

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Diseño de un prototipo de impresora 3D FDM con capacidad de
4 ejes

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Mecatrónica

Presentado por:

Darwin Adrián Bermeo Gaibor

Joseph Andrés Baquerizo Flor

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico, en primer lugar, a Dios por darme sabiduría y la salud para continuar con esta gran meta.

A mis seres más amados, mi mamá, mis hermanos y mi perrita, Inés Gaibor, Jorge Bermeo, Laura Bermeo y Savage, quienes con su apoyo y presencia me han alentado e instruido con todo el cariño para continuar luchando por mis sueños.

A mis ángeles del cielo, a mi amado padre y abuela, quienes en vida me dieron todo su amor y entregaron todo de ellos para que yo llegara a convertirme en el profesional que deseo ser.

Darwin Bermeo

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mis abuelos Guillermo Baquerizo, Letty Dávila, Eudaldo Flor y Monserrate Cedeño, quienes me han alentado e instruido con mucho amor y respeto a lo largo de mi vida.

A mis padres que tanto amo, Guillermo Joseph Baquerizo Dávila y Sara Priscila Flor Cedeño, quienes me han brindado su apoyo y consejo a lo largo de mi vida con el fin de ser una mejor persona.

Joseph Baquerizo

AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos a Dios por todas las bendiciones que me ha brindado a lo largo de mi vida.

A mi familia por ser el pilar fundamental de mi vida, que con su apoyo incondicional me ha inspirado a soñar alto y a luchar por ello.

A la universidad, en la que deposité todos mis sueños, que me ha brindado una educación y la capacidad de superación para alcanzar mis objetivos.

Al MSc. Fausto Maldonado, por compartir sus conocimientos como docente y por su apoyo como tutor en el desarrollo de este proyecto.

A mi amigo y compañero de tesis, Joseph Baquerizo, por su apoyo y amistad, y que con sus conocimientos logramos perfeccionar la idea de este proyecto

Darwin Bermeo

AGRADECIMIENTOS

A Dios, porque en los momentos más difíciles ha resultado ser el pilar fundamental de mi resiliencia.

A mis padres, que siempre han estado ahí para mí, dándome su apoyo incondicional a lo largo de este camino que he escogido.

Al Ing. Fausto Maldonado, por ser un gran profesor y tutor, brindándonos su guía durante el desarrollo de este proyecto.

Agradezco todas las experiencias y decisiones que me han llevado hasta este momento, las cuales han forjado la persona que soy el día de hoy.

Joseph Baquerizo

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Darwin Adrián Bermeo Gaibor* y *Joseph Andrés Baquerizo Flor* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Darwin Adrián Bermeo
Gaibor



Joseph Andrés
Baquerizo Flor

EVALUADORES

.....
Efraín Terán M.Sc.

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Fausto Maldonado M.Sc.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

La impresión 3D se ha vuelto extremadamente popular en los últimos años, llegando a extenderse incluso en sectores de salud, educación y negocios. A lo largo de los años se han implementado varias tecnologías de impresión 3D, siendo el modelado por deposición fundida (FDM) la más popular de hoy en día. A pesar de eso, todavía presenta algunas debilidades, como su incapacidad para imprimir estructuras de geometría compleja sin la necesidad de soportes, que afectan tiempos de producción y calidad del acabado final. En esta tesis se analiza la posibilidad de eliminar esta problemática mediante el uso de un sistema de 4 ejes. Para ello, se diseñó el prototipo de una impresora FDM de 3 ejes con un 4to eje adicional. Se analizaron las características físicas y propiedades de los materiales de las estructuras, soportes y ejes guías, lo cual ayudó a determinar las fuerzas ejercidas sobre cada uno de ellos y de esa forma desarrollar los cálculos de diseño y la selección de componentes. Con este diseño preliminar, se procedió a realizar un análisis de elementos finitos por medio de un software CAM, verificando que el diseño de la estructura se encuentra correctamente realizado y que es capaz de soportar las cargas de cada eje. Adicional, se creó un caso de estudio en el cual se hizo una comparativa con las impresoras convencionales, comprobando que con nuestro diseño se ahorra material y se consume menos tiempo de producción.

Palabras Clave: Impresora 3D, 4to eje, soporte, FDM, tiempo de producción.

ABSTRACT

3D printers are one of the applications of additive manufacturing that have become extremely popular in recent years, reaching even the health, education, and business sectors. Various 3D printing technologies have been implemented over the years, with fused deposition modeling (FDM) being the most popular today. Despite this, it still has some weaknesses, such as its inability to print structures with complex geometry without the need for supports, which affect production times and the quality of the final finish. This thesis analyzes the possibility of eliminating this problem by using a 4-axis system. For this, the prototype of a 3-axis FDM printer with an additional 4 axis was designed. The physical characteristics and properties of the materials of the structures, supports and guide shafts were analyzed, which helped us determine the forces exerted on each of them and thus develop the design calculations and the selection of components. With this preliminary design, a finite element analysis was made via CAM software, verifying that the design of the structure is correctly carried out and that it is capable of supporting the loads of each axis. Additionally, a case study was created in which a comparison was made with conventional printers, verifying that with our design material is saved and less production time is consumed.

Keywords: *3D printer, 4th axis, support, FDM, production time.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XI
ÍNDICE DE PLANOS	XII
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Justificación del problema.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.4 Marco teórico	4
1.4.1 Impresión 3D.....	4
1.4.2 Tecnologías de impresión 3D.....	6
1.4.3 Tecnología FDM.....	9
1.4.4 Elementos de una impresora 3D FDM	10
1.4.5 Cuarto eje (4to grado de libertad).....	11
1.4.6 Programación ISO.....	13
CAPÍTULO 2	16
2. Metodología	16
2.1 Procedimiento para el diseño	16

2.2	Alternativas de solución	17
2.3	Diseño de la impresora 3D	19
2.3.1	Diseño del cuarto eje.....	21
2.3.2	Diseño del eje Y	34
2.3.3	Diseño del eje X	46
2.3.4	Diseño del eje Z	56
2.4	Sistema de control	65
2.4.1	Motores de paso.....	65
2.4.2	Tarjeta de control	69
2.4.3	Tarjeta de control de potencia	69
2.4.4	Pantalla LCD	70
2.4.5	Selección de componentes electrónicos	72
2.4.6	Fuente de alimentación	74
2.4.7	Esquema de control	75
CAPÍTULO 3.....		76
3.	Resultados y análisis	76
3.1	Análisis de elementos finitos.....	76
3.1.1	Análisis de elementos finitos en el soporte del eje X.....	77
3.1.2	Análisis de elementos finitos en la placa para la base	81
3.1.3	Análisis de elementos finitos de la columna soporte para el eje Z	84
3.1.4	Análisis de elementos finitos de la estructura para el cuarto eje.....	88
3.2	Caso de estudio	92
3.2.1	Programación de la impresora con 4 ejes.....	95
3.3	Análisis de costos	97
3.3.1	Rentabilidad del proyecto	100
CAPÍTULO 4.....		101

4.	Conclusiones y recomendaciones.....	101
4.1	Conclusiones	101
4.2	Recomendaciones	102
	BIBLIOGRAFÍA.....	104
	APÉNDICES	106

ABREVIATURAS

3D	Tridimensional
GDL	Grados de libertad
FFF	Fabricación de Filamentos Fundidos
FDM	Modelado por deposición fundida
SLA	Fotopolimerización en Tinta
SLS	Fusión de capa de polvo
UV	Ultravioleta
STL	Formato que se incorpora rápidamente a software CAM
CAM	Manufactura asistida por computadora
CAD	Diseño asistido por computadora
CNC	Control numérico computarizado

SIMBOLOGÍA

m	metros
mm	milímetros
Nm	torque
kg	kilogramos
N	newton
ρ	densidad
S_y	resistencia a la fluencia
σ	esfuerzo
V	voltio
A	Amperio
Vdc	Voltaje continuo
W	Watts

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Impresión 3D con soportes	2
Figura 1.2 Impresoras 3D en el taller de la empresa Play and Learning	3
Figura 1.3 Ejes de movimiento de una impresora 3D	6
Figura 1.4 Impresión 3D por tecnología FFF	7
Figura 1.5 Impresión 3D por tecnología SLA	7
Figura 1.6 Impresión 3D por tecnología SLS	8
Figura 1.7 Impresión 3D por tecnología Polyjet	8
Figura 1.8 Elementos de una Impresora 3D FDM.....	10
Figura 1.9 Estructura CNC de 4 ejes	12
Figura 1.10 Programa en G-Code.....	14
Figura 2.1 Planteamiento esquemático de la metodología de diseño	16
Figura 2.2 Sistema de transmisión de banda dentada y cuarto eje en husillo (A)	17
Figura 2.3 Sistema de transmisión de banda dentada y cuarto eje en la base (B)	18
Figura 2.4 Sistema de transmisión de tornillo sin fin y cuarto eje en husillo (C)	18
Figura 2.5 Sistema de transmisión de tornillo de potencia y cuarto eje en la base (D)	18
Figura 2.6 Diseño de impresora 3D con cuarto eje.....	20
Figura 2.7 Estructura de cuarto eje coordenada en X.....	21
Figura 2.8 Posición inicial	23
Figura 2.9 Rotación de la pieza	23
Figura 2.10 Compensación de distancia.....	24
Figura 2.11 Cama térmica	25
Figura 2.12 Base rotatoria	26
Figura 2.13 Perno con resorte	27
Figura 2.14 Diagrama de cuerpo libre, eje de rotación en coordenada X	29
Figura 2.15 Puntos de corte en diagrama de cuerpo libre, eje de rotación en coordenada X.....	30
Figura 2.16 Diagrama de fuerza cortante sobre el eje de rotación en coordenada X	31
Figura 2.17 Diagrama de momentos sobre el eje de rotación en coordenada X	32
Figura 2.18 Estructura del eje Y.....	34

Figura 2.19 Base deslizante	35
Figura 2.20 Soporte del motor	36
Figura 2.21 Fuerzas aplicadas sobre base deslizante	38
Figura 2.22 Medidas entre los centros de las uniones con los ejes guía y el tornillo de potencia en coordenada Y	38
Figura 2.23 Diagrama de fuerzas sobre el eje coordenada Y (guías).....	40
Figura 2.24 Diagrama de cortes sobre el eje coordenada Y (guías).....	40
Figura 2.25 Diagrama de fuerza cortante sobre los ejes guía en coordenada Y	42
Figura 2.26 Diagrama de momento flector sobre los ejes guía en coordenada Y.....	42
Figura 2.27 Estructura del eje X.....	46
Figura 2.28 Soporte de extrusor coordenada X	47
Figura 2.29 Extrusor directo Mk8 y motor	48
Figura 2.30 Bloque deslizante SCS8/10/12/16UU	49
Figura 2.31 Diagrama de fuerzas sobre el eje X (guías).....	50
Figura 2.32 Diagrama de cortes sobre el eje X (guías).....	50
Figura 2.33 Diagrama de fuerza cortante sobre el eje guía en coordenada X.....	51
Figura 2.34 Diagrama de momento flector sobre el eje guía en coordenada X	52
Figura 2.35 Estructura del eje Z.....	56
Figura 2.36 Fuerzas sobre eje guía coordenada Z (bloque deslizante)	57
Figura 2.37 Diagrama de fuerzas del eje Z (guías).....	58
Figura 2.38 Diagrama de cortes del eje Z (guías).....	59
Figura 2.39 Diagrama de fuerza cortante sobre el eje guía en coordenada Z	60
Figura 2.40 Diagrama de momento flector sobre el eje guía en coordenada Z	61
Figura 2.41 Motor de paso	66
Figura 2.42 Funcionamiento de motor de paso	67
Figura 2.43 Arduino Mega	69
Figura 2.44 Tarjeta de control Duet	70
Figura 2.45 PanelDue	71
Figura 2.46 Tarjeta Duet con extensión Duex4.....	72
Figura 2.47 Fuente de alimentación AVAWO	74
Figura 2.48 Esquema de control.....	75
Figura 3.1 Cargas en el soporte del eje X.....	77
Figura 3.2 Mallado del soporte del eje X.....	77

Figura 3.3 Esfuerzos de Von Mises – soporte del eje X	78
Figura 3.4 Concentrador de esfuerzos – soporte del eje X.....	79
Figura 3.5 Deformación a lo largo del soporte del eje X	80
Figura 3.6 Cargas en la estructura del eje Y	81
Figura 3.7 Mallado de la estructura del eje Y.....	81
Figura 3.8 Esfuerzos de Von Mises – estructura del eje Y	82
Figura 3.9 Deformación a lo largo de la estructura del eje Y	83
Figura 3.10 Cargas en el punto de sujeción en la base – columna eje Z.....	84
Figura 3.11 Torsión sobre cara superior - columna eje Z	85
Figura 3.12 Mallado de la columna soporte del eje Z	85
Figura 3.13 Esfuerzos de Von Mises – columna del eje Z.....	86
Figura 3.14 Deformación a lo largo del soporte para el Z.....	87
Figura 3.15 Cargas en la estructura del cuarto eje	88
Figura 3.16 Mallado de la estructura para el cuarto eje	89
Figura 3.17 Esfuerzos de Von Mises en la estructura del cuarto eje	90
Figura 3.18 Deformación a lo largo de la estructura para el cuarto eje.....	91
Figura 3.19 Pieza seleccionada para el caso de estudio	92
Figura 3.20 Pieza impresa con cuarto eje.....	93
Figura 3.21 Caso de estudio con generación de soportes (3 ejes)	94
Figura 3.22 Caso de estudio sin generación de soportes (4 ejes)	94
Figura 3.23 Ruta del extrusor en un ángulo de rotación de 0°	96
Figura 3.24 Ruta del extrusor en un ángulo de rotación de 90°	96
Figura 3.25 Ruta del extrusor en un ángulo de rotación de -90°.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Resultado de matriz de soluciones	19
Tabla 2.2 Componentes de impresora 3D	20
Tabla 2.3 Partes del cuarto eje	21
Tabla 2.4 Partes del eje Y	35
Tabla 2.5 Partes del eje X	47
Tabla 2.6 Partes del eje Z	56
Tabla 2.7 Motores seleccionados para los ejes	68
Tabla 2.8 Especificaciones de tarjeta Duet	73
Tabla 2.9 Potencia requerida por componentes	74
Tabla 3.1 Parámetros de estudio – soporte del eje X	78
Tabla 3.2 Valores de Von Mises – soporte del eje X	79
Tabla 3.3 Valores de desplazamiento – soporte del eje X	80
Tabla 3.4 Parámetros de estudio – estructura del eje Y	82
Tabla 3.5 Valores de Von Mises – estructura del eje Y	83
Tabla 3.6 Valores de desplazamiento – estructura del eje Y	83
Tabla 3.7 Parámetros de estudio – columna soporte del eje Z	86
Tabla 3.8 Valores de Von Mises – columna soporte del eje Z	87
Tabla 3.9 Valores de desplazamiento – columna soporte del eje Z	88
Tabla 3.10 Parámetros de estudio – estructura del cuarto eje	89
Tabla 3.11 Valores de Von Mises – estructura del cuarto eje	90
Tabla 3.12 Valores de desplazamiento – estructura del cuarto eje	91
Tabla 3.13 Resultados de la simulación del caso de estudio	93
Tabla 3.14 Cotización de componentes para la impresora de 4 ejes	98
Tabla 3.15 Costo de ensamblaje y dirección para la impresora de 4 ejes	100

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Cuarto eje
- PLANO 2 Eje Y
- PLANO 3 Eje X
- PLANO 4 Eje Z
- PLANO 5 Impresora 3D de 4 ejes

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La impresión 3D es una aplicación de la manufactura aditiva que se ha ido desarrollando desde fines del siglo XX hasta el día de hoy, la cual se ha visto involucrada en diversos campos profesionales como la medicina, la ingeniería, entre otros [1]. Algunos ejemplos de los elementos que pueden ser fabricados por este tipo de sistema son: extensiones artificiales (prótesis), estructuras de soporte, piezas mecánicas y accesorios personalizados. Para poder fabricar estas piezas tridimensionales, se emplea un mecanismo que puede generar formas geométricas simples o complejas a base de materiales como: cerámicos, termoplásticos, etc. Se lo denomina impresora 3D.

La impresora 3D es un sistema mecatrónico con la capacidad de crear objetos de tres dimensiones con distintos materiales por medio de un proceso llamado fabricación aditiva. Este tipo de fabricación elabora objetos a partir de la deposición del material de impresión en una sucesión de capas continuas hasta completar la estructura deseada [2]. Una impresora 3D posee una cantidad determinada de grados de libertad, que usualmente se encuentran entre tres y seis GDL. Estos grados de libertad se asocian con la capacidad existente de generar los movimientos que puede realizar el sistema en el espacio de los ejes X, Y e Z; ya sean lineales o rotatorios [3]. Las impresoras 3D más comunes poseen sólo tres GDL.

Estos sistemas de impresión 3D se constituyen como un nuevo eslabón en la cadena de innovación tecnológica por sus múltiples aplicaciones industriales. Esta tecnología llegó a implementarse en Ecuador en el año 2013 por una empresa pionera llamada INNOVA 3D en la ciudad de Guayaquil, a partir de la trayectoria y éxito de esta empresa aparecerían en el mercado ecuatoriano otras empresas con servicios similares [3]. Actualmente, esta empresa está asociada con Play and Learning la cual se especializa en la implementación robótica educativa en el Ecuador, con visión en la educación STEAM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería, Arte y Matemáticas). Por lo que, siempre están en búsqueda de innovación en cuanto a los equipos de impresión 3D.

1.1 Descripción del problema

Durante el proceso de impresión tridimensional de un objeto es común observar el uso de soportes (Figura 1.1), los cuales son estructuras que se imprimen junto al modelo 3D para mantener el equilibrio de la pieza durante el desarrollo de la impresión. Sin embargo, estos elementos no forman parte de la pieza original. [4] La presencia de soportes en la pieza fabricada podría perjudicar el acabado final y la eficiencia del proceso de impresión, ya que para retirar el material de apoyo es necesario contar con diferentes métodos de eliminación (dependiendo de la tecnología de impresión 3D utilizada) que pueden deteriorar la superficie del producto final. Además, el hecho de imprimir estos soportes cubre un tiempo de impresión determinado y un gasto de material, el cual es desechado posterior al ser removido.



Figura 1.1 Impresión 3D con soportes

Este proyecto se enfoca en la optimización de los procesos de impresión 3D de la empresa Play and Learning, implementando un cuarto eje para reducir los soportes generados por la elaboración de una pieza de alto grado de complejidad. Esto presenta, de manera indirecta, muchas ventajas para el proceso de manufactura aditiva mencionado, ya que permite reducir el tiempo que le toma al sistema fabricar una pieza, aumentar la calidad del acabado final y reducir el consumo de materiales utilizados para el proceso de impresión, como por ejemplo el material termoplástico PLA.

