered from some diseases such as Carpal tunnel, amputation of phalanges or other diseases caused by excessive manual work decreased.

For the development of the project it was important to consider the requirements of the company to correctly select the instrumentation and mechanical elements, in addition to the results obtained in load simulation in Solidworks of Nodal Tension and Displacement where favorable results were obtained comparing with the elastic limit of the selected materials, the analysis and acquisition of the electronic components was also carried out to implement the machine, which implied making the connections of the motors to the drivers, to the Mach3 controller and to the power supply. Being the beginning to carry out some tests in the Mach 3 software, in this way the estimated cutting times on each pattern were obtained for a later tabulation with the data obtained from manual cutting and in this way it was found that productivity increased in the process cutting with the CNC machine by up to 31.2% based on the working times provided by the software and thus reducing the working time of the operator.

Keywords:

CAD, CAM, G-Code, Computerized numerical control (CNC), Drag Knife, textile industry, Machine CNC.

Contenido

	Pág.
Resumen	V
Abstract	VI
Lista de figuras	X
Lista de diagramas	XII
Lista de tablas	XIII
Introducción	1
Objetivos	4
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos	4
1. Marco teórico	5
1.1 Máquina CNC.....	5
1.1.1 Unidad de control	5
1.1.2 Mecanismo de movimiento.....	6
1.1.3 Sistemas de guía.....	8
1.1.4 Actuadores.....	10
1.1.5 Sistema de accionamiento:.....	11
1.1.6 Herramienta de corte.....	12
1.1.7 Panel de control	13
1.1.8 Acople flexible	14
1.2 Sistemas CAD/CAM	14
1.2.1 SolidWorks.....	15
1.2.2 Estlcam	15
1.2.3 Mach 3	15
1.3 Código G	15
1.3.1 Estructura de bloque	16
1.4 Método de elementos finitos	17
1.4.1 Tipos de elementos	17
1.4.2 Fases del análisis de elementos finitos	19

2. Requerimientos y Selección de instrumentación	20
2.1 Requerimientos	20
2.1.1 Dimensiones	20
2.1.2 Pruebas del sistema de corte	21
2.2 Selección de componentes mecánicos.....	22
2.2.1 Herramienta de corte	22
2.2.2 Husillo de bolas.....	23
2.2.3 Guías lineales	26
2.2.4 Rodamientos.....	27
2.3 Selección de componentes eléctricos y electrónicos	28
2.3.1 Motor paso a paso	28
2.3.2 Driver para motor paso a paso.....	32
3. Diseño y programación	35
3.1 Diseño.....	36
3.1.1 Diseño SolidWorks.....	37
3.2 Programación por control numérico.....	42
3.2.1 Procesamiento de planos a código G.....	42
3.2.2 Configuración previa de Mach3.....	44
4. Análisis y resultados	49
4.1 Análisis de elementos finitos	49
4.1.1 Análisis en guías lineales	49
4.1.2 Análisis base de la máquina.....	57
4.1.3 Análisis de la herramienta de corte	59
4.2 Resultados	63
4.2.1 Comparación tiempo de corte	63
4.2.2 Productividad	63
4.2.3 Consumo energético.....	64
5. Conclusiones y recomendaciones	66
5.1 Conclusiones.....	66
5.2 Recomendaciones.....	68
A. Anexo: Lista de códigos G	70
B. Anexo: Lista de códigos M.....	72
C. Anexo: Configuración System HotKeys	73
D. Anexo: Hoja de especificación Motor Nema 17-HS3401	74
E. Anexo: Hoja de especificación driver TB6000	75
F. Anexo: Mach3 USB Motion Card.....	77
G. Anexo: Conexiones Placa Mach 3 USB Motion Card	78

H. Anexo: Conexiones físicas placa	79
I. Anexo: Vista explosionada del ensamblaje de la máquina	80
J. Anexo: Plano de husillo de bola	81
K. Anexo: Plano de la tuerca de husillo de bola	82
L. Anexo: Plano del rodamiento lineal cerrado	83
M. Anexo: Plano del rodamiento lineal abierto	84
N. Anexo: Plano del motor nema 17	85
O. Anexo: Plano del acople flexible	86
P. Anexo: Plano de la herramienta de corte Drag Knife.....	87
6. Bibliografía	88

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Mecanismo piñón y cremallera.....	6
Figura 1-2: Formas de roscas de un tornillo de potencia. a) Rosca cuadrada b) Rosca ACME c) Rosca trapezoidal.	7
Figura 1-3: Husillo de bolas.....	8
Figura 1-4: Tipos de montaje para guía lineal redondo a) Apoyo continuo b) Soporte en los extremos.....	9
Figura 1-5: Guía lineal de riel de perfil con sistema de recirculación	10
Figura 1-6: Paso de un tornillo de bolas	11
Figura 1-7: Cuchilla rotativa para el proceso de corte	12
Figura 1-8: Tipos de cuchillas a) redondas b) ortogonales	13
Figura 1-9: Cuchilla recta para el proceso de corte	13
Figura 1-10: Elemento unidimensional viga	18
Figura 1-11: a) elemento triangular, b) elemento rectangular, c) elemento cuadrilateral	18
Figura 1-12: a) elemento tetraédrico, b) elemento hexaédrico c) elemento prismático ..	18
Figura 2-1: Máquina de corte manual con disco giratorio	21
Figura 2-2: Cuchilla de corte drag knife	22
Figura 2-3: a) Rodamiento de una hilera de bolas de contacto angular, b) Rodamiento de dos hileras de bolas de contacto angular	28
Figura 3-1: Dimensiones de la máquina CNC diseñada	37
Figura 3-2: Sistema de corte drag knife.....	38
Figura 3-3: Diseño base en SolidWorks eje Y	38
Figura 3-4: Carro eje X diseñado en SolidWorks.....	39
Figura 3-5: Carro eje Y.....	40
Figura 3-6: Carro en el eje Z	41
Figura 3-7: Herramienta exterior y guardar molde de espalda en código G.....	42

Figura 3-8:	Código G del molde de espalda.....	43
Figura 3-9:	Configuración puertos de salida de los motores en Mach3.....	44
Figura 3-10:	Configuración señales de entrada en Mach3.....	45
Figura 3-11:	Configuración Pin de entrada de Stop	45
Figura 3-12:	Configuración de velocidad y pasos de los motores en mach3.....	46
Figura 3-13:	Configuración entradas para pulsadores	47
Figura 3-14:	Configuración botones externos	47
Figura 3-15:	Configuración System HotKeys	48
Figura 4-1:	Fuerzas y restricciones sobre la guía lineal del eje Y	50
Figura 4-2:	Ajuste densidad de malla en SolidWorks	50
Figura 4-3:	Mallado tetraédrico de la guía lineal redonda del eje Y.....	51
Figura 4-4:	Solución análisis estático guía lineal eje Y	51
Figura 4-5:	Resultado de análisis de Von Mises tensión nodal eje Y	52
Figura 4-6:	Resultado de análisis de desplazamiento estático eje Y.....	52
Figura 4-7:	Factor de seguridad eje Y.....	53
Figura 4-8:	Cargas y restricciones sobre la guía lineal del eje X.....	53
Figura 4-9:	Resultado de análisis de Von Mises tensión nodal en el eje X	54
Figura 4-10:	Resultado de análisis de desplazamiento estático en el eje X	55
Figura 4-11:	Cargas y restricciones sobre la guía lineal del eje z	55
Figura 4-12:	Resultado de análisis de Von Mises tensión nodal en el eje Z.....	56
Figura 4-13:	Resultado de análisis de desplazamiento estático en el eje Z	57
Figura 4-14:	Fuerzas aplicadas sobre la base de la máquina	58
Figura 4-15:	Resultado de análisis de Von Mises tensión nodal en la base de la maquina	59
Figura 4-16:	Resultado de análisis de desplazamiento estático en la base de la maquina	59
Figura 4-17:	Cargas y restricciones herramienta de corte (Drag Knife).....	60
Figura 4-18:	Mallado de herramienta de corte Drag Knife.....	61
Figura 4-19:	Resultado de Análisis de Von Mises para herramienta de corte	62
Figura 4-20:	Resultado De análisis de desplazamiento estático herramienta de corte.....	62

Lista de diagramas

	Pág.
Diagrama 2-1: Características principales de los mecanismos de movimiento	24
Diagrama 2-2: Características principales de sistema de guías lineales	27
Diagrama 2-3: Características principales de los actuadores	28

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Funciones típicas de un bloque de código G.....	16
Tabla 2-1: Fuerza mínima requerida para cortar material Huracán y Reebag.	23
Tabla 2-2: Especificaciones de componentes	29
Tabla 2-3: Comparación especificaciones eléctricas y mecánicas del motor paso a paso	31
Tabla 2-4: Especificaciones de motor paso a paso 17HS3401	32
Tabla 2-5: Configuración del micro paso del controlador.....	33
Tabla 4-1: Comparación de tiempos de corte.....	63
Tabla 4-2: Comparación de piezas cortadas en una hora	64
Tabla 4-3: Aumento de producción en un día.....	64
Tabla 4-4: Características eléctricas de componentes de la máquina	65

Introducción

Las máquinas CNC, operan mediante el lenguaje de mecanizado que se conoce a nivel de programación como código G; este permite controlar la posición, velocidad y profundidad de elementos mecánicos, así mismo la herramienta de corte con movimiento dinámico soportada en los ejes principales, sigue las coordenadas suministradas por el software de control y de esta manera aumenta la flexibilidad de maquinado, permitiendo obtener un control del proceso mucho más preciso [1], a partir de este método las empresas han podido mejorar sus procesos de manufactura y disminuir los riesgos laborales.

En la actualidad hay empresas que se dedican a la industria de textiles como MAD ingenieros con ubicación en Colombia, Pathfinder Cutting Technology empresa australiana, Lazer del Valle empresa colombiana y muchas más; que se han enfocado en innovar, mejorar y adaptar sus máquinas. El avance tecnológico ha impulsado a algunas microempresas a mejorar con el fin de que en sus procesos se implementen máquinas las cuales tengan la capacidad de realizar varias operaciones en simultáneo e incluso ejecutar procesos en cadena, todo de manera autónoma y eficiente.

Se han creado máquinas CNC para el corte de textiles, conformados por Software y Hardware avanzados y de última generación, con el fin de facilitar los procesos en esta industria; es aquí donde se encuentran inmersos temas como el control numérico y el diseño de sistemas autónomos, un punto de partida para este proyecto es la máquina Lectra de Vector [2] elaborada por la empresa colombiana Mad ingenieros; máquina diseñada para el corte de tela de espesores entre 5 a 80 cm, estos son mecanismos bastante robustos que pueden cortar desde telas livianas hasta telas muy pesadas, además cuentan con un sistema de control el cual permite visualizar cada etapa del proceso de corte permitiéndole al operario tener un control más detallado sobre la máquina.

Las máquinas CNC que operan en la industria de la confección se han convertido en foco de investigación importante. En 2019 S. P. Pillai, B. R. Abhiram, A. S. Kumar, U. S. Ashish, and G. Harikrishnan realizaron un estudio acerca del corte láser utilizando energía solar, dónde se presenta el diseño y la fabricación de una máquina láser portátil con energía solar para el corte de tela y papel. En el desarrollo de este artículo se considera importante además de la calidad y productividad, el cuidado del medio ambiente y la conservación de los recursos naturales, siendo este uno de los motivos por los cuales la máquina fue construida a pequeña escala con un presupuesto limitado, aun siendo posible garantizar la precisión y calidad de corte tanto de la tela como del papel; teniendo como objetivo asegurar la asequibilidad a las microempresas, demostrando que es una máquina liviana y de fácil instalación. De este estudio se obtuvo un buen resultado en el acabado final del corte en tela, sin embargo, no se logró el mismo resultado al realizar cortes de la misma forma en materiales como poliestireno y acrílico [3]. Con base en lo anterior, es fundamental tener en cuenta esta investigación para el desarrollo de este proyecto, esto se da por contener varios campos y temas similares; como el tipo de aplicación que se le dará a dicha máquina, la aplicación del control numérico para facilitar el corte, la limitación de recursos para su implementación, la escala de la máquina y el hecho de que se busque un bien colectivo tanto para el desarrollo de las microempresas como el del país a nivel tecnológico e industrial.

En la implementación de innovaciones tecnológicas cabe destacar algunos aspectos que influyen en la construcción de la máquina, como la reducción del consumo de energía; que tiene como fin la disminución de gases invernadero en la atmósfera, ya que en los últimos años ha aumentado considerablemente en los países que han mostrado un desarrollo tecnológico avanzado, según el reporte del consejo mundial de energía del 2019 [4], China aparte de innovar se ha dedicado a emitir millones de gases invernaderos a la atmósfera por el uso excesivo de recursos a base de carbón, por esto es importante utilizar energías renovables y economizar lo más posible, iniciando por el consumo de energía en maquinarias pequeñas.

De acuerdo a la investigación de L.E. Chiang y J. Ramos en los procesos de automatización de CNC enfocados en el sector textil, se analizó el uso del láser alimentado por CO_2 ; este proceso lleva acabo factores influyentes de acuerdo al material no metálico que se esté usando; de este modo cabe notar que la composición de los diferentes tipos de polímeros al ser sometidos a un corte de láser pueden tener una reacción química que

afecte el acabado final de este, un ejemplo significativo para esta actividad son los cortes en acrílicos que generan vapores altamente inflamables, para corregir esto se debe incrementar la adaptación de la maquinaria para no generar algún tipo de ignición [5].

En la maquinarias CNC que realizan corte con láser [6] se especifican los materiales que se adaptan mejor para este proceso y los riesgos a tener en cuenta a la hora de trabajarlos, en el sector textil se observa gran variedad en los componentes de fabricación de las telas, la empresa Creaciones Rolando hace uso de telas que tienen una base de polímeros que son resistentes a la tensión y al rasgado [7]. Los polímeros [8] son fibras que no poseen materiales tóxicos que provocan ignición en el equipo constituido por un sistema de corte con láser. Un corte láser en este tipo material realiza un acabado final sobre las fibras, donde se quema su capa más exterior evitando que aparezcan hebras que pueden deteriorar el material. Para la implementación de corte con láser sobre telas se requiere hacer una inversión de alto costo, además en la adquisición de un sistema como este, se debe tener presente el gasto por mantenimiento, siendo notable que el consumo requerido para el láser implica una afectación alta en la economía de las microempresas que plantean automatizar los procesos de corte. Dado al poco conocimiento que maneja el operario frente a la composición de los materiales que se están cortando; por ejemplo: cloruro de vinilo, el cual genera vapores tóxicos al ser cortado con láser, provocando que la instrumentación utilizada dependa del tipo de tela que se corta; por último y más importante a notar en este tipo de sistema de corte es el tipo de alimentación que se requiere para este, al ser dependiente de uno de los gases de efectos invernaderos como lo es el CO_2 provocando un mayor impacto ambiental.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar y analizar una máquina CNC de tres ejes para corte en empresas textiles.

Objetivos específicos

- Estudio de requerimientos de la empresa y pruebas iniciales del sistema de corte.
- Simulación de cargas y esfuerzos en el software Solidworks.
- Análisis de cargas y esfuerzos para la selección adecuada de materiales.
- Selección de instrumentación, software y demás elementos necesarios con criterios de ingeniería.
- Cálculos y análisis respectivo de la instrumentación y componentes seleccionados.

1.Marco teórico

1.1 Máquina CNC

Una máquina es una herramienta que se creó para facilitar el trabajo, de tal manera que sea capaz de reducir el esfuerzo, la energía empleada al realizar un trabajo y disminuir la fuerza empleada durante la operación. Una máquina de Control Numérico Computarizado (CNC) es capaz de realizar multitud de tareas, tiene la capacidad de mover la herramienta de corte en sus tres ejes al tiempo [9], facilitando la ejecución de trayectorias que manualmente pueden llegar a ser complejas, esta máquina actúa según las señales emitidas por el computador a través de un microcontrolador, con un proceso en paralelo que genera señales digitales las cuales dan el movimiento a los actuadores interviniendo en el movimiento de los ejes. Esta instrumentación permite la automatización de procesos que se realizan de manera manual o mediante la intervención de un trabajador, usando un lenguaje conocido como código G. [10] [11]

1.1.1 Unidad de control

Se encarga de recibir instrucciones del software CAD/CAM y procesarlas enviando una serie de comandos de manera secuencial.

- **Mach 3 USB Card Motion**

Este microcontrolador se utiliza para la controlar máquinas CNC desde 3 hasta 6 ejes, el mach 3 es muy conocido en la industria de la automatización ya que permite controlar fácilmente los cortes empleados por una máquina y también por la simplicidad al programar, además permite realizar distintas operaciones, se puede implementar desde el circuito más básico hasta la creación de una máquina CNC, ejecutando sus comandos de manera secuencial. Este dispositivo está configurado de tal manera que cuenta con un conector USB, lo que permite cargar un programa al microcontrolador, pines de alimentación de 3,3 V y 5 V, además cuenta con 4 entradas y 4 salidas que permiten dar

movimiento a los motores, y accionar de manera externa la máquina mediante pulsadores de inicio y parado de emergencia.

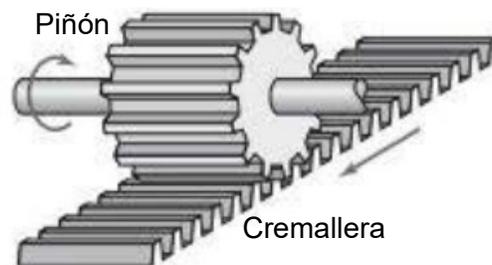
1.1.2 Mecanismo de movimiento

La máquina CNC tiene la necesidad de mover su herramienta de corte en el eje Z verticalmente, en el eje X transversalmente y el eje Y horizontalmente de tal manera que se pueda lograr el corte de la pieza deseada, para lograr este tipo de movimiento requiere de un mecanismo de transformación del movimiento o actuador lineal, este tipo de mecanismo se caracteriza por recibir un tipo de movimiento, en este caso la rotación del motor y se encarga de convertirlo en movimiento lineal.

▪ Piñón-cremallera

El piñón cremallera es un mecanismo que permite transformar el movimiento rotacional cuando el piñón gira sobre los dientes de la cremallera que se ilustra en la (Figura 1-1), de tal manera que esta se desplaza con un movimiento rectilíneo [12], en este mecanismo también se puede lograr la transformación inversa de movimiento, es decir de movimiento lineal a rotacional. Este tipo de mecanismo es el más utilizado para realizar la transformación de movimiento cuando se requiere implementar una máquina con amplias distancias de recorrido debido a que el costo puede reducirse bastante, además para el sistema piñón-cremallera la fuerza máxima en su mayoría es otorgada por la relación entre el paso de dientes y el tamaño del piñón. [13] [14] [15]

Figura 1-1: Mecanismo piñón y cremallera, obtenida de [14]



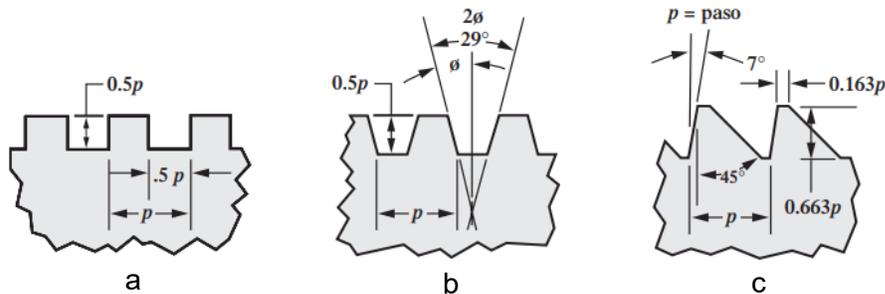
▪ Tornillo de avance

El tornillo de avance o de potencia es utilizado para convertir el movimiento rotacional a lineal [16], este mecanismo funciona muy similar a un tornillo con rosca de tal manera que cuando el tornillo está sujetado a sus extremos con soportes y rodamientos la tuerca está sujeta a un elemento, por lo tanto, el tornillo tendrá un único grado de libertad rotacional,

donde el motor es el encargado de transmitirle dicho movimiento, mientras que la tuerca se va a desplazar a lo largo del tornillo otorgándole el movimiento rectilíneo a la pieza deseada.

El tornillo de potencia tiene varias pérdidas por fricción de deslizamiento debido a el contacto que hay entre la tuerca y la rosca del tornillo, el coeficiente de fricción para cada tornillo de avance se puede determinar de acuerdo a el material de la tuerca y del tornillo, debido a estas pérdidas por fricción la eficiencia de los tornillos de potencia está comprendida entre un 20% y 50% [17], sin embargo se puede determinar qué tipo de rosca es más adecuada y eficiente para la aplicación que se desea, ya que hay tres tipos de roscas para los tornillos de potencia véase en la (Figura 1-2), la cuadrada, trapezoidal y ACME, donde se destacan por tener una mejor eficiencia la rosca cuadrada y la trapezoidal y para aplicaciones dónde se desea transmitir fuerza en una sola dirección la rosca preferida es la trapezoidal. [14] [18]

Figura 1-2: Formas de roscas de un tornillo de potencia. a) Rosca cuadrada b) Rosca ACME c) Rosca trapezoidal tomada de [17].



▪ Husillo de bola

El husillo de bola es un mecanismo el cual se caracteriza por la capacidad que tiene de transformar el movimiento rotativo de un motor a movimiento lineal, este actuador se destaca por que utiliza un tren de bolas re circulantes como se ilustra en la (Figura 1-3) , es decir que la tuerca y el tornillo tienen un contacto por rodadura, donde la tuerca tiene un sistema especial que contiene rodamientos de bolas esféricas por lo tanto proporciona bajas fricciones y tiene una capacidad de carga mucho más elevada que el tornillo de avance, otorgándole un paso mucho más delicado [14], esto permite que el mecanismo brinde una relación de eficiencia del 90% o mayor [17], además brinda una velocidad de desplazamiento alta, y cuenta con una precisión más alta que la del tornillo de potencia.

Destacando también que el tornillo de bolas requiere menos par torsional y menos potencia lo que se ve reflejado en el incremento de su vida útil. [18]

Figura 1-3: Husillo de bolas tomado de [14]



1.1.3 Sistemas de guía

Es un sistema que soporta el desplazamiento lineal a lo largo de un eje, desplazando una parte móvil de la máquina, soportando a su vez las cargas del elemento móvil, este debe garantizar alta precisión en su desplazamiento para así obtener la menor cantidad de pérdidas por fricción y a su vez debe tener alta rigidez para soportar las fuerzas aplicadas perpendicularmente a ese eje.

▪ Guía lineal de riel redondo

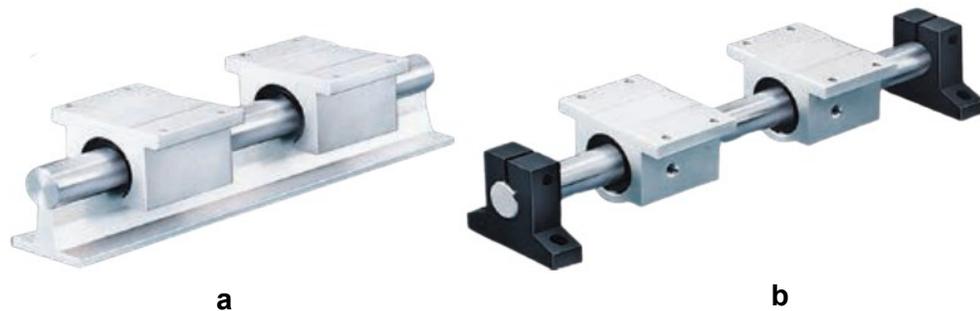
La guía lineal redonda es ideal para aplicaciones donde la carga sobre esta no es tan grande, de lo contrario puede presentar deflexiones además es capaz de adaptarse a la desalineación torsional, este tipo de guía lineal le permite a la máquina tener un deslizamiento mucho más fino debido a que son menos sensibles a la suciedad o polvo y por la forma de su estructura, permitiéndole al rodamiento lineal desplazarse más fácil. [19]

Este sistema debe lubricarse constantemente para mantener bajo el coeficiente de fricción y evitar las pérdidas por fricción, aun así, requiere de menos lubricación que la guía lineal cuadrada y también de menos mantenimiento, cabe destacar que este tipo de guía lineal tiene un costo inferior y por su facilidad de instalación es preferida. [20]

Para la implementación de esta guía lineal se puede utilizar dos tipos de soportes, esto dependiendo de las cargas aplicadas sobre el eje, en la (Figura 1-4a) se observa el montaje con apoyo continuo, este tipo de soporte se implementa cuando se tienen longitudes de

eje muy largas o cargas muy pesadas esto con el fin de evitar la deflexión de la varilla, hay que tener en cuenta para esta aplicación el rodamiento lineal que se va a utilizar es abierto; en la (Figura 1-4b) obsérvese el montaje al final del eje donde la varilla solo está apoyada en los extremos de sus ejes este tipo de aplicación todo lo contrario a la anterior se utiliza cuando se tienen distancias cortas, para este caso lo recomendable es utilizar rodamientos cerrados para evitar la pérdida de fricción por impurezas que puedan ingresar al rodamiento lineal. [13]

Figura 1-4: Tipos de montaje para guía lineal redondo a) Apoyo continuo b) Soporte en los extremos. Tomado de [21]

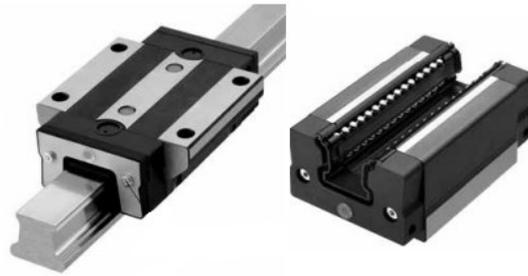


▪ Guía lineal de riel de perfil

Esta guía lineal se caracteriza por la capacidad que tiene de soportar grandes cargas debido a su estructura cuadrada lo cual le da una mayor área de soporte, este sistema utiliza un carril o riel el cual cuenta con un sistema de recirculación véase en la (Figura 1-5), lo que le brinda un bajo coeficiente de fricción entre el riel y el perfil y además le permite al eje desplazarse a altas velocidades [22]. Este sistema tiene algunas desventajas, entre ellas la baja tolerancia que tiene a la desviación, dónde se tiene el desafío de que las guías queden paralelas entre sí y la altura de los rieles debe ser la misma, en caso de que no ocurra esto se corre el riesgo de que los rieles se desgasten más rápido, está guía lineal es más costosa, tiene mayor dificultad en su instalación y requiere de mantenimiento más seguido que la guía lineal redonda. [13] [23]

Al seleccionar una guía lineal es fundamental realizar la elección enfocándose inicialmente en los requerimientos estructurales de la máquina como la carga y precisión que este sistema puede brindarle, ya que si falla la guía lineal la máquina corre el riesgo de tener fallos mayores en otras partes de su estructura, obteniendo como resultado gastos superiores en la reparación o adquisición de nuevos componentes.

Figura 1-5: Guía lineal de riel de perfil con sistema de recirculación tomado de [22]



1.1.4 Actuadores

▪ Servomotor

El servomotor es un actuador que posee un movimiento rotacional y es capaz de convertir su movimiento mecánico en pulsos digitales [24], además este motor tiene un rotor mucho más pequeño que el del motor paso a paso, por lo tanto, brinda aceleraciones mucho más rápidas y con mayor potencia, este tipo de motor es reconocido por tener un control en lazo cerrado de la posición y velocidad del mecanismo [25], es por esto que el servomotor tiene en su interior un codificador que sirve como sensor para brindar una realimentación y generar una señal, de tal manera que sea posible mantener el control constantemente del motor [26]. Para utilizar este tipo de motor es necesario establecer unos parámetros, para esto los métodos más comunes son a través de un PID o un PIV.