1.2 Justificación del problema

Actualmente, una empresa ecuatoriana dedicada al desarrollo de piezas tridimensionales por medio de impresión 3D (Play and Learning) se ha visto en la necesidad de optimizar sus procesos de producción a causa de la demanda creciente de sus productos. Esto ha iniciado una búsqueda de diferentes tecnologías que puedan cumplir sus requerimientos. Inicialmente, se han ido agregando numerosas impresoras 3D de tres ejes (Figura 1.2), lo cual ha ayudado a mantener la disponibilidad de estas máquinas al momento en que la demanda aumenta.

No obstante, a pesar de que se han conseguido estos equipos, no se ha podido lidiar con los siguientes problemas principales: la disminución de tiempos de producción, el uso eficiente de material termoplástico y la mejora de calidad del producto final, es decir, la constancia de la superficie de las piezas tridimensionales que se generan en la empresa. Esto debido a que, al momento de crear elementos con estructuras complejas, el sistema genera soportes hechos del mismo material de la pieza fabricada de manera automática, para que dicha pieza no pierda su balance sobre la base del mecanismo y así poder terminar el proceso de manufactura aditiva sin interrupciones.

Por ello, el presente proyecto propone establecer el diseño de una impresora 3D de cuatro ejes que permita contribuir con la eficiencia general de los procesos de producción de estas piezas tridimensionales.

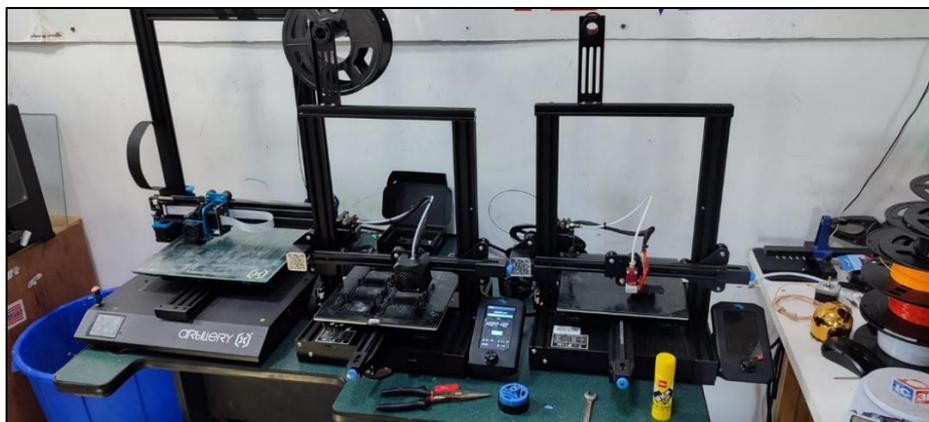


Figura 1.2 Impresoras 3D en el taller de la empresa Play and Learning

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar el prototipo de una impresora 3D con cuatro grados de libertad para optimizar la eficiencia, la calidad y el tiempo del proceso de fabricación de piezas tridimensionales.

1.3.2 Objetivos específicos

- Desarrollar el diseño detallado de los sistemas mecánico y electrónico de la impresora 3D.
- Realizar el cálculo de esfuerzos que actúan sobre el sistema por medio de un análisis de elementos finitos.
- Seleccionar los componentes electrónicos, eléctricos y mecánicos con el que trabajará la máquina teniendo como referencia su disponibilidad en el mercado.
- Estimar el costo de fabricación de las piezas que componen el sistema de la impresora 3D.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Impresión 3D

La impresión 3D es un tipo de fabricación conocida como aditiva, en donde se emplean diferentes tipos de materiales para poder generar objetos tridimensionales. A diferencia de los procesos de mecanización en donde se remueve material de un elemento para darle una forma final, en los procesos de impresión 3D se adiciona material para fabricar el objeto, creando varias capas continuas hasta formar la estructura final deseada [4].

Usualmente, para llevar a cabo un proceso de impresión 3D, se requiere un modelo tridimensional digital del objeto a imprimir [5]. El software de estos sistemas obtiene la información necesaria a partir de este modelo para así poder generar el proceso de fabricación que se va a llevar a cabo.

Estos modelos utilizados en la impresión 3D se suelen clasificar (en su mayoría) en 2 tipos: los modelos sólidos y los modelos poligonales. Un modelo sólido emplea el uso de fórmulas matemáticas y características como el volumen para manifestar la estructura de un objeto. Por otro lado, los modelos poligonales sólo tratan de representar la superficie del objeto por medio de puntos, líneas y planos interconectados entre sí, y al ser solo una representación superficial, se suelen renderizar en una menor cantidad de tiempo en comparación a los modelos sólidos [6].

A medida que pasa el tiempo, la manufactura aditiva se vuelve cada vez más común entre los procesos que se emplean en la industria, debido a que, permite realizar piezas de alta complejidad y objetos personalizados que requieren de precisiones elevadas, además, impulsado por el desarrollo de las tecnologías involucradas en esta rama de la manufactura.

En varias empresas la impresión 3D se ha adoptado como la técnica de fabricación estándar, principalmente con equipos de 3 GDL (Figura 1.3), que incluso se emplean para ambientes de diseño y prototipado de un objeto con una funcionalidad específica [6].

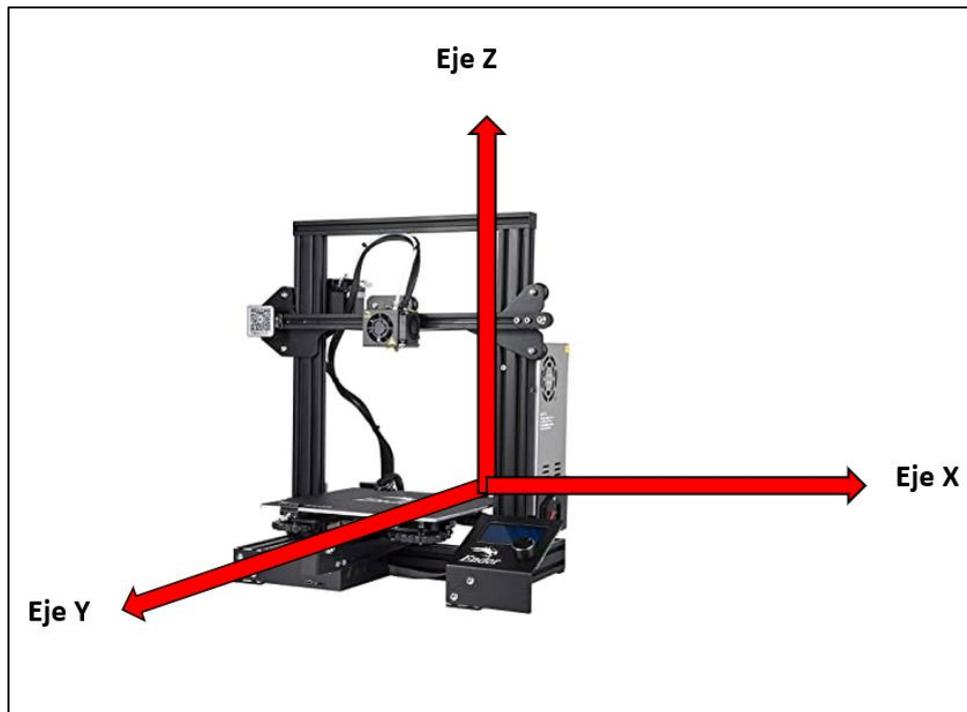


Figura 1.3 Ejes de movimiento de una impresora 3D

1.4.2 Tecnologías de impresión 3D

Existen diferentes tipos de tecnologías aplicadas a los procesos que genera una impresora 3D, estas tecnologías son las siguientes:

- **Tecnología FFF**

Trabaja con modelado por deposición fundida, sin embargo, no cuenta con controles de temperatura, y por lo general son mucho más lentas que las de tecnología FDM, la cual se va a explicar posteriormente [5].

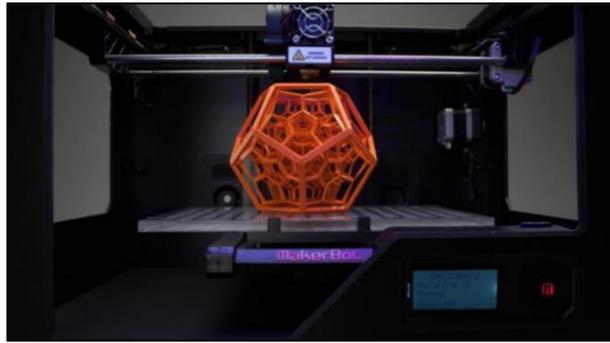


Figura 1.4. Impresión 3D por tecnología FFF [7]

- **Tecnología SLA**

Trabaja bajo el principio de fotopolimerización, el cual ocurre cuando se expone una resina líquida fotosensible a una fuente de luz [5]. Esta impresora ejerce un control sobre la fuente de luz mediante un láser, de esa manera, genera geometrías que dan forma al producto final.

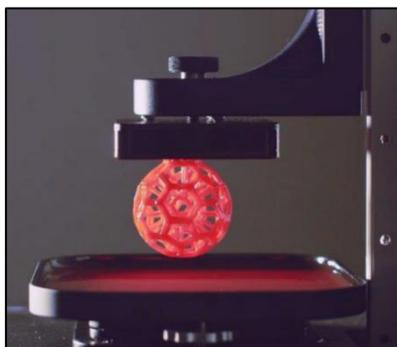


Figura 1.5 Impresión 3D por tecnología SLA [7]

- **Tecnología SLS**

Posee la capacidad de fabricar piezas completamente sólidas, gracias a la fundición de partículas de polvo de diferentes materiales [5].

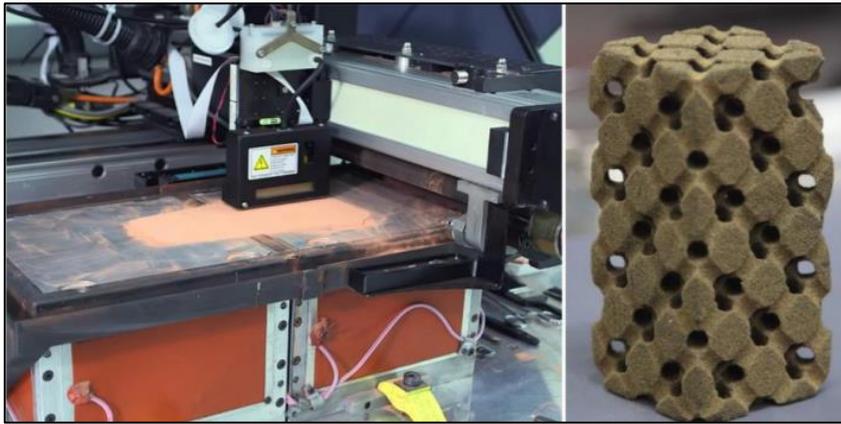


Figura 1.6 Impresión 3D por tecnología SLS [7]

- **Tecnología Polyjet**

Similar a una impresora 3D común, con la única diferencia que, en vez de inyectar gotas de tinta en una hoja de papel, suministra capas de fotorpolímero líquido que son colocados en la zona de la pieza a construir para luego ser curado con luz UV [5].

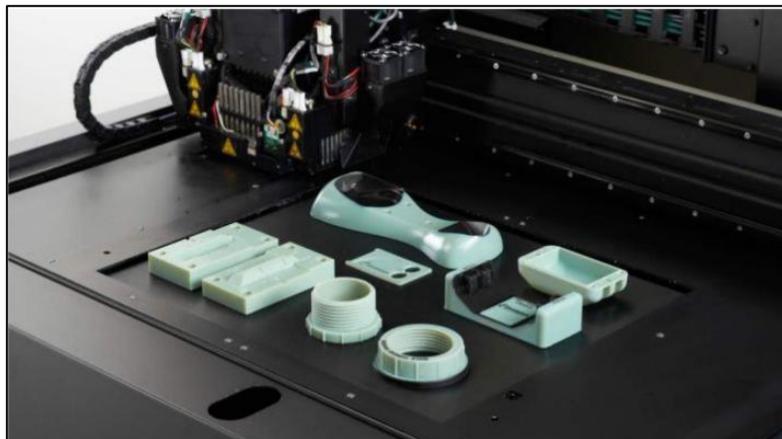


Figura 1.7 Impresión 3D por tecnología Polyjet [7]

1.4.3 Tecnología FDM

La impresión 3D se puede llevar a cabo por medio del uso de distintas tecnologías, una de ellas es la impresión 3D FDM. Las siglas FDM hacen referencia a Modelado por Deposición Fundida, en donde se generan diferentes objetos tridimensionales a partir de la extrusión y depósito de termoplástico en capas. Usualmente la adhesión del material termoplástico se lleva a cabo a través de un cabezal de extrusión interconectado con un depósito de dicho material [6]. El proceso para llevar a cabo una impresión 3D con la tecnología FDM es el siguiente:

Primero, se ingresa un archivo de tipo STL en donde se especifican configuraciones previas al proceso de impresión, como modificación de capas, modificación de segmentos, etc [6]. El software involucrado en el sistema básicamente segmenta en varias capas el diseño tridimensional ingresado para poder generar las trayectorias que el sistema mecánico necesita, y así poder situarse correctamente en los puntos de impresión.

Luego, una vez ingresado el modelo 3D al software y realizado las modificaciones necesarias, empieza el proceso de impresión de dicho modelo [6]. En este proceso el cabezal de extrusión del material termoplástico se va situando en los puntos correspondientes para llevar a cabo la manufactura aditiva, es decir, agregar el material termoplástico en dichos puntos.

Dependiendo de la geometría del modelo, en muchos casos se necesita generar soportes (del mismo material) en las superficies que quedan suspendidas, para así evitar su colapso. Finalmente, se encuentra la parte del postproceso, en donde se remueven los soportes que brindaron apoyo a la estructura del diseño que se estaba desarrollando en la fase anterior. Usualmente, la forma de remover el material en exceso para este tipo de proceso es empleando roturas manuales y lijando la superficie en donde se generan las roturas [6].

1.4.4 Elementos de una impresora 3D FDM

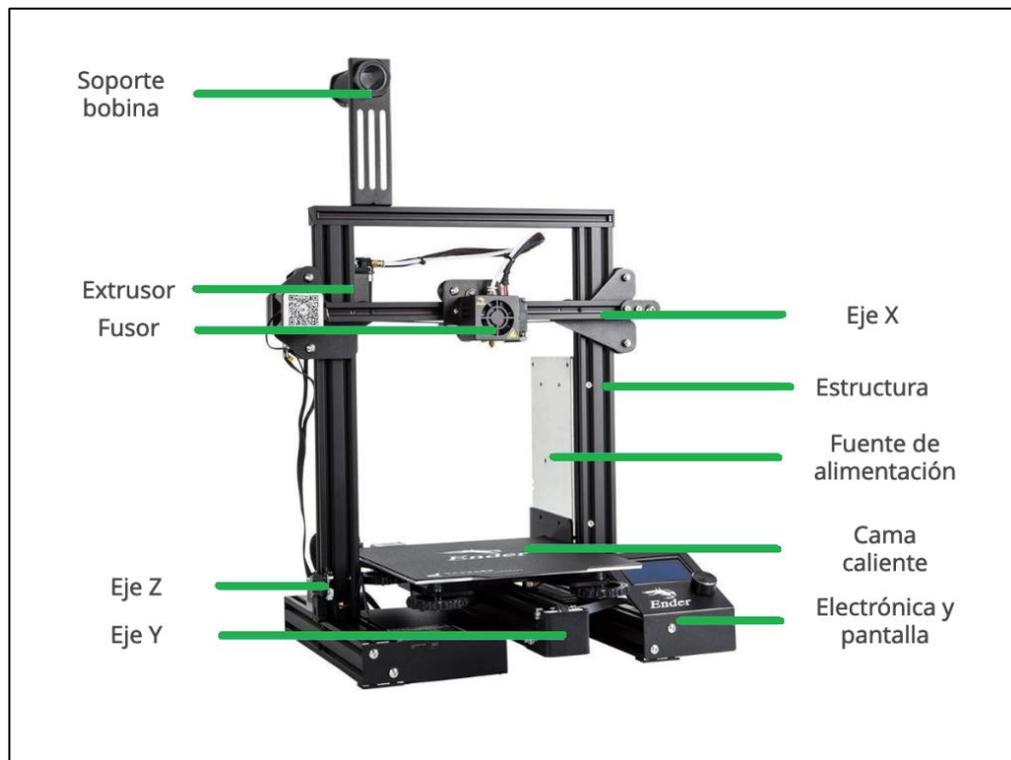


Figura 1.8 Elementos de una Impresora 3D FDM

Las impresoras 3D tradicionales de la tecnología FDM (Figura 1.8), se componen de 4 sistemas principales:

Estructura: Este sistema se relaciona a las piezas que componen la base de la máquina, y en las cuales son colocados todos los elementos. Además, su forma y composición definen la rigidez de la impresora, lo cual evita que la calidad de las piezas terminadas resulte afectada por vibraciones [7].

Sistema Mecánico: Define el movimiento de la impresora 3D. La impresora tradicional posee tres ejes de movimiento, el cabezal que se desplaza en el plano XZ y la base en el plano Y [7]. Existen diferentes formas de diseñar el sistema de transmisión de la impresora 3D para efectuar el movimiento de los ejes anteriormente mencionados, algunos de ellos son: varillas lisas con rodamientos, guías lineales, correas y husillos.

Sistema de Extrusión: Está compuesto por un extrusor y un fusor, es el encargado de aplicar el material termoplástico fundido en la base de la impresora. El fusor es un componente que funde el material termoplástico, generalmente compuesto por un disipador, un barrel y un bloque calentador junto con la boquilla (nozzle). En cambio, el extrusor es el conjunto de elementos que empujan el filamento hacia el fusor [7].

Electrónica: Se encuentra constituido por todos los elementos electrónicos de la máquina como: motores, sensores y las tarjetas de control. La tarjeta de control es la que origina las órdenes de movimiento de los motores. Existen diversos tipos de este dispositivo y, aunque cumplen con la misma función, se diferencian por los drivers que manejan [7].

Sensor de filamento: Detecta si hay una provisión discontinua del material utilizado para la impresión 3D. Una vez detectada dicha discontinuidad, el proceso se detiene. En la actualidad se incluyen en la mayoría de las impresoras 3D.

1.4.5 Cuarto eje (4to grado de libertad)

Por lo general, las máquinas mecánicas destinadas a la manufactura de precisión de objetos tridimensionales, a partir de la remoción de material, suelen poseer tres ejes correspondientes a los desplazamientos lineales que el sistema puede realizar (X, Y e Z). Sin embargo, existen sistemas que incluyen un cuarto eje sobre su ambiente de movimiento, que, por lo general, es de tipo rotacional (Figura 1.9).

Hay máquinas de Control Numérico por Computadora (CNC) que emplean ejes rotacionales sobre la herramienta de trabajo o en la base del sistema, dependiendo de la aplicación. Esto le permite al operador realizar un desbaste sobre la materia prima colocada en la base (que gira 360 grados) sin la necesidad de desplazar la herramienta una vez que haya penetrado la superficie de dicho material (para el caso de un eje rotacional sobre la base). Este eje rotacional puede posicionarse referente a los otros ejes existentes del sistema [8]. Las ventajas que ofrece un cuarto eje en los procesos de mecanización son: permitir el control de giro de un elemento o pieza sobre uno de los

ejes mencionados anteriormente y facilitar la fabricación de piezas mecánicas de forma cilíndrica [9].