▪ Motor paso a paso

Este tipo de motor se caracteriza por los incrementos tan diminutos que tiene el rotor en su movimiento de rotación, esto es debido a la gran cantidad de polos magnéticos que tiene este motor dentro del estator, es por eso que, controlando la cantidad de pulsos es posible tener un control más preciso de la posición angular de este [18]. Para realizar una selección correcta del motor para la implementación de este proyecto es necesario tener en cuenta aspectos como potencia, amperaje y voltaje, esto con el fin de obtener valores deseables para la velocidad de corte, fuerza de corte y desplazamiento en los distintos ejes, dónde además el torque juega un papel importante para vencer las fuerzas de resistencia del material a cortar. [27]

La eficiencia directa es utilizada para definir el par de entrada que va a permitir la transformación de movimiento rotacional a lineal [28], a partir de la ecuación (1-1) donde μ es el coeficiente de fricción que según el catálogo de SKF para los husillos de bolas con

denominación SD, SX, SL, SN, SND, BD, BX, BN, BL, PN, PND tiene un valor 0.006, d_0 es el diámetro nominal del eje del husillo que de igual manera puede ser visualizado en el catálogo de SKF.

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\pi * d_0}{P_h} * \mu} \quad (1-1)$$

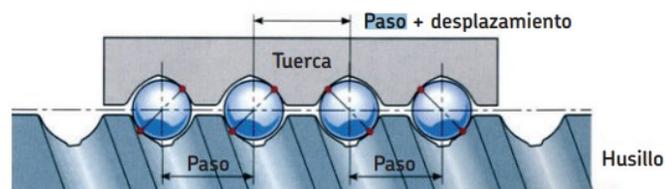
La eficiencia práctica es directamente proporcional a la eficiencia directa por un coeficiente de 0,9 que es un promedio realizado por SKF entre un husillo nuevo y uno usado, donde estos husillos fueron sometidos a operación bajo condiciones de trabajo normales, es decir en condiciones apropiadas de lubricación, velocidad y con una carga baja.

$$\eta_p = \eta (0.9) \quad (1-2)$$

El par de entrada en estado de reposo es el par necesario para que empiece a girar el husillo de bola a su mínima velocidad donde se tiene que $F(N)$ es la fuerza que va a soportar este mecanismo, P_h es el paso del husillo conocido como la longitud que recorre la tuerca por cada revolución (ver en la Figura 1-6).

$$T = \frac{F * P_h}{2\pi * \eta_p} \quad (1-3)$$

Figura 1-6: Paso de un tornillo de bolas tomado de [28].



1.1.5 Sistema de accionamiento:

Los drivers o controladores del motor paso a paso son los encargados de convertir un pulso digital entregado por la unidad de control y convertirlo en movimiento mecánico permitiendo que el motor tenga un desplazamiento angular [29], este sistema además cumple la función de circuito controlador encargándose de limitar la corriente, reducir el

consumo energético y proteger el motor de cualquier tipo de sobrecarga. Este dispositivo tiene la posibilidad de controlar el ángulo de paso del motor, de esta manera la cantidad de pulsos que proporciona la unidad de control le da la relación de desplazamiento angular al motor. también se dice que la velocidad del motor es dependiente de la frecuencia de pulso del driver [30].

1.1.6 Herramienta de corte

▪ Disco giratorio

Este tipo de cuchilla gira a altas revoluciones sobre la tela y la corta ejerciendo una fuerza hacia abajo (ver Figura 1-7), el diámetro de la cuchilla influye directamente en la potencia que puede llegar a tener la máquina, sin embargo entre más grande sea el diámetro la máquina será más grande y pesada haciendo que sea más difícil maniobrarla para el operario, además de esto por la forma de la cuchilla no se pueden hacer cambios de dirección a altas velocidades, toca detener la máquina y posicionarla en la nueva dirección para obtener un mejor corte; no es posible que la tela tenga cortes bien definidos, como curvas detalladas o esquinas finas por la geometría que tiene, sin embargo variando el diámetro de la cuchilla se puede obtener cortes mejor precisión en sus curvas [31] [32].

Generalmente se utilizan las cuchillas redondas para cortar telas livianas, en cambio cuando se requiere cortar telas más duras o gruesas se puede variar la hoja de corte a una ortogonal de 4 a 10 lados (ver Figura 1-8). Si se requiere realizar el corte de varias capas de tela, es importante que estas estén bien sujetas con una masa extra que no permita que se muevan sobre la mesa de corte mientras se realiza el ejercicio de corte, sin embargo, este sistema no presenta una buena precisión por el que se corre el riesgo de que las telas no estén bien prensadas y no permitan el corte de manera correcta sobre la tela.

Figura 1-7: Cuchilla rotativa para el proceso de corte

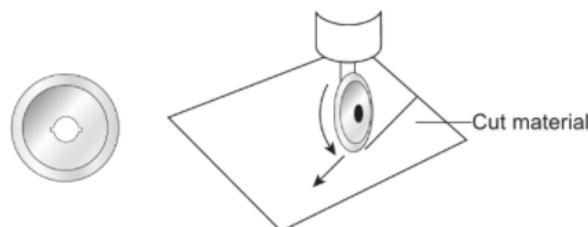
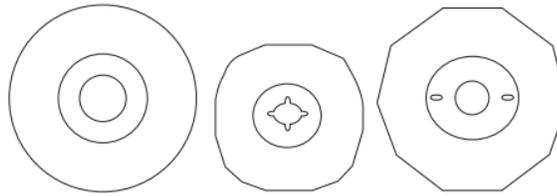
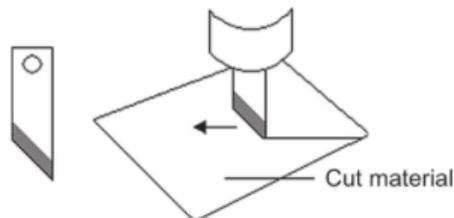


Figura 1-8: Tipos de cuchillas a) redondas b) ortogonales

- **Drag knife**

El sistema de corte drag knife es un dispositivo que tiene acoplado un cuchillo de arrastre, donde este sigue la dirección correspondiente del eje que se mueva ya que tiene la capacidad de girar libremente 360°, por medio de un rodamiento es posible que el sistema actúe de esa manera, este tipo de cuchilla es ideal para cortes detallados con curvaturas finas o también para cortar figuras muy pequeñas, debido a su geometría la cuchilla es capaz de acceder a espacios muy reducidos, permitiéndole un libre movimiento y así obteniendo un corte más preciso que con el disco giratorio.

Como se observa en la (Figura 1-9) para realizar el corte se debe aplicar una fuerza a la cuchilla que va a depender directamente del espesor de la tela a cortar, se encontrará en más detalle en el (capítulo 2.2.1) [32].

Figura 1-9: Cuchilla recta para el proceso de corte

1.1.7 Panel de control

El panel de control es el encargado de controlar y operar la máquina desde el software mediante unos botones especiales, la selección de los botones necesarios es diseño exclusivo según las necesidades y características de la máquina CNC, para esta aplicación los botones adecuados son el de INICIO, DETENIDO DE EMERGENCIA Y APAGADO, ya que el panel de operación que se encarga principalmente del control de velocidad, posición, potencia y otras variables de la máquina; es manejado implícitamente en el

hardware, por lo tanto, no es necesario la aplicación de otros botones en el panel de control. [33]

- **Botón de inicio**

Mediante el botón de inicio se puede suministrar energía a la máquina, ya que no es conveniente que este energizada siempre, sino hasta que el operador desee presionar el botón. Por lo tanto, la energía que va a accionar la máquina únicamente va a estar controlada por el panel de control sin importar que está ya tenga una alimentación.

- **Botón de emergencia**

Este botón solo va a funcionar cuando la máquina esté operando ya que es un botón de emergencia, se va a oprimir únicamente con el fin de detener el movimiento de los motores, y se detengan automáticamente apenas se presione este botón. Este botón es esencial en una máquina CNC para emergencias durante el proceso especialmente que puedan afectar al operador o cuando algo en el movimiento de la máquina sale incorrecto.

- **Botón apagado**

Este botón tiene la función de des energizar la máquina esto con el fin de evitar algún accidente de accionamiento de la máquina mientras no se esté utilizando.

1.1.8 Acople flexible

Este acoplamiento tiene como función principal transmitir el par de un eje a otro, además es capaz de corregir alguna desalineación de hasta 3 grados que esté presente entre los dos ejes, teniendo en cuenta que una desalineación puede ocasionar una fuerza excesiva sobre el motor ocasionando problemas de vibración, por lo tanto, este acoplamiento también se encarga de amortiguar dichas vibraciones [34] [35].

1.2 Sistemas CAD/CAM

Es un software de diseño y manufactura asistido por computador (CAD/CAM por sus siglas en ingles), permite automatizar operaciones manuales que requieren de mayor dedicación, como los diseños, análisis de fuerzas, esfuerzos, optimización de una pieza, y control de operaciones de manufactura, que además facilita el proceso de elaboración de la pieza [36] , reduciendo el tiempo empleado para su fabricación debido a las funciones que tienen de realizar cálculos que se asemejan con gran precisión a la realidad, reduciendo fallas

durante el proceso de producción, además esta tecnología busca programar la mayor cantidad de instrucciones detalladamente en cada etapa de operación, desde que se enciende la máquina hasta que finaliza, con el fin de que el operario tenga menos interacción con la máquina [37].

1.2.1 SolidWorks

Herramienta CAD, que permite el diseño y simulación del hardware a diseñar en 3D, esta herramienta se usa en varios sectores de la industria, permite hallar las cargas que se encuentran aplicadas sobre un sistema y tiene herramientas de análisis como el método de elementos finitos.

1.2.2 Estlcam

Es un software de fácil manejo que tiene código abierto, este permite crear y editar gráficos vectoriales, importar piezas desde Solidworks en formato DXF garantizando que la imagen en ningún momento pierda la calidad, además puede generar el código G a partir de una imagen o figura y es compatible con el software Mach 3.

1.2.3 Mach 3

Es un software de control numérico computarizado que es capaz de interpretar el código G generado por otro software como Estlcam y posteriormente le manda una señal a la unidad de control mediante comunicación paralela, para el accionamiento de los motores paso a paso, este programa permite controlar parámetros de la máquina como velocidad de operación, posicionamiento de cada eje, y el punto cero de la máquina. Este software es muy reconocido en la industria de la automatización debido a la alta compatibilidad que tiene con los sistemas CAD/CAM [38].

1.3 Código G

Se conocen como funciones preparatorias, se encarga de las funciones de movimiento de una máquina CNC, este permite dar la posición, velocidad de desplazamiento, desplazamientos radiales, pausas, y ciclos que consume para el procesamiento de la máquina. En la obtención de este código se debe definir la secuencia a seguir, definir las coordenadas sobre los que va a trabajar la máquina y definir las velocidades con las que

se trabaja [39]. Para estas funciones de CNC, se pueden encontrar algunos tipos de acceso a estos, como lo son: El operario ingresa manualmente el código al panel de control de la máquina, también con un dialogo interactivo, codificado en código ASCII o diseño de la pieza que se procesa por el software CAM. Todas estas instrucciones están estandarizadas por EIA (Electronic Industries Association) e ISO (International Standards Organization) [36].

1.3.1 Estructura de bloque

Una estructura de bloque es una línea de código de un programa, que va a ordenar una instrucción específica a la máquina CNC, la cual puede estar compuesta por varios comandos o funciones típicas del código G (véase en la Tabla 1-1), estos comandos pueden tener instrucciones de posición, velocidad, avance, comandos preparatorios y comandos para manejar la herramienta, Se tiene una única restricción en este código y es que los comandos no estén repetidos en un mismo bloque más de una vez y además el tiempo que demora en ejecutar el programa va a depender directamente de la cantidad de comandos que contenga el código y la dificultad de estos. [40]

Un bloque depende del sistema de control y de la máquina CNC que se va a configurar, ya que se tiene una variación en el código si es una máquina cortadora, de torneado o de plasma, debido a que va a cambiar su manera de operar y la fuerza que va a aplicarse en la herramienta durante el proceso de corte o grabado, además la estructura de bloques debe tener una secuencia lógica, es decir que va a tener un orden en su código dependiendo de el corte que se quiere obtener, para esto es importante tener en cuenta que lo principal es el posicionamiento de los ejes en el punto 0 y posicionar la herramienta de corte (el eje z) a la profundidad especificada de cada molde y luego enviar los comandos que indiquen el inicio del corte. [33]

Tabla 1-1: Funciones típicas de un bloque de código G

Letra	Descripción
N	Número de bloque
G	Comando preparatorio
M	Funciones auxiliares
X, Y, Z, A, B, C, U, V, W	Comandos de movimiento de eje
I, J, K, R, Q	Palabras relacionadas con los ejes
S, F, T	Función de máquina o herramienta

Los comandos más utilizados para programar en código G se pueden observar con más detalle en los anexos A y B dónde puede encontrar la lista de códigos G y M con sus respectivas funciones dentro de un programa para el manejo de una máquina CNC de tipo fresado.

1.4 Método de elementos finitos

Este método numérico es capaz de hallar soluciones aproximadas de una estructura sometida a distintas cargas, para ello es requerido discretizar la estructura, es decir dividirla en elementos finitos con una forma geométrica más pequeña y simple, como triángulos, cuadrados, tetraedros, entre otros; donde los elementos divididos están enlazados entre sí por una cantidad discreta de puntos (nodos), los cuales pueden estar ubicados en sus vértices o en medio de sus vértices, además se va a obtener una solución mucho más aproximada si la estructura se divide en mayor cantidad de elementos finitos, luego de discretizar la estructura se analiza cada elemento por separado y se vuelve a unir los elementos para así determinar el desplazamiento que sufrió cada nodo debido a cambios de temperatura, cristalización, retracciones y llegar a la solución de ecuaciones diferenciales correspondientes a la estructura. El método de elementos finitos es muy útil ya que le evita al diseñador posibles errores en la solución de ecuaciones diferenciales debido a la complejidad que puede representar el análisis de una estructura mecánica. [41] [42]

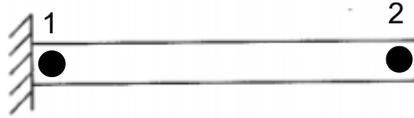
1.4.1 Tipos de elementos

Según el tipo de estructura a discretizar puede tomar formas geométricas unidimensional, bidimensional o tridimensional.

- **Elemento unidimensional**

Este tipo de elemento se denomina de esta manera debido a que la deformación que provocan las cargas en la estructura únicamente tiene la componente axial, es decir, que el campo de deformaciones de este tipo de estructura consta de una sola variable (x), debido a que se analiza en una única dirección. Un ejemplo de este tipo de elementos es la viga la cual solo consta de dos nodos. [41] [43]

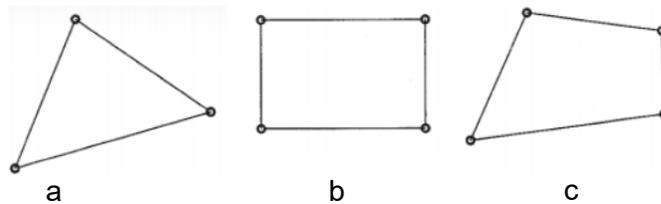
Figura 1-10: Elemento unidimensional viga tomado de [41]



▪ Elemento bidimensional

El elemento bidimensional es aquel que tiene un campo de deformaciones en X y Y provocadas por las cargas aplicadas en la estructura, la forma geométrica triangular es la más utilizada para el método de elementos finitos de elemento bidimensional por su facilidad de adaptarse a superficies planas. Un ejemplo de este tipo de elemento es una estructura con estado de deformación plano como los muros de contención [41]

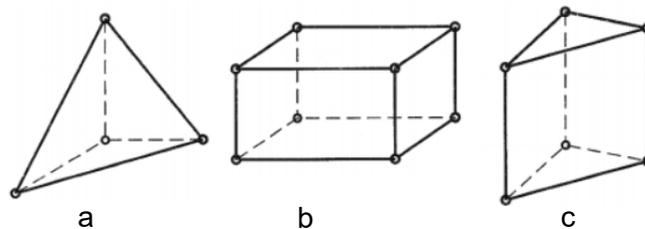
Figura 1-11: a) elemento triangular, b) elemento rectangular, c) elemento cuadrilateral tomado de [41]



▪ Elemento tridimensional

El elemento tridimensional es aquel que al igual que el elemento bidimensional tiene un campo de deformaciones en la coordenada X y Y , con la excepción que este elemento posee una deformación en la coordenada Z , este tipo de elemento es muy implementado a nivel industrial en piezas donde claramente no se puede despreciar la tensión en la dirección de su espesor.

Figura 1-12: a) elemento tetraédrico, b) elemento hexaédrico c) elemento prismático tomado de [41]



1.4.2 Fases del análisis de elementos finitos

▪ Preprocesamiento

Esta primera fase consiste en definir las propiedades de la estructura, tales como material, cargas a las que está sometida, restricciones, tipo de análisis ya sea estático, térmico, dinámico, de frecuencias, y también se elige el tipo de mallado a trabajar según la pieza a analizar. En el preprocesamiento muchas veces se requiere simplificar la estructura eliminando operaciones como el redondeo ya que pueden ser insignificantes y además podrían complicar el análisis o aumentar el tiempo que tarde en solucionarse. [44] [45]

▪ Cálculo de los resultados

El cálculo de los resultados consiste en la solución que realiza el software en este caso SolidWorks , el cual analiza cada subdivisión de los elementos discontinuos resultantes de la discretización realizada anteriormente, el software realiza una solución de ecuaciones lineales parciales ,analizando por separado cada elemento y luego de este análisis vuelve a unir los elementos conformando la estructura inicial y de esta manera comparando la deformación que se provocó en cada nodo en cuanto a desplazamientos y tensiones obteniendo una solución total. [44]

▪ Post procesamiento

En el post procesamiento luego de obtener la solución de las ecuaciones lineales parciales en cada elemento y de reconstruir la pieza, el software arroja una serie de resultados de esfuerzos, deformaciones, tensiones, desplazamientos, factor de seguridad y otros, luego de esto el diseñador debe interpretar los resultados teniendo en cuenta aproximaciones o errores que pueda arrojar el software debido a posibles configuraciones erróneas en las fases anteriores. [45]

2.Requerimientos y Selección de instrumentación

A partir del estudio realizado en la empresa Creaciones Rolando se determinó algunas especificaciones para lograr que la máquina CNC cumpliera correcta y eficientemente con el proceso de corte, teniendo en cuenta que el presupuesto de la empresa para la implementación de este proyecto es muy reducido, se mostrará a continuación los requerimientos a tener en cuenta para el desarrollo del diseño de esta máquina y algunas pruebas que fueron tomadas para obtener datos y de esta manera realizar la selección de la instrumentación y componentes mecánicos, de esta forma será posible realizar una selección más efectiva de los elementos que conformarán la máquina CNC para una posterior creación de esta, bajo los criterios que se brindan en este capítulo

2.1 Requerimientos

2.1.1 Dimensiones

Como requerimiento inicial para obtener las dimensiones adecuadas para la máquina CNC se analizaron las medidas que tienen todos los patrones de la empresa para posteriormente realizar la manufacturación de las chaquetas de seguridad, estas medidas están comprendidas entre 20 cm a 70 cm de largo y de 10 cm a 30 cm de ancho, además el espesor de cada capa de tela está en un rango de 1 mm a 3 mm. Para otorgarle un área de movimiento confiable a la máquina inicialmente se dimensionó de 30 cm de ancho por 80 cm de largo, pero para tener este área de corte se debe considerar que el puente que permite desplazar el sistema sobre el eje X va a reducir el área de trabajo de la máquina ya que tiene unas dimensiones de 10cm en el eje X y 15cm en el eje Y, de modo que el área que se reduce está dado por el espacio que se requiere para este puente, permitiendo ser esta el área de trabajo sobre la cual se realizara el corte del patrón para obtener el corte deseado, de acuerdo con los espacios que se requieren para que la máquina cumpla

con esta área de trabajo se da una dimensión de la máquina de 38 cm de ancho y 95 cm de largo como se observa en la Figura 3-1.

2.1.2 Pruebas del sistema de corte

Para determinar el tipo de sistema de corte más conveniente a implementar en la máquina CNC, se realizaron dos pruebas de corte, la primera con el disco giratorio y la segunda con el sistema de tracción Drag Knife, para luego elegir la mejor opción que tenga un mejor costo, beneficio y posteriormente recopilar datos de fuerza entre el sistema de tracción y la tela a cortar.

▪ Pruebas con disco giratorio

Inicialmente se realiza una prueba con la cortadora de tela manual con disco giratorio, esta máquina tiene la capacidad de girar a altas revoluciones para el proceso de corte. Al manipular esta herramienta se observa detalladamente como realiza el corte sobre las capas de tela donde se ubican entre 3 a 5 capas una encima de la otra, durante el proceso de corte con estas herramientas, se presenta un gran inconveniente al ser necesario un cambio de dirección cortar el patrón deseado, esto provoca que la tela se acumule en el instrumento de corte provocando la pérdida de materia prima.

Para obtener una pieza óptima de acuerdo con el patrón requerido, se debe realizar el corte de manera lineal y cuando se cambia de dirección se debe pausar la maquinaria reubicar y reanudar el proceso, este proceso implica adicionar tiempo a la manufacturación de cada corte.

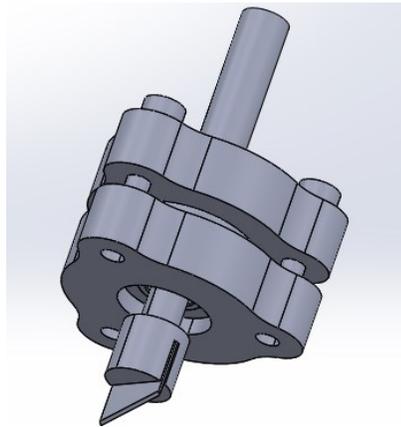
Figura 2-1: Máquina de corte manual con disco giratorio tomado de [46]



▪ Pruebas con el sistema de tracción drag knife

La tela es sometida a una segunda prueba de corte, donde se hace uso de un sistema de tracción acoplado a un hoja de corte afilado o Drag Knife; Un componente importante de este sistema es un rodamiento el cual permite un movimiento rotativo de 360°, otorgándole a la máquina grados de libertad más flexibles, este sistema de arrastre permite optimizar los cortes que se efectúan sobre cada uno de los patrones presentes en la confección de las telas; al tener movilidad en un plano 2D, reduce el margen de error en los cortes lineales y disminuye el tiempo que toma realizar los cambios de dirección para cada uno de estos, además al tener un movimiento en el eje vertical permite alcanzar la profundidad para realizar perforación sobre el material.

Figura 2-2: Cuchilla de corte drag knife



2.2 Selección de componentes mecánicos

2.2.1 Herramienta de corte

Una herramienta de corte debe seleccionarse teniendo presente los factores en los que será utilizado este utensilio como: las propiedades del material, la cantidad de capas a cortar, la forma, tamaño y curvatura.

Las máquinas de corte manual garantizan que las piezas queden totalmente cortadas, sin embargo, no otorga precisión en los cortes con curvaturas finas y su productividad depende directamente del operario, la sujeción que tengan estas telas; en muchas ocasiones se le pone un sobrepeso para maniobrar la máquina, con el cual se corre el riesgo de que las telas no queden correctamente ordenadas para corte y afectar las condiciones de trabajo para esta herramienta. Haciendo la automatización de este proceso se permite controlar

la posición de la herramienta de corte drag knife, permitiendo tener un mayor control de los movimientos que son necesarios para obtener las piezas a cortar, destacando la agilidad que tiene esta para acceder a espacios reducidos y de cortar piezas pequeñas, con detalles finos. La precisión que brinda el drag knife en comparación con la máquina de corte manual de disco giratorio es aproximadamente del 31,2%; para determinar esta precisión se realizó la comparativa del trabajo realizado de forma manual y el corte automatizado, (véase en la Tabla 4-3).

En este caso se pretende cortar 5 capas de tela superpuestas, ya que con este tipo de herramienta y según la ficha técnica de los materiales Reebag y Huracán es recomendable cortar bajas cantidades de capas máximo 5 a la vez, para obtener un corte más preciso, para esto se realizaron unas pruebas con esta hoja de corte para determinar la fuerza mínima y la cantidad de peso requerido para cortar una capa de tela según el tipo de material.

Inicialmente se realizó una prueba con 0.2 kg de peso en los 2 tipos de telas que usa la empresa, se obtuvo un rasgado en el material más no el corte completo, se procede en aumentar el peso aplicado a 0,4 kg donde se obtuvo un corte perfecto con una fuerza mínima para cortar la tela Huracán con un valor equivalente a 3,93 N y para la tela Reebag de 3,3 N por lo tanto la fuerza mínima para cortar 5 capas de telas superpuestas de Huracán es de 19,65 N y para cortar 5 capas de tela Reebag es de 16,5 N.

Tabla 2-1: Fuerza mínima requerida para cortar material Huracán y Reebag.

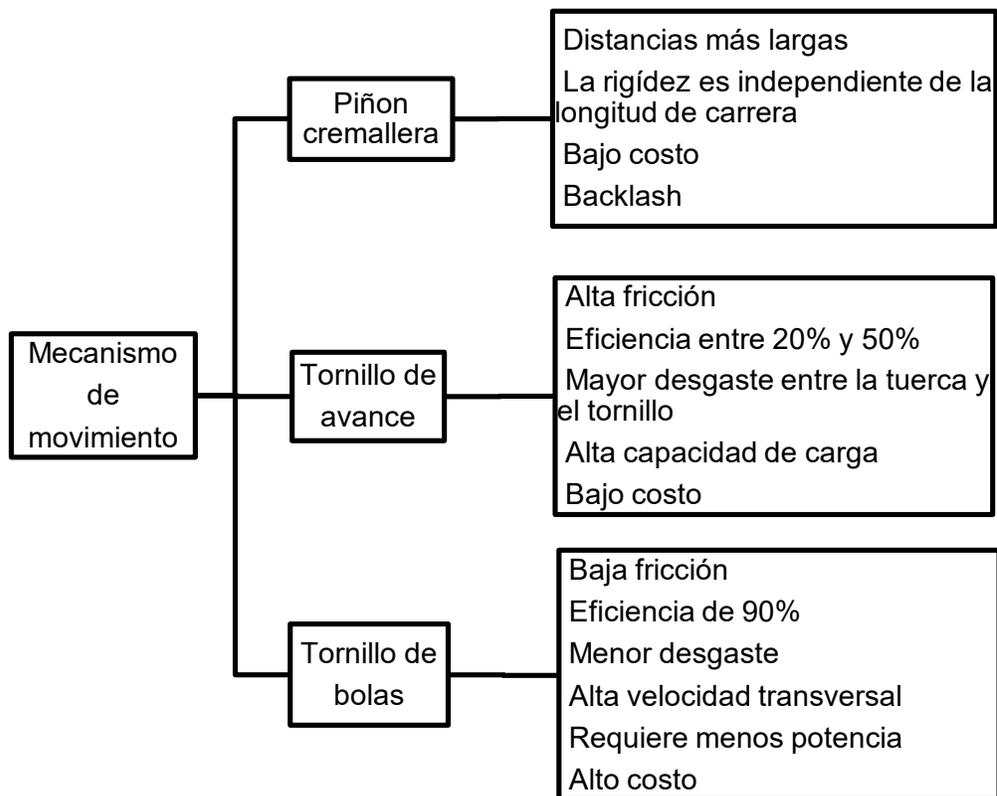
Material	Peso (kg)	Fuerza para 1 capa (N)	Fuerza para 5 capas (N)
Huracán	0,4	3,93	19,65
Reebag	0,4	3,3	16,5
Huracán	0,2	1,96	9,8
Reebag	0,2	1,3	6,5

2.2.2 Husillo de bolas

Para la selección del mecanismo de movimiento se debe considerar que lo más relevante en este caso es la precisión que puede brindar este dispositivo y la eficiencia que va a otorgar, además esta máquina CNC no requiere un mecanismo con distancias

extensamente largas ni de una alta capacidad de carga ya que la máxima distancia a recorrer que es de 70 cm y la carga más alta es de 179.83 N, por lo tanto, se seleccionó el husillo de bola teniendo como base la eficiencia que puede brindar este mecanismo, donde la precisión que se está dando es del 90% y puede llegar a ser superior según las condiciones de trabajo en las que opere, además la baja fricción que otorga el sistema de recirculación del husillo de bolas permite que la máquina tenga una velocidad alta y que el mecanismo no sufra mayor desgaste a la hora de operar, otras características importantes por las que se seleccionó este mecanismo pueden ser vistas en el (Diagrama 2-1).

Diagrama 2-1: Características principales de los mecanismos de movimiento



Un factor importante para la selección del husillo de bolas es la vida útil o nominal de este mecanismo, siendo esta el número de horas de trabajo a una velocidad constante que el husillo es capaz de resistir antes de que se muestre una señal de fatiga, donde el fallo del husillo de bolas se da generalmente por el desgaste, contaminación, poca lubricación y temperaturas fuera de su rango permitido. [28]

Según el catálogo de SKF [28] para determinar la vida útil de un husillo de bolas (Ver ecuación (2-1)) donde se relaciona el coeficiente dinámico (C_a) el cual se utiliza para medir la fatiga en la vida útil de los husillos y se relaciona con la carga media constante (F_m) que es aplicada a dicho mecanismo.

$$L_{10} = \left(\frac{C_a}{F_m} \right)^3 \quad (2-1)$$

▪ **Vida útil husillo eje Z:**

La carga media constante a la que se va a someter el husillo de bolas en el eje Z es igual a 56,378 N además se estimó un tiempo de vida útil de 15 años a una velocidad de 656 RPM, por lo tanto, reemplazando en la ecuación (2-1) se obtiene la carga dinámica requerida.

$$15 * 656 = \left(\frac{C_a}{56,378 N} \right)^3$$

$$C_a = 1,208 \text{ KN}$$

Con un factor de seguridad del 10% la carga dinámica requerida finalmente para el eje Z es de 1,329 KN.

▪ **Vida útil husillo eje Y:**

La carga media constante a la que se va a someter el husillo de bolas en el eje Y es igual a 94,343 N, además se estimó un tiempo de vida útil de 15 años a una velocidad constante de 656 RPM, por lo tanto, reemplazando en la ecuación (2-1) se obtiene la carga dinámica requerida.

$$15 * 656 = \left(\frac{C_a}{94,343 N} \right)^3$$

$$C_a = 2,021 \text{ KN}$$

Con un factor de seguridad del 10% la carga dinámica requerida finalmente para el eje Z es de 2,223 KN, a partir de esta carga requerida y según el catálogo de SKF [28] se determinó que para el eje Z y el eje Y es adecuado implementar un husillo de bola de

especificaciones SD/BD 16x5 R el cual tiene un paso (P_h) igual a 16mm y un diámetro de nominal (d_0) igual a 5mm.

▪ **Vida útil husillo eje X:**

La carga media constante a la que se va a someter el husillo de bolas en el eje es igual a 170,527N, además se estimó un tiempo de vida útil de 15 años a una velocidad constante de 656 RPM, por lo tanto, reemplazando en la ecuación (2-1) se obtiene la carga dinámica requerida.

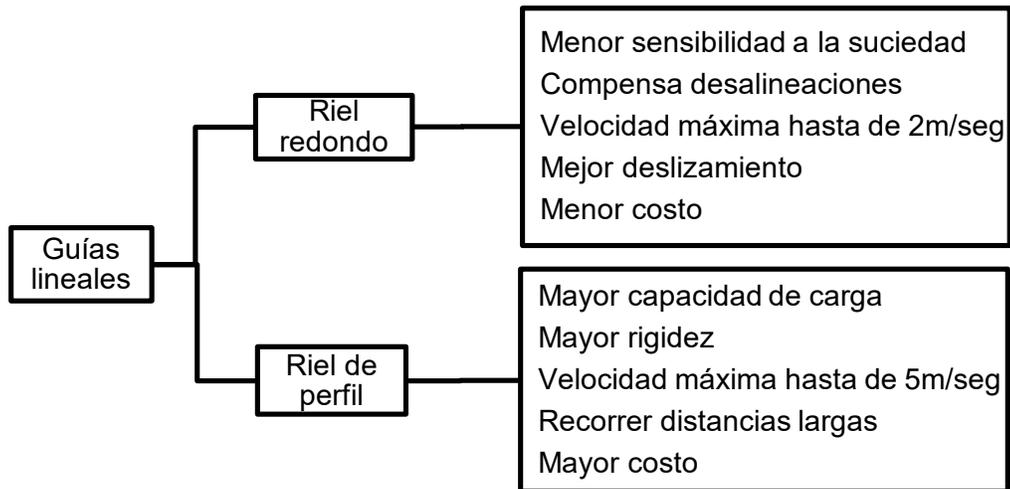
$$15 * 656 = \left(\frac{C_a}{170.527N} \right)^3$$

$$C_a = 3,654 \text{ KN}$$

Con un factor de seguridad del 10% la carga dinámica requerida finalmente para el eje X es de 4,019 KN, a partir de esta carga requerida y según el catálogo de SKF [28], se determinó que para el eje X es adecuado implementar un husillo de bola de especificaciones SD/BD 16x5 R el cual tiene un paso (P_h) igual a 5mm y un diámetro de nominal (d_0) equivalente a 16mm.

2.2.3 Guías lineales

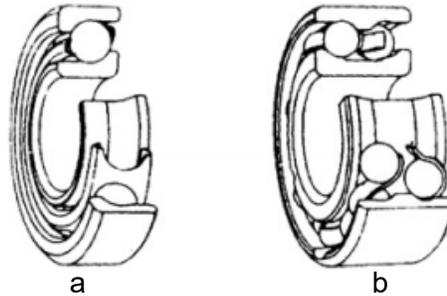
El sistema de guía lineal de riel de perfil tiene grandes ventajas frente a la guía lineal de riel redondo como se observa en el (Diagrama 2-2), destacándose la rigidez que puede brindarle a la máquina y la mayor capacidad de carga, esto debido a que tiene un área de soporte mayor que el área del riel redondo, sin embargo esta máquina CNC para el corte de tela es un diseño con dimensiones cortas con una longitud máxima de 70 cm y con una carga liviana con un peso máximo de 170N, por lo tanto la mejor opción es la guía de riel redondo teniendo en cuenta que aunque no supera las ventajas del riel de perfil, brinda las características apropiadas para que la máquina opere correctamente, una de estas características es que soporta las cargas suministradas sobre ella sin presentar deflexiones considerables que puedan afectar al sistema, además de esto para el eje Y que tiene la distancia más larga se acoplara a esta guía un soporte de apoyo continuo para minimizar la deflexión que pueda presentar el eje, para el eje X y Z se implementarán soportes en los extremos de la guía ya que tienen distancias de recorrido de 20 cm y 40 cm respectivamente [21] [22].

Diagrama 2-2: Características principales de sistema de guías lineales

2.2.4 Rodamientos

En la industria hay varios tipos de rodamientos como el de bola radial de una hilera, rodamiento de rodillos esféricos, rodamiento de rodillos cónicos, rodamiento de agujas, rodamiento de bola de contacto angular, donde su elección se basa en algunas características principales que tiene la máquina, como la velocidad, carga que va a soportar, pero en especial un alto grado de precisión [47], en general cuando se requiere de esta última característica como en las máquinas CNC dónde el desplazamiento en cada eje debe ser milimétrico el rodamiento de una hilera de bola de contacto angular es el indicado (ver en Figura 2-3a), este tipo de rodamiento se destaca en estas aplicaciones debido a la alta rigidez que brinda, la baja fricción que puede llegar a tener, reduciendo la generación de calor y por lo tanto permitiéndole al husillo de bola altas velocidades de rotación. Este tipo de rodamiento solo soporta cargas axiales en un sentido y permite una temperatura de hasta 150°C, sin embargo, hay distintas combinaciones de rodamientos con el fin de mejorar la efectividad de este, como el rodamiento de dos hileras de contacto angular (ver en Figura 2-3b) el cual mejora la capacidad de carga, soportando carga axial y radial en ambos sentidos, donde la capacidad de carga, fatiga y velocidad nominal depende de las dimensiones del husillo, es decir que tan grande es el diámetro del eje del husillo [48].

Figura 2-3: a) Rodamiento de una hilera de bolas de contacto angular, b) Rodamiento de dos hileras de bolas de contacto angular tomado de [47]

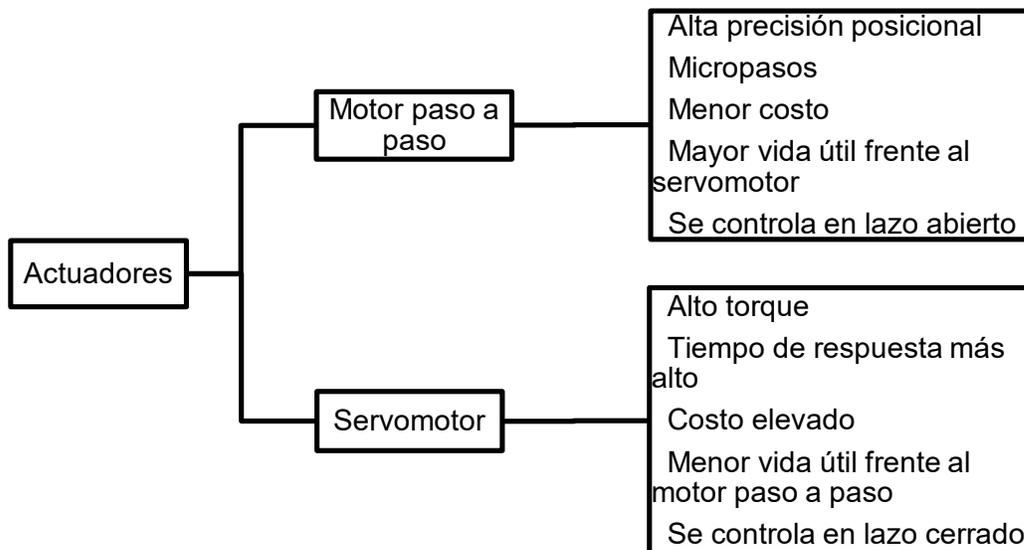


2.3 Selección de componentes eléctricos y electrónicos

2.3.1 Motor paso a paso

Para la selección del actuador se observaron las siguientes características entre el motor paso a paso y el servomotor véase en el (Diagrama 2-3), y de esta manera determinar el más apropiado para esta aplicación.

Diagrama 2-3: Características principales de los actuadores



Comparando las características de los dos tipos de actuadores que se tienen para una máquina CNC que va a cortar tela, se requiere precisión en el posicionamiento del mecanismo de movimiento, es adecuado utilizar un motor paso a paso porque brinda una alta precisión posicional y tiene una característica muy importante que son los micro pasos

[37], esta característica es fundamental para el corte de tela, debido a que se necesita cortar pequeñas distancias, dónde los pequeños movimientos que brinda el motor paso a paso es esencial para obtener un corte correcto, el par de un motor paso a paso a bajas velocidades es mayor que el de un servomotor de características similares, además este tipo de motor no necesita de un ajuste como el servomotor y es más complejo de comprender e implementar, también se facilita el manejo de este motor porque no tiene la necesidad de controlarse en lazo cerrado [13], teniendo en cuenta que se busca un diseño a bajo costo el motor paso a paso permite economizar en cuanto al presupuesto planteado para la implementación de la máquina CNC en este caso.

El motor paso a paso es un dispositivo que puede lograr una determinada cantidad de pasos o grados dependiendo de la entrada que se le asigne obteniendo unos incrementos fijos en el momento de dar cada paso, este motor es adecuado para esta implementación en especial por ser robusto, tener alta precisión en su posicionamiento por cada uno de los micro pasos que se le programan al motor que este acoplado al husillo de bolas permitiendo un beneficio en el corte de los patrones en este proceso.

Para determinar el torque necesario para la selección de los motores se debe considerar el peso de los componentes (Ver Tabla 2-2):

Tabla 2-2: Especificaciones de componentes

Componente	Material	Dimensiones(cm)	Peso (kg)
Drag Knife	Aluminio y acero	21,6 x 13,9 x 4,5	0,454
Mandril	Acero	---	4,231
Lámina eje z	Aluminio	12,4 x 13 x 1,5	0,653
Lámina Inferior y superior eje z	Aluminio	13 x 7,6 x 1,5	0,398
Lámina unión eje x y eje z	Aluminio	13 x 18,4 x 1,5	0,964
Lámina soporte puente	Aluminio	15 x 32 x 1,5	1,994
Rodamiento lineal cerrado	Acero- Níquel y cromo	Ø1,6	0,318
Acople flexible	Aluminio	---	0,0065
Husillo de bola	Acero inoxidable	20	0,558
Husillo de bola	Acero inoxidable	40	1,116
Guía lineal de riel redondo	Acero	Ø 1,6 x 20 de largo	0,316
Guía lineal de riel redondo	Acero	Ø 1,6 x 40 largo	0,631
Motor	Ferromagnético	4,23 x 4,8	0,220

▪ Cálculos para la selección del motor

Para determinar la fuerza de empuje necesaria que permite mover el husillo de bolas en cada eje se debe hallar la torsión de rotación del motor, teniendo en cuenta la masa que va a desplazar este mecanismo, según el catálogo SKF [28] para un husillo de especificación SD/BD se tiene un coeficiente de 0,006 que corresponde a la resistencia al deslizamiento entre dos superficies, en este caso entre el tornillo de acero y la tuerca de acero.

Los datos principales para un eje helicoidal de 16 mm son los siguientes:

Paso de tornillo (P_h) = 5 mm

Diámetro (d_0) = 16 mm

Coefficiente de carga dinámica (C_a)= 7,6 kN

Coefficiente de fricción (μ) = 0,006

Peso en el eje z (F_z)= 5,747 kg

Peso en el eje x (F_x)= 9,617 kg

Peso en el eje y (F_y)= 17,383 kg

Para determinar el par torsional requerido por el husillo de bola de acuerdo con la carga se calcula primero la eficiencia teórica reemplazando en la ecuación (1-1):

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\pi * 16 \text{ mm}}{5 \text{ mm}} * 0,006}$$

$$\eta = 0,943$$

La eficiencia práctica para este caso reemplazando en la ecuación (1-2):

$$\eta_p = 0,943 * 0,9$$

$$\eta_p = 0,849$$

▪ Motor eje Z:

$$T = \frac{9,81 \frac{m}{s^2} * 5,747 \text{ kg} * 0,005 \text{ m}}{2\pi * 0,849}$$

Par de entrada en estado de reposo T = 0,0528 N.m

▪ **Motor eje X:**

$$T = \frac{9,81 \frac{m}{s^2} * 9,617kg * 0,005 m}{2\pi * 0,849}$$

Par de entrada en estado de reposo $T = 0,0884 \text{ N.m}$

▪ **Motor eje Y:**

$$T = \frac{9,81 \frac{m}{s^2} * 17,283 \text{ kg} * 0,005 m}{2\pi * 0,849}$$

Par de entrada en estado de reposo $T = 0,1589 \text{ N.m}$

En la Tabla 2-3 se muestran algunos modelos de motor paso a paso con sus características más importantes para esta aplicación para poder determinar el modelo adecuado:

Tabla 2-3: Comparación especificaciones eléctricas y mecánicas del motor paso a paso

Modelo del motor	Ángulo de paso (°)	Corriente (A)	Resistencia (Ω)	Máximo torque (Nm)
NEMA17-13-04PD-AMT112S	1,8	1,33	2,5	0,297
NEMA17-16-06PD-AMT112S	1,8	1,4	2,7	0,445
NEMA17-19-07SD-AMT112S	1,8	1,05	1,3	0,586
NEMA-23 GM57BYG608	1,8	2,1	1,6	0,593
NEMA-23 GM57BYG503	1,8	1,0	5,1	0,487
NEMA-23 GM57BYG402	1,8	2,4	0,75	0,395

Se determinó el torque necesario para realizar el desplazamiento en cada eje dónde se obtuvo un resultado de un torque de $0,0538 \text{ N.m}$ para el eje Z, $0,0884 \text{ N.m}$ para el eje X y $0,1589 \text{ N.m}$ para el eje Y, por lo tanto el torque máximo requerido es de $0,16 \text{ N.m}$, a partir

de este resultado y comparando el torque con la tabla 2 se determinó que el motor más apropiado es el modelo NEMA17-13-04PD-AMT112S correspondiente a un torque de 0,297 *N.m* y con una corriente de 1,33 A.

Como el motor seleccionado no es muy reconocido comercialmente se eligió el motor 17HS3401 por su fácil acceso comercialmente, este motor que tiene características similares, con un torque de 0,28 *N.m* y una corriente de 1,3 A y otras características que pueden ser visualizadas en la (Tabla 2-4).

Tabla 2-4: Especificaciones de motor paso a paso 17HS3401

Modelo	17HS3401
Paso	1,8°
Pasos/revolución	200
Voltaje	12 V
Corriente	1,3 A
Torque de sujeción	0,28 Nm
Inercia del rotor	34 <i>gcm²</i>
Peso	0,220 kg
Inductancia	2,8 mH
Resistencia	2,4 Ω

2.3.2 Driver para motor paso a paso

El driver TB6600 es un dispositivo ideal para motores de paso a paso bipolares, es muy utilizado en la industria de las máquinas CNC por la robustez y fiabilidad que brinda, este controlador maneja corrientes entre 0,5 A y 4,5 A, voltajes de 9 V a 42 V, se prefiere en aplicaciones dónde se quiere evitar el sobrecalentamiento de los motores paso a paso, un ruido bajo o donde se busca precisión y velocidad. Este driver permite configurar los micro pasos a través de 3 interruptores dónde hay 5 tipos de micro pasos, véase en la (Tabla 2-5) [49].

Tabla 2-5: Configuración del micro paso del controlador

Micro paso	Pulsos/rev	M1	M2	M3
NC	NC	OFF	OFF	ON
2	400	OFF	ON	OFF
4	800	ON	OFF	OFF
8	1600	ON	OFF	ON
16	3200	ON	ON	OFF

Cuando se configura en el driver mayor cantidad de pasos/rev el motor tiene una mejor respuesta en cuanto a sensibilidad, resolución y aumenta el número de posiciones que puede recorrer. Para calcular la precisión que va tener el motor cuando gira se debe tener en cuenta la ecuación (2-2) y los pulsos por revolución (P_{PR}) según la configuración del driver BL TB6600 y el paso que recorre la máquina por cada revolución del motor (P_h); por lo tanto para un paso pequeño el motor girará con mayor precisión [50].

$$Pasos/mm = \frac{P_{PR}}{P_h} \quad (2-2)$$

$$Precisión = \frac{1}{Pasos/mm} \quad (2-3)$$

Con una configuración en el controlador de 400 pul/rev y un tornillo de bolas de paso igual a 5mm se obtienen alrededor de 80 pasos/mm y una precisión de 0,0125 mm, además se puede observar en la Tabla 2-6 la precisión que va a tener el motor con las distintas configuraciones que tiene el driver de pulsos por revolución.

$$Pasos/mm = \frac{400 \text{ pul/rev}}{5 \text{ mm}}$$

$$Pasos/mm = 80 \text{ pasos/mm}$$

$$Precisión = \frac{1}{80 \text{ pasos/mm}}$$

$$Precisión = 0,0125 \text{ mm}$$

Tabla 2-6: Precisión del motor con distintas configuraciones del driver

Pulsos/rev	Pasos/mm	Precisión (mm)
400	80	0,0125
800	160	0,00625
1600	320	0,00313
3200	640	0,00156

La unidad de control Mach3 tiene una velocidad en comunicación paralela entre 25000 Hz y 100000 Hz, por lo tanto para determinar la velocidad de operación de la máquina debe tenerse en cuenta esta velocidad de comunicación y la cantidad de pulsos por revolución que se eligió para la configuración del driver, conociendo esto se dice que la velocidad angular que tiene el motor es igual a la velocidad de comunicación paralela (W_c) que tiene la unidad de control Mach3 sobre la cantidad de pulsos por revolución, obsérvese en la ecuación (2-4).

$$w = \frac{W_c}{P_{PR}} \quad (2-4)$$

$$w = \frac{25000 \text{ pps}}{3200 \text{ pul/rev}}$$

$$w = 7,813 \text{ rev/s}$$

$$w = 468,75 \text{ rpm}$$

Entonces la velocidad lineal de la máquina es igual a la velocidad angular del motor por el paso del husillo de bolas como se muestra en la ecuación (2-5).

$$V = w * Ph \quad (2-5)$$

$$V = 468,75 \text{ rpm} * 5 \text{ mm}$$

$$V = 2343,8 \text{ mm/min}$$

3. Diseño y programación

Para realizar el diseño de una máquina para que cumpla con los requerimientos que plantea la empresa que hace uso de herramientas manuales, se observó cada uno de los procesos de corte sobre la tela, teniendo como objetivo principal identificar como se ejecuta. Se evidencia que las herramientas empleadas son de empuje, de este modo es posible plantear varias opciones para ejecutar un diseño que permita tener un mayor rendimiento, reducir el consumo energético y sobre todo brindar una seguridad para el operario.

Para este proyecto, inicialmente se definieron las dimensiones como se indica en el capítulo 2.1.1; con estas medidas se inicia con la idea principal para diseñar la estructura considerando cada uno de los ejes del sistema a crear. También es necesario conocer cuanta fuerza se requiere aplicar sobre cada uno de los ejes; para esto se desarrollaron distintas pruebas sobre el Drag Knife como se menciona en el capítulo 2.2.1, este valor adicional al peso que tendría la estructura permite identificar la fuerza que se está distribuyendo sobre cada una de las piezas que van a conformar el prototipo.

Cuando se hace la recopilación de la información anterior y se definen cada uno de los materiales sobre los cuales se plantea hacer el prototipo, se inicia a la búsqueda de un software que permita realizar el diseño y a su vez permita hacer un análisis de elementos finitos, con el fin de poder obtener un estudio de cargas estáticas sobre cada una de las piezas, es de este modo que se puede ver la viabilidad del material seleccionado o incluso que superficies se ven expuestas a un exceso de cargas, impidiendo que el prototipo realice el movimiento deseado.

Es de este modo que se elige sobre todas las herramientas de diseño CAD / CAM el software SolidWorks, mediante el cual es posible desarrollar un buen diseño y modelado

sobre cada una de las piezas que se planean utilizar para la creación de este modelo virtual.

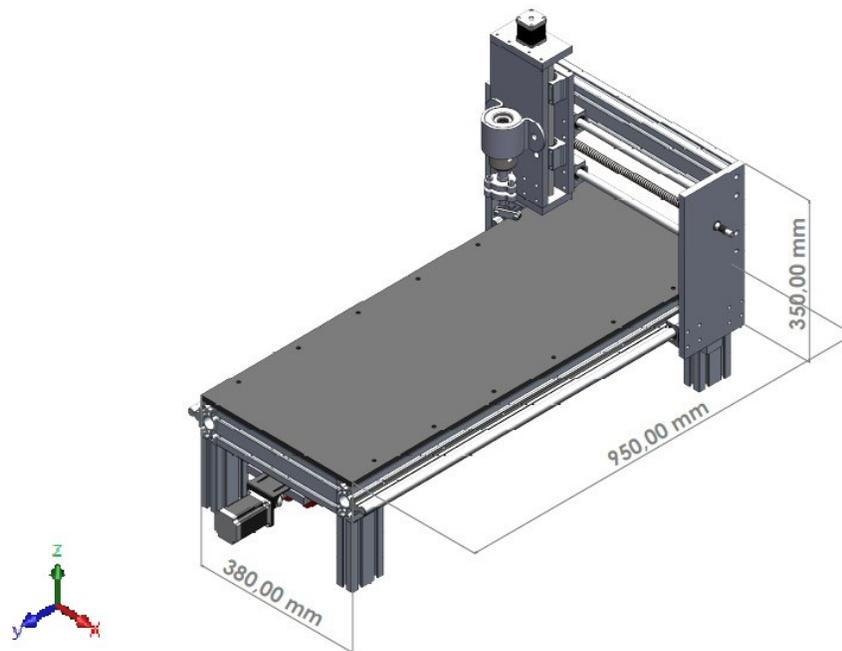
3.1 Diseño

Para el diseño de este proyecto se hizo la elección de los materiales que son más comerciales para la fabricación de estas máquinas CNC (Guías lineales, husillos de bola, motores paso a paso, drivers, etc.).

Haciendo uso de la herramienta CAD / CAM SolidWorks, es viable hacer el diseño de este proyecto, realizando una búsqueda de los materiales en las librerías que se encuentran en el Internet (GRABCAD), es posible encontrar los moldes de cada uno de los componentes de este. Para esto se tuvo en cuenta las medidas que se requieren, Para esto las piezas encontradas en la plataforma mencionada debieron ser modificadas para hacer posible el ensamblaje virtual del prototipo planteado.

Con el software que se usa en este proyecto se facilita modificar las medidas de las piezas utilizadas, también se permite agregar el tipo de material sobre el cual se está trabajando y hacer uso de la herramienta TOOLBOX; es la biblioteca que conforma los componentes (Rodamientos, tornillos, pernos, levas, etc.) bajo normas internacionales, de modo que facilita el adicionar los rodamientos necesarios para otorgar el movimiento requerido de la máquina. Asignar las propiedades físicas a los elementos utilizados para este diseño, permite realizar el estudio de elementos finitos que se requiere para conocer el comportamiento de cada uno de los componentes sobre cada uno de los ejes del sistema.

Con base a lo anterior se secciona de acuerdo con los movimientos que se realizan sobre cada uno de los ejes, es importante iniciar con el soporte de la máquina , por esto se diseñó primero la base la cual permite que se realice el desplazamiento sobre el eje Y del sistema a sus laterales, continuando con este se procede a realizar el diseño del soporte que tiene el desplazamiento en el eje X, es aquí donde se plantea el deslizamiento de la estructura a lo ancho de este la máquina y por último el diseño que conforma el desplazamiento sobre el eje Z que da el movimiento sobre el Drag Knife.

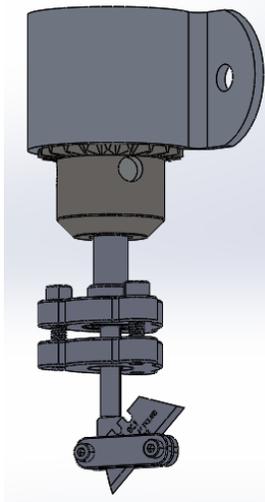
Figura 3-1: Dimensiones de la máquina CNC diseñada

3.1.1 Diseño SolidWorks

- **Sistema de corte**

Para el sistema de corte, se planteó usar la herramienta de corte Drag Knife como se menciona el capítulo 2.2.1, donde su funcionamiento está basado en la tracción similar al principio que tienen las ruedas de una silla de oficina; donde su centro de giro este desplazado, lo que permite seguir la ruta que se suministra por el programa dando los movimientos sobre los ejes X y Y. Para la sujeción de este sistema de tracción se planifico el uso de un mandril de $\frac{1}{2}$ pulgada que permite el ingreso al eje del Drag Knife, del mismo modo para adaptar el carro que se mueve en el eje z con el mandril y el Drag Knife se usa una abrazadera que permite dar el ajuste necesario (Ver Figura 3-2).

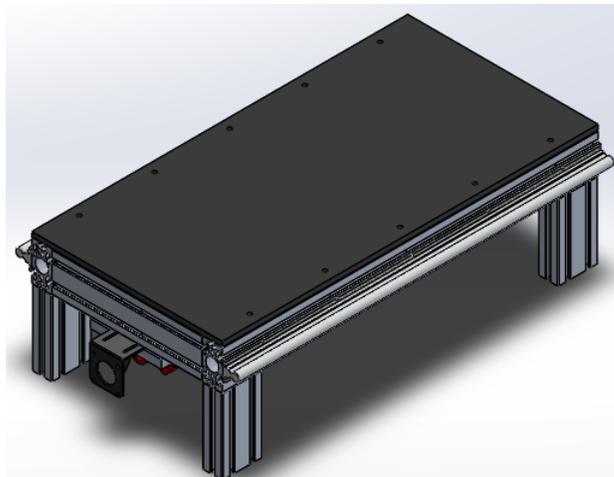
Figura 3-2: Sistema de corte drag knife



▪ **Eje Y**

En este eje los componentes que se encuentran permiten realizar el desplazamiento de todo el sistema sobre este eje, es aquí donde se puede encontrar los perfiles de aluminio de $40\text{ mm} \times 80\text{ mm}$, este perfil brinda los soportes y las bases de la mesa de corte, en el lado más largo y ancho que tiene el perfil, se encuentran ubicadas las guías (SA16 – #), sobre estas se soportan los carros (SBR16UU) que permiten al carro X y Z desplazarse sobre el eje Y. También lo conforma un tornillo (SFU1605 – #), dos ejes guía, un BK12, un husillo de bolas (SFU1605–3), un acople flexible (D30L35) y un motor nema 17, componentes que permiten dar el desplazamiento sobre este eje (Ver anexos), los componentes de la base se observan en la Figura 3-3.