En manufactura aditiva, un cuarto eje puede ayudar a realizar impresiones 3D de forma cilíndrica, al igual que su aplicación en el mecanizado. Sin embargo, se debe tener en consideración que, durante el proceso de impresión de piezas tridimensionales, el algoritmo del sistema a veces genera soportes para que la pieza, en el caso de que posea partes extendidas, no se vayan a caer hacia un lado de la base. Esto genera un desperdicio de materia prima, debido a que, se emplea el uso de material base para elaborar dichos soportes, lo cual también conlleva a una mayor cantidad de tiempo para el proceso de impresión. No obstante, el uso de un cuarto eje rotacional sobre la base podría reducir el uso del material de apoyo, ya que le permite al actuador que extruye el termoplástico alcanzar lugares complejos de la pieza a fabricar, reduciendo la necesidad de utilizar soportes, por lo cual, también se lograría ahorrar material y disminuir los tiempos durante el proceso de impresión.

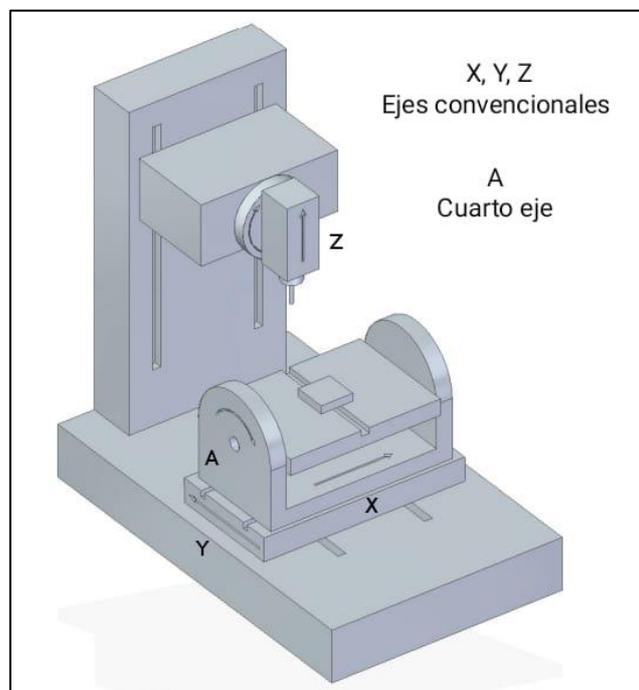


Figura 1.9 Estructura CNC de 4 ejes

1.4.6 Programación ISO

G-Code:

Esta nomenclatura hace referencia a un lenguaje programación que describe las operaciones para máquinas de control numérico. G-Code se encuentra estandarizado bajo la norma ISO 6983 y la norma DIN 66025, este lenguaje es uno de los más populares que existen y que en los últimos años han ganado aún más notoriedad debido al surgimiento de las impresoras 3D. [10]

Los comandos que se escriben en G-Code van describiendo los movimientos y las operaciones necesarias en una máquina CNC. En la impresión 3D el G-Code permite controlar varios parámetros de la impresora como, el movimiento de los ejes, temperaturas del extrusor y de la base, velocidad de impresión y la especificación de la cantidad de filamento a depositar sobre el material [10]

En lo referente al formato de los comandos que maneja G-Code, estos por lo general, comienzan con una letra que indica el tipo de función a realizar, que puede ser G, M (Funciones misceláneas o M-Code) o T (Seleccionar herramienta), seguido de un número que trabaja a modo de descriptor de la función. A continuación, va acompañado de otros parámetros asociado a una letra del alfabeto y que corresponden a un uso específico. Para el caso de la impresora 3D, los códigos con "X, Y, Z" hacen referencia a los ejes, "E" al extrusor, "S" para la temperatura y "F" para la velocidad. [10]

Un programa en G-Code puede ser tratado como un fichero de texto, es decir, puede ser editado de forma manual desde cualquier editor de texto, este proceso no es lo habitual ya que hoy en día existen softwares que generan de forma automática el código una vez realizado el modelado 3D. [10]

G90 G71	(cotas absolutas referidas al punto 0,0; Programación en mm)
G00 X0.0 Y0.0	(posicionamiento rápido lineal al punto 0,0 del plano XY)
G01 X10.0	(movimiento lineal de 10mm en la dirección X positiva)
G01 Y10.0	(movimiento lineal de 10mm en la dirección Y positiva)
G01 X0.0	(movimiento lineal de 10mm en la dirección X negativa)
G01 Y0.0	(movimiento lineal de 10mm en la dirección Y negativa)

Figura 1.10 Programa en G-Code [10]

Programación indexada:

Esta programación es muy utilizada en máquinas CNC, en especial las que implementan un cuarto eje en donde la mayoría se limitan únicamente a realizar este tipo de proceso. La programación indexada se basa en posicionar el divisor rotatorio, compuesto de una mesa giratoria en donde es colocado el elemento a fabricar, en un ángulo específico para posteriormente utilizar los tres ejes conocidos (X, Y, Z) en la que está ubicada la pieza de corte y de esa manera poder trabajar sobre la posición seleccionada. [11] Esta programación es muy útil en piezas complejas ya que permite realizar distintas operaciones en diferentes ángulos sin necesidad de buscarlos o definirlos de manera manual en la máquina en el plato divisor, sino que el proceso lo hace de forma automática [12].

Programación continua:

Este tipo de programación en las aplicaciones CAD-CAM toma lugar cuando, de manera simultánea, el husillo de la máquina CNC y el eje rotacional de la base realizan los movimientos y trayectorias necesarias para lograr manufacturar una pieza tridimensional. Por lo general, la programación continua suele ser más eficiente que la programación indexada debido a que se reduce la cantidad de posicionamientos que el sistema toma para llegar a los puntos de corte, es decir, que la herramienta realiza menos pasadas [12]. Sin embargo, a pesar de que resulte ser muy eficiente en comparación a la programación indexada, esta metodología resulta más difícil de implementar en la

realidad, ya que este sistema debe tener en consideración la posición del husillo, el posicionamiento de la base, y el nivel de desarrollo de la pieza al mismo tiempo para evitar errores durante el proceso de manufactura.

Existen algunos tipos de software con sistema CAD-CAM en donde el código a elaborar (que permite que exista una sinergia entre el movimiento de la base y el husillo de la máquina CNC) se genera de manera automática.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Procedimiento para el diseño

La metodología de diseño que se definió para el presente proyecto se puede observar en la Figura 2.1. En este esquema, se consideran los requerimientos y restricciones del cliente para posteriormente realizar el planteamiento de las alternativas de solución y, mediante un método de toma de decisiones, escoger la mejor solución.

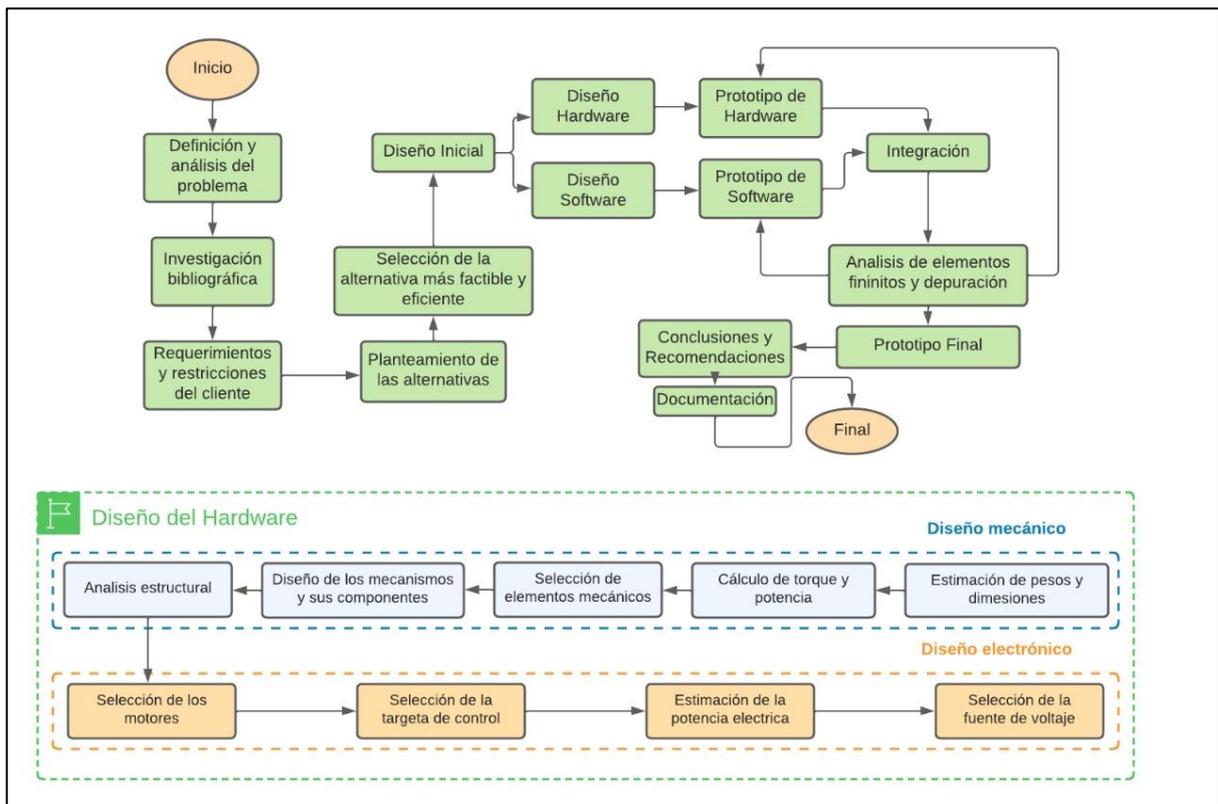


Figura 2.1 Planteamiento esquemático de la metodología de diseño

2.2 Alternativas de solución

Una matriz de solución es una herramienta utilizada para poder cuantificar la importancia de las diferentes características que se presentan en distintas soluciones para un mismo problema. De esta manera, se puede determinar por medio de valores numéricos la solución que más favorece a la resolución del problema.

Como se mencionó anteriormente, la solución debe estar arraigada a una impresora 3D de 4 ejes. En este caso, las soluciones escogidas para ser procesadas en la matriz de solución se diferencian en el sistema de transmisión utilizado y la localización del cuarto eje. La primera solución (solución A – Figura 2.2) se relaciona con un sistema de transmisión de banda dentada y un cuarto eje en el husillo del mecanismo. La segunda solución (solución B – Figura 2.3) se relaciona con un sistema de transmisión de banda dentada y un cuarto eje en la base de la impresora 3D. La tercera solución (solución C – Figura 2.4) se relaciona con un sistema de transmisión de tornillo sin fin y un cuarto eje en el husillo del mecanismo. La cuarta y última solución (solución D – Figura 2.5) se relaciona con un sistema de transmisión de tornillo sin fin y un cuarto eje en la base de la impresora 3D.

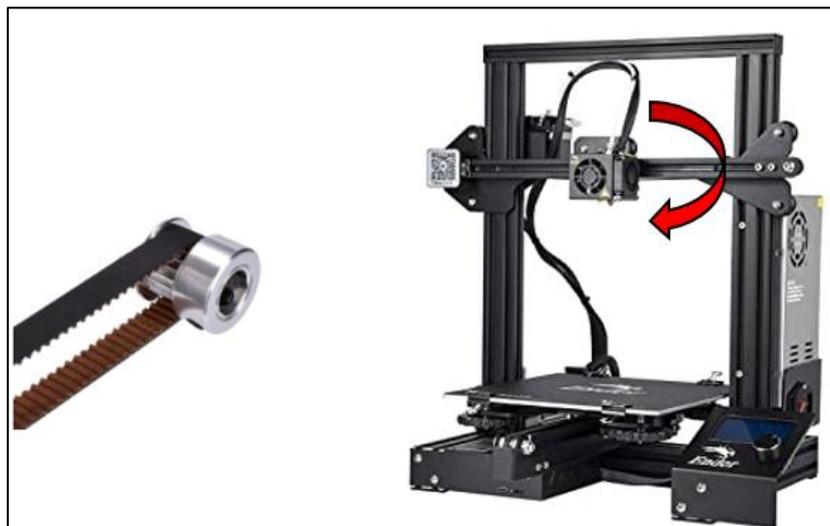


Figura 2.2 Sistema de transmisión de banda dentada y cuarto eje en husillo (A)

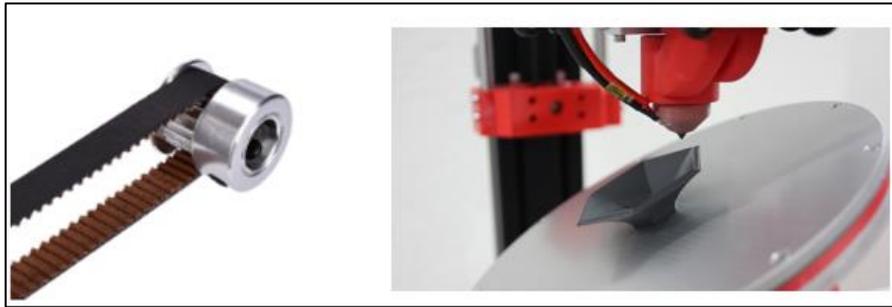


Figura 2.3 Sistema de transmisión de banda dentada y cuarto eje en la base (B)

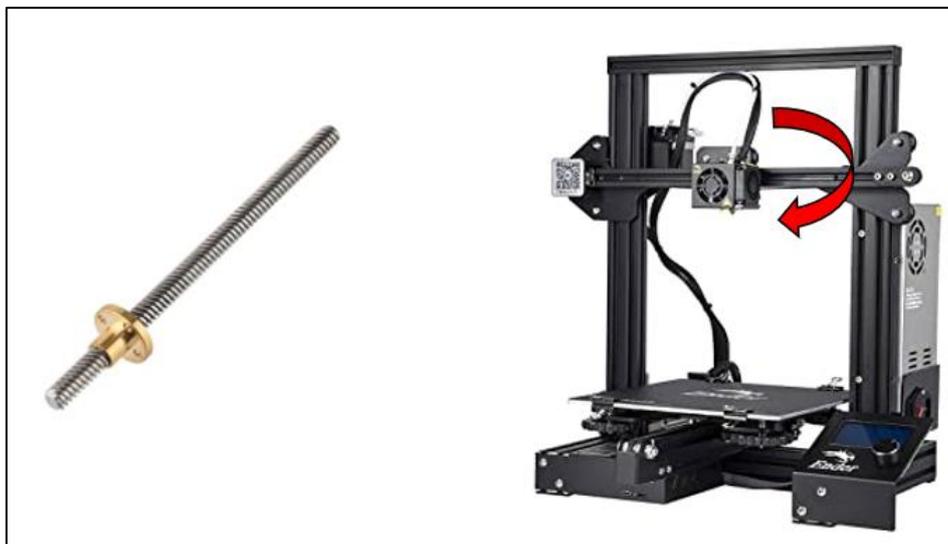


Figura 2.4 Sistema de transmisión de tornillo sin fin y cuarto eje en husillo (C)

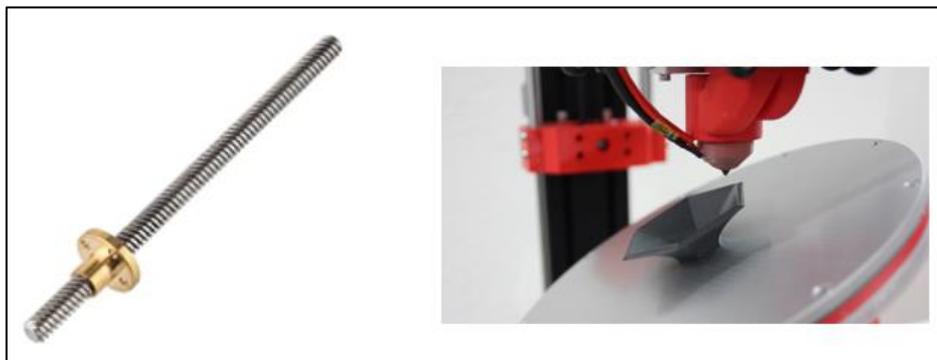


Figura 2.5 Sistema de transmisión de tornillo de potencia y cuarto eje en la base (D)

Las características que se tomaron en cuenta para cuantificar el valor de cada una de las soluciones con respecto a éstas fueron: control, dimensionamiento, seguridad, mantenimiento y costo.

Tabla 2.1 Resultado de matriz de soluciones

	Costo	Mantenimiento	Seguridad	Control	Dimensionamiento	SUMA
A	0.006	0.013	0.020	0.050	0.026	0.116
B	0.016	0.046	0.040	0.050	0.053	0.206
C	0.016	0.026	0.060	0.116	0.080	0.300
D	0.026	0.046	0.080	0.116	0.106	0.376

El resultado obtenido de este proceso se puede ver reflejado en la Tabla 2.1, en donde, por medio de ponderaciones para cada atributo seleccionado, se determinó que la solución D, la impresora con sistema de transmisión de tornillo sin fin y 4to eje en la base, es la más adecuada para la resolución del problema. El procedimiento de esta matriz de solución se encuentra en el APÉNDICE de este documento.

2.3 Diseño de la impresora 3D

Esta sección tiene como objetivo mostrar el procedimiento del diseño de cada uno de los componentes principales de la impresora 3D, los cuales son el cuarto eje, el eje X, el eje Y, y el eje Z; indicando cada una de las partes que conforman estos componentes.

Como diseño de forma se consideró emplear 2 GDL para el extrusor y 2 GDL para la base del sistema. El extrusor posee movimientos lineales en los ejes X y Z, mientras que la base posee un movimiento lineal en Y, y un movimiento rotacional en X.