Figura 3-3: Diseño base en SolidWorks eje Y



Para hacer una mejor descripción del desplazamiento que presenta el sistema, con el motor nema 17 que se encuentra sujeto a la base, se une al eje helicoidal por medio del acople flexible y finaliza su unión en el soporte (BK12); dentro de esta unión se encuentra el husillo de bola el cual por medio del (SFU2505) permite acoplar el eje Y con el eje X. De tal forma que al generar los pulsos por medio de la placa Mach3 permite la rotación al motor nema 17 y así iniciar el movimiento de rotación sobre el eje helicoidal y convertir este en movimiento traslacional por medio del husillo de bolas.

▪ Eje X

Este eje está conformado por varios componentes, de ellos cabe destacar los soportes laterales, estos tienen como función dar la altura del sistema y el desplazamiento del carro por el ancho de la máquina. Es también de gran importancia notar que lo conforman al igual que el eje Y un husillo de bola, un tornillo helicoidal, dos ejes guía, (Nut holder) para acoplar el sistema al carro de desplazamiento. Otro componente importante del eje X es el carro, este se diseña de modo que pueda contener 8 soportes lineales (SC16UU) para permitir un desplazamiento más equilibrado sobre este los ejes X y Z, para poder mover todo el sistema del eje X sobre el eje Y, se unen 4 (SBR16UU), un acople flexible y un motor nema 17 que permita la rotación del husillo de bolas (Ver anexos), la Figura 3-4 muestra el carro en el eje X el cual permite el desplazamiento sobre el eje X y Z, la Figura 3-5 muestra los componentes que permiten el desplazamiento sobre el eje Y.

Figura 3-4: Carro eje X diseñado en SolidWorks

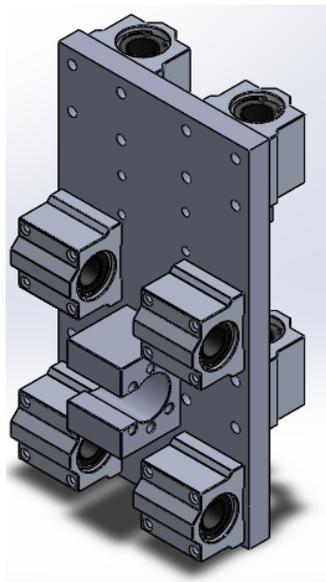
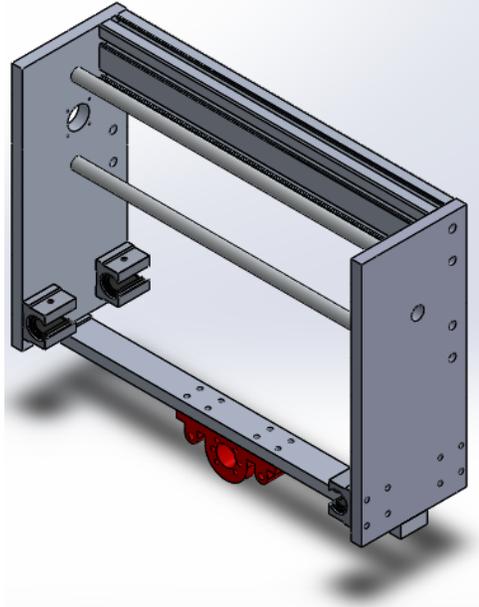
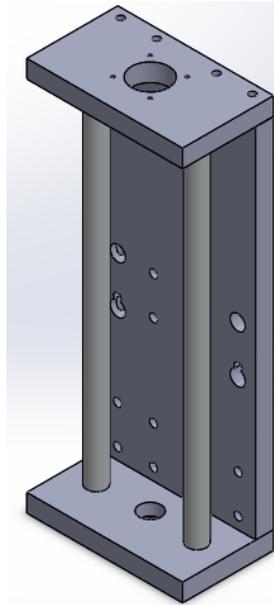


Figura 3-5: Carro eje Y

Para acoplar todo este sistema se hace uso de los soportes laterales donde se requiere hacer un maquinado de modo que los componentes anteriormente relacionados permitan la traslación del todo el sistema en el eje X. Cada uno de los componentes son ubicados de manera específica, para que no tenga colisión o inconvenientes en el desplazamiento durante todo el eje.

▪ Eje Z

Este eje es conformado por un carro cuyos componentes se han mencionado anteriormente y por tres placas que se requieren maquinar para poder acoplar todo el sistema, la placa principal es la encargada de soportar el sistema de corte o Drag Knife. En este carro se encuentra una placa superior que soporta el motor nema 17 y una placa inferior que esta acondicionada para sujetar un rodamiento y dar libertad de movimiento a el tornillo helicoidal, la Figura 3-6 es la estructura que conforma el carro que permite el desplazamiento en el eje Z.

Figura 3-6: Carro en el eje Z

Este eje es el encargado de aplicar la fuerza que se requiere para cortar las telas de acuerdo con los patrones que se suministran a través de la Unidad de control Mach3. El funcionamiento del sistema de corte como es explicado anteriormente.

Posterior al diseño y ensamblaje de cada una de las piezas anteriormente relacionadas por ejes es posible realizar un estudio de movimiento, de modo que es posible verificar el correcto funcionamiento de cada uno de los componentes que permiten el desplazamiento sobre cada uno de los ejes del sistema, para esto se hace uso de la misma herramienta CAD / CAM, donde es posible observar que no hay colisiones sobre la plataforma que se desarrolló.

3.2 Programación por control numérico

La programación por control numérico computarizado se ejecuta por bloques, donde cada uno de ellos contiene una instrucción detallada que es enviada a la unidad de control y posteriormente a la máquina CNC, estas instrucciones se ejecutan de manera sucesiva sin saltarse ninguna línea, en un orden lógico donde el programador u operario debe tener conocimiento de los comandos especiales para controlar la máquina CNC, además debe tener conocimiento sobre la configuración del software (Mach3).

Para controlar la máquina por medio del software Mach3 se deben convertir en código G cada uno de los planos realizados en Solidworks mediante el programa de manejo libre Estlcam, para luego enviarlo a Mach3 y poder ejecutar el corte de las piezas, además este programa requiere de una configuración previa para que reconozca los motores de cada eje y sea posible controlar desde el computador.

3.2.1 Procesamiento de planos a código G

Para realizar el procesamiento de los planos a código G, como primer paso se exportaron todos los moldes diseñados en Solidworks con una extensión .DXF, ya que esta extensión es compatible con Estlcam, se adjunta cada molde seleccionando la herramienta (exterior) como se observa en la Figura 3-7 que se encarga de crear un trazado al exterior del molde, esto con el fin de que la herramienta de corte tenga un punto de referencia del trazado que debe seguir, se procede a guardar el molde con una extensión .TAP como se muestra en la Figura 3-8 generando el código G respectivo para este molde.

Figura 3-7: Herramienta exterior y guardar molde de espalda en código G.

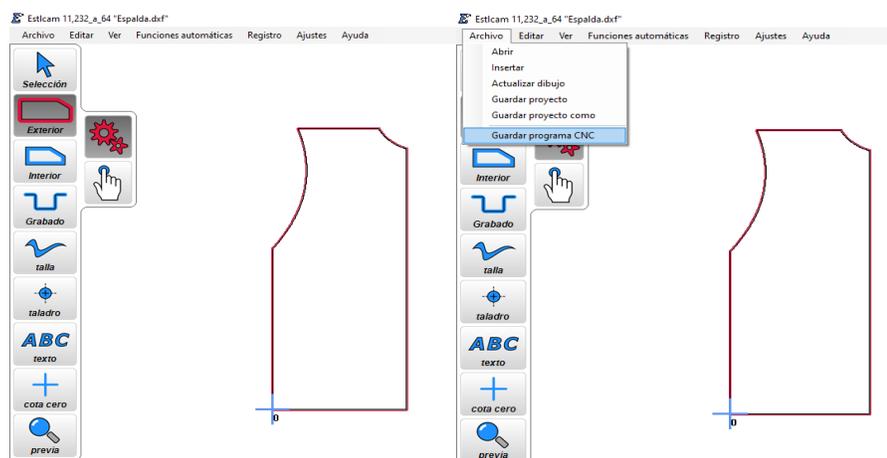


Figura 3-8: Código G del molde de espalda

```

(Machining time about 00:03:14 hours)
(Required tools:)
(End mill 3mm)
G90
G91.1
M03 S24000
G00 Z5.0000
G00 X-1.5000 Y0.0000
G00 Z0.5000
G01 Z0.0000 F600 S24000
G01 Z-1.0000
G03 X0.0000 Y-1.5000 I1.5000 J0.0000 F1200
G01 X300.0000|
G03 X301.5000 Y0.0000 I0.0000 J1.5000
G01 Y650.0000
G03 X300.4641 Y651.4264 I-1.5000 J0.0000
G02 X273.5227 Y664.0879 I33.9508 J107.2347
G02 X245.6640 Y690.6254 I57.3821 J88.1308
G02 X238.9261 Y700.9229 I103.4366 J75.0343
G03 X237.7436 Y701.5000 I-1.1825 J-0.9229
G01 X57.7436
G03 X56.3311 Y699.4954 I0.0000 J-1.5000
G02 X70.1161 Y650.2547 I-312.4195 J-114.0125
G02 X75.5173 Y593.0787 I-276.4642 J-54.9595
G02 X61.8894 Y511.4672 I-267.2765 J2.6874
G02 X40.2245 Y461.6970 I-288.7924 J96.1103
G02 X12.6401 Y418.6126 I-322.6500 J176.2016
G02 X-1.2619 Y400.8109 I-369.6772 J274.3658
G03 X-1.5000 Y400.0000 I1.2619 J-0.8109
G01 Y0.0000
G01 Z-2.0000 F600
G03 X0.0000 Y-1.5000 I1.5000 J0.0000 F1200
G01 X300.0000
G03 X301.5000 Y0.0000 I0.0000 J1.5000
G01 Y650.0000

G03 X300.4641 Y651.4264 I-1.5000 J0.0000
G02 X273.5227 Y664.0879 I33.9508 J107.2347
G02 X245.6640 Y690.6254 I57.3821 J88.1308
G02 X238.9261 Y700.9229 I103.4366 J75.0343
G03 X237.7436 Y701.5000 I-1.1825 J-0.9229
G01 X57.7436
G03 X56.3311 Y699.4954 I0.0000 J-1.5000
G02 X70.1161 Y650.2547 I-312.4195 J-114.0125
G02 X75.5173 Y593.0787 I-276.4642 J-54.9595
G02 X61.8894 Y511.4672 I-267.2765 J2.6874
G02 X40.2245 Y461.6970 I-288.7924 J96.1103
G02 X12.6401 Y418.6126 I-322.6500 J176.2016
G02 X-1.2619 Y400.8109 I-369.6772 J274.3658
G03 X-1.5000 Y400.0000 I1.2619 J-0.8109
G01 Y0.0000
G00 Z5.0000
G00 X0.0000
M05
M30

```

3.2.2 Configuración previa de Mach3

Para que el software envíe la señal a los motores por medio de la tarjeta de control Mach3, el programa requiere de una configuración previa para que estos actuadores puedan reconocer dicha señal, para esto se realizó la configuración de los puertos y pines, inicialmente se ubicaron los pines donde están conectados las señales de paso y dirección de los motores, se seleccionaron únicamente los ejes X, Y y Z (ver en Figura 3-9 **Figura 3-9**). Se configura las señales de entrada (véase en la Figura 3-10) activando los límites en los tres ejes para controlar la ubicación del sistema y acoplar los finales de carrera para evitar colisiones que provoque algún daño en la máquina cuando se detecte que llegó al final del trayecto en cada eje.

Figura 3-9: Configuración puertos de salida de los motores en Mach3

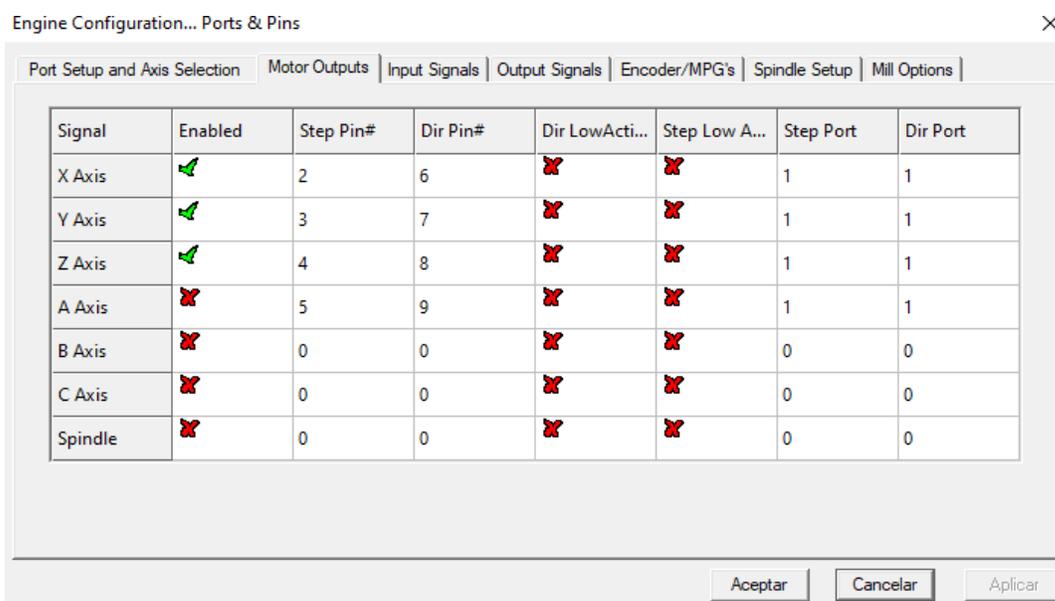
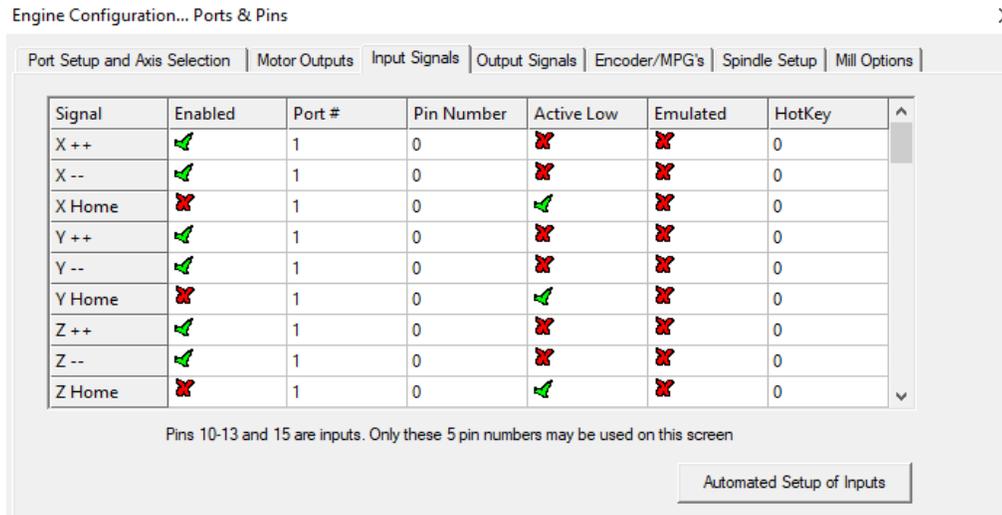
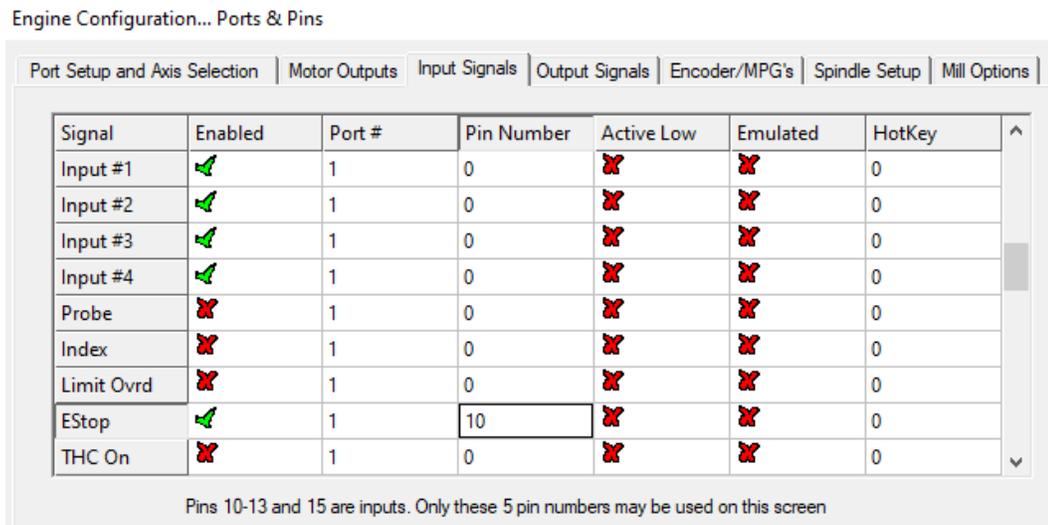


Figura 3-10: Configuración señales de entrada en Mach3



Además, es necesario configurar el pin de entrada de los botones STOP y START por lo tanto se habilita la casilla del botón START, con el fin de que se detecte el pulso del botón externo se habilitan las entradas de la 1 a 4, dónde la 1 se utilizó para controlar el STOP de la máquina y la entrada 3 para controlar el CYCLE START de la máquina.

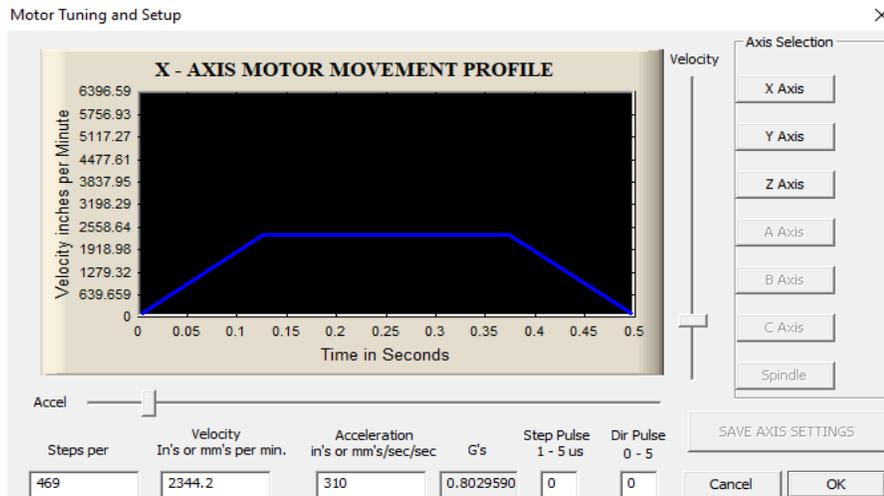
Figura 3-11: Configuración Pin de entrada de Stop



Luego se realizó la configuración de los pasos y velocidad a la que van a operar los motores de cada eje; calculados previamente en el capítulo 2.3.2, dónde los tres motores operan a una misma velocidad de 2344 mm/min y a 469 pasos, esto se da por la dependencia del

paso del husillo que es de 5mm para los tres ejes y de la configuración de los micro pasos del driver TB6600, que se eligió de 3200 pul/rev.

Figura 3-12: Configuración de velocidad y pasos de los motores en mach3



El botón de inicio (CYCLE START) y detenido de emergencia (STOP) son instalados físicamente en la máquina CNC, para tener un acceso más cercano a la máquina y poder reaccionar mucho más rápido si ocurre alguna emergencia; ya que en muchos casos no es posible tener el computador tan cerca de la máquina. El botón de emergencia debe ser capaz de detenerse apenas le llegue la señal de que fue pulsado y no reiniciar el proceso cuando se deje de oprimir, sino únicamente cuando se oprima el botón de RESET.

Para configurar los pulsadores de Inicio y Stop primero en la opción de puertos y pines se activan las entradas de la tarjeta (véase en la Figura 3-13), que en este caso para el botón de Stop es la (input 1), y el botón de CYCLE START es (input 3), según el esquema del controlador de bit sensor mach3, donde se indica de esta manera el orden de las conexiones. Luego en la Figura 3-14 se activó la opción (OEM TRIG), esta opción permite configurar la máquina de tal manera que funcione mediante botones externos, y se habilita el pin 11 y 13 que son los pines a los que están conectados dichos botones, además para el (OEM TRIG 1) se debe habilitar el active low para que el botón Stop funcione normalmente cerrado.

Figura 3-13: Configuración entradas para pulsadores

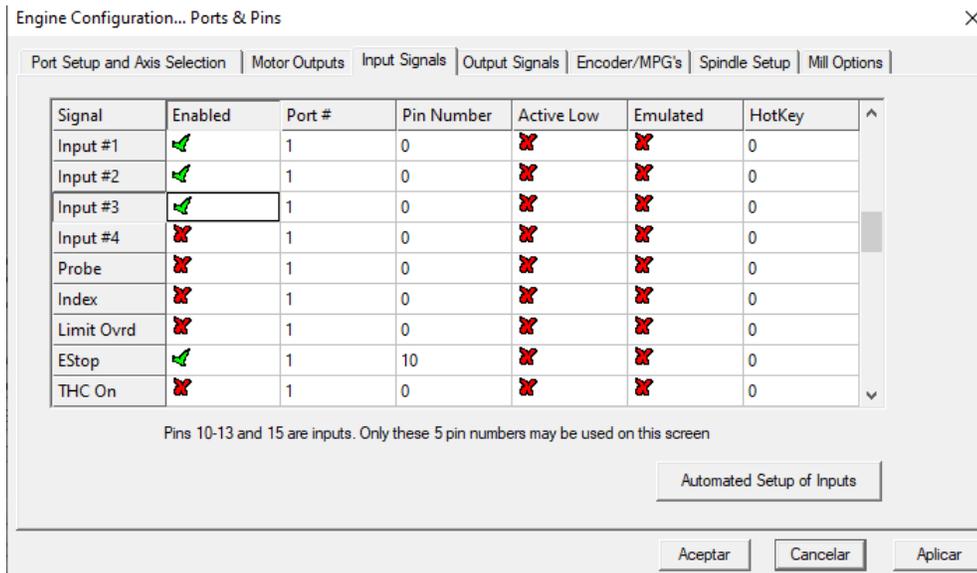
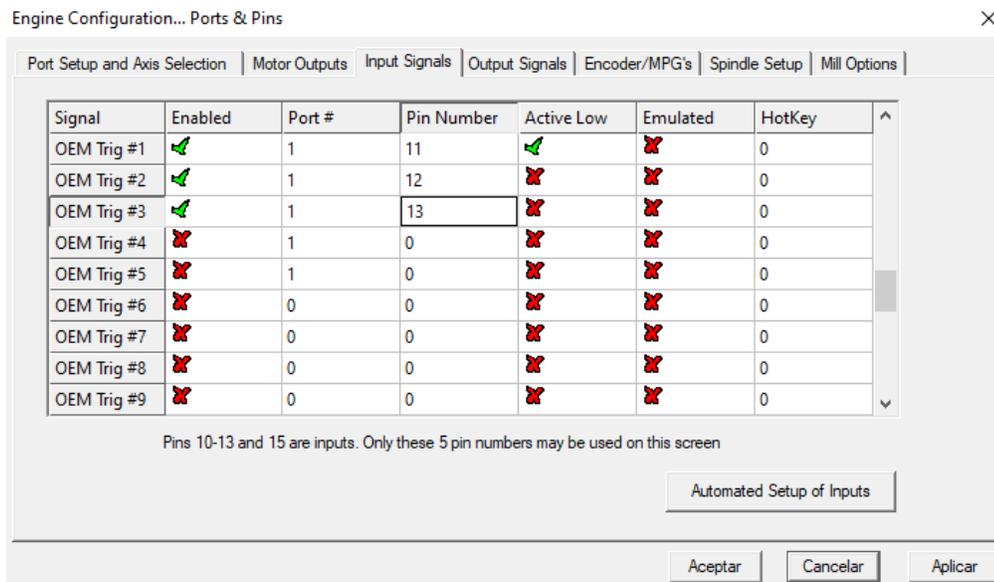


Figura 3-14: Configuración botones externos



Según las especificaciones del mach 3, se debe habilitar los System Hockey o teclas de acceso rápido, aplicando un código especial según el fabricante del controlador a cada botón externo (véase en el anexo C); cuando se desea utilizar una entrada como botón externo, como Stop, el código que lo identifica es 1003, y para el CYCLE START es de 1000 como se observa en la Figura 3-15.

Figura 3-15: Configuración System HotKeys

System HotKeys Setup

Jog Hotkeys

	ScanCode		ScanCode
X++	39	X--	37
Y++	38	Y--	40
Z++	33	Z--	34
A / U ++	999	A / U --	999
B / V ++	999	B / V --	999
C / W ++	999	C / W --	999

External Buttons - OEM Codes

Trigger #	DEM Code		DEM Code
1	1003	8	-1
2	-1	9	-1
3	1000	10	-1
4	-1	11	-1
5	-1	12	-1
6	-1	13	-1
7	-1	14	-1
		15	-1

System Hotkeys

	ScanCode		ScanCode
DRO Select	999	Code List	999
MDI Select	999		
Load G-Code	999		

Esta sección de los pulsadores no se implementó físicamente, solo se realizó el estudio detallado de la configuración correspondiente para proyectos futuros, donde se implemente la máquina CNC, ya que es fundamental para el manejo de una máquina automatizada tener botones cercanos al operario que le permitan reaccionar velozmente.

4. Análisis y resultados

4.1 Análisis de elementos finitos

En esta sección se realizó un análisis estático de algunas piezas las cuales son determinantes para la resistencia de la máquina, inicialmente se hizo un análisis de las guías lineales redondas, en el eje Y se analizó la guía lineal de soporte con apoyo continuo, en los ejes X y Z un se realizó un análisis de las guías con soporte de apoyo en los extremos para determinar el desplazamiento que sufre la pieza, las tensiones nodales y la deformación unitaria.

4.1.1 Análisis en guías lineales

- **Eje Y con apoyo continuo**

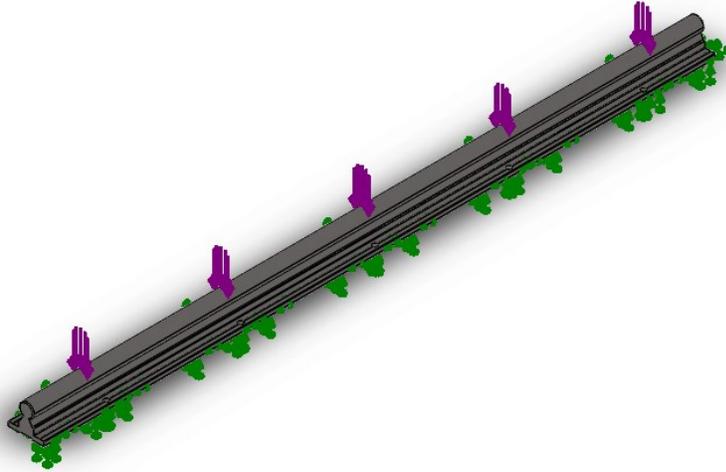
La solución de elementos finitos en la guía lineal del eje Y se desarrolló por medio de las tres fases mencionadas en el capítulo 1.4.2 las cuales están conformadas de la siguiente manera.