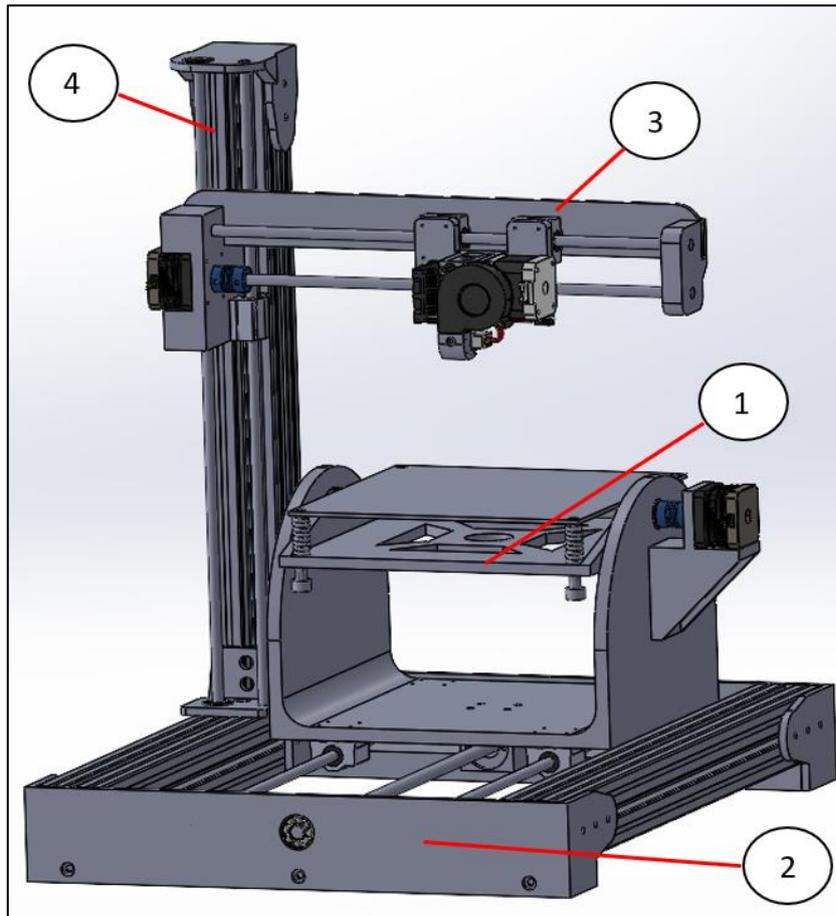


Figura 2.6 Diseño de impresora 3D con cuarto eje

Tabla 2.2 Componentes de impresora 3D

Enumeración	Componente
1	Cuarto eje
2	Eje Y
3	Eje X
4	Eje Z

2.3.1 Diseño del cuarto eje

El cuarto eje es el encargado de hacer rotar la base de la impresora 3D, de tal forma que se pueda generar la compensación lineal para agregar material termoplástico sobre el punto de interés de la pieza que se desea fabricar.

A continuación, se muestra una imagen que enumera cada uno de los componentes del cuarto eje. Posteriormente se presenta una tabla indicando el componente asociado a su respectiva enumeración.

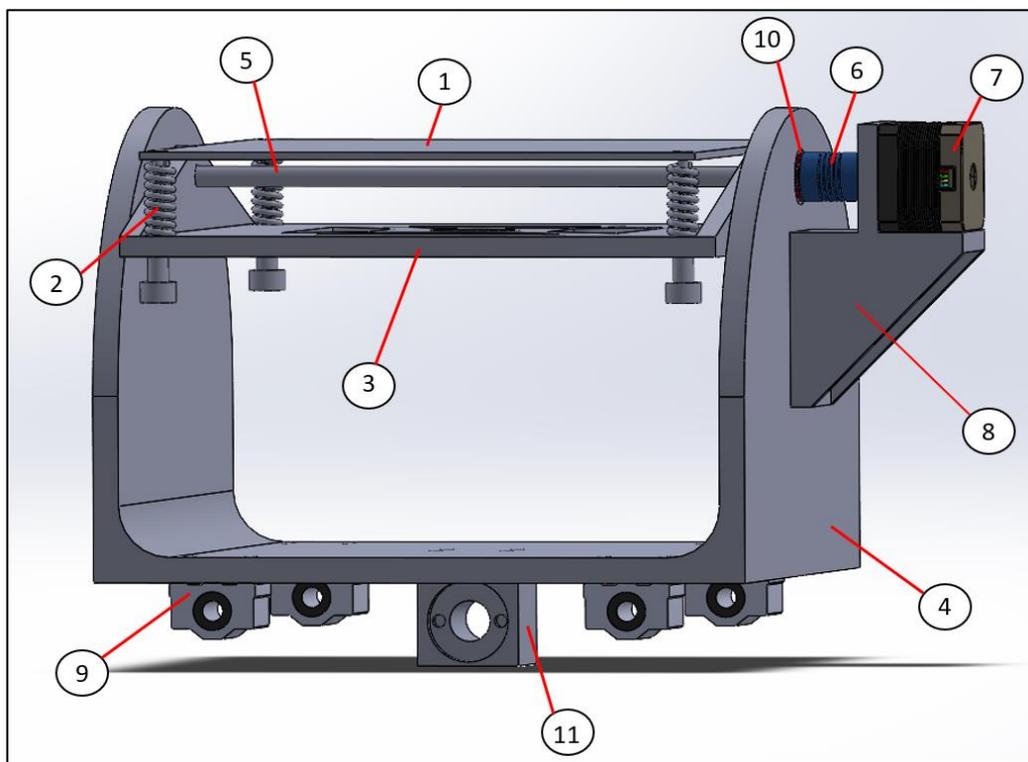


Figura 2.7 Estructura de cuarto eje coordinada en X

Tabla 2.3 Partes del cuarto eje

Enumeración	Componente
-------------	------------

1	Cama térmica
2	Perno con resorte
3	Base rotatoria del cuarto eje
4	Base deslizante del cuarto eje
5	Eje
6	Acople
7	Motor de paso
8	Soporte del motor de paso
9	Guías
10	Rodamientos
11	Husillo de bola

La cama térmica mantiene una distancia con la base rotatoria por medio de pernos con resortes ubicados en sus esquinas. Esto debido a que, cuando se empiezan a generar piezas tridimensionales por medio de la adición de materiales termoplásticos sobre la cama térmica, la base rotatoria (hecha de duralon) podría sufrir daños por las altas temperaturas de estos materiales si mantiene un contacto directo con la cama térmica. Este sistema se encuentra montado sobre una base deslizante, la cual genera el movimiento lineal en el eje Y del cuarto eje mediante el uso de dos ejes guía y un tornillo de potencia.

El cuarto eje tiene la capacidad de rotar la pieza por medio de la base rotatoria. Además, se compensa la distancia generada entre el centro de coordenadas y el punto de interés mediante la base deslizante, para así poder elaborar el proceso de impresión 3D requerido, como se muestra en las Figuras 2.8, 2.9 y 2.10.

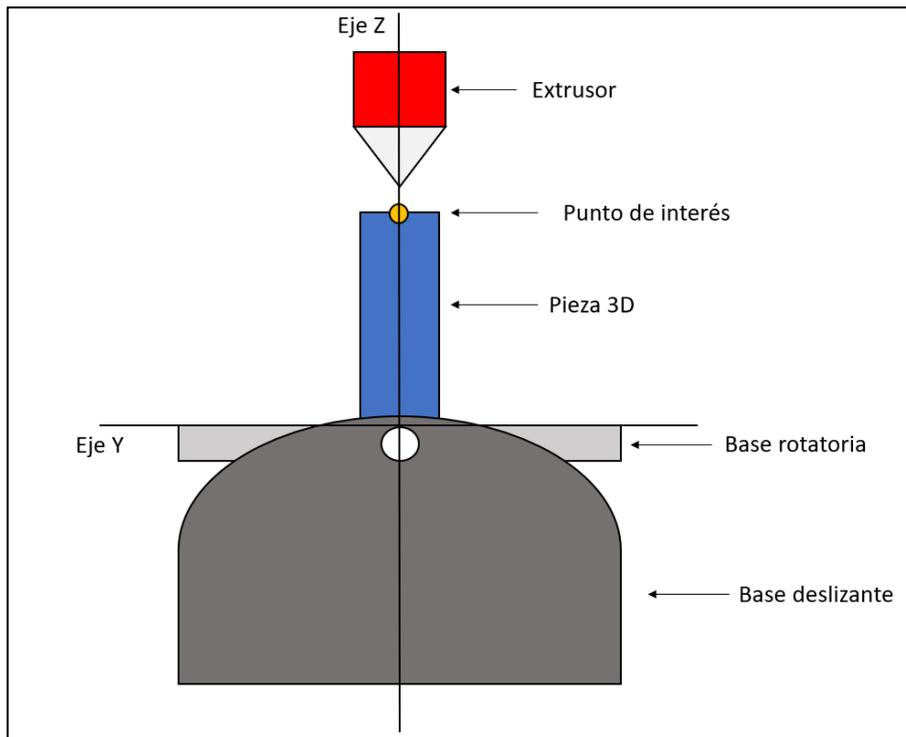


Figura 2.8 Posición inicial

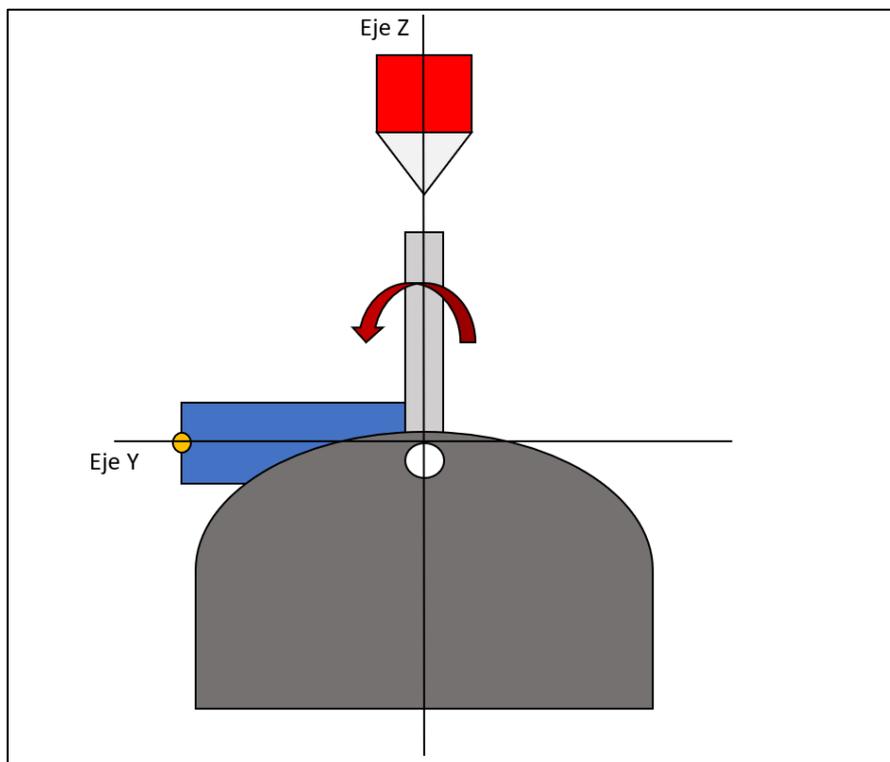


Figura 2.9 Rotación de la pieza

La masa de los elementos seleccionados por lo general está dada por los fabricantes. A continuación, se procede a calcular los pesos de estos componentes:

Primero, se seleccionó una cama térmica de aluminio con dimensiones 220 x 220 x 3 mm, del modelo MKS MK3-220, 12 a 24V de 200 W (Figura 2.11), de acuerdo con los requerimientos de diseño.



Figura 2.11 Cama térmica

Luego, se determinó la masa de la cama térmica por medio de su volumen y la densidad del material que la compone.

$$\rho_{base\ térmica} = \frac{m_{base\ térmica}}{V_{base\ térmica}}$$

$$m_{base\ térmica} = (\rho_{base\ térmica})(V_{base\ térmica})$$

$$m_{base\ térmica} = (2.7\ g/mm^3)(20\ cm)(20\ cm)(0.3\ cm)$$

$$m_{base\ térmica} = 324\ g$$

A partir de las dimensiones de la base térmica, se procedió a diseñar la base rotatoria de la cama, la cual posee la forma mostrada en la Figura 2.12.

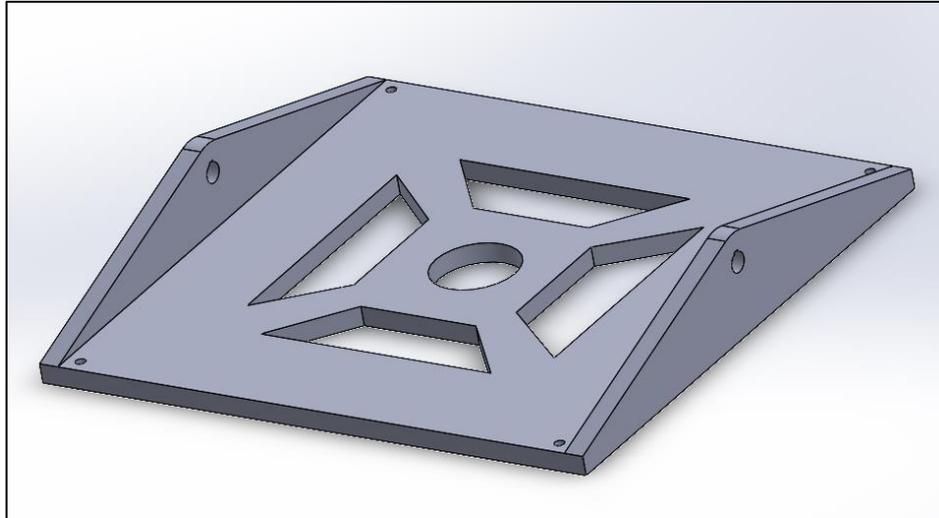


Figura 2.12: Base rotatoria

Esta base rotatoria será de duralon, el cual es un plástico de alta resistencia contra las vibraciones y posee una densidad de 1.14 g/cm^3 . Además, con las medidas de la pieza, se puede calcular la masa a partir de su volumen:

$$\rho_{base\ rotatoria} = \frac{m_{base\ rotatoria}}{V_{base\ rotatoria}}$$

$$m_{base\ rotatoria} = \rho_{base\ rotatoria} V_{base\ rotatoria}$$

$$m_{base\ rotatoria} = (1.14 \text{ g/cm}^3)(393.88 \text{ cm}^3)$$

$$m_{base\ rotatoria} = 449.026 \text{ g}$$

Esta base rotatoria se va a encontrar unida a la cama térmica por medio de pernos con resortes, y el cuarto eje pasará a través de rodamientos. Los rodamientos seleccionados

para dicha base son los 608-2Z de la marca SKF, que poseen placa de protección en ambos lados, 8mm de diámetro interno, 22mm de diámetro externo y una capacidad de carga estática y dinámica de 1.37 kN y 3.45 kN respectivamente. Los pernos que se seleccionaron son de tipo SPRING M4x30 debido a que son un estándar de soporte para las camas térmicas de las impresoras 3D.

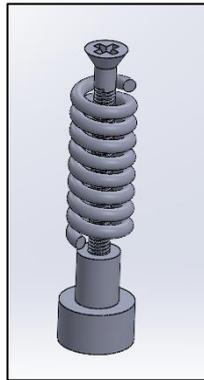


Figura 2.13 Perno con resorte

Ahora, se procede a calcular el diámetro del eje que se va a utilizar para rotar la base en la coordenada X. Para esto, se necesita obtener la fuerza total que actúa sobre el eje.

Para poder calcular la fuerza total que va a resistir el eje, se debe obtener la suma de las masas que se encuentran sobre el mismo y multiplicarlas por la gravedad. Como se mencionó anteriormente, se tendrá un volumen de impresión de 200 x 200 x 200 mm. El material que se va a utilizar para las impresiones 3D será el plástico PLA, cuya densidad es de 1.24 g/cm^3 . Por lo tanto, la masa total de una pieza que ocupe todo el volumen de impresión vendría a ser la siguiente:

$$\rho_{pieza} = \frac{m_{pieza}}{V_{pieza}}$$

$$m_{pieza} = \rho_{pieza} V_{pieza}$$

$$m_{pieza} = (1.24 \text{ g/cm}^3) (20 \text{ cm})(20 \text{ cm})(20 \text{ cm})$$

$$m = 9920 \text{ g}$$

Entonces, la sumatoria de las masas sobre el cuarto eje es:

$$\sum m = m_{base \text{ térmica}} + m_{base \text{ rotatoria}} + m_{pieza} \quad (2.2)$$

$$\sum m = 393 \text{ g} + 449.026 \text{ g} + 9920 \text{ g}$$

$$\sum m = 10762.026 \text{ g} = 10.762 \text{ Kg}$$

Por lo tanto, la fuerza total que soporta el cuarto eje sería:

$$F_{total} = m_{total}g \quad (2.3)$$

$$F_{total} = (10.762 \text{ Kg}) (9.8 \text{ m/s}^2)$$

$$F_{total} = 105.468 \text{ N}$$

Una vez calculada la fuerza total, se obtiene el diagrama de fuerzas sobre el eje (Figura 2.14).

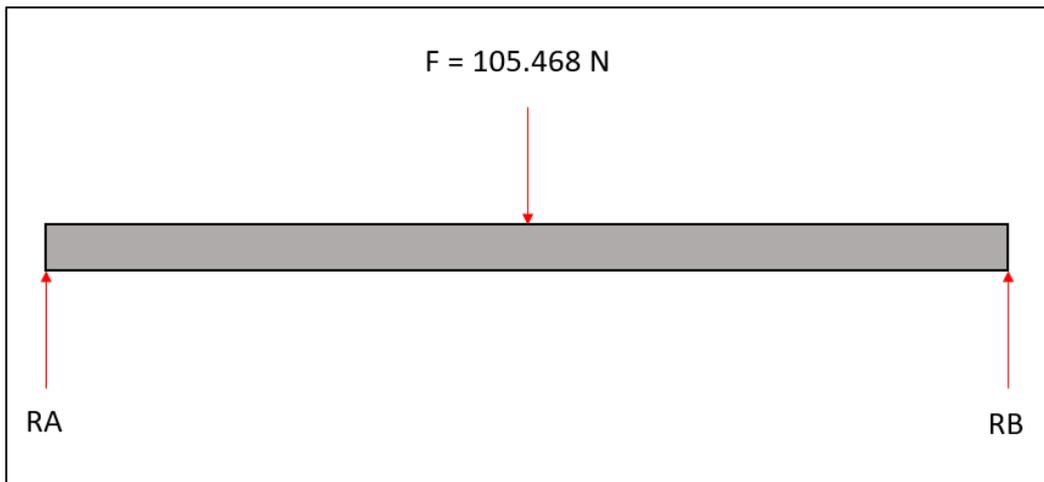


Figura 2.14 Diagrama de cuerpo libre, eje de rotación en coordenada X

Se pueden observar 2 reacciones a los extremos del eje, generadas por el apoyo en los rodamientos, además, la fuerza proveniente del peso de los elementos que se ubican sobre el eje, la cual se va a considerar como una fuerza puntual en el centro del mismo, ya que representaría el caso más crítico. A partir de esto, se calcula el diámetro mínimo que debería tener el eje para resistir dicha fuerza.

Se establece la sumatoria de fuerzas en Y:

$$\sum F_y = 0 \quad (2.4)$$

Al ser la fuerza F aplicada en el centro del eje, se puede decir que tanto la reacción RA como la reacción RB son de igual magnitud, y, por lo tanto, cada una sería equivalente a la mitad del valor de la fuerza, es decir, F/2.

$$RA = 52.734 \text{ N}$$

$$RB = 52.734 \text{ N}$$

Con los valores obtenidos previamente, se procede a realizar los cálculos y diagramas de fuerza cortante y momento flector correspondientes.