Preprocesamiento

Tipo de material: El material que se le aplicó haciendo uso del Software a la guía lineal fue acero inoxidable debido a que la guía lineal está compuesta por este material según las especificaciones de fabricación.

Restricciones: Se puso una restricción en la parte interna de la guía lineal tal y como se muestra en la Figura 4-1 ya que en el capítulo 2.2.3 se seleccionó una guía lineal redonda con soporte de tipo apoyo continuo.

Cargas: Se le suministro una fuerza de 56,9 N debido a que el peso neto del puente que va a soportar este eje es de 170,5N y esta va a estar repartida entre las dos guías lineales ubicadas a los laterales del eje Y, y también por el husillo de bola de este.

Figura 4-1: Fuerzas y restricciones sobre la guía lineal del eje Y

Tipo de mallado: El software SolidWorks tiene por defecto mallado sólido de elementos en 3D, elementos de vaciado triangulares en 2D y elementos de viga en 3D, para este caso como la pieza a analizar es de geometría sólida en tres dimensiones, el software le ajusta automáticamente el tipo de mallado sólido de elementos en 3D como se ve en la Figura 4-3, además el diseñador tiene la posibilidad de realizarle un ajuste de densidad de la malla véase en la Figura 4-2, para realizar este ajuste se debe tener claro las necesidades del diseñador, por lo tanto si se configura con una malla gruesa el programa va a arrojar una solución más rápida y si se elige una malla más fina el resultado del análisis va a ser más preciso debido a que entre mayor cantidad de elementos se analicen dentro de la estructura mayor cantidad de incógnitas se tendrán y la solución de ecuaciones será más precisa.

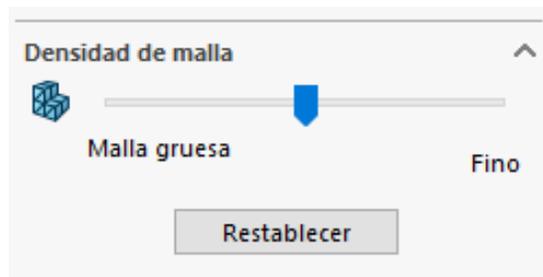
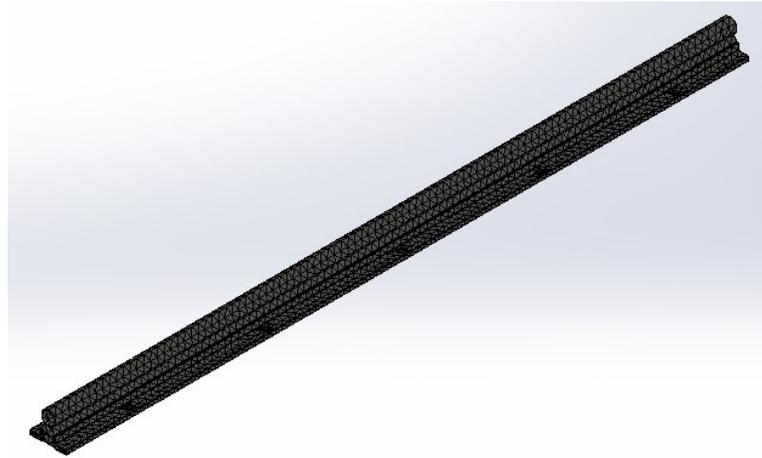
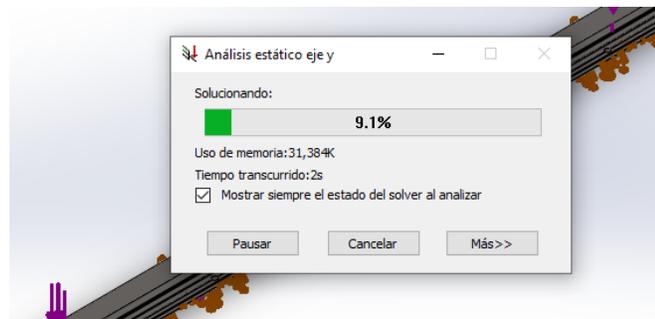
Figura 4-2: Ajuste densidad de malla en SolidWorks

Figura 4-3: Mallado tetraédrico de la guía lineal redonda del eje Y

Cálculo de resultados

En esta etapa el diseñador no interviene, esto se da a los parámetros digitados anteriormente en el software, que se encarga de resolver las ecuaciones que arrojó la estructura, por lo tanto, el diseñador espera un tiempo estimado directamente por el Software de simulación y así dar inicio con la siguiente fase para obtener el análisis de los resultados.

Figura 4-4: Solución análisis estático guía lineal eje Y

Post procesamiento

En la fase de post procesamiento se observan los resultados que arroja el análisis de elementos finitos, luego de analizar cada uno de los elementos se determinó una tensión nodal máxima sobre toda la superficie de aproximadamente $2,897 \times 10^3 Pa$ y un desplazamiento máximo sobre el eje de $6,048 \times 10^{-7} mm$, se puede observar que el

desplazamiento que presenta el eje sufre menos con un soporte de apoyo continuo que con soporte a los extremos y además la tensión máxima que sufre la guía lineal está lejos del límite elástico del material acero inoxidable que es de 170 MPa por lo tanto, el factor de seguridad que arrojo este eje fue de 3 como se observa en la Figura 4-7, teniendo en cuenta que la tolerancia para el factor de seguridad está en un rango entre 1 y 3, este valor que se obtuvo se puede justificar con el sobredimensionamiento que hay del eje con respecto a las fuerzas aplicadas sobre este, sin embargo, este FDS beneficiaría al diseño de la máquina aumentando la vida útil del eje.

Figura 4-5: Resultado de análisis de Von Mises tensión nodal eje Y

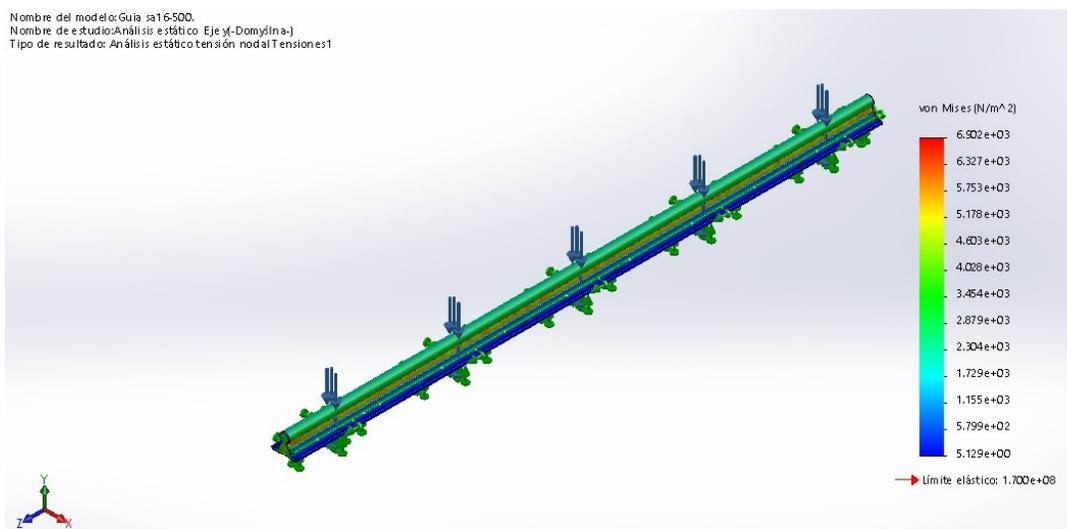


Figura 4-6: Resultado de análisis de desplazamiento estático eje Y

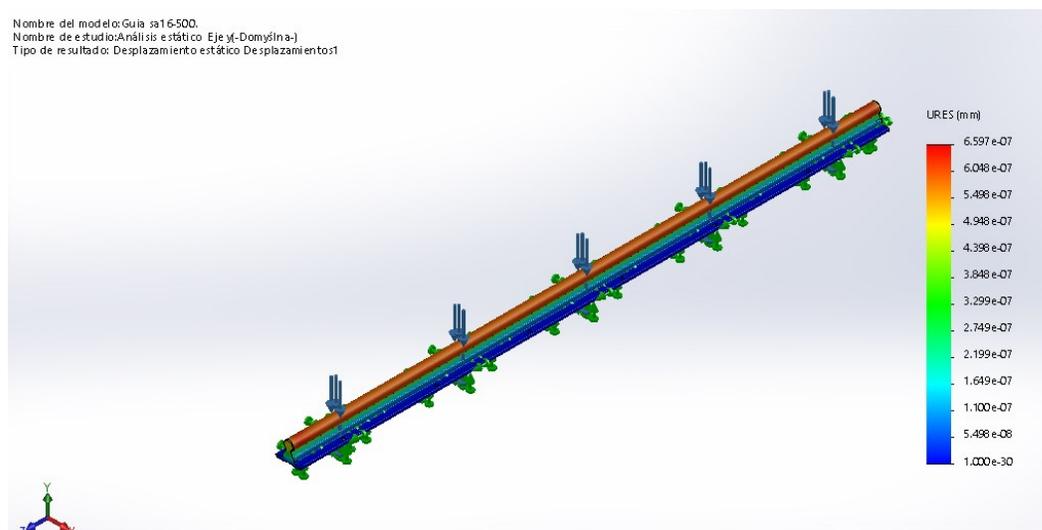
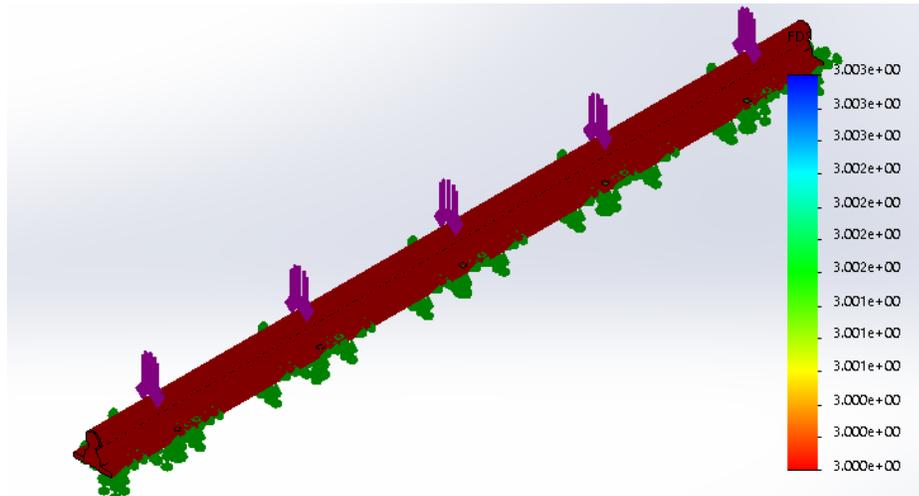


Figura 4-7: Factor de seguridad eje Y



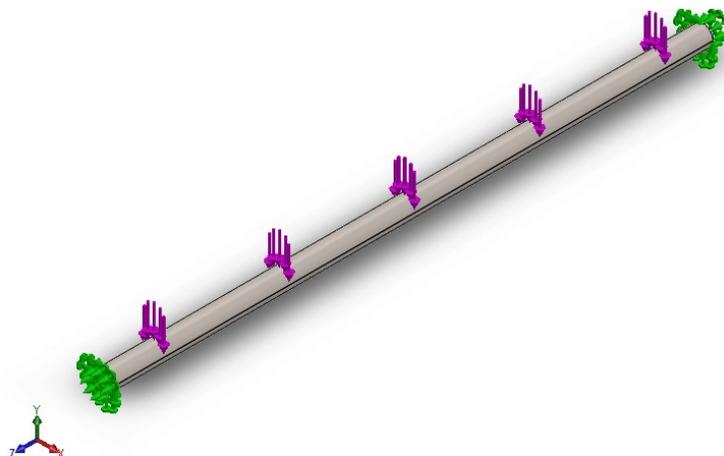
▪ **Eje X apoyo en los extremos**

Preprocesamiento

Para la fase inicial de la guía lineal de soporte con apoyo en los extremos en el eje x se le aplicó un material a la barra de acero inoxidable según las especificaciones de fabricación, una carga de 31,45 N, una restricción a los extremos de la barra simulando las restricciones que provocan los soportes.

Tipo de mallado: El tipo de mallado para esta pieza el software la ajusto automáticamente ya que es una pieza sólida en 3D, por lo tanto, el tipo de malla sobre toda la estructura mecánica fue tetraédrico.

Figura 4-8: Cargas y restricciones sobre la guía lineal del eje X



Post procesamiento:

Según los resultados arrojados luego de solucionar los elementos de la estructura, en el análisis de Von mises o tensión nodal se observa en la (Figura 4-9) que en el medio de la barra se produce una tensión nodal máxima de aproximadamente 1,816 MPa y a lo largo de la barra una tensión de $2,602 \times 10^5 Pa$, además se presenta una pequeña tensión cerca a los extremos en los soportes de la barra de 3,11 MPa la cual se produce por la restricción que provocan los soportes de apoyo a los extremos, esta tensión máxima provocada por la carga aplicada a las guías no alcanza el límite elástico del acero inoxidable que tiene un valor de 170 MPa lo cual indica que soporta fácilmente y sin mucho esfuerzo las cargas que se le pretende aplicar.

En el análisis de desplazamiento estático (véase en la Figura 4-10) presenta una deformación máxima de $1,415 \times 10^{-2} mm$ en la mitad de la barra debido a que en el medio no tiene ningún soporte que reciba todo el peso aplicado a la guía lineal, a medida de que se va acercando la fuerza aplicada a los soportes de los extremos, la deformación de la barra va disminuyendo, mostrando una deformación mínima de $1,00 \times 10^{-3} mm$.

Figura 4-9: Resultado de análisis de Von Mises tensión nodal en el eje X

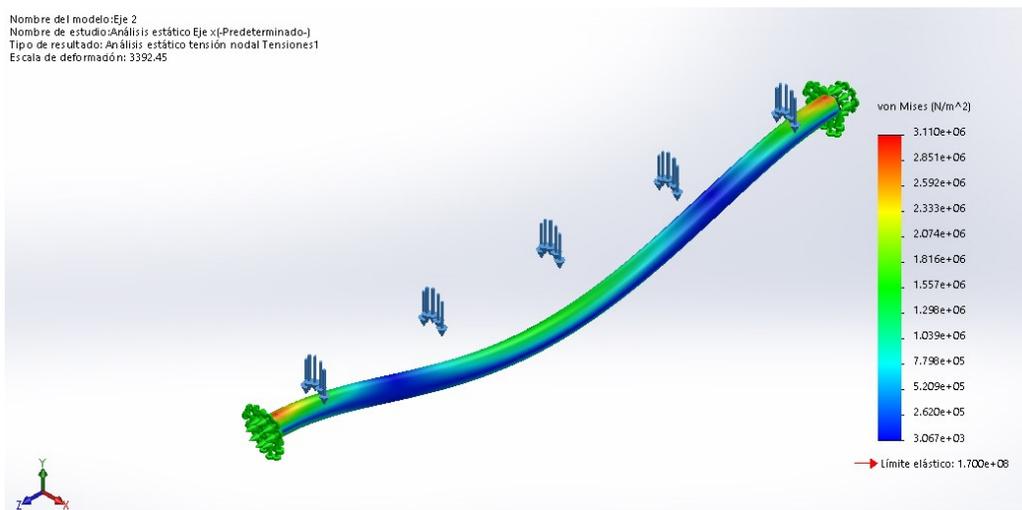
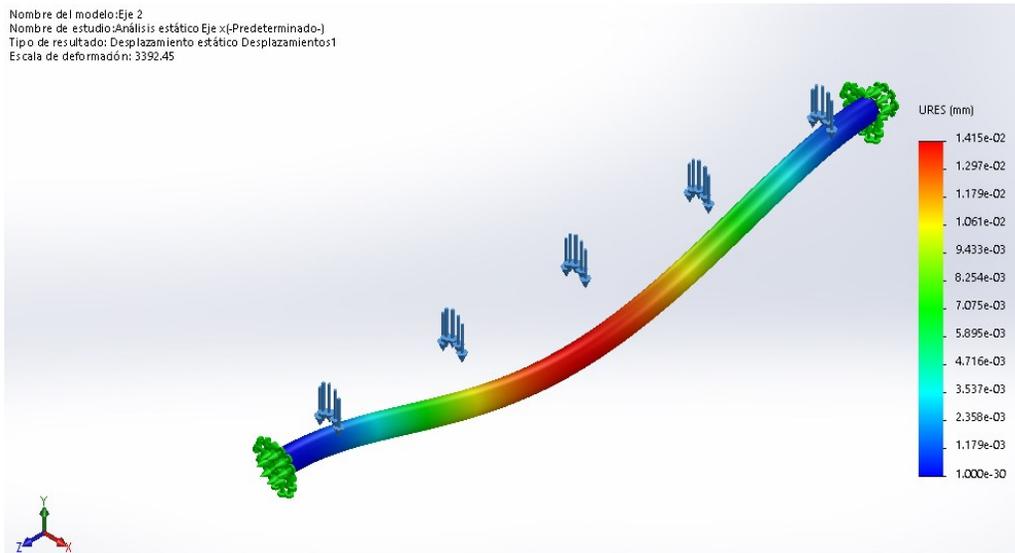


Figura 4-10: Resultado de análisis de desplazamiento estático en el eje X

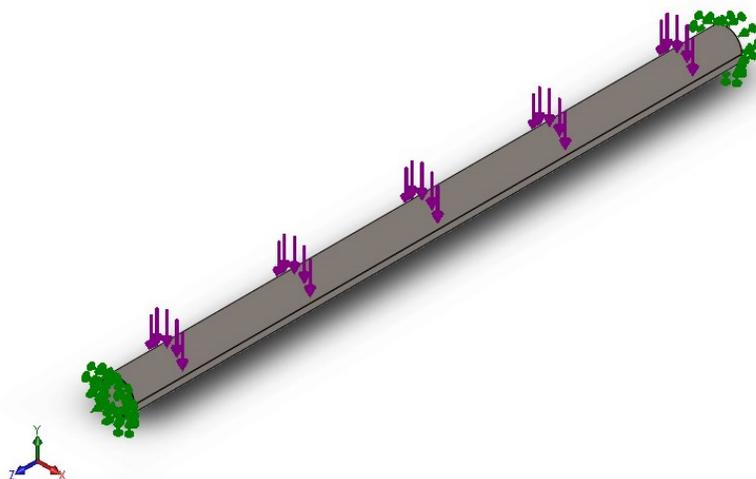


▪ **Eje Z apoyo en los extremos**

Preprocesamiento:

El tipo de material que se le aplicó a la guía lineal del eje x al igual que las guías lineales de los otros dos ejes fue de acero inoxidable, una carga repartida en sus dos guías lineales y el husillo de bola de 19 N, una restricción a los extremos de la guía lineal y un tipo de mallado tetraédrico según el tipo de estructura.

Figura 4-11: Cargas y restricciones sobre la guía lineal del eje z



Post procesamiento:

Luego de solucionar las ecuaciones arrojadas por la división de los elementos de la estructura en el software se determinó la máxima tensión nodal en el medio de la guía lineal dónde se obtuvo un valor de $5,465 \times 10^5 Pa$ y a lo largo de la barra un valor de aproximadamente $9,221 \times 10^4 Pa$, por lo tanto está muy lejos del límite elástico soportado por el material que es de $170 MPa$ lo que indica que va a soportar las cargas aplicada sobre este eje.

Según el análisis de desplazamiento estático realizado por el software arrojó un resultado de desplazamiento máximo de $2,103 \times 10^{-3} mm$ y a lo largo de la barra lineal tiene un desplazamiento el cual va disminuyendo a medida que se acerca a los soportes de los extremos.

Figura 4-12: Resultado de análisis de Von Mises tensión nodal en el eje Z

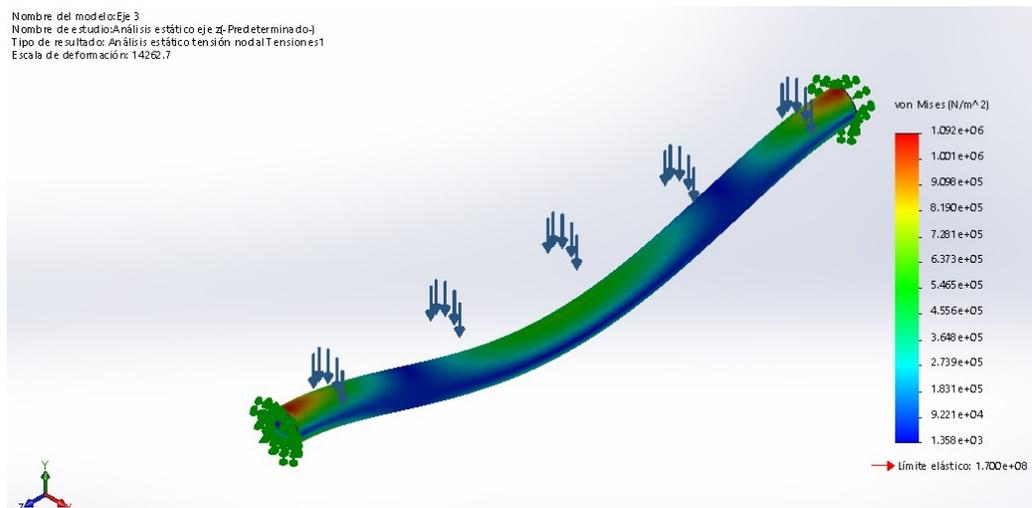
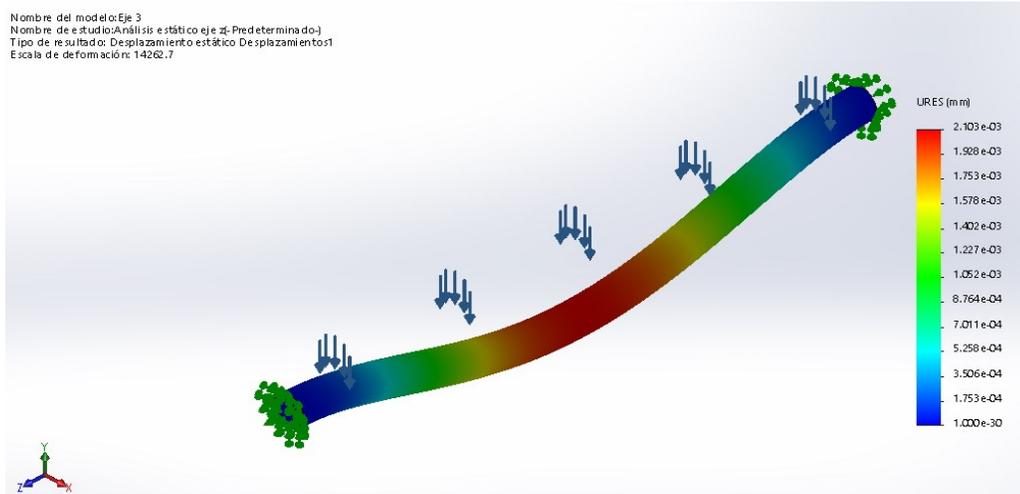


Figura 4-13: Resultado de análisis de desplazamiento estático en el eje Z

4.1.2 Análisis base de la máquina

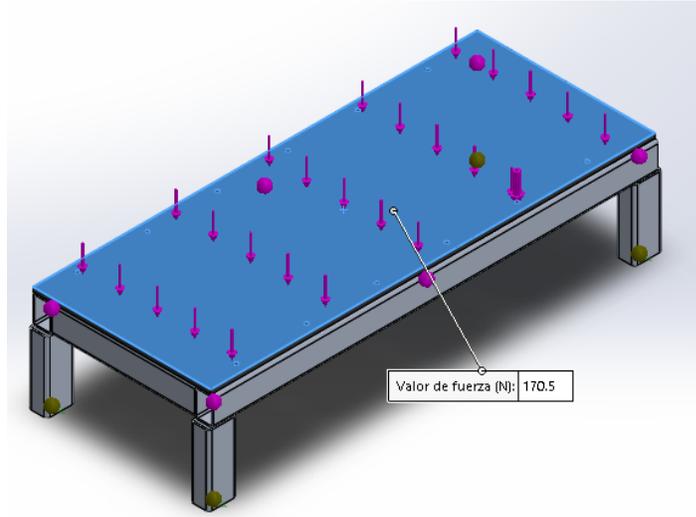
Preprocesamiento

Tipo de material: El material que se le aplico haciendo uso del Software a la base de la máquina se encuentra conformada por una estructura de perfil de aluminio y una lámina de sacrificio, en este ejercicio se hace uso de la placa para hacer una correcta distribución de las fuerzas que caen sobre la base.

Restricciones: Se aplicaron restricciones en la parte inferior de las patas, ya que la base de la máquina va a estar sujeta al piso.

Cargas: Se le aplicó una fuerza de 170,5 N que equivale al peso total que soporta esta base, siendo este el valor del peso que se emplea en cada uno de los ejes sobre los que trabaja la máquina y esta va a estar repartida entre las dos guías lineales ubicadas a los laterales del eje Y.

Figura 4-14: Fuerzas aplicadas sobre la base de la máquina



Post procesamiento

Luego de solucionar las ecuaciones arrojadas por la división de los elementos de la estructura en el software se determinó la máxima tensión nodal distribuida sobre toda el cuerpo de la base del sistema donde se obtuvo un valor de $3,745 \times 10^5 \text{ Pa}$ y una tensión mínima sobre la base con un valor de aproximadamente $2,098 \times 10^3 \text{ Pa}$, por lo tanto está muy lejos del límite elástico soportado por el material que es de 170 MPa lo que indica que va a soportar las cargas aplicada sobre este eje, la placa de sacrificio presenta este tipo de deformación por el tipo de materia que se está simulando y adicional la fuerza aplicada se encuentra sobre este.

Según el análisis de desplazamiento estático realizado por el software arrojó un resultado de desplazamiento máximo de $1 \times 10^{-30} \text{ mm}$ y a lo largo de la base de la máquina tiene un desplazamiento el cual va disminuyendo a medida que se acerca a los soportes de los extremos, el desplazamiento sobre la placa de sacrificio que se muestra está definido por el tipo de material que se usa.