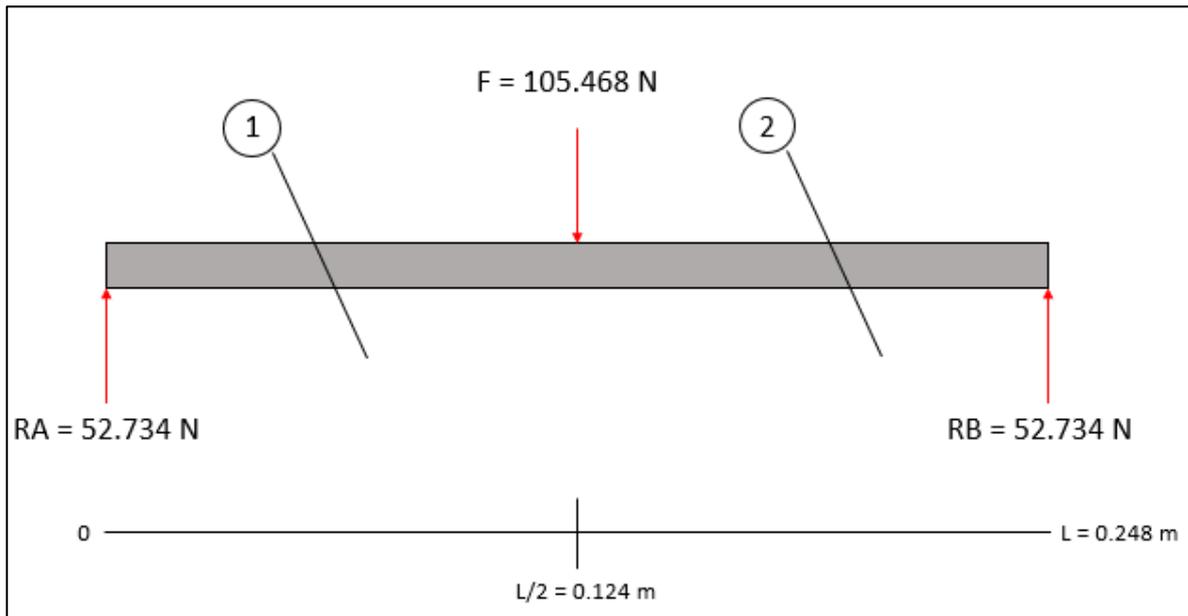


Figura 2.15 Puntos de corte en diagrama de cuerpo libre, eje de rotación en coordenada X

La figura 2.15 muestra el diagrama de cuerpo libre correspondiente al eje guía en la coordenada X con los puntos en donde se van a realizar los cortes necesarios para el análisis de fuerzas y momentos respectivos. Se obtiene lo siguiente:

Corte 1:

$$V_1 = 52.734 \text{ N}$$

$$M_1 = 52.734(x); \quad x = 0.124 \text{ m}$$

$$M_1 = 52.734(0.124) = 6.539 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Corte 2:

$$V_2 = 52.734 - 105.468 = -52.734 \text{ N}$$

$$M_2 = 52.4(x) - 105.468 \left(x - \frac{L}{2} \right); x = 0.248$$

$$M_2 = 52.4(0.248) - 105.468(0.124) = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

El valor de momento flector máximo que se produce sobre el eje es de $6.539 \text{ N} \cdot \text{m}$.

A continuación, las Figuras 2.16 y 2.17 muestran los esfuerzos cortantes y momentos flectores a lo largo del eje respectivamente.

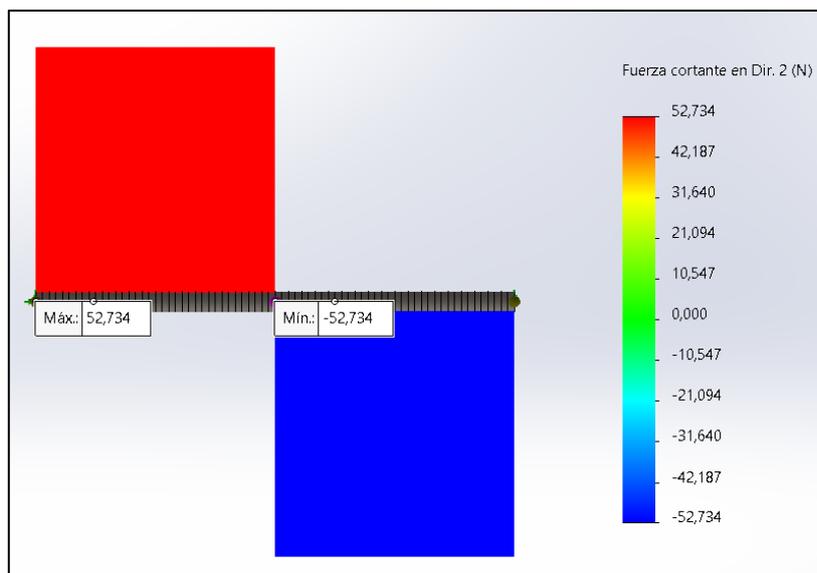


Figura 2.16 Diagrama de fuerza cortante sobre el eje de rotación en coordenada X

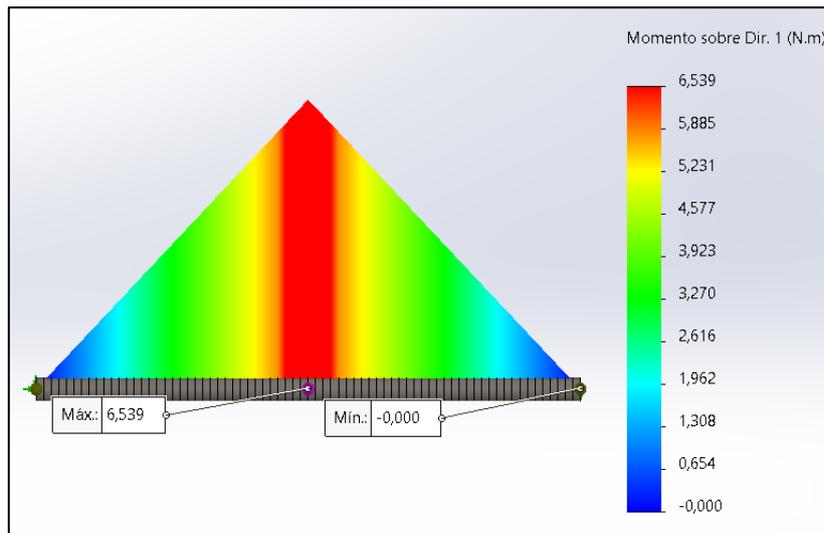


Figura 2.17 Diagrama de momentos sobre el eje de rotación en coordenada X

Para obtener el diámetro del eje se necesita el esfuerzo normal máximo que soporta el material del cual se encuentra compuesto dicho elemento, el cual se determina con la ecuación del esfuerzo máximo:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{S_y}{n} \quad (2.5)$$

$$S_y \left(\frac{N}{mm^2} \right) = 310 \left[\begin{array}{l} \text{Resistencia a la fluencia del material,} \\ \text{acero AISI – SAE 1045} \end{array} \right]$$

$$n = 2 \text{ [Factor de seguridad seleccionado, entre 1.5 y 2.5]}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{310 \text{ N/mm}^2}{2} = 155 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Se calcula el módulo de resistencia del material seleccionado con la siguiente fórmula:

$$S = \frac{M}{\sigma_{\text{máx}}} \quad (2.6)$$

$$M = 6.539 \text{ N} \cdot \text{m} \text{ [Momento flector máximo generado]}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 155 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ [Esfuerzo normal máximo del material]}$$

$$S = \frac{(6.539 \text{ N} \cdot \text{m}) \left(\frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} \right)}{155 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 42.187 \text{ mm}^3$$

Finalmente, el diámetro del eje se lo determina con la siguiente expresión:

$$D_G = \sqrt[3]{\frac{32 * S}{\pi}} \quad (2.7)$$

$$S = 43.89 \text{ mm}^3 \text{ [Módulo de resistencia del material]}$$

$$D_G = \sqrt[3]{\frac{32 * 42.187 \text{ mm}^3}{\pi}} = 7.54 \text{ mm}$$

Por facilidad de adquisición se selecciona un diámetro cercano disponible de 8 mm.

Ahora, se calcula el torque requerido para el cuarto eje:

$$T = F * d \quad (2.8)$$

$$T = (105.468 \text{ N})(0.008 \text{ m})$$

$$T = 0.84 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Se obtiene que, para hacer girar el cuarto eje se necesita al menos $0.84 \text{ N} \cdot \text{m}$.

2.3.2 Diseño del eje Y

Posterior al diseño del cuarto eje, se diseñó la estructura del eje Y, la cual sería encargada de desplazar al eje rotatorio a lo largo de su dimensión. En la Figura 2.18 se muestran las partes de este componente.

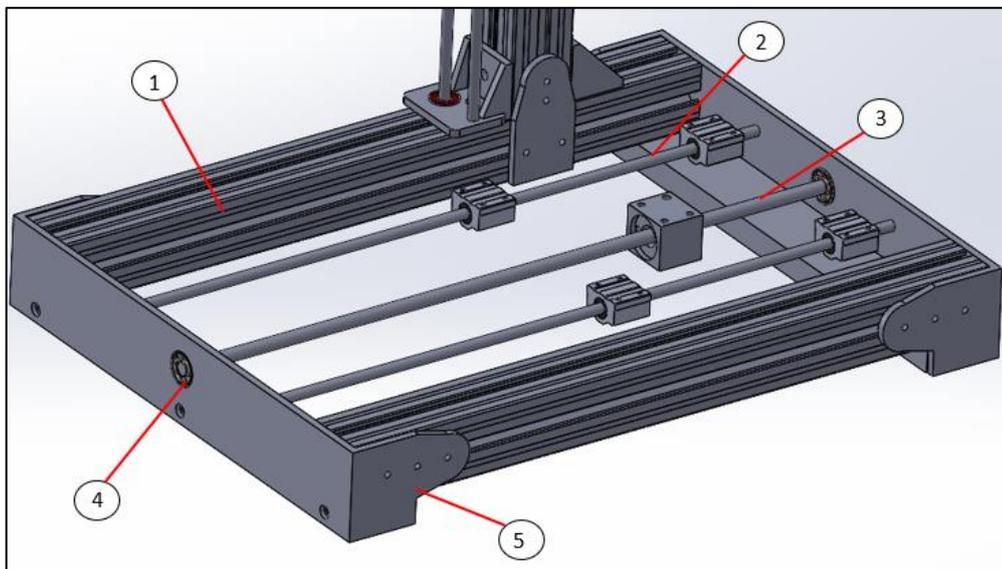


Figura 2.18 Estructura del eje Y

Tabla 2.4 Partes del eje Y

ENUMERACIÓN	COMPONENTE
1	Perfiles
2	Ejes guía
3	Tornillo de potencia
4	Rodamientos
5	Soporte de estructura

Primero, se diseñó la base deslizante de la cama térmica a partir de las medidas previamente establecidas para los demás componentes. La forma de la base se presenta en la Figura 2.19.

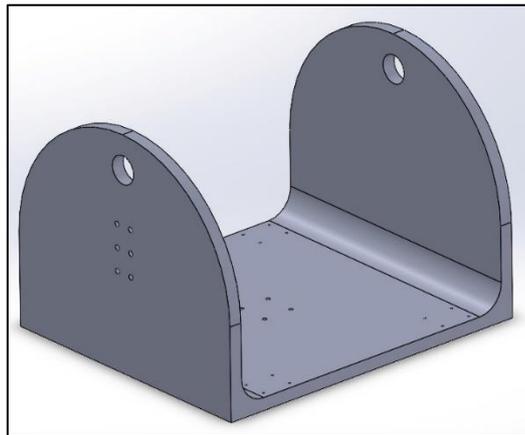


Figura 2.19 Base deslizante

Al igual que la base rotatoria, la base deslizante será fabricada de duralon, por lo que, una vez obtenido el volumen de este diseño podemos obtener la masa de dicha base y de sus componentes utilizando la ecuación 2.1:

$$\rho_{base\ deslizante} = \frac{m_{base\ deslizante}}{V_{base\ deslizante}}$$

$$m_{base\ deslizante} = \rho_{base\ deslizante} V_{base\ deslizante}$$

$$m_{base\ deslizante} = (1.14 \text{ g/cm}^3)(1253.859 \text{ cm}^3)$$

$$m_{base\ deslizante} = 1429.399\ g = 1.429\ Kg$$

A un extremo de la base deslizante, se va a montar la estructura de soporte del motor que va a hacer rotar al cuarto eje (Figura 2.20). Entre el motor y el eje se encontraría un acople flexible mecánico.

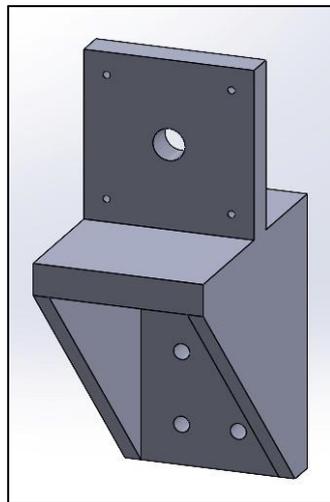


Figura 2.20 Soporte del motor

Calculamos la masa del soporte del motor con la ecuación 2.1:

$$\rho_{SM} = \frac{m_{BSM}}{V_{BSM}}$$

$$m_{SM} = \rho_{BSM} V_{BSM}$$

$$m_{SM} = (1.14\ g/cm^3)(71.411\ cm^3)$$

$$m_{BSM} = 81.40854\ g = 0.0814\ Kg$$

Las masas del motor, el acople, el eje, la guía del tornillo de potencia (GTP) y los bloques deslizantes (BD) de acuerdo con el fabricante son de 1.1 Kg, 0.03 Kg, 0.1068 Kg, 0.15 Kg y 0.3 Kg respectivamente. Con esto, se procede a obtener la fuerza total que actuará sobre el tornillo sin fin que desplaza al cuarto eje sobre el eje Y.

$$\sum m = m_{motor} + m_{acople} + m_{eje} + m_{GTP} + m_{ABM} + m_{BD} + m_{base\ deslizante} \quad (2.9)$$

$$\sum m = 0.1068 + 1.429 + 0.0814 \text{ g} + 1.1 + 0.15 + 0.3 + 0.03$$

$$\sum m = 3.1972 \text{ Kg}$$

$$F2 = mg$$

$$F2 = (3.1972 \text{ Kg}) (9.8 \text{ m/s}^2)$$

$$F2 = 31.332 \text{ N}$$

La fuerza total aplicada en el sistema de transmisión de potencia del eje Y, va a ser la suma de la fuerza obtenida previamente con la fuerza que actúa sobre el eje rotacional.

$$F_{total} = F1 + F2 \quad (2.10)$$

$$F_{total} = 105.468 \text{ N} + 31.332 \text{ N}$$

$$F_T = 136.8 \text{ N}$$

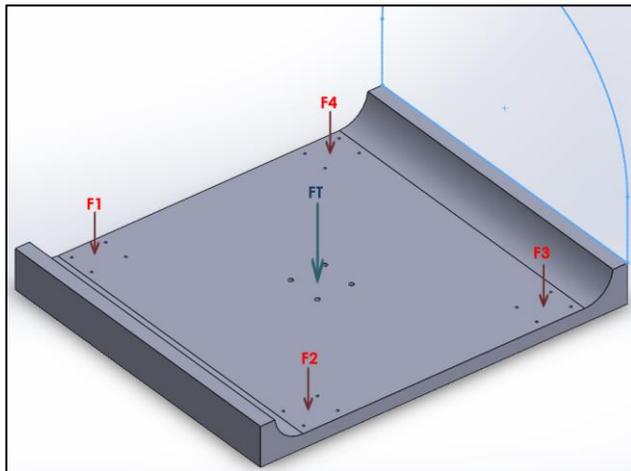


Figura 2.21 Fuerzas aplicadas sobre base deslizante

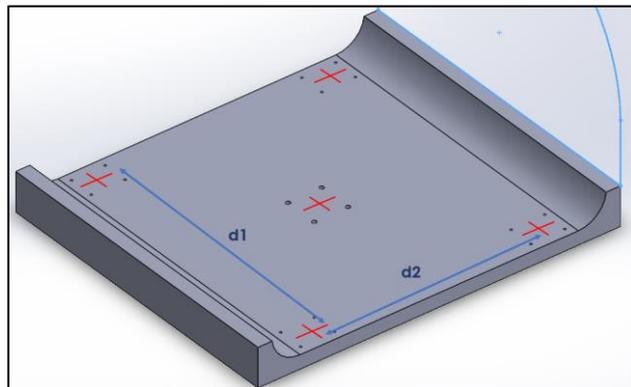


Figura 2.22 Medidas entre los centros de las uniones con los ejes guía y el tornillo de potencia en coordenada Y

Debido a que los ejes guías van a contar con el apoyo de dos rieles de soporte, la carga aplicada en los mismos va a ser la mitad de la fuerza total calculada.

$$F_{Total} = \frac{F_T}{2}$$

$$F_{Total} = \frac{136,8}{2} = 68,4$$

En el sistema mostrado en la Figura 2.21, se presentan cargas normales, una en cada punto de contacto, debido al peso de la estructura que deben soportar. Para calcular dichas cargas generadas se emplea el uso de la conservación de la relación de distancias:

$$F1 = F4 = \frac{F_{Total}}{2}$$

$$F2 = F3 = \frac{F_{Total}}{2}$$

$$d1 = 190 \text{ mm}$$

$$d2 = 164 \text{ mm}$$

$$F1 = F4 = 34.2 \text{ N}$$

$$F2 = F3 = 34.2 \text{ N}$$

Para las guías de la coordenada Y se utilizan ejes redondos de acero AISI – SAE 1045. La carga aplicada en cada eje guía va a estar ubicada en los puntos de contacto, por lo que, se disponen las distancias: $d1 = d3 = 172 \text{ mm}$ y $d2 = 95 \text{ mm}$, en donde estarán aplicadas dichas fuerzas que corresponden a $F = 34.2 \text{ N}$, la cual, es la carga máxima a resistir por dichos ejes guías en los puntos establecidos anteriormente.

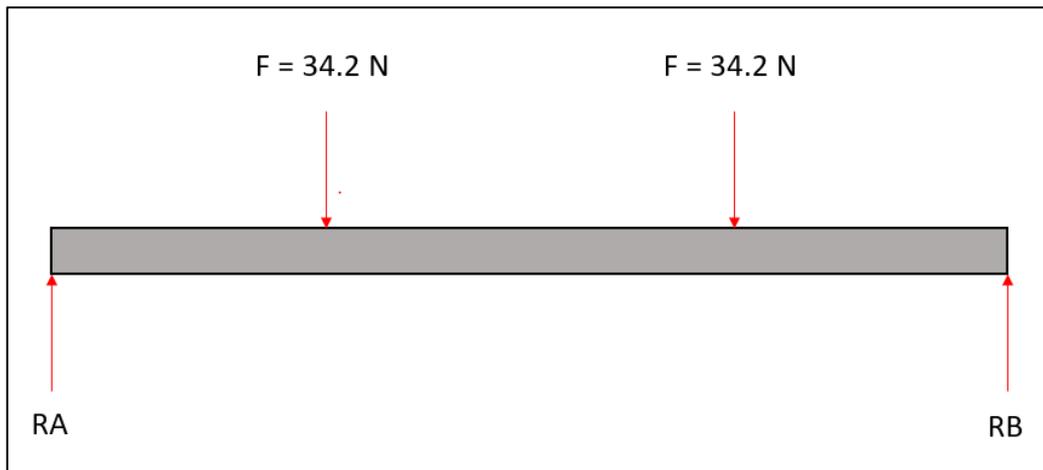


Figura 2.23 Diagrama de fuerzas sobre el eje coordenada Y (guías)

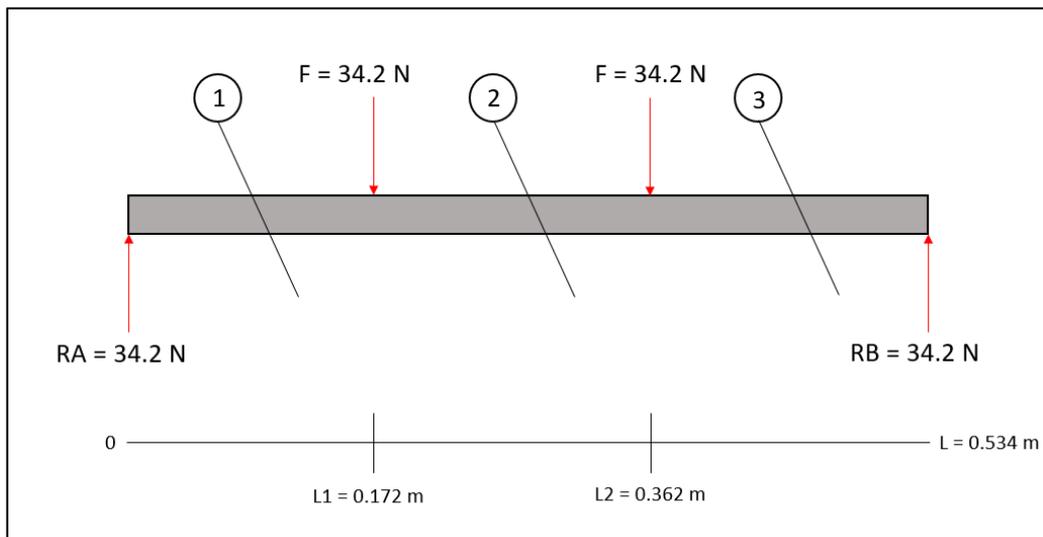


Figura 2.24 Diagrama de cortes sobre el eje coordenada Y (guías)

Corte 1:

$$V_1 = 34.2 \text{ N}$$

$$M_1 = 34.2(x); \quad x = 0.172 \text{ m}$$

$$M_1 = 34.2(0.172) = 5.8824 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Corte 2:

$$V_2 = 34.2 - 34.2 = 0 \text{ N}$$

$$M_2 = 34.2(x) - 34.2(x - L1); \quad x = 0.362 \text{ m}$$

$$M_2 = 34.2(0.362) - 34.2(0.190) = 5.8824 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Corte 3:

$$V_2 = 0 - 34.2 = -34.2 \text{ N}$$

$$M_2 = 34.2(x) - 34.2(x - L2) + 34.2(x - L1); \quad x = 0.534 \text{ m}$$

$$M_2 = 34.2(0.534) - 34.2(0.362) - 34.2(0.172) = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

A continuación, en las Figuras 2.25 y 2.26 se muestran los diagramas de fuerza cortante y momento flector que actúan a lo largo de los ejes guías.

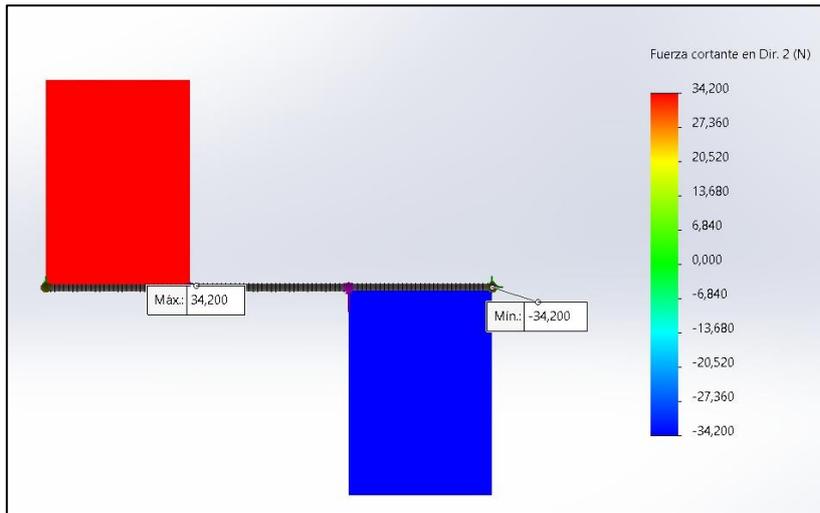


Figura 2.25 Diagrama de fuerza cortante sobre los ejes guía en coordenada Y

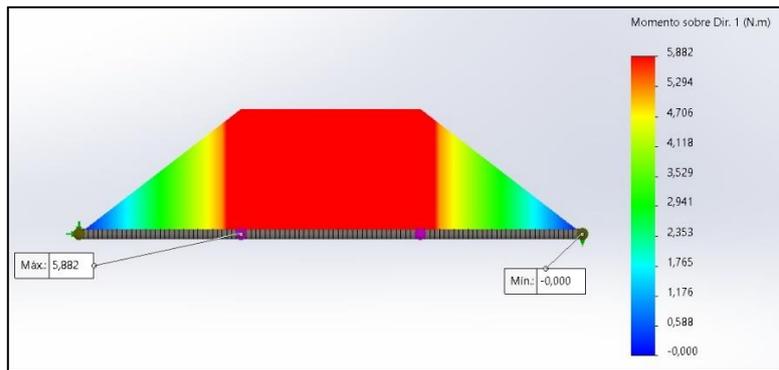


Figura 2.26 Diagrama de momento flector sobre los ejes guía en coordenada Y

Una vez obtenido el momento máximo sobre el eje guía, se procede a calcular el diámetro mínimo a partir de la ecuación 2.5:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{S_y}{n}$$

$$S_y \left(\frac{N}{mm^2} \right) = 310 \left[\begin{array}{l} \text{Resistencia a la fluencia del material,} \\ \text{acero AISI – SAE 1045} \end{array} \right]$$

$$n = 2 \text{ [Factor de seguridad seleccionado, entre 1.5 y 2.5]}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{310 \text{ N/mm}^2}{2} = 155 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Se calcula el m3dulo de resistencia del material seleccionado con la ecuaci3n 2.6:

$$S = \frac{M}{\sigma_{m\acute{a}x}}$$

$$M = 5.8824 \text{ N} \cdot \text{m} \text{ [Momento flector m\acute{a}ximo generado]}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 155 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ [Esfuerzo normal m\acute{a}ximo del material]}$$

$$S = \frac{(5.8824 \text{ N} \cdot \text{m}) \left(\frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} \right)}{155 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 37.951 \text{ mm}^3$$

Se determina el di\ameetro del eje con la ecuaci3n 2.7:

$$D_G = \sqrt[3]{\frac{32 * S}{\pi}}$$

$$S = 37.951 \text{ mm}^3 \text{ [M3dulo de resistencia del material]}$$

$$D_G = \sqrt[3]{\frac{32 * 37.951 \text{ mm}^3}{\pi}} = 7.28 \text{ mm}$$

Por facilidad de adquisici3n se selecciona un di\ameetro cercano disponible de 8 mm.

Se procede a calcular la fuerza total que actuará sobre el tornillo de potencia, la cual es igual a la suma de las fuerzas que actúan sobre los rieles de los ejes guías:

$$F_{Total} = 4(34.2 N)$$

$$F_{Total} = 136.8 N$$

Se calcula el área transversal del tornillo de potencia:

$$\frac{\sigma}{n} = \frac{F_{Total}}{A} \quad (2.11)$$

$$\sigma \left(\frac{Lb}{in^2} \right) = 1000 \left[\begin{array}{l} \text{Esfuerzo admisible del material,} \\ \text{ACERO AISI – SAE 1045} \end{array} \right]$$

$$n = 3.5 \text{ [Factor de seguridad escogido]}$$

$$A = \frac{F_{Total} * n}{\sigma} = \frac{\left(136.8 N \frac{1 Lb}{4.448 N} \right) * 3.5}{1000 \frac{Lb}{in^2}} = 0.1076 in^2$$

Finalmente, se calcula el diámetro del tornillo de potencia:

$$D_T = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} \quad (2.12)$$

$$D_T = \sqrt{\frac{4 * 0.1076 \text{ in}^2}{\pi}} = 0.37 \text{ in} = 9.398 \text{ mm}$$

Por facilidad de adquisición se va a seleccionar un diámetro de 10 mm. Además, se escogió por criterio un paso de 3 mm.

Para el cálculo del torque requerido en el tornillo de potencia del eje Y se necesita determinar la carga axial, la cual se calcula con la carga axial de husillo de bolas THK:

$$F_a = \mu \cdot mg \tag{2.13}$$

Donde:

μ : Coeficiente de fricción de la superficie de la guía (-)

m : masa transferida

g : aceleración gravitacional

Cuyos datos son los siguientes:

$$\mu = 0.01 \text{ (Coeficiente de fricción giratoria para husillo de bola)}$$

$$mg = 136.8 \text{ N (Fuerza ejercida en el eje Y)}$$

$$F_a = 0.01 * 136.8 \text{ N} = 1.368 \text{ N}$$

La resistencia a la rodadura es prácticamente despreciable, ya que el hecho de utilizar husillo de bolas proporciona un coeficiente de fricción muy bajo, a esto se suma el poco peso del sistema. Transformando la fuerza a un par mediante un husillo de paso 2 mm y un rendimiento del 90 % por medio de la siguiente ecuación:

$$T = \frac{F_a \cdot Ph}{2\pi \cdot h_1} \quad (2.14)$$

Donde:

Ph : Paso del husillo de alimentación

η_1 : Eficiencia positiva del husillo de alimentación

$$T = \frac{0.1.368N \cdot (3 \cdot 10^{-3})m}{2\pi \cdot 0.90} = 7.26 \cdot 10^{-4}Nm$$

2.3.3 Diseño del eje X

Se procede a diseñar el eje X del sistema. Para esto, se necesitan obtener los diámetros del eje guía y del tornillo de potencia de esta coordenada.

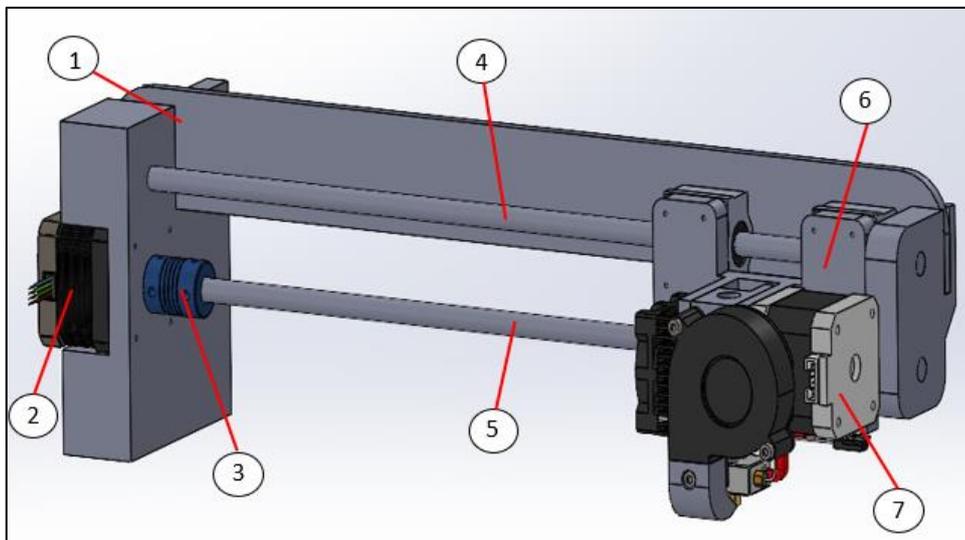


Figura 2.27 Estructura del eje X

Tabla 2.5 Partes del eje X

ENUMERACIÓN	COMPONENTE
1	Soporte de estructura
2	Motor de eje X
3	Acople
4	Eje guía
5	Tornillo de potencia
6	Bloques deslizantes
7	Extrusor

Para determinar el diámetro del eje guía en la coordenada X se debe obtener la fuerza que este elemento va a soportar. Para obtener esta fuerza se debe calcular el peso de los elementos que se encuentran sobre este componente, los cuales son: el soporte del extrusor, el extrusor, el motor y el bloque deslizante. A continuación, se calcula la masa del soporte del extrusor (SE), hecho de aluminio utilizando la ecuación 2.1.

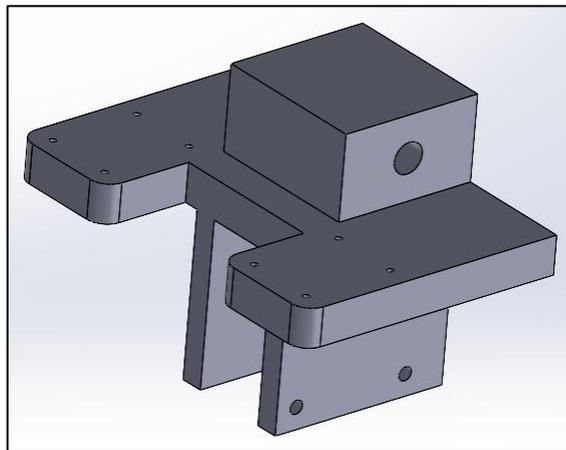


Figura 2.28 Soporte de extrusor coordenada X

$$\rho_{SE} = \frac{m_{SE}}{V_{SE}}$$

$$m_{SE} = \rho_{SE} V_{SE}$$

$$m_{SE} = (2.7 \text{ g/cm}^3)(116.4469 \text{ cm}^3)$$

$$m_{SE} = 314.4 \text{ g} = 0.3144 \text{ Kg}$$

La masa del extrusor es de 1.35 Kg, mientras que la del motor es de 1.1 Kg.

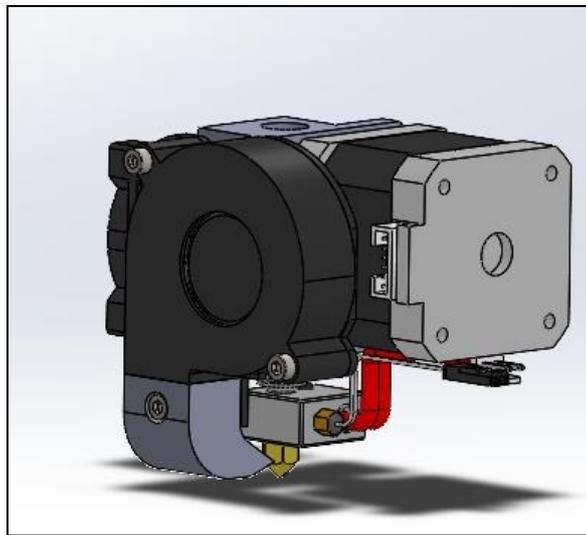


Figura 2.29 Extrusor directo Mk8 y motor

La masa de los 2 bloques deslizantes es de 0.15 Kg. Estos bloques trapezoidales poseen un movimiento suave, una baja fricción, larga vida útil y rigidez elevada. Además, poseen rodamientos de bola y son de aluminio. Su carga nominal es de 370 N, al igual que la de los ejes guías.

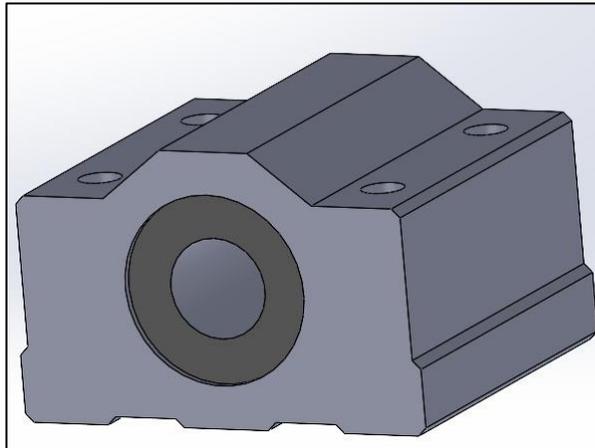


Figura 2.30 Bloque deslizante SCS8/10/12/16UU

Se calcula la masa total y se multiplica el resultado por la gravedad para así obtener el peso total que se ejerce sobre el eje guía.

$$\sum m = m_{SE} + m_{extrusor} + m_{motor} + m_{BD} \quad (2.15)$$

$$\sum m = 0.3144 + 1.35 + 1.1 + 0.15$$

$$\sum m = 2.9144 \text{ Kg}$$

Por lo tanto, la fuerza sería:

$$F = mg = (2.9144 \text{ Kg}) (9.8 \text{ m/s}^2) = 28.5611 \text{ N}$$

Una vez obtenida la fuerza que actúa sobre el eje guía de la coordenada X, se procede a calcular el diámetro requerido de dicho eje.