Figura 4-15: Resultado de análisis de Von Mises tensión nodal en la base de la maquina

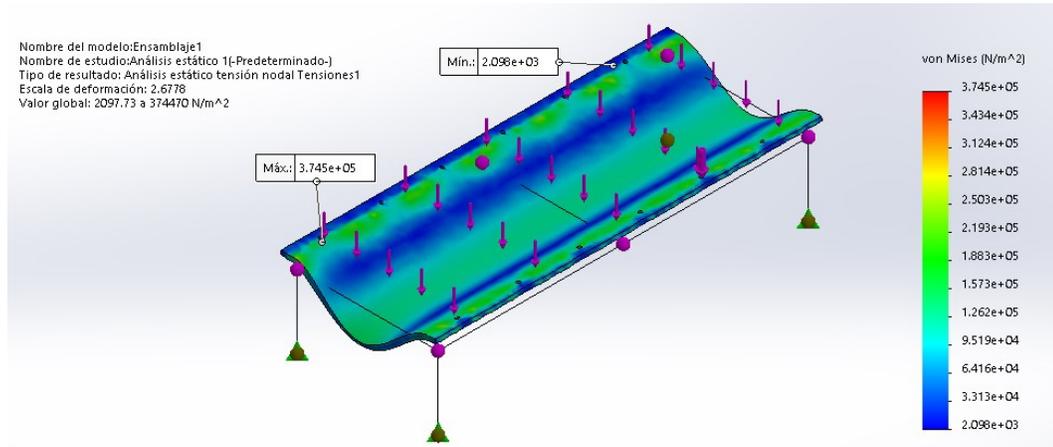
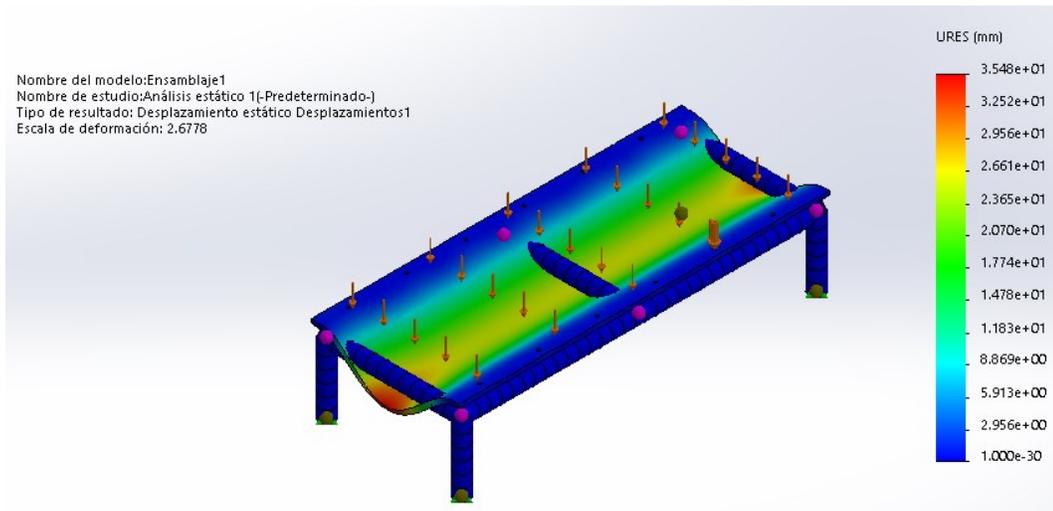


Figura 4-16: Resultado de análisis de desplazamiento estático en la base de la maquina



4.1.3 Análisis de la herramienta de corte

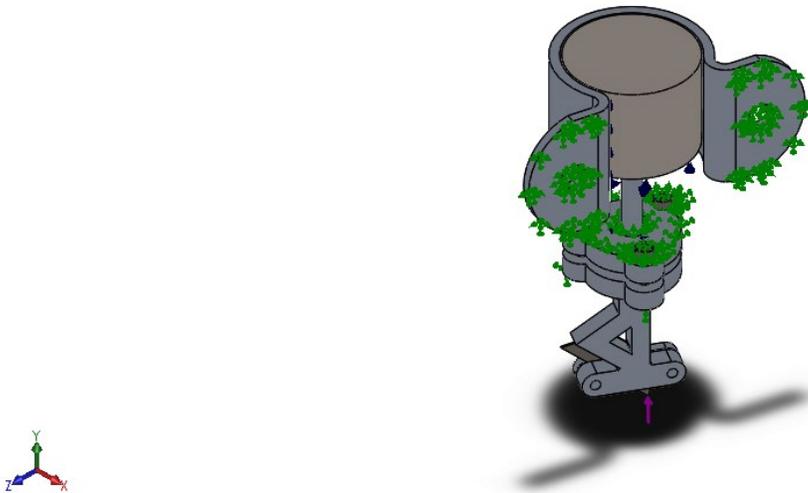
Preprocesamiento:

Tipo de material: Para la herramienta de corte se aplicó un material de aleación de aluminio para la estructura, y para la cuchilla de acero normalizado, donde el límite elástico de estos materiales es de $2,78 \times 10^7 \text{ N/mm}^2$ y $7,1 \times 10^8 \text{ N/mm}^2$ respectivamente.

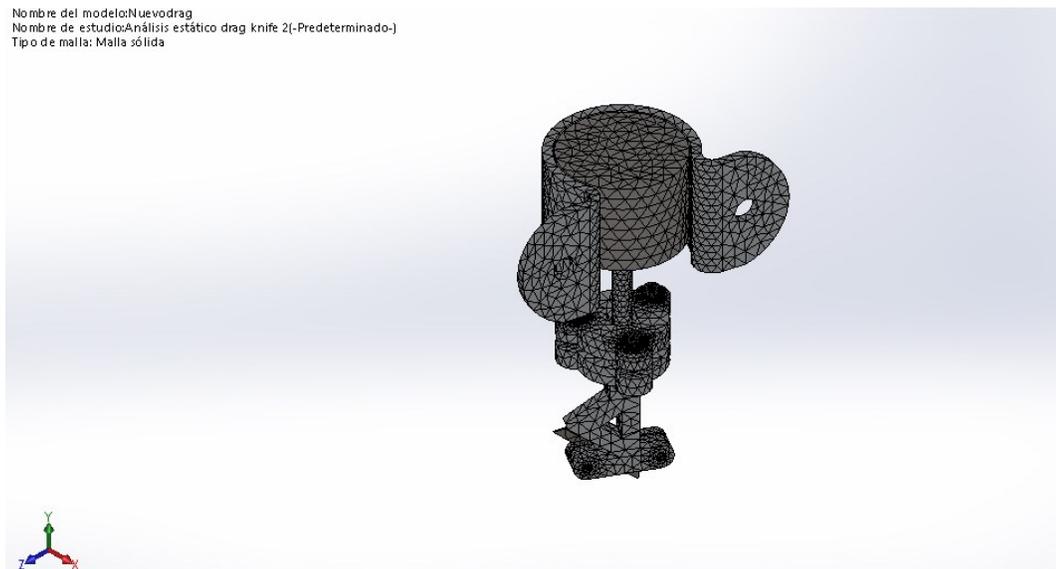
Restricciones: Se le aplicaron restricciones principalmente en los pernos de la abrazadera para tener una sujeción mientras se le aplicó la fuerza a la cuchilla, además se le aplicó otra restricción en las piezas de la mitad de la herramienta ya que estas tienen un movimiento debido a los rodamientos que hacen que giren, como es un análisis estático, se tuvo que limitar este movimiento, ya que en este estudio lo importante fue los esfuerzos generados en la cuchilla con el corte.

Cargas: El correcto funcionamiento de la máquina CNC depende en gran magnitud de la herramienta de corte, en especial de los esfuerzos generados en la cuchilla al entrar en contacto con la tela, por esta razón el análisis que se realizó fue aplicando una carga de 20 N (fuerza de resistencia de las 5 capas de tela sobrepuestas) directamente sobre la punta inferior de la cuchilla (véase en la Figura 4-17).

Figura 4-17: Cargas y restricciones herramienta de corte (Drag Knife)

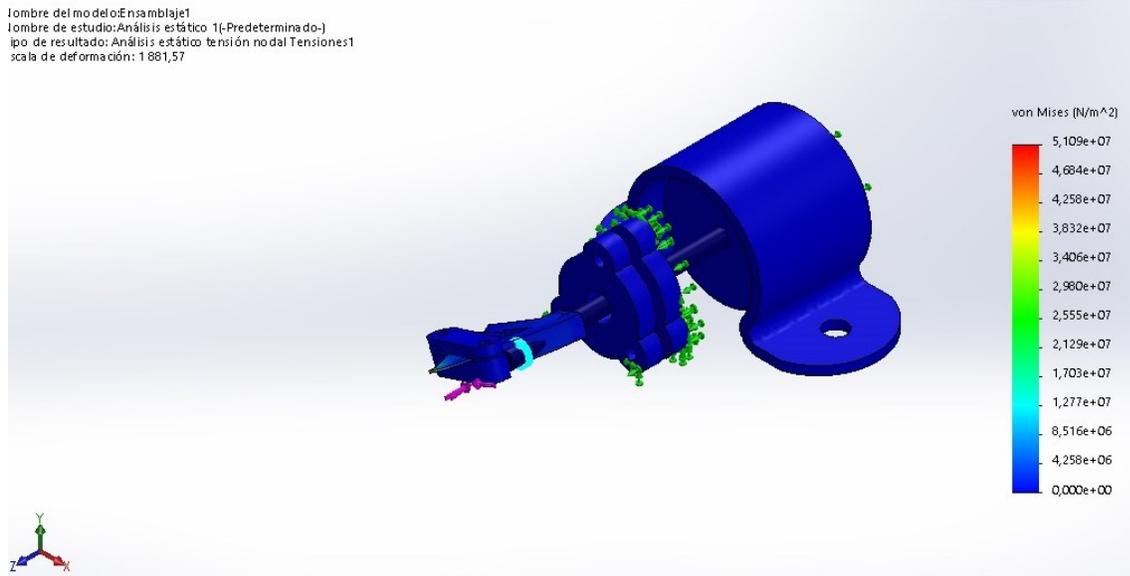
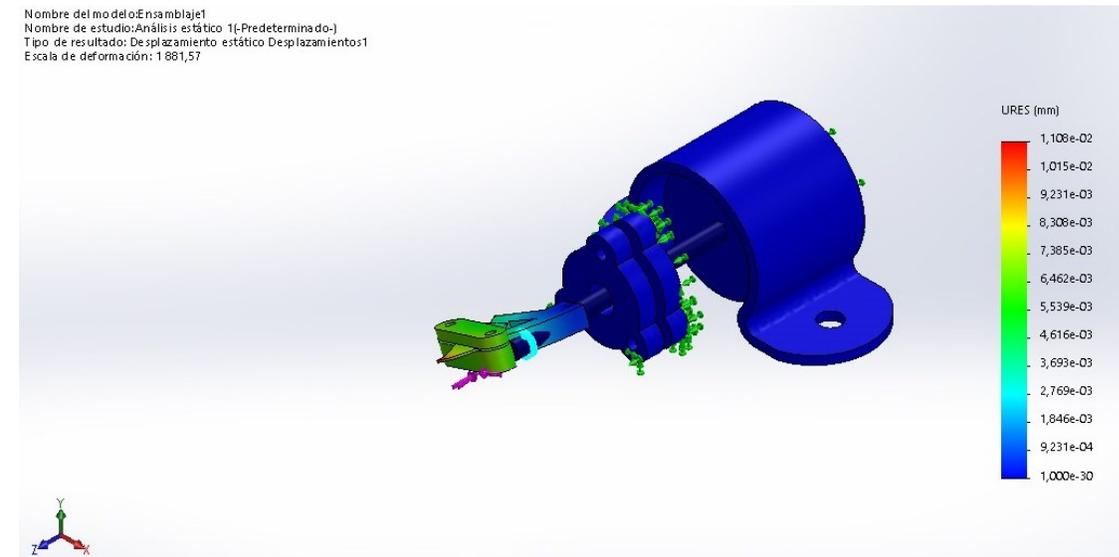


Tipo de mallado: Para realizar un mallado correcto fue necesario dimensionar con el asesor de conexiones, teniendo como base que las conexiones entre conjuntos por defecto no eran las adecuadas para este análisis, por lo tanto, se crearon unas conexiones especiales en los pernos que tiene la pieza y en los rodamientos, ya que para realizar el mallado debe dimensionarse correctamente estos parámetros. Luego la malla que se creó por defecto fue de tipo tetraédrico (véase en la Figura 4-18), pero se tuvo que ajustar con una dimensión fina, para que ninguna pieza quedará excluida del mallado.

Figura 4-18: Mallado de herramienta de corte Drag Knife**Post procesamiento:**

Solucionando las ecuaciones arrojadas por la división de los elementos de la estructura en el software, se determinó la máxima tensión nodal que fue de 34 Mpa que se obtuvo en la punta que entra en contacto directo con la tela, y el resto de la estructura tiene una tensión muy cercana a 0.

Según el análisis de desplazamiento estático (véase en la Figura 4-20) realizado por el software el cual arrojó un resultado de desplazamiento máximo de $1,015 \times 10^{-2} \text{ mm}$ y a medida que se va alejando de la cuchilla, el desplazamiento va disminuyendo; además se pudo observar que este tipo de cuchilla soporta fácilmente la fuerza de resistencia que tiene las 5 capas de tela al contacto con la cuchilla, ya que esta no presentó deformaciones considerables que puedan afectar el corte, y que el límite elástico está muy lejos de la tensión máxima que presenta; se determinó que es adecuado utilizar esta herramienta de corte para la máquina CNC, también teniendo en cuenta aspectos tratados anteriormente, donde se dijo que esta herramienta de corte proporciona mayor accesibilidad a espacios reducidos, y curvaturas finas.

Figura 4-19: Resultado de Análisis de Von Mises para herramienta de corte**Figura 4-20:** Resultado De análisis de desplazamiento estático herramienta de corte

4.2 Resultados

4.2.1 Comparación tiempo de corte

Se realizaron pruebas de corte midiendo el tiempo que se demoró la máquina de corte manual en cortar los diferentes moldes y luego se realizó la prueba con el software Mach3 con los mismos moldes (véase en la Tabla 4-1), donde este programa arroja el tiempo estimado que se va a demorar en cortar el molde, con respecto a la cantidad de bloques que tenga el código procesado por Estlcam. Se puede observar que el tiempo de diferencia entre los cortes manual y automatizado este alrededor de unos 35 segundos y teniendo en cuenta que con la máquina CNC el operario ya no va a esforzarse tanto en el proceso de corte.

Tabla 4-1: Comparación de tiempos de corte

Molde	Tiempo de corte manual (minutos)	Tiempo de corte automatizado (minutos)
Delantero	02:56	02:05
Espalda	04:14	03:15
Manga	03:58	03:09
Pretina	03:02	02:27
Puño	01:30	01:01
Cuello	02:37	02:05
Tapa cremallera	02:58	02:27

4.2.2 Productividad

Para determinar en cuanto se vio aumentada la productividad con la automatización del proceso de corte se determinó cuantas piezas es posible cortar en una hora para los dos casos y además el aumento de la productividad en una jornada laboral de 6 horas (véase en la Tabla 4-2), considerando que en cada corte hay 5 capas de tela superpuestas, por ejemplo en el caso del molde delantero se realizaron 20 cortes en una hora, donde por cada corte salieron 5 piezas, por lo tanto en 1 hora se obtendrían 102 piezas de delanteros y en 6 horas 612 piezas cortando con la máquina manual, mientras que con la máquina automatizada fue posible realizar 28 cortes en una hora, donde por cada corte salieron 5 piezas, por lo tanto en 1 hora se obtuvieron 144 piezas y en 6 horas 864 piezas.

Tabla 4-2: Comparación de piezas cortadas en una hora

Molde	Cantidad de piezas de corte manual En 1 hora	Cantidad de piezas de corte manual En 6 horas	Cantidad de piezas de corte automatizado en 1 hora	Cantidad de piezas de corte manual En 6 horas
Delantero	102	612	144	864
Espalda	70	420	92	552
Manga	75	450	95	570
Pretina	98	588	122	732
Puño	200	1200	295	1770
Cuello	114	684	144	864
Tapa cremallera	101	606	122	732

El aumento de la productividad en un día con un trabajo de operación de 6 horas se determinó comparando la cantidad de piezas que se cortan con los dos tipos de máquinas obteniendo un aumento de producción promedio del 31,2%, (véase en la Tabla 4-3).

Tabla 4-3: Aumento de producción en un día

Molde	Aumento en la producción (%)
Delantero	41,2
Espalda	31,4
Manga	26,7
Pretina	24,5
Puño	47,5
Cuello	26,3
Tapa cremallera	20,8

4.2.3 Consumo energético

La máquina de corte manual según sus especificaciones eléctricas tiene un consumo energético de 250 W por hora, mientras que la máquina de corte manual tiene una potencia de 175,6 W, se calculó con base en la corriente y voltaje de operación máximo al que va a trabajar cada uno de los componentes eléctricos y electrónicos que aportan al funcionamiento de la máquina CNC como se observa en la Tabla 4-4. La potencia de una máquina puede calcularse con la suma de las potencias de cada uno de sus componentes, donde la potencia es directamente proporcional al voltaje por la corriente, como se muestra en la ecuación (4-1).

$$P = V * I \quad (4-1)$$

Tabla 4-4: Características eléctricas de componentes de la máquina

Componente	Cantidad	Voltaje(V)	Corriente(A)	Potencia(W)
Motor paso a paso	3	12	1,3	46,8
Placa mach 3	1	5	2	10
Driver	3	12	1,3	46,8
Pulsador	2	12	1,5	72
Potencia total:				175,6 W/h

El consumo energético consumido por la máquina manual en un día de trabajo es de 1500 W, mientras que con la máquina automatizada se determinó una potencia de 1053,6 W, por lo tanto, según estas cifras se puede decir que el consumo energético podría disminuir alrededor de un 29,76 %.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Con los lineamientos planteados para el desarrollo de este proyecto se hizo un estudio sobre la actividad de corte que aplican actualmente en la empresa, se observó que tipo de herramientas manuales están usando los operarios de la compañía; la herramienta manual que se usa es una máquina con un disco giratorio que permite realizar cortes de manera lineal, es con este método de corte empleado se hizo un análisis del consumo de material y tiempo que requiere para ejecutar cada pieza. Se procede a estudiar el proceso de elaboración de un patrón que presente perfiles curvos tangentes a una recta, es de este modo que también se observa el tiempo que se requiere para este proceso. La herramienta manual por sus características de diseño original limita la funcionalidad de ejecutar corte de manera ágil, esto se presenta por la geometría que presenta el consumible de corte de esta herramienta. Es por este tipo de conclusiones que se llega al uso de un sistema de tracción, el cual cumple con la función de seguir lineamientos de los patrones suministrados por el Software a implementar; el cual se conoce como Drag Knife de manera comercial, este sistema de tracción permite hacer uso de un consumible más económico de acuerdo con las recomendaciones de construcción que hace la compañía.

El proceso de realizar el diseño con los parámetros y medidas que maneja la empresa permitió realizar varios tipos de actividades para poder cumplir con las expectativas propuestas. Las piezas principales del diseño de este Hardware fueron seleccionadas teniendo en cuenta la durabilidad y el uso que va a tener esta máquina, es de este modo que se hace el análisis de un husillo de bola que permita tener este periodo y cumpla con los requerimientos de este sistema; el tiempo estimado de vida útil que se plantea para esta máquina es de unos 15 años a un uso diario laboral normal de la compañía; este elemento fundamental del mecanismo planteado, para tener una mayor eficiencia no hay necesidad de sobre exigirlo, obteniendo una eficiencia de trabajo superior o igual al 90% y

trabajando a una velocidad de giro de 469 RPM. Para diseñar este proyecto se analizaron varios tipos de motores que pudieran cumplir con los requerimientos de la máquina y los parámetros brindados, ya que este elemento es una pieza fundamental para el adecuado funcionamiento de la máquina, sin un correcto análisis para la elección de estos motores se corre el riesgo de que la máquina no se mueva o el torque que emite este motor provoque daños en el mecanismo del montaje, otro factor que se debe tener presente es la corriente máxima permitida según las especificaciones del motor elegido. Para el correcto funcionamiento de este motor seleccionado se acopla respectivamente un Driver para regular los pasos que se requieren para cada uno de estos, esto permite regular el movimiento de una forma suave en cada uno de los ejes y permite que el movimiento de la máquina sea más suave y controlado.

Con el diseño del prototipo elaborado en el software Solidworks, fue posible observar el comportamiento de las estructuras que conforman cada uno de los ejes sobre los cuales la máquina estará trabajando; es de este modo que se puede apreciar que las cargas que se encuentran en el eje Y; el encargado de soportar el peso de los otros dos ejes presenta una tensión máxima de $2,897 \text{ kPa}$ esta tensión es baja en comparación a los dos otros ejes, siendo esto posible ya que se diseñó con un apoyo de soporte continuo. El sistema tiene un desplazamiento en el eje X, sobre el cual se encuentran soportadas las fuerzas de tensión generadas por la fuerza que emite el sistema en reposo, en este eje de trabajo el sistema está presentando a una tensión máxima de $260,6 \text{ kPa}$, es aquí donde se encuentra la tensión que genera el eje Z, al cual se acopla al sistema de tracción de corte. El eje Z soporta una tensión mayor, dado al tipo de esfuerzo que se genera por cada uno de los elementos que lo conforman; especialmente por el sistema de tracciones que genera una fuerza opuesta en su puesta en marcha, es de este modo que la tensión máxima que se encuentra aquí tiene un valor de $546,5 \text{ kPa}$, estos valores de tensión máxima estimada sobre cada uno de los ejes que se usan para este sistema no exceden el límite elástico del material que se usa para este proyecto, donde se encuentran perfiles de aluminio y guías lineales de acero inoxidable, el cual tiene un valor de 170 MPa . De modo que el diseño soporta las tensiones de cada uno de los elementos.

Con el objetivo de mejorar el rendimiento de la microempresa y la seguridad de los operarios, se observó que al automatizar y aplicar otro sistema de corte es posible lograr este propósito planteado, mejorando el consumo y rendimiento que se tiene en la

producción. Para el rendimiento se hace un análisis del tiempo que tarda la persona encargada de manipular la máquina de corte manual con unos patrones, sobre los cuales se tiene presente el grado de dificultad de corte (Curvaturas y espacios reducidos), donde se puede observar que el tiempo que toma en ejecutar este proceso es de aproximadamente 3 minutos por pieza contando el tiempo que el operario tarda en acomodar la tela. La siguiente toma de tiempos se hace a través del software Mach3, donde los datos del tiempo de operación son adquiridos directamente por medio del software mach3 y da a conocer la duración que realiza en el mismo patrón de corte, siendo posible identificar que tarda en cada corte un tiempo promedio de 2,5 minutos. Con la información recopilada se puede afirmar que el corte manual llega a una producción de 20 piezas por horas de manera continua, mientras con la automatización de esta actividad se puede esperar un incremento en la producción del 31,2%.

5.2 Recomendaciones

Cuando el motor paso a paso actúa con sobrecargas puede llegar a perder precisión en cada paso esto debido a que su funcionamiento se realiza en bucle abierto, por lo tanto, en trabajos futuros se recomienda para máquinas industriales trabajar con servomotores, ya que permiten una realimentación otorgando un control en lazo cerrado de las variables, garantizando una mayor precisión y control de la máquina.

Este proyecto requiere un procesamiento de los patrones que usa la compañía para así implementarlos en la creación de sus diseños, por lo que en la selección de Software se menciona inicialmente LazyCam; que permite el procesamiento de estos en código G, este programa no presentó una buena discretización de las imágenes, por lo tanto, se realizó la búsqueda de un nuevo preprocesador de código para cumplir con los objetivos del proyecto. Es aquí donde se plantea el uso de Estlcam, este programa cuenta con una mejor discretización, ya que permite tener una mayor resolución de los moldes que implementa la compañía. De este modo de acuerdo con la aplicación de la máquina, se debe realizar una buena selección de programa, observando que cumpla con necesidades de corte y brinde una buena resolución de las imágenes para que permita procesarlas correctamente a código G.

Para trabajos futuros donde se implemente la máquina CNC se recomienda precalentar el husillo antes de empezar a trabajar la máquina por primera vez en su proceso de corte, e

ir aumentando las revoluciones por minuto poco a poco para garantizar la vida útil de la máquina, en especial del husillo y los rodamientos.

Para este tipo prototipos, es fácil presentar mejoras en pro de la seguridad del operario, por lo que para un próximo diseño se propone implementar una barrera de seguridad, que encierre la máquina por todos sus laterales y adicionar una puerta de ingreso que permite acceder a los cortes realizados. También teniendo en cuenta el diseño implementado es posible crear un eje adicional el cual se encargaría de hacer un suministro de la tela de manera continua acoplado a un royo de tela y de este modo hacer más autónomo el trabajo.

A. Anexo: Lista de códigos G

Comando	Función
G00	Posicionamiento rápido
G01	Interpolación lineal
G02	Interpolación circular/ helicoidal en sentido horario
G03	Interpolación circular/ helicoidal en sentido antihorario
G04	Fijar o mantener algún eje inmóvil
G10	Configuración del origen de sistema de coordenadas
G12	Bolsillo circular en sentido horario
G13	Bolsillo circular en sentido antihorario
G15/ G16	Las coordenadas polares se mueven en G00 y G01
G17	Selección del plano XY
G18	Selección del plano XZ
G19	Selección del plano YZ
G20	Unidad de pulgada/ milímetro
G28	Regreso a casa u origen
G28.1	Ejes de referencia
G30	Regreso a origen
G31	Exploración recta
G40	Cancelar compensación del radio de la cortadora
G41/G42	Comienzo de la compensación del radio de la cortadora izquierda / derecha
G43	Aplicar compensación de longitud de herramienta
G49	Cancelar corrección de longitud de herramienta
G50	Restablecer todos los factores de escala a 1.0
G51	Establecer factores de escala de entrada de datos del eje
G52	Desplazamientos temporales del sistema de coordenadas
G53	Mover en sistema de coordenadas de máquina absoluto
G54	Usar desplazamiento de dispositivo 1
G55	Usar desplazamiento de dispositivo 2
G56/G58	Usar desplazamiento de dispositivo 3, 4, 5
G59	Usar desplazamiento de accesorio 6 / usar número de accesorio general
G61/G64	Modo de parada exacta/ velocidad constante
G68/G69	Rotación del sistema de coordenadas
G70/G71	Unidad de pulgada/ milímetro

G73	Ciclo fijo/ perforación continua
G80	Cancelar el modo de movimiento
G81	Ciclo fijo / taladrado
G82	Ciclo fijo / taladrado con parada
G83	Ciclo fijo / taladrado con por picoteo
G85/G86/G88/G89	Ciclo fijo / pesado
G90	Modo de distancia absoluta
G90.1	Modo de distancia absoluto IJK
G91	Modo de distancia incremental
G91.1	Modo de distancia incremental IJK
G92	Desplazar coordenadas y configurar parámetros
G92.x	Cancelar G92
G93	Modo de alimentación en tiempo inverso
G94	Unidades por minuto
G98	Retorno de nivel del punto Z después de ciclos fijos
G99	Retorno del nivel del punto R después de ciclos fijos

B. Anexo: Lista de códigos M

Comando	Función
M00	Parada del programa
M01	Parada opcional del programa
M02	Finalizar el programa
M03/M04	Rotación del husillo horario/ antihorario
M05	Detener la rotación del husillo
M06	Cambio de herramienta
M07	Encender refrigerante empañado
M08	Encendido de refrigerante inundado
M09	Apagar todos los refrigerantes
M30	Fin del programa y devanado
M47	Repetir el programa desde la primera línea
M48	Habilitar anulación de velocidad y avance
M49	deshabilitar anulación de velocidad y avance
M98	Llamar subrutina
M99	Volver de la subrutina/ repetir

C. Anexo: Configuración System HotKeys

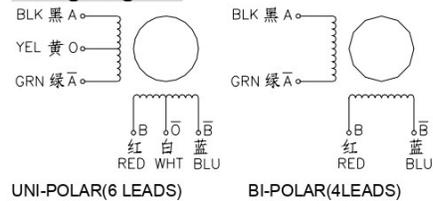
OEM Button	Jog Together X & A –	353
OEM Button	Jog Together Y & B ++	354
OEM Button	Jog Together Y & B –	355
OEM Button	Start	1000
OEM Button	Pause Feed Hold	1001
OEM Button	G-Code Rewind	1002
OEM Button	Stop	1003
OEM Button	Single Block	1004
OEM Button	Resume	1005
OEM Button	Teach File Edit	1006
OEM Button	Work Zero All	1007
OEM Button	Work X Zero	1008
OEM Button	Work Y Zero	1009
OEM Button	Work Z Zero	1010
OEM Button	Work A Zero	1011
OEM Button	Work B Zero	1012
OEM Button	Work C Zero	1013
OEM Button	Feed Rate Override Cancel	1014
OEM Button	Estimate Job	1015
OEM Button	Run From Here	1016
OEM Button	Work Go To Zeros	1017
OEM Button	Multi-function DROs System	1018
OEM Button	Verify	1020
OEM Button	Reset	1021
OEM Button	Home/Reference X	1022
OEM Button	Home/Reference Y	1023
OEM Button	Home/Reference Z	1024
OEM Button	Home/Reference A	1025
OEM Button	Home/Reference B	1026
OEM Button	Home/Reference C	1027
OEM Button	Joystick Off/On Toggle	1028
OEM Button	Soft limits On/Off Toggle	1029
OEM Button	Unknown	1030
OEM Button	Jog Push to Jog Until stopped	1031

D. Anexo: Hoja de especificación Motor Nema 17-HS3401

2 Phase Hybrid Stepper Motor 17HS series-Size 42mm(1.8 degree)



Wiring Diagram:

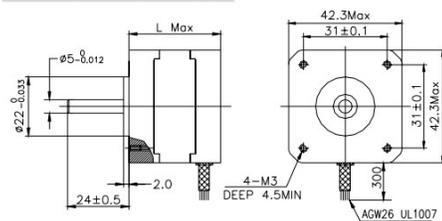


Electrical Specifications:

Series Model	Step Angle (deg)	Motor Length (mm)	Rated Current (A)	Phase Resistance (ohm)	Phase Inductance (mH)	Holding Torque (N.cm Min)	Detent Torque (N.cm Max)	Rotor Inertia (g.cm ²)	Lead Wire (No.)	Motor Weight (g)
17HS2408	1.8	28	0.6	8	10	12	1.6	34	4	150
17HS3401	1.8	34	1.3	2.4	2.8	28	1.6	34	4	220
17HS3410	1.8	34	1.7	1.2	1.8	28	1.6	34	4	220
17HS3430	1.8	34	0.4	30	35	28	1.6	34	4	220
17HS3630	1.8	34	0.4	30	18	21	1.6	34	6	220
17HS3616	1.8	34	0.16	75	40	14	1.6	34	6	220
17HS4401	1.8	40	1.7	1.5	2.8	40	2.2	54	4	280
17HS4402	1.8	40	1.3	2.5	5.0	40	2.2	54	4	280
17HS4602	1.8	40	1.2	3.2	2.8	28	2.2	54	6	280
17HS4630	1.8	40	0.4	30	28	28	2.2	54	6	280
17HS8401	1.8	48	1.7	1.8	3.2	52	2.6	68	4	350
17HS8402	1.8	48	1.3	3.2	5.5	52	2.6	68	4	350
17HS8403	1.8	48	2.3	1.2	1.6	46	2.6	68	4	350
17HS8630	1.8	48	0.4	30	38	34	2.6	68	6	350

*Note: We can manufacture products according to customer's requirements.