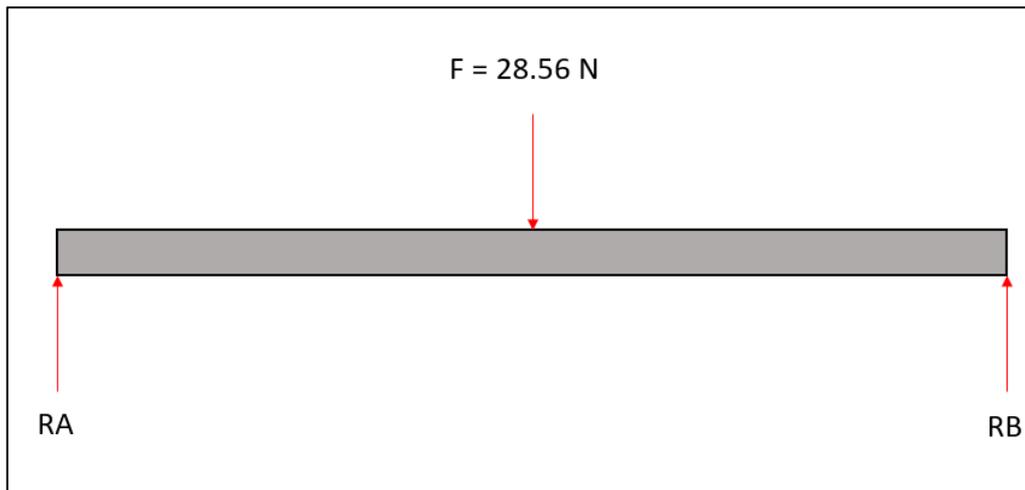


Figura 2.31 Diagrama de fuerzas sobre el eje X (guías)

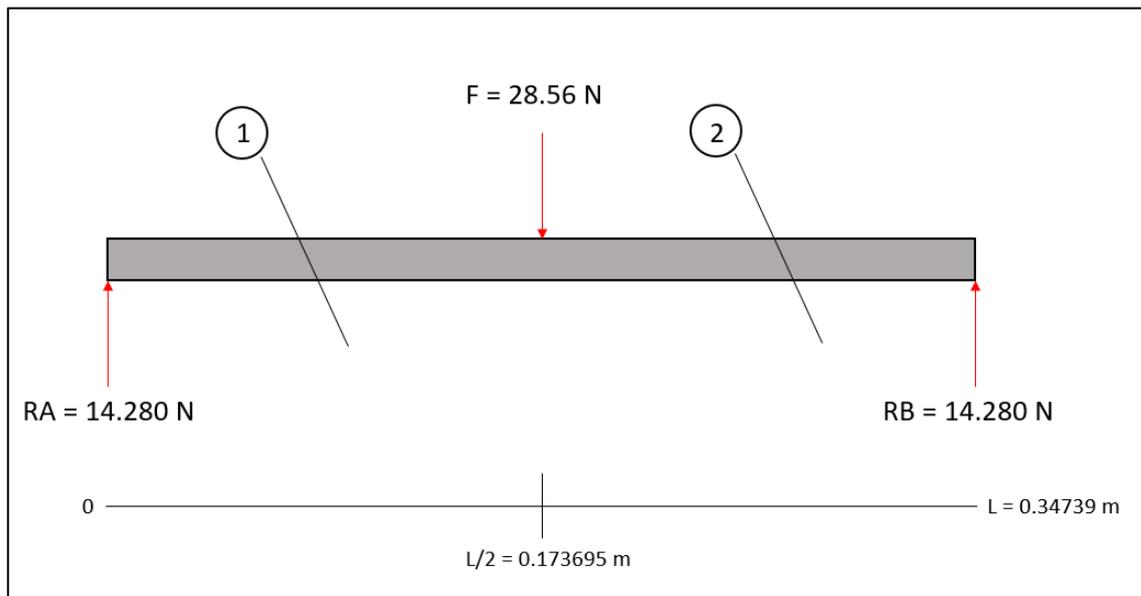


Figura 2.32 Diagrama de cortes sobre el eje X (guías)

Corte 1:

$$V_1 = 14.280 \text{ N}$$

$$M_1 = 14.280(x); \quad x = 0.173695 \text{ m}$$

$$M_1 = 14.280(0.173695) = 2.48 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Corte 2:

$$V_2 = 14.28 - 28.56 = 14.28 \text{ N}$$

$$M_2 = 14.28(x) - 14.28(x - L1); \quad x = 0.34739 \text{ m}$$

$$M_2 = 14.28(0.34739) - 14.28(0.173695) = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

La Figuras 2.33 y 2.34 muestran los diagramas de fuerza cortante y momento flector que actúan a lo largo del eje guía:

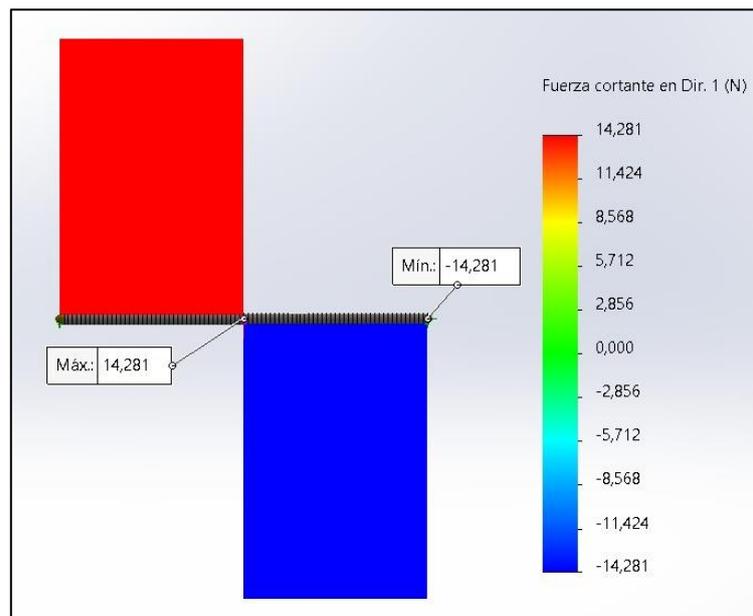


Figura 2.33 Diagrama de fuerza cortante sobre el eje guía en coordenada X

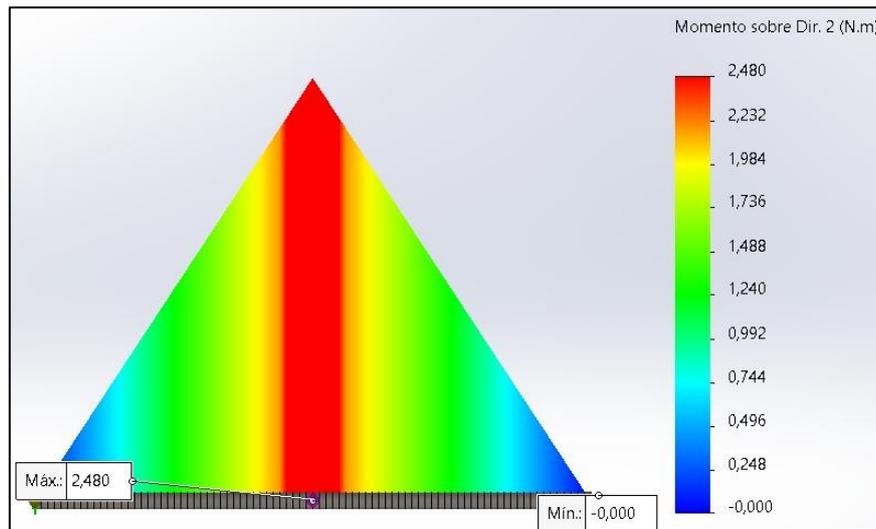


Figura 2.34 Diagrama de momento flector sobre el eje guía en coordenada X

Se calcula el diámetro del eje guía por medio del momento máximo obtenido, comenzando por la ecuación 2.5 de esfuerzo máximo:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{S_y}{n}$$

$$S_y \left(\frac{N}{mm^2} \right) = 310 \left[\begin{array}{l} \text{Resistencia a la fluencia del material,} \\ \text{acero AISI – SAE 1045} \end{array} \right]$$

$$n = 2 \text{ [Factor de seguridad seleccionado, entre 1.5 y 2.5]}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{310 \text{ N/mm}^2}{2} = 155 \frac{N}{mm^2}$$

Se obtiene el módulo de resistencia del material seleccionado empleando la ecuación 2.6:

$$S = \frac{M}{\sigma_{m\acute{a}x}}$$

$$M = 2.48 \text{ N} \cdot \text{m} \text{ [Momento flector máximo generado]}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 155 \frac{N}{mm^2} [\text{Esfuerzo normal m\acute{a}ximo del material}]$$

$$S = \frac{(2.48 N \cdot m) \left(\frac{1000 mm}{1 m} \right)}{155 \frac{N}{mm^2}} = 16 mm^3$$

Se determina el diámetro del eje con la ecuación 2.7:

$$D_G = \sqrt[3]{\frac{32 * S}{\pi}}$$

$$S = 43.89 mm^3 [\text{M\acute{o}dulo de resistencia del material}]$$

$$D_G = \sqrt[3]{\frac{32 * 16 mm^3}{\pi}} = 5.46 mm$$

Por facilidad de adquisición se selecciona un diámetro cercano disponible de 8 mm.

Se procede a calcular el diámetro que debe tener el tornillo de potencia en la coordenada X. A continuación, se obtiene el área transversal del tornillo de potencia utilizando la ecuación 2.11:

$$\frac{\sigma}{n} = \frac{F_{Total}}{A}$$

$$\sigma \left(\frac{Lb}{in^2} \right) = 1000 \left[\begin{array}{l} \text{Esfuerzo admisible del material,} \\ \text{ACERO AISI – SAE 1045} \end{array} \right]$$

$$n = 3.5 [\text{Factor de seguridad escogido}]$$

$$A = \frac{F_{Total} * n}{\sigma} = \frac{\left(28.56 N \frac{1 Lb}{4.448 N}\right) * 3.5}{1000 \frac{Lb}{in^2}} = 0.0224 in^2$$

Calculando el diámetro del tornillo de potencia con la ecuación 2.12:

$$D_T = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}$$

$$D_T = \sqrt{\frac{4 * 0.0224 in^2}{\pi}} = 0.16 in = 4.29 mm$$

Por facilidad de adquisición se va a seleccionar un diámetro de 8 mm. Además, se escogió por criterio un paso de 2 mm.

Para el cálculo del torque requerido en el tornillo de potencia del eje X se necesita determinar la carga axial, la cual se calcula con la expresión 2.13:

$$F_a = \mu \cdot mg$$

Cuyos datos son los siguientes:

$$\mu = 0.01 \text{ (Coeficiente de fricción giratoria para husillo de bola)}$$

$$mg = 28.56 N \text{ (Fuerza ejercida en el eje Y)}$$

$$F_a = 0.01 * 28.56 N = 0.2856 N$$

La resistencia a la rodadura es prácticamente despreciable, ya que el hecho de utilizar husillo de bolas proporciona un coeficiente de fricción muy bajo, a esto se suma el poco peso del sistema. Transformando la fuerza a un par mediante un husillo de paso 2 mm y un rendimiento del 90 % por medio de la ecuación 2.14:

$$T = \frac{Fa \cdot Ph}{2\pi \cdot \eta_1}$$

Donde:

Ph : Paso del husillo de alimentación

η_1 : Eficiencia positiva del husillo de alimentación

$$T = \frac{0.2856N \cdot (2 \cdot 10^{-3})m}{2\pi \cdot 0.90} = 1,01 \cdot 10^{-4}Nm$$

2.3.4 Diseño del eje Z

Ahora se procede a diseñar el eje Z, el cual se encarga de desplazar a la estructura del eje X a una altura determinada. En la Figura 2.35 se observa la estructura del eje Z.

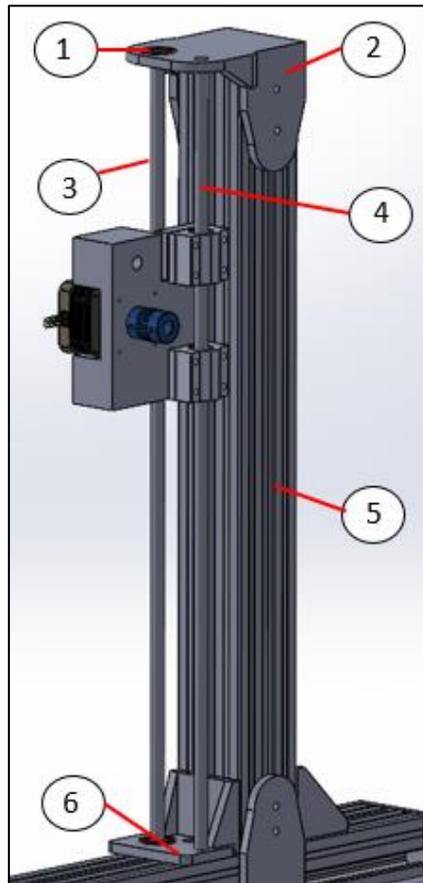


Figura 2.35 Estructura del eje Z

Tabla 2.6: Partes del eje Z

ENUMERACIÓN	COMPONENTES
1	Rodamientos
2	Soporte superior
3	Tornillo de potencia
4	Eje guía
5	Perfil
6	Soporte inferior

Al igual que en los otros ejes, se tienen que determinar las medidas del eje guía y del tornillo de potencia. Para calcular esto, se debe obtener la fuerza generada por el peso de los componentes que actúan sobre estos elementos. Entre los componentes que se encuentran actuando sobre el eje guía de Z se encuentran el extrusor, el soporte del extrusor y los bloques deslizantes. Anteriormente, se obtuvo la masa total de estos elementos, la cual fue de 2.9144 Kg con una fuerza de 28.56 N.

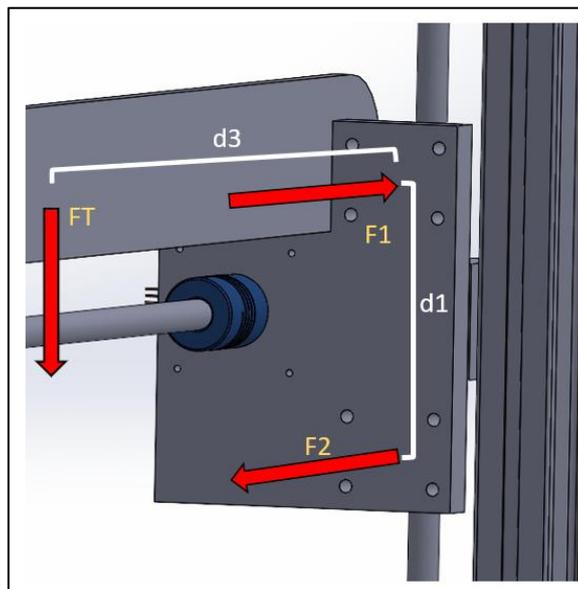


Figura 2.36 Fuerzas sobre eje guía coordenada Z (bloque deslizante)

Se obtienen las siguientes ecuaciones por medio de un análisis de momentos y fuerzas sobre el bloque deslizante del eje Z:

$$F2 = F_T \left(\frac{d3}{d1} \right) = 28.56 \left(\frac{0.29739}{0.070} \right) = 121.335 \text{ N}$$

$$F1 = -F_T \left(\frac{d3}{d1} \right) = -121.335 \text{ N}$$

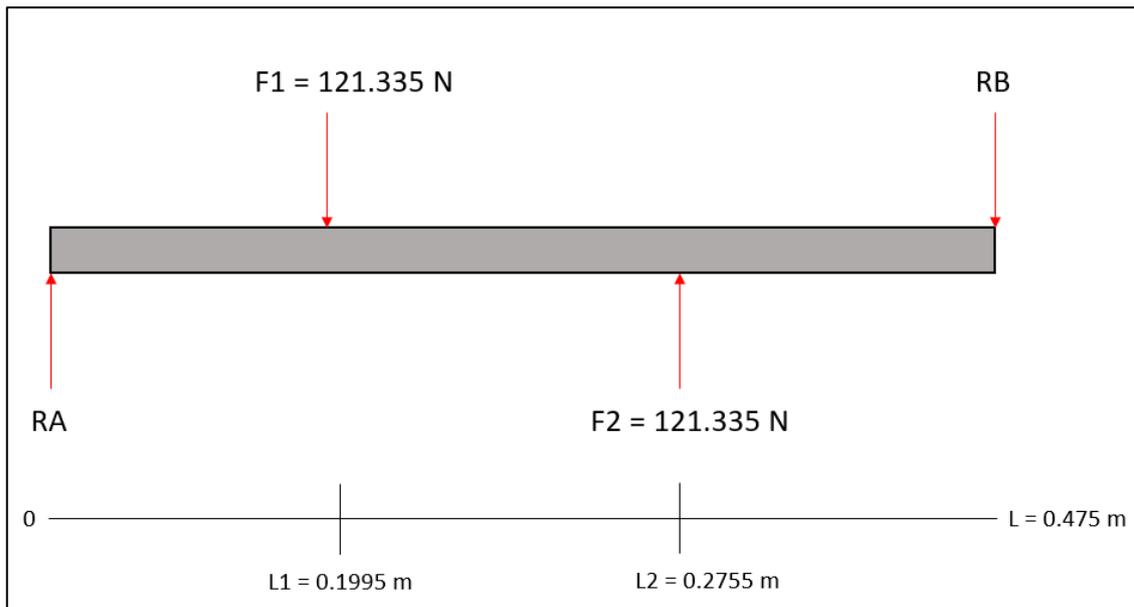


Figura 2.37 Diagrama de fuerzas del eje Z (guías)

$$\sum F_y = 0$$

$$-F_1 + F_2 + RA - RB = 0$$

$$RA = RB$$

$$\sum M_A = 0$$

$$F_1(0.1995) + F_2(0.1995 + 0.076) + RA(0.475) = 0$$

$$RA = \frac{9.22146 \text{ Nm}}{0.475 \text{ m}} = 19.4136 \text{ N}$$

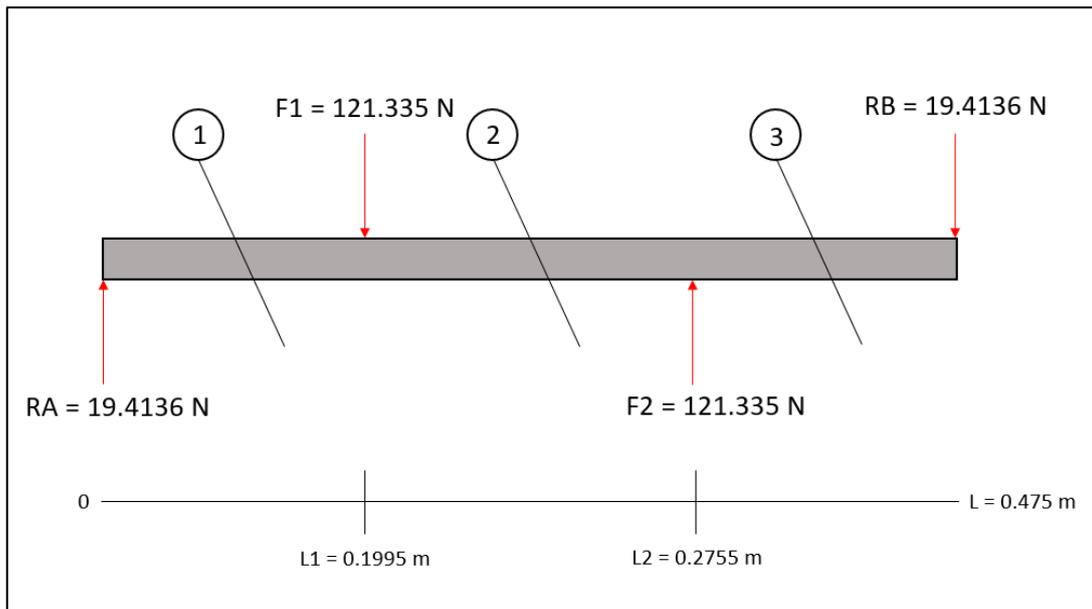


Figura 2.38 Diagrama de cortes del eje Z (guías)

Corte 1:

$$V_1 = 19.4136 \text{ N}$$

$$M_1 = 19.4136(x); \quad x = 0.1995 \text{ m}$$

$$M_1 = 19.4136(0.1995) = 3.873 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Corte 2:

$$V_2 = 19.4136 - 121.335 = -101.9214 \text{ N}$$

$$M_2 = 19.4136(x) - 121.335(x - L1); \quad x = 0.2755 \text{ m}$$

$$M_2 = 19.4136(0.2755) - 121.335(0.076) = -3.873 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Corte 3:

$$V_2 = -101.9214 + 19.4136 = -82.5078 \text{ N}$$

$$M_2 = 19.4136(x) - 121.335(x - L_2) + 121.335(x - L_1); \quad x = 0.475 \text{ m}$$

$$M_2 = 19.4136(0.475) - 121.335(0.2755) - 121.335(0.1995) = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

En las Figuras 2.39 y 2.40 se muestran los diagramas de fuerza cortante y momento flector que actúan a lo largo del eje guía.