Dimensions: unit=mm



Motor Length:

Model	Length
17HS2XXX	28 mm
17HS3XXX	34 mm
16HS4XXX	40 mm
16HS8XXX	48 mm

E. Anexo: Hoja de especificación driver TB6000

i Hoja de especificaciones parte I



4.5Amps Bipolar Stepper Motor driver Based On TB6600

Bipolar stepper drive board described here has been designed around TB6600HG IC. The TB6600HG is PWM chopper type single chip bipolar sinusoidal micro-step stepping driver.

Features

- Based on Single chip
- Suitable for Nema17, Nema23, Nema34 bipolar stepper motors
- Suitable for 4Wires, 6 wires and 8 wires stepper motor.
- Forward and reverse rotations available
- Selectable Phase (Micro-step) drives 1/1, 1/2, 1/4, 1/8, and 1/16
- Maximum Input supply 42V DC Minimum Input supply 10V DC
- Output current 4.5Amps
- Output Fault Monitor LED indicator
- On Board Power LED indicator
- On Board step pulse input LED indicator
- Standby auto half current reduction circuitry onboard
- Built in Thermal shutdown (IC)
- Built in under voltage lock out (UVLO) circuit (IC)
- Built in over current detection (ISD) circuit (IC)
- Large capacitor to handle inrush current

Applications

- Robotics
- Large format Size Printers
- CNC
- Routers
- 3D Printers
- Machine Automations
- Camera Pan Tilt Heads
- Slot Machines
- Vending Machines

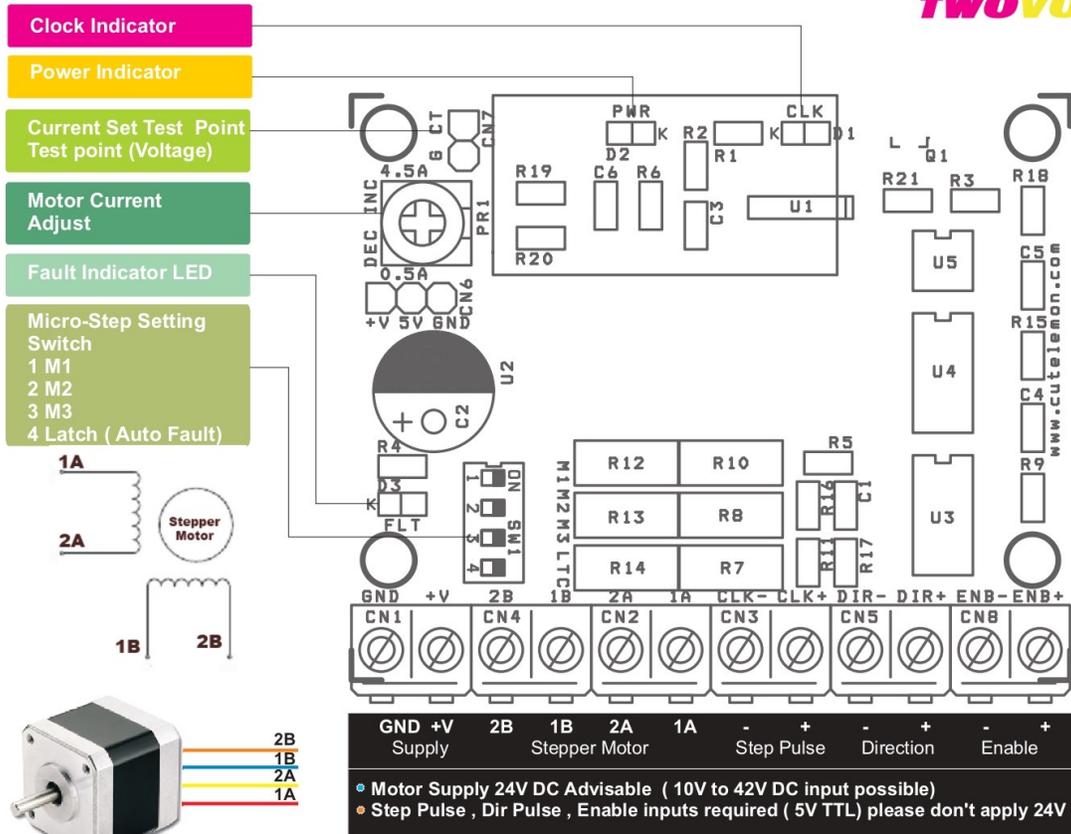
4 X DIP SWITCH SETTINGS

LATCH : ON=Automatic Return if Thermal Shutdown Or Over Current Detection,

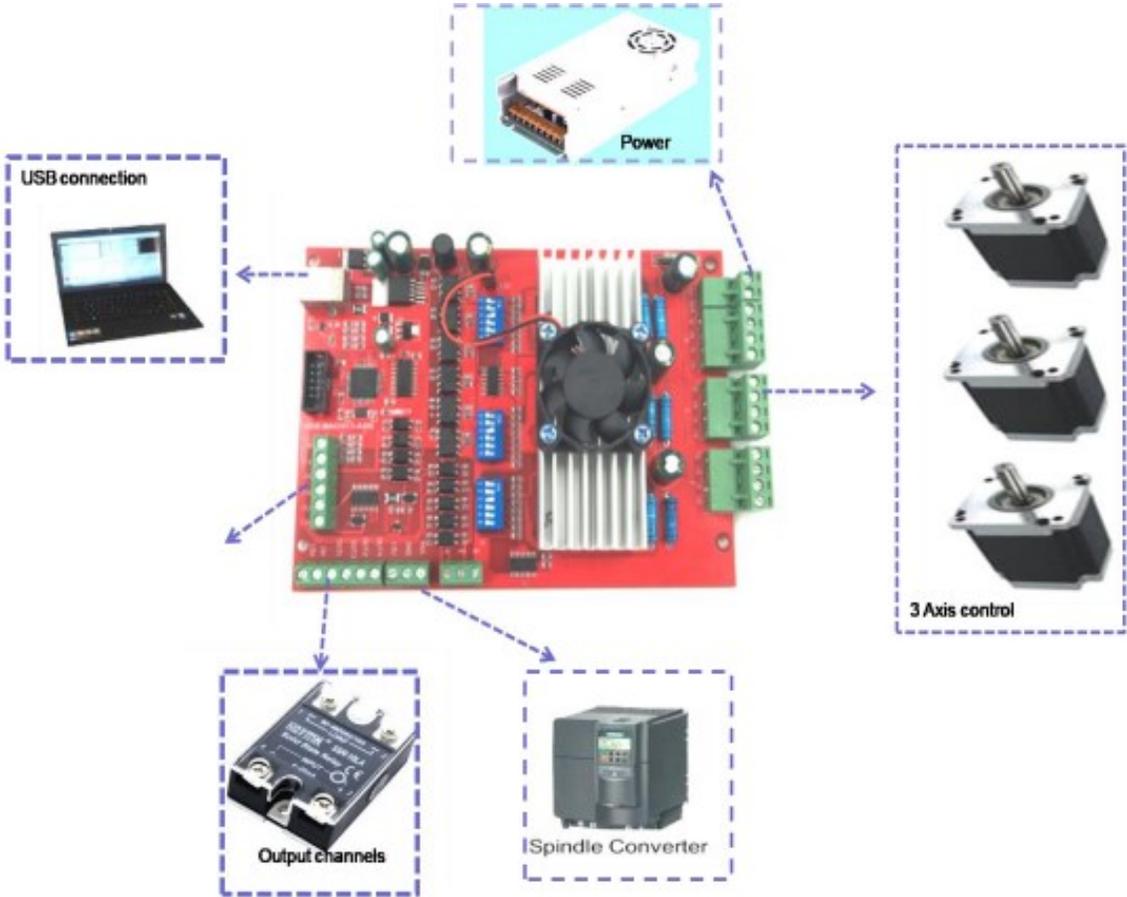
LATCH : OFF Its return to normal operation on power on

Micro-Stepping (Excitations Settings)			
M1	M2	M3	Operations
OFF	OFF	ON	Full step 1/1
OFF	ON	OFF	1/2A type (1-2 phase excitation A type) 0% - 71% - 100%
OFF	ON	ON	1/2B type (1-2 phase excitation B type) 0% - 100%
ON	OFF	OFF	1/4 Step
ON	OFF	ON	1/8Step
ON	ON	OFF	1/16Step
ON	ON	ON	Standby (Operation of the internal circuit almost turned off
OFF	OFF	OFF	Standby (Operation of the internal circuit almost turned off

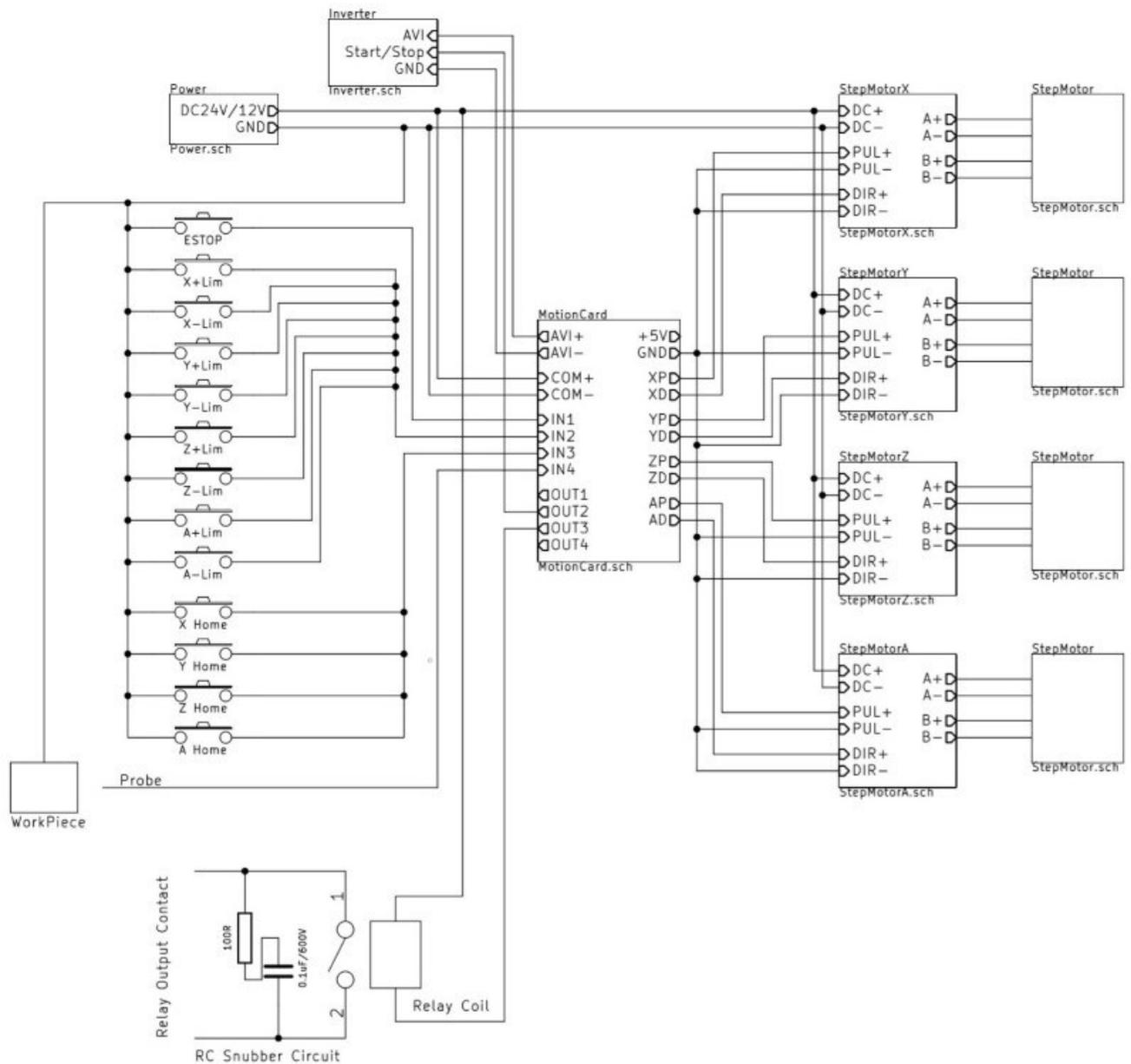
ii Hoja de especificaciones parte II



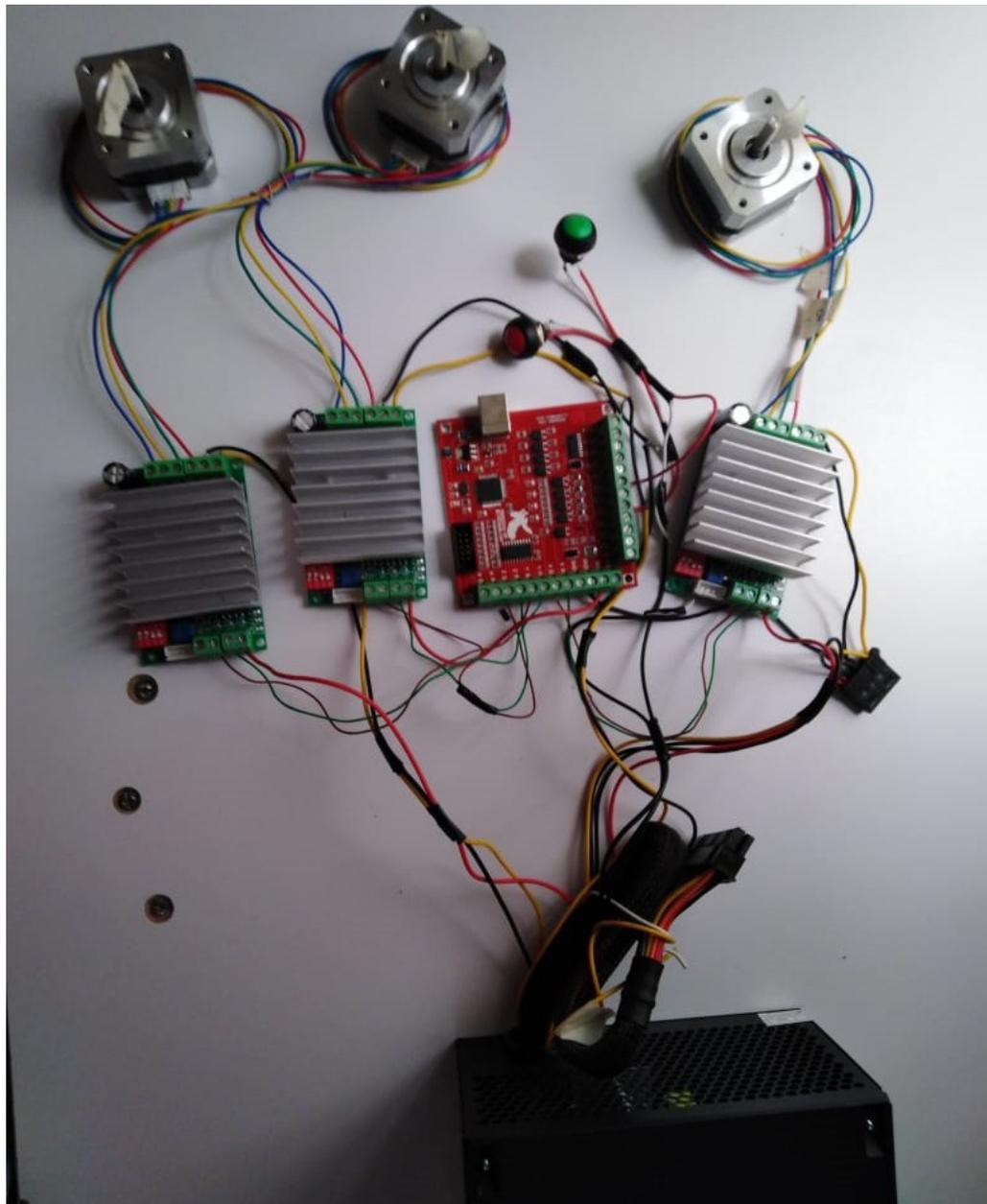
F. Anexo: Mach3 USB Motion Card



G. Anexo: Conexiones Placa Mach 3 USB Motion Card



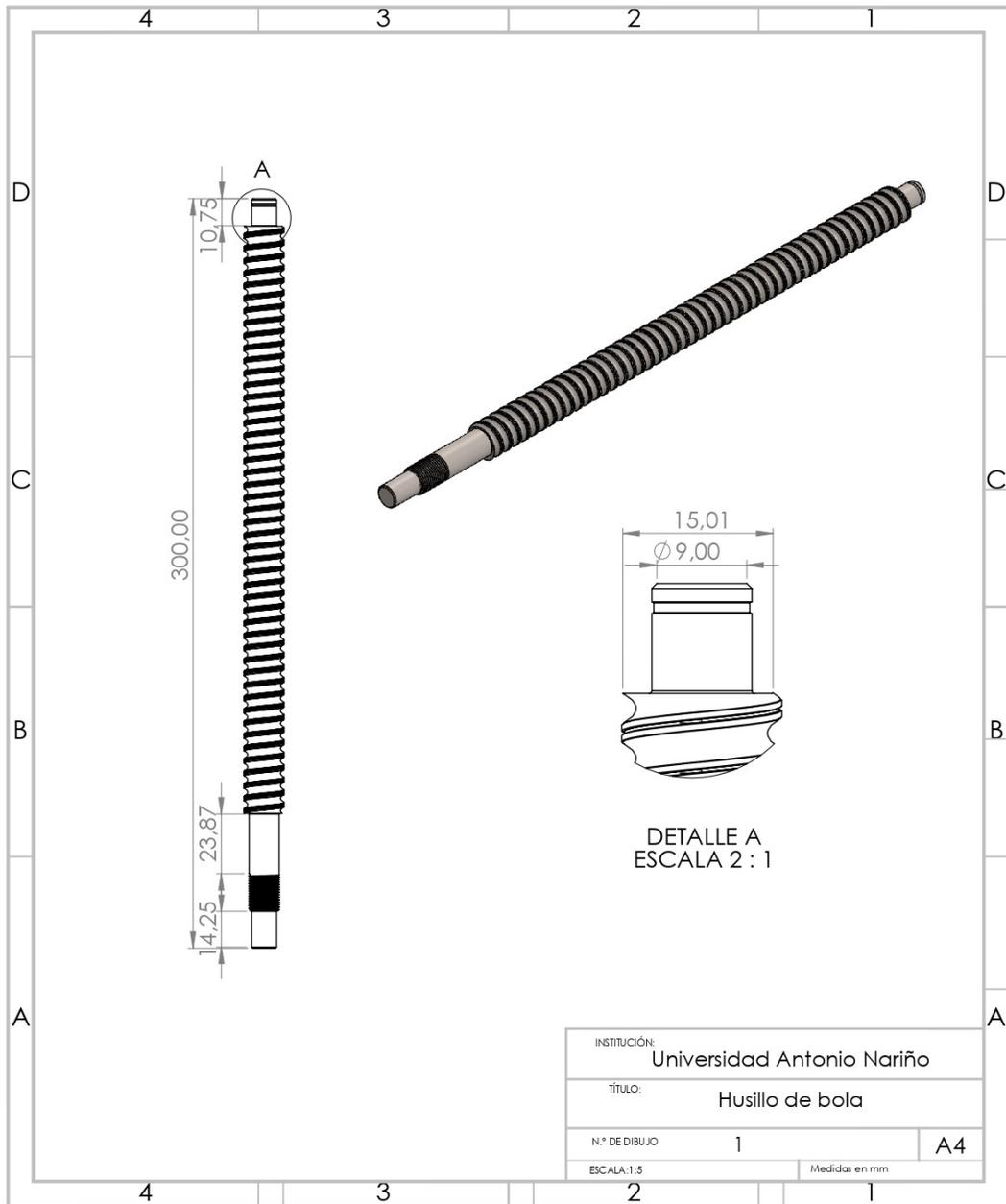
H. Anexo: Conexiones físicas placa



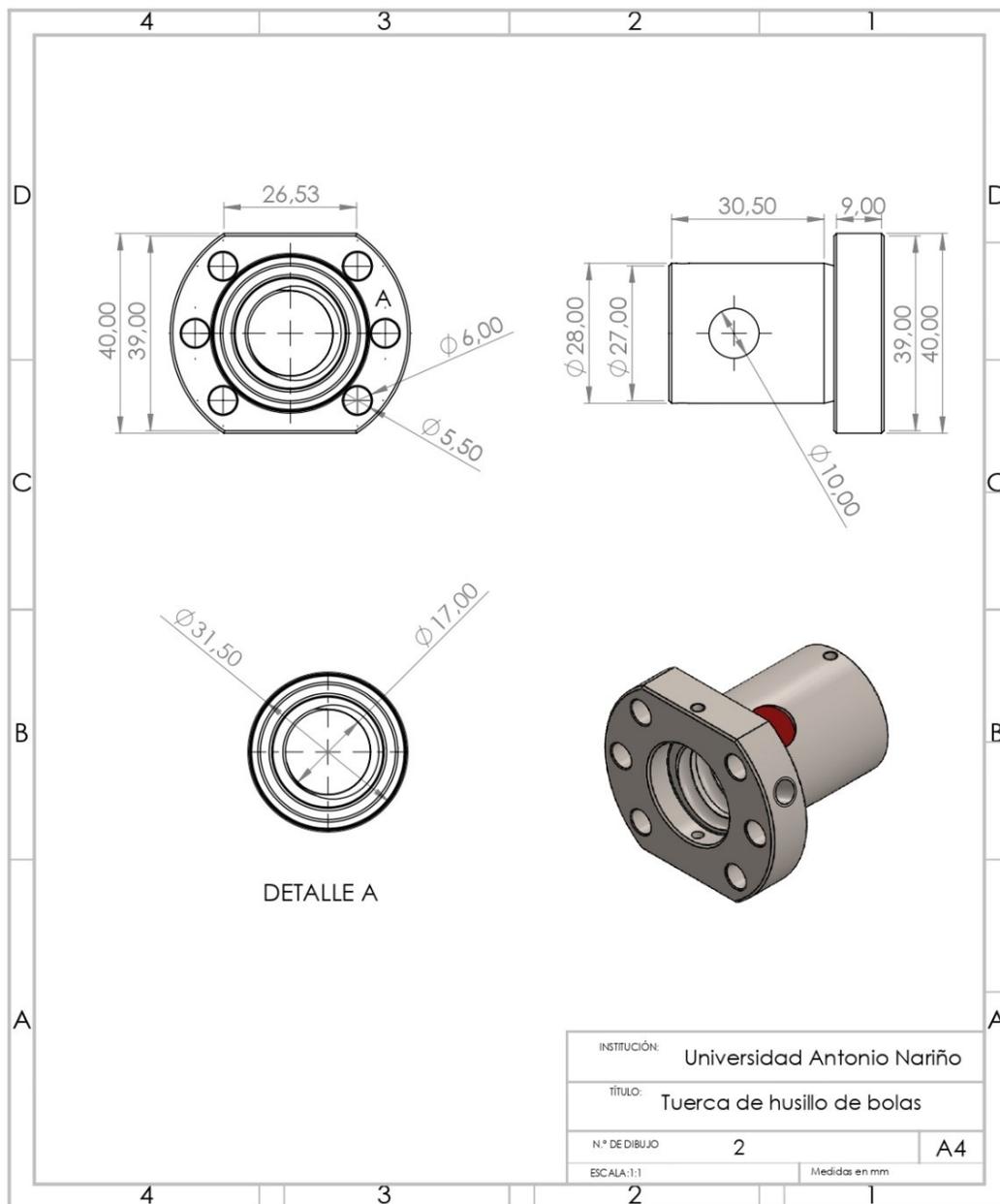
I. Anexo: Vista explosionada del ensamblaje de la máquina

N° DE ELEMENTO	N° DE PIEZA	CANTIDAD
1	Base	1
1.1	Perfil 40mmx30mm	1
1.2	Perfil 40mmx250mm	2
1.3	Guía sal 16-500	2
1.4	Perfil 40mmx150mm	4
1.5	Placa de sacrificios	1
1.6	Perfil 40mmx30mm 2	1
1.7	Soporte Nema 23	1
1.8	Soporte principal	1
1.9	Bancada 3 MIC1	2
1.10	Eje PRINCIPAL	2
1.11	Soporte principal 2	1
2	Eje X	1
2.1	Perfil 40mmx30mm	1
2.2	Soporte superior Left	1
2.3	Soporte superior Right	1
2.4	Eje 2	2
2.5	Guía SBR16U1	4
2.5.1	Kolyte SBR16U1	1
2.5.2	Touarimink D11 60UOP	1
2.5.3	Cilindro de rodamiento	2
2.5.4	Cilindro de rodamiento M4x2.5	1
2.5.5	Cilindro de rodamiento M6x6	1
2.6	Apoyacarrilera	1
2.7	Carrilera 1 MIC1	1
3	Cara eje X	1
3.1	Lamina caja union eje XT Z	1
3.2	Guía sc16uu_bearing	8
3.3	Nutholder Husillo	2
4	Cara eje Z	1
4.1	Lamina caja union eje XT Z	1
4.2	Parte inferior caja sistema corrie	1
4.3	Parte superior caja sistema corrie	1
4.4	Eje 3	2
5	Nema 23	1
6	nema 17	2
7	Husillo de Bolas SFU1605-3	3
7.1	1605-3	1
7.2	Grease Nipple A M6x1.00	1
7.2.1	A M6x1.00	1
7.2.2	Ø 2.50	1
7.3	ISO 4027 - M3 x 2.5-C	4
8	1605-800	1
9	Flex Coupler D30.35-4.35-10.0	3
9.1	D30.35	1
9.2	D30.35-10	2
9.3	ISO 4762 M4 x 16 - 16N	2
10	BK12	1
10.1	BK12	1
10.2	BK12F	2
10.3	BK12	2
10.4	AFRMA 20.1 - 28-12 - Full.SI.NC.Full.68	2
11	1605-800	1
12	AFRMA 12.1.4.1 - 012018 - 20.SI.NC.20.68	3
13	1605-800	1
14	Manchil y drag	1
14.1	Pieza Base	1
14.2	Pieza 3	3
14.3	Pieza 2	1
14.4	Crc drag tirife	1
14.5	Pieza 4	1
14.6	Abrazadera 2.5x2.5 pulgadas	1

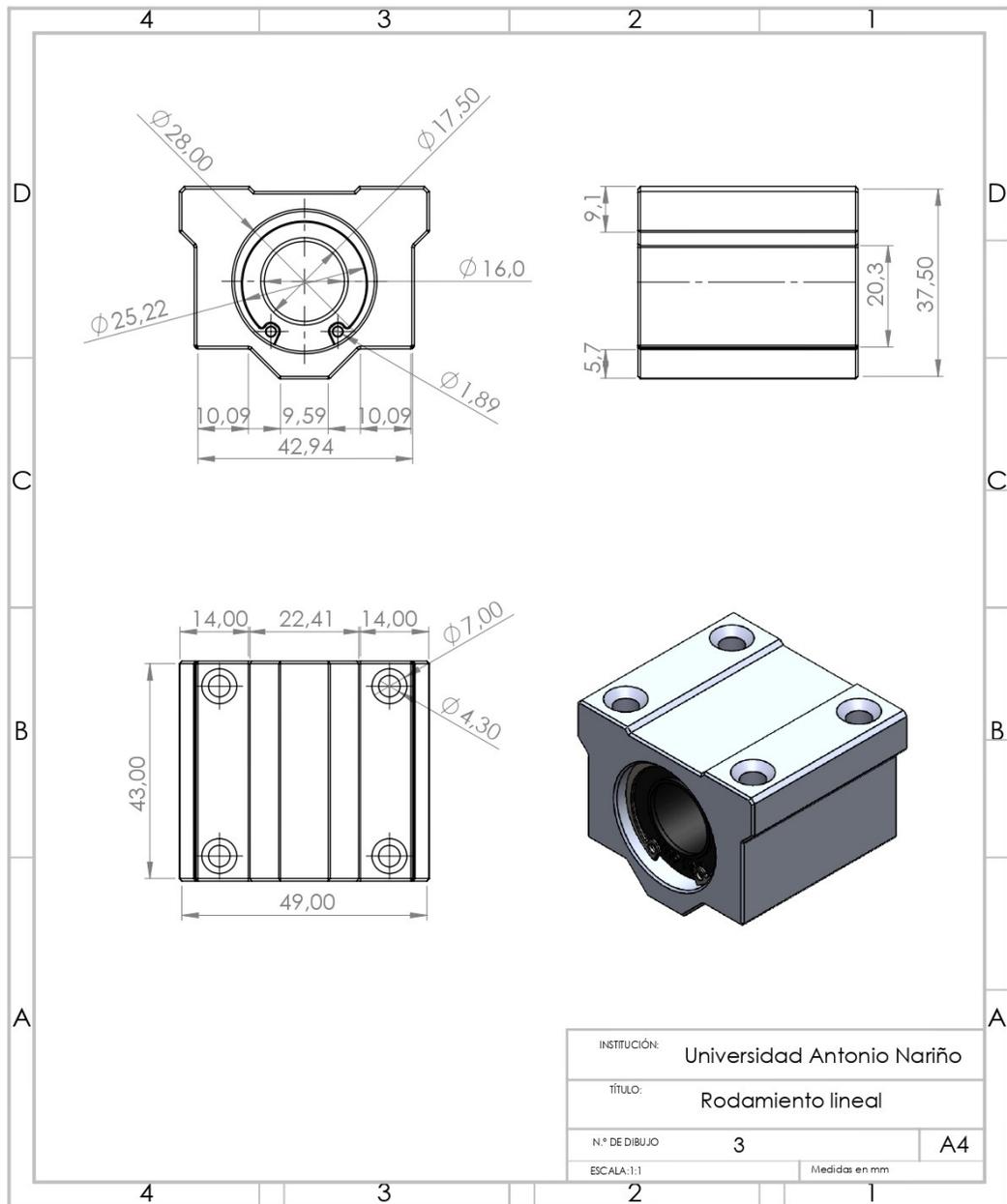
J. Anexo: Plano de husillo de bola



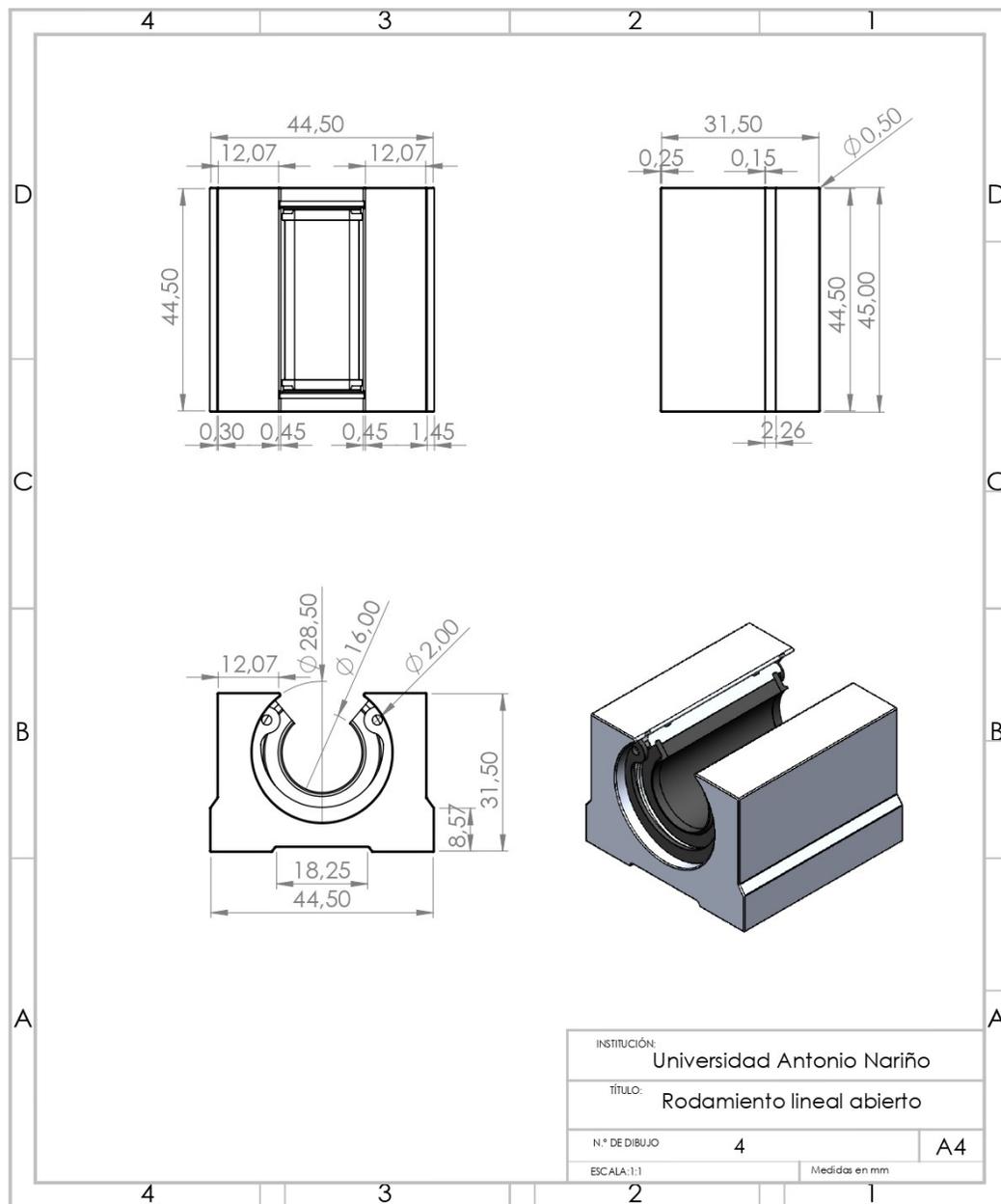
K. Anexo: Plano de la tuerca de husillo de bola



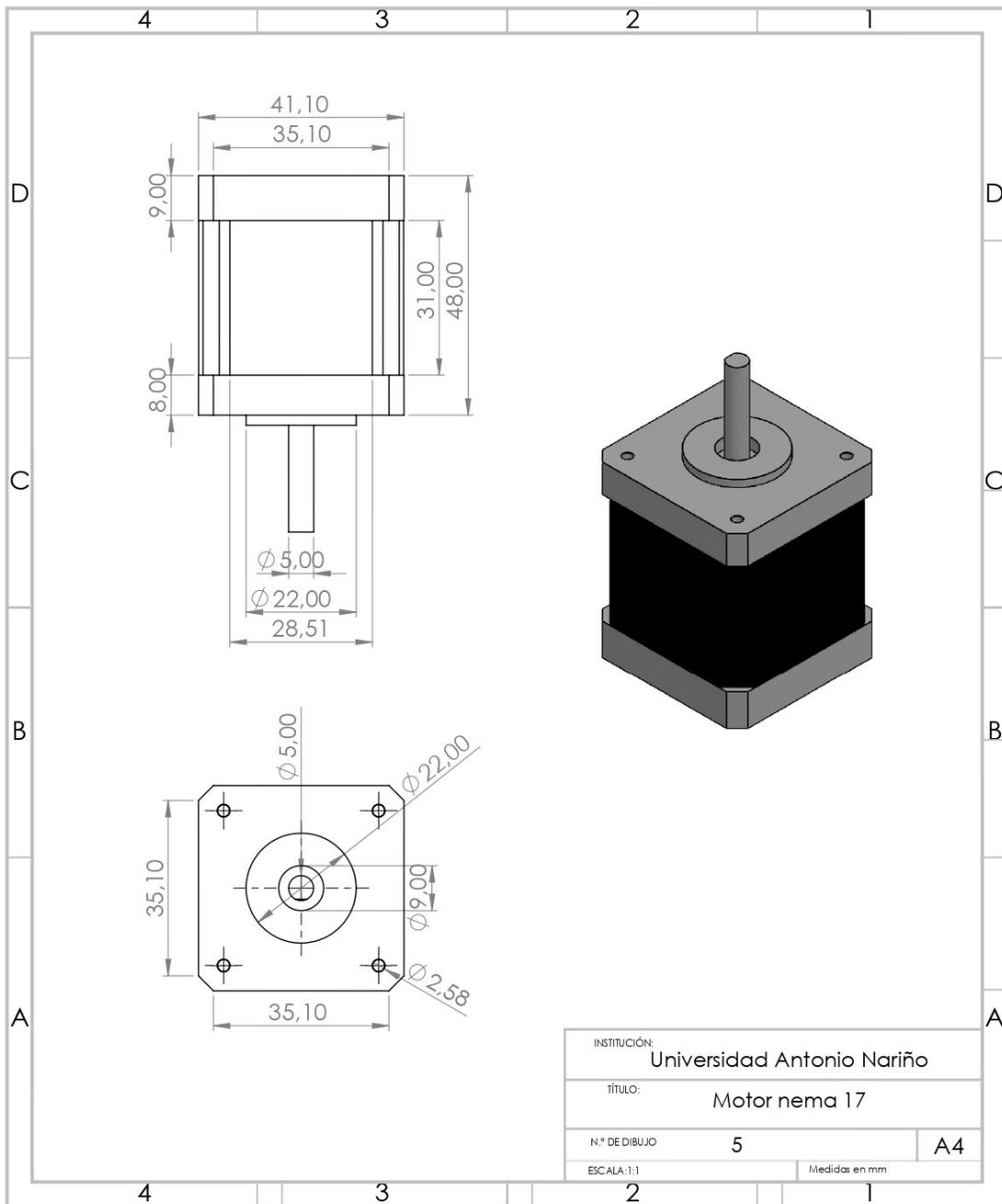
L. Anexo: Plano del rodamiento lineal cerrado



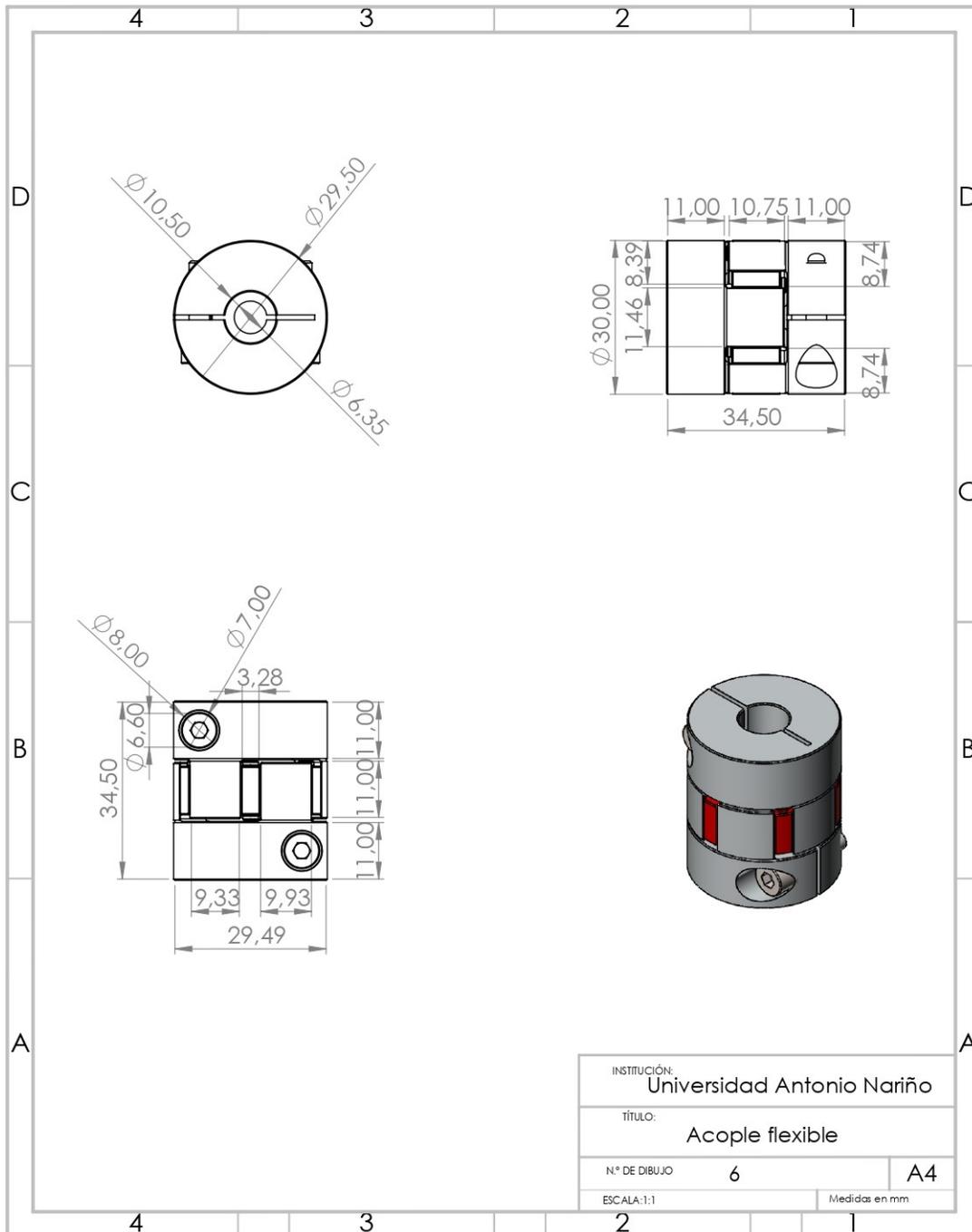
M. Anexo: Plano del rodamiento lineal abierto



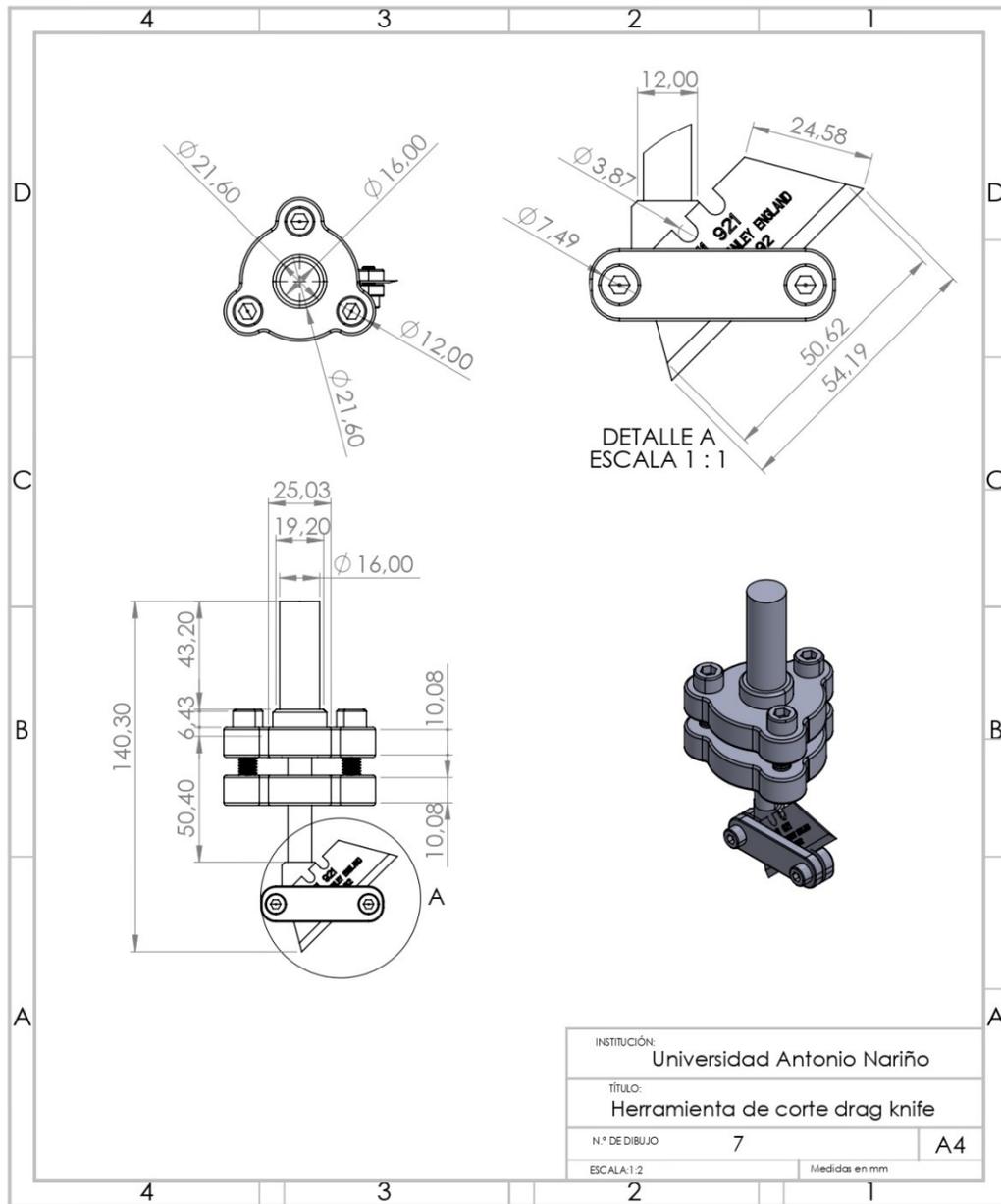
N. Anexo: Plano del motor nema 17



O. Anexo: Plano del acople flexible



P. Anexo: Plano de la herramienta de corte Drag Knife



6. Bibliografía

- [1] B. F, «Nódulo control numérico computarizado,» 2012. [En línea]. Available: https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/36987933/Modulo_Control_Numerico_Computarizado.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1549322967&Signature=s2vnMB2i7Q8aSR44VK6BRdrZxME%3D&response-content-disposition=inline%3B filename%3DMODULO_C..
- [2] I. Mad, «Máquina Lectra sala de corte,» 1998. [En línea]. Available: https://www.mading.co/Maquinaria_Lectra.html.
- [3] B. R. A. A. S. K. U. S. A. a. G. H. S. P. Pillai, «Solar powered desktop CNC machine for fabric and paper cutting,» *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 577, 2019.
- [4] W. Oliver, «Trilema Index,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.liebertpub.com/>.
- [5] L. C. a. J. Ramos, «CNC control of a laser cutting machine,» *IEEE*, 2002.
- [6] Epilog Láser, «Material Safety and your Laser,» 2015. [En línea]. Available: <http://support.epiloglaser.com/article/8205/30188/material-safety-and-your-laser>.
- [7] LAFFAYETTE, «LAFAYETTE TEXSOLUTIONS,» 2010. [En línea]. Available: <https://www.lafayettetexsolutions.com/referencia/huracan/>.
- [8] I. E. a. R. U. C. Manor, «Polímeros termocontraíbles Thermofit Polímeros termocontraíbles Thermofit,» pp. 1-6, 2006.
- [9] M. A. B. S. Pabla, *CNC machines*, New Delhi: New Age International, 2005.
- [10] P. smid, «CNC Programming Techniques: An Insider's Guide to Effective Methods and applications,» de *CNC Programming Techniques: An Insider's Guide to Effective Methods and applications*, New York, Madison, 2006, p. 339.
- [11] S. K. Kang, S. S. D. Chung y I. Stroud, de *Theory and Design of CNC Systems*, Republica de Korea, Springer, 2008, p. 454.
- [12] S. Singh, *Theory of Machines*, New Delhi: Pearson, 2002.

-
- [13] A. Overby, *CNC Machining Handbook: Building, Programming, and Implementation*, New York: Mc Graw Hill, 2011.
- [14] D. H. Myszka, *Máquinas y mecanismos*, Monterrey: Pearson, 2012.
- [15] Hmt, *Mechatronics*, New Delhi: Mc Graw Hill, 1998.
- [16] W. GONZÁLEZ COQUEL y H. F. REYES CARVAJAL , «DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA PARA EL RUTEO Y PERFORACIÓN DE PCB,» p. 250, 2014.
- [17] R. L. Mott, *Diseño de Elementos de Máquinas*, México: Pearson, 2006.
- [18] E. M. Vavrek, R. L. Mott y J. Wang, *Machine Elements in Mechanical Design*, 6e, Estados Unidos: Pearson, 2014.
- [19] Thomson, «RoundRail_LinearGuides_Components_cten,» Thomson Industries, 2018.
- [20] D. COLLINS, «Linear motion Tips,» Design world resource, 24 Julio 2015. [En línea]. Available: <https://www.linearmotiontips.com/round-shaft-or-profiled-rail-how-to-choose/>. [Último acceso: 06 2020].
- [21] Thomson, «RoundRail Linear Guides and Components,» 2014. [En línea]. Available: https://www.thomsonlinear.com/downloads/bearings_guides/RoundRail_LinearGuides_Components_cten.pdf.
- [22] Thomson, «Profile Rail Linear Guides,» 2012. [En línea]. Available: https://www.thomsonlinear.com/downloads/bearings_guides/Profile_Rail_Linear_Guides_cten.pdf.
- [23] HIWIN, «Linear guideway,» Hiwin technologies Corp, 2019. [En línea]. Available: https://www.hiwin.com/pdf/linear_guideways_1.pdf. [Último acceso: 2020].
- [24] V. U.A.Bakshi, «Control System Engineering,» de *Control System Engineering*, 2008.
- [25] N. Sclater, *MECHANISMS AND MECHANICAL DEVICES SOURCEBOOK*, Estados Unidos: Mc Graw Hill, 2007.
- [26] V. B. U.A.Bakshi, *Electrical Engineering and Control Systems*, India: Technical publications, 2008.
- [27] V. Athani, *Stepper Motors : Fundamentals, Applications And Design*, India: New Age International, 1997.
- [28] SKF, «Husillos de bola,» 2008. [En línea]. Available: http://www.mecapedia.uji.es/catalogos/husillo_de_bolas/skf.1.pdf. [Último acceso: 2020].

- [29] Stepperonline, «Stepper online,» 2005. [En línea]. Available: <https://www.omc-stepperonline.com/stepper-motor-driver/>. [Último acceso: 06 2020].
- [30] O. Krishna, P. K. y R. Reddy, «Fabrication of Low Cost 3-Axis Cnc Router,» *International Journal of Engineering Science Invention*, vol. III, p. 10, 2014.
- [31] I. Vilumsone-Nemes, *Industrial Cutting of Textile Materials*, India: ELSEVIER, 2018.
- [32] R. P. Rajkishore Nayak, *Automation in Garment Manufacturing*, Cambridge: ELSEVIER, 2018.
- [33] P. Smid, *CNC Control Setup for Milling and Turning: Mastering CNC Control Systems*, New York: Industrial Press, 2007.
- [34] MEDITAL, «Flexible couplings & Shafts,» [En línea]. Available: <https://www.medital.com/collections/flexible-couplings#:~:text=Flexible%20coupling%20flexible%20couplings%20are,vibration%20damping%20or%20noise%20reduction..>
- [35] HOHNER, «Acoplamiento flexibles,» [En línea]. Available: https://www.disai.net/wp-content/uploads/catalogos_pdf/Acoplamiento.pdf.
- [36] F. Diaz del castillo, «PROGRAMACIÓN AUTOMÁTICA DE MAQUINAS,» 2018. [En línea]. Available: http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m4/master_cam.pdf.
- [37] K. Lee, *Principles of CAD/CAM/CAE systems*, Estados Unidos: Addison Wesley, 1999.
- [38] Bob CAD_CAM, «Controlador de cnc,» [En línea]. Available: <http://www.softwarecadcam.com.mx/software/mach3.html#:~:text=Mach%203%20es%20un%20sistema,num%C3%A9rico%20a%20un%20bajo%20costo..>
- [39] R. Jiménez, «Control Numérico por Computadora,» 2013. [En línea]. Available: <http://materias.fi.uba.ar/7565/U4-control-numerico-por-computadora.pdf>.
- [40] P. Smid, *CNC Programming Handbook: A Comprehensive Guide to Practical CNC Programming*, Industrial Press, 2008.
- [41] E. L. Manuel Vázquez, *El método de los Elementos Finitos, aplicado al análisis estructural*, Madrid: Noela.
- [42] B. S. I. Babuška, *Introduction to Finite Element Analysis*, Wiley, 2011.
- [43] J. T. C. Lizarza, *Método de los Elementos Finitos*, España, 2011.
- [44] J. M. Jiménez, «Introducción a Solidworks Simulation y análisis de elemento finito,» 5 Marzo 2018. [En línea]. Available:

- <https://ditlag.wordpress.com/2018/03/05/introduccion-a-solidworks-simulation-y-analisis-de-elemento-finito/>. [Último acceso: 2020].
- [45] R. M. Jiménez, «Estudio y simulación por elementos,» 2015. [En línea]. Available: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/8943/MemoriaPFC_Elementos_Finitos.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Último acceso: 2020].
- [46] NOVASTITCH, «Cortadora Textil Manual KANSEW KS 100,» 2015. [En línea]. Available: <http://novastitch.com/producto/cortadora-textil-manual-kansew-ks-100..>
- [47] Elsevier, «Bearings and Applied Technology,» *Researchgate*, 2012.
- [48] P. Brown, «Ball Bearings,» *Researchgate*, 2009.
- [49] Sorotec, «Stepper motor driver TB6600,» [En línea]. Available: https://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/TB6600_data_sheet.pdf. [Último acceso: 08 2020].
- [50] J. P. S. José Rafael Lajara Vizcaíno, «Control de un motor paso a paso,» de *LabVIEW: Entorno gráfico de programación*, Barcelona , Marcombo, 2011, pp. 209-210.
- [51] Y. A. Badamasi , «The Working Principle Of An Arduino,» *IEEE*, p. 4, 2014.
- [52] Datasheet, «ARDUINO UNO Revision 3 BOARD,» Datasheet, 27 Abril 2014. [En línea]. Available: <https://datasheet.datasheetarchive.com/originals/library/Datasheets-ZSAA2/DSAAZSAA00029930.pdf>. [Último acceso: 06 2020].
- [53] R. L.Mott, «Diseño de elementos y máquinas,» de *Diseño de elementos y máquinas*, México, Pearson, 2006, p. 946.
- [54] D. E. M. Colin H. Simmons, «Researchgate,» Enero 2020. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/340418922_Bearings_and_applied_technology. [Último acceso: 08 2020].