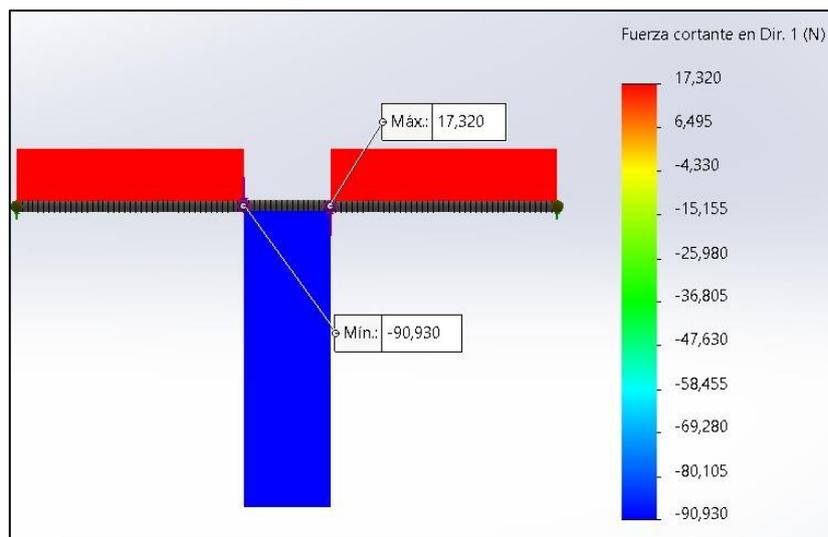


Figura 2.39 Diagrama de fuerza cortante sobre el eje guía en coordenada Z

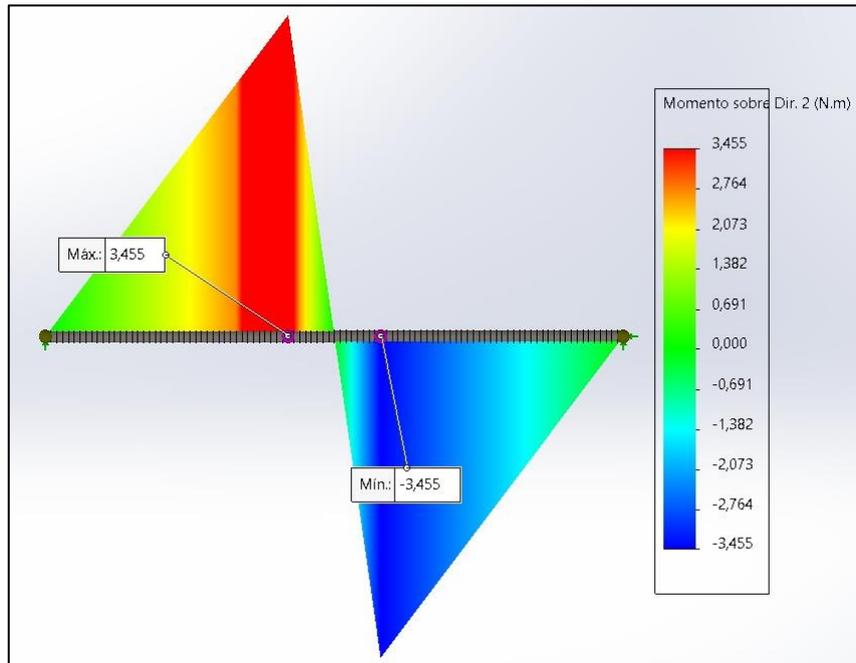


Figura 2.40 Diagrama de momento flector sobre el eje guía en coordenada Z

Una vez obtenido el momento máximo, 3.455 Nm, se procede a calcular el diámetro requerido para el eje guía de la coordenada Z, partiendo de la ecuación 2.5.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{S_y}{n}$$

$$S_y \left(\frac{N}{mm^2} \right) = 310 \left[\begin{array}{l} \text{Resistencia a la fluencia del material,} \\ \text{acero AISI – SAE 1045} \end{array} \right]$$

$$n = 2 \text{ [Factor de seguridad seleccionado, entre 1.5 y 2.5]}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{310 \text{ N/mm}^2}{2} = 155 \frac{N}{mm^2}$$

Se calcula el módulo de resistencia del material seleccionado con la ecuación 2.6:

$$S = \frac{M}{\sigma_{\text{máx}}}$$

$$M = 3.455 \text{ N} \cdot \text{m} \text{ [Momento flector máximo generado]}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 155 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ [Esfuerzo normal máximo del material]}$$

$$S = \frac{(3.455 \text{ N} \cdot \text{m}) \left(\frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} \right)}{155 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 22.29 \text{ mm}^3$$

El diámetro del eje se lo determina con la ecuación 2.7:

$$D_G = \sqrt[3]{\frac{32 * S}{\pi}}$$

$$S = 22.29 \text{ mm}^3 \text{ [Módulo de resistencia del material]}$$

$$D_G = \sqrt[3]{\frac{32 * 22.29 \text{ mm}^3}{\pi}} = 6.1 \text{ mm}$$

Por facilidad de adquisición se selecciona un diámetro cercano disponible de 8 mm.

Para determinar el diámetro del tornillo de potencia del eje Z, se necesita obtener la fuerza que actúa sobre éste, en este caso el peso total de los elementos. Básicamente, el peso vendría a ser el que genera todo el eje X sobre el eje Z, el cual es:

$$F_{\text{Total}} = 50.894 \text{ N}$$

Se obtiene el área transversal del tornillo de potencia con la ecuación 2.11:

$$\frac{\sigma}{n} = \frac{F_{Total}}{A}$$

$$\sigma \left(\frac{Lb}{in^2} \right) = 1000 \left[\begin{array}{l} \text{Esfuerzo admisible del material,} \\ \text{ACERO AISI – SAE 1045} \end{array} \right]$$

$$n = 4 \text{ [Factor de seguridad escogido]}$$

$$A = \frac{F_{Total} * n}{\sigma} = \frac{\left(50.984 \text{ N} \frac{1 \text{ Lb}}{4.448 \text{ N}} \right) * 4}{1000 \frac{\text{Lb}}{in^2}} = 0.04576 \text{ in}^2$$

Se calcula el diámetro del tornillo sin fin a partir de la ecuación 2.12:

$$D_T = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}$$

$$D_T = \sqrt{\frac{4 * 0.04576 \text{ in}^2}{\pi}} = 0.24139 \text{ in} = 6.1315 \text{ mm}$$

Por facilidad de adquisición se va a seleccionar un diámetro de 8 mm. Además, por criterio se escogió un paso de 2 mm.

Se procede a calcular el torque para el tornillo de potencia de la coordenada Z. Se sabe que la carga total aplicada en el tornillo de potencia es igual al peso que genera el eje X sobre el elemento, el cual tiene un valor de 50.894 N. Además, los valores del diámetro de raíz y diámetro medio de un tornillo de potencia de diámetro exterior de 8 mm son:

$$d_r(\text{mm}) = 6.51 \text{ [Diámetro de raíz]}$$

$$d_m(\text{mm}) = 7.25 \text{ [Diámetro medio]}$$

$$p(\text{mm}) = 2 \text{ [Paso menor para husillo de bola de diámetro: 8 mm]}$$

$$\mu = 0.01 \text{ [Coeficiente de fricción para husillo de bola]}$$

El torque de subida requerido se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$T_s = \frac{F_T * d_m}{2} \left(\frac{p + (\pi * \mu * d_m)}{\pi * d_m - \mu * p} \right) \quad (2.16)$$

$$T_s = \frac{50.894 * 7.25}{2} \left(\frac{2 + (\pi * 0.01 * 7.25)}{\pi * 7.25 - 0.01 * 2} \right)$$

$$T_s = 0.018 \text{ N} \cdot \text{m}$$

El torque de bajada requerido se calcula de la siguiente forma:

$$T_b = \frac{F_T * d_m}{2} \left(\frac{(\pi * \mu * d_m) - p}{\pi * d_m + \mu * p} \right) \quad (2.17)$$

$$T_b = \frac{50.894 * 7.25}{2} \left(\frac{(\pi * 0.01 * 7.25) - 2}{\pi * 7.25 + 0.01 * 2} \right)$$

$$T_b = 0.014 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Por lo tanto, se necesita un torque de subida de $0.018 \text{ N} \cdot \text{m}$ y un torque de bajada de $0.014 \text{ N} \cdot \text{m}$ para el tornillo de potencia.

2.4 Sistema de control

El sistema de control permite regular las acciones de los actuadores de un mecanismo dependiendo de las salidas del sistema, de tal forma que se logre obtener el comportamiento deseado.

Para el control de una impresora 3D, se necesitan los siguientes componentes:

- Motores de paso
- Tarjeta de control
- Tarjeta de potencia
- Pantalla LCD (Opcional)

2.4.1 Motores de paso

Son motores de tipo eléctrico, los cuales no poseen velocidades de giro muy elevadas como los motores DC u otros tipos de motores, pero, permiten desarrollar con precisión el posicionamiento angular de su rotor, se emplean en lazo abierto y poseen un control eléctrico complejo.

En la Figura 2.41 se muestra el interior de un motor de paso.

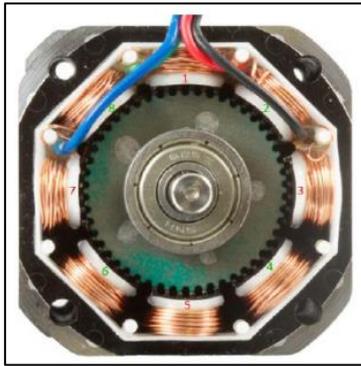


Figura 2.41 Motor de paso

En el interior del motor de paso se pueden observar varias bobinas colocadas alrededor del rotor, que cuenta con una cierta cantidad de dientes. Básicamente, las bobinas están interconectadas en pares y en polos opuestos dentro del estator, por lo que, si se energiza un par de bobinas, los dientes del rotor se van a alinear con dicho par. Luego, si se energiza otro par de bobinas, el rotor se va a alinear con este último par, dando así paso a paso el movimiento giratorio deseado (Figura 2.42).

Mientras mayor sea el número de dientes del rotor dentro de un motor de paso, mayor precisión tendrá, ya que, puede abarcar espacios intermedios entre los dientes con la activación de uno o más pares de bobinas.

Se escogió este tipo de motores debido a que ofrecen precisión y repetitividad en los movimientos generados por el mecanismo. Éstas son características indispensables en los procesos de manufactura aditiva de piezas tridimensionales.

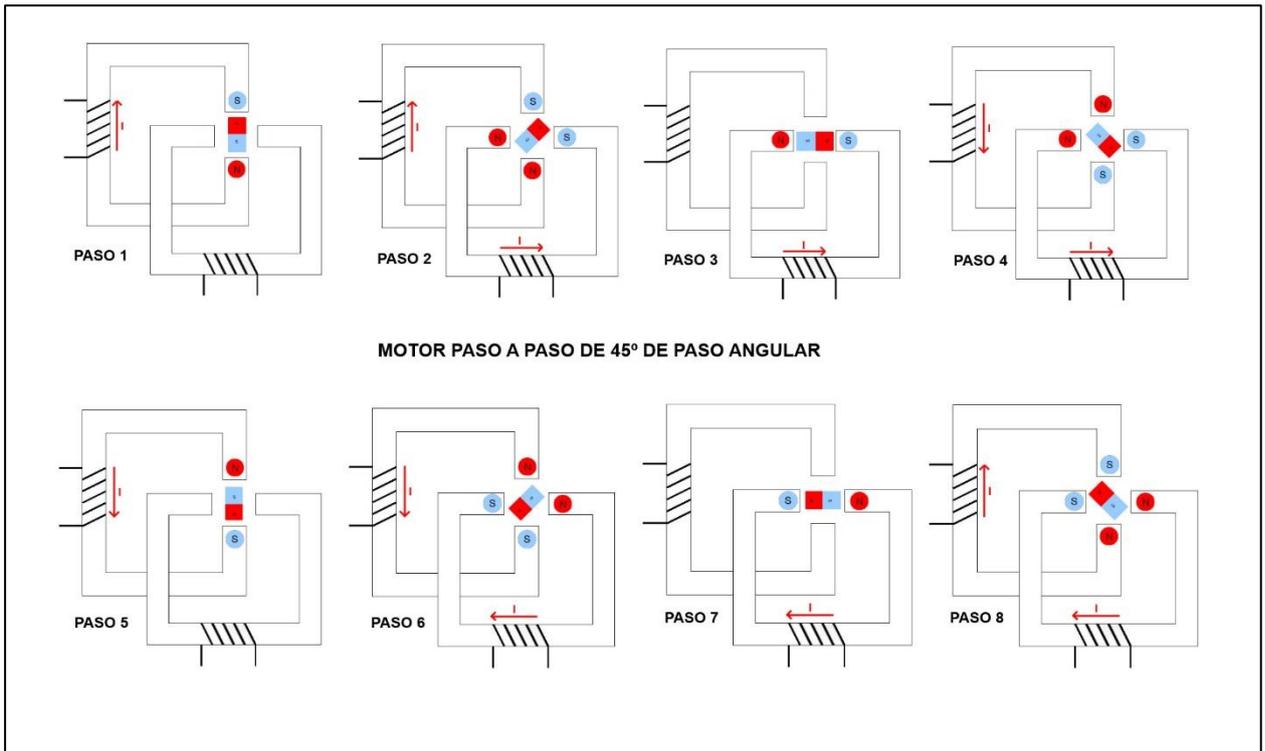
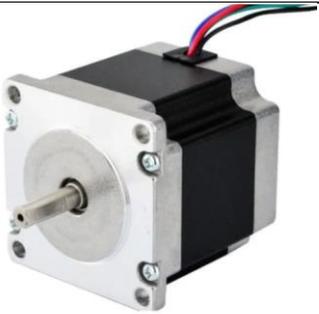


Figura 2.42 Funcionamiento de motor de paso

Los motores seleccionados para cada uno de los ejes se presentan en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7 Motores seleccionados para los ejes

DATOS	EJE Z	EJE X	EJE Y	CUARTO EJE
				
No. Modelo	17HS4401-S Nema 17 Fabricante: ineev			57HD4016-01 Nema 23
Angulo de Paso	1.8°	1.8°	1.8°	1.8°
Precisión del ángulo de paso	±5%	±5%	±5%	±5%
Paso por revolución	200	200	200	400
Corriente	1.7 A	1.7 A	1.7 A	2 A
Tensión de trabajo	DC 9-42V	DC 9-42V	DC 9-42V	5.2 Vdc por fase
Par de sujeción	0.022 Nm	0.022 Nm	0.022 Nm	0.46 Nm
Par de retención	0.4 Nm	0.4 Nm	0.4 Nm	1.2 Nm
Dimensión	32x32x38 mm	32x32x38 mm	32x32x38 mm	54x57x57 mm

2.4.2 Tarjeta de control

Este componente, cuando es utilizado en una impresora 3D, tiene el fin de generar los comandos que necesitan seguir los actuadores (motores, extrusor y cama térmica), para así, poder crear una pieza tridimensional a partir de un archivo con el diseño 3D de la misma. A esta se le pueden adicionar en memoria los programas necesarios para renderizar las piezas tridimensionales de algún software de diseño y para el manejo de los motores al momento de la impresión.

Una tarjeta que suele emplearse en sistemas sencillos de impresión 3D de 3 ejes y 2 perfiles sería la placa Arduino Mega (Figura 2.48).

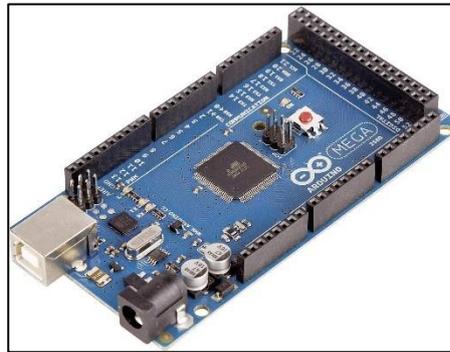


Figura 2.43 Arduino Mega

2.4.3 Tarjeta de control de potencia

La tarjeta de control por sí sola no puede entregar la potencia suficiente hacia los actuadores del sistema, debido a que, se maneja con pequeños voltajes. Por ello, se suele emplear una tarjeta de control de potencia, que usualmente es de 12 V a 24 V, dependiendo de la potencia requerida por los componentes del sistema.

Cuando se emplea una placa Arduino Mega como tarjeta de control en un sistema de impresión 3D de 3 ejes y 2 perfiles, se suele utilizar la tarjeta de potencia Shield Ramps 1.4, la cual tiene la capacidad de manejar 4 motores, 2 extrusores y la temperatura de la cama térmica al mismo tiempo. Sin embargo, para este proyecto se va a utilizar la placa

Duet, la cual sirve como tarjeta de control y de potencia al mismo tiempo. Esta tarjeta se muestra en la Figura 2.44.

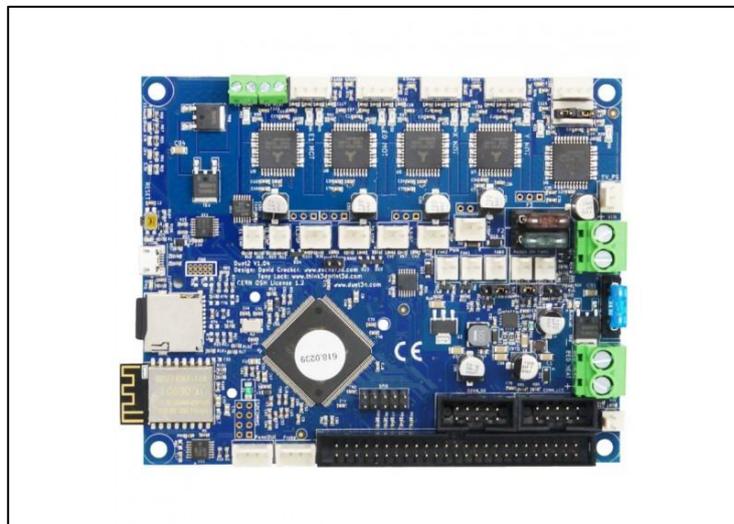


Figura 2.44 Tarjeta de control Duet

Dentro de esta placa de control, se puede agregar un firmware de impresión 3D denominado Reprap, que se basa en técnicas FDM para culminar procesos de manufactura aditiva considerando la estructura del código G, el manejo de los calefactores (cama térmica), motores de paso, sensores, entre otros.

2.4.4 Pantalla LCD

Este componente es opcional para la estructura de la impresora 3D, sin embargo, puede ser de mucha utilidad cuando se desea saber la medición de distintas variables presentes durante el proceso de impresión como: la temperatura del extrusor, la temperatura de la cama térmica, tiempo de impresión, entre otros.

Una opción de pantalla LCD para conectar al Duet vendría a ser el PanelDue (Figura 2.45), el cual es uno de los componentes del conjunto Duet.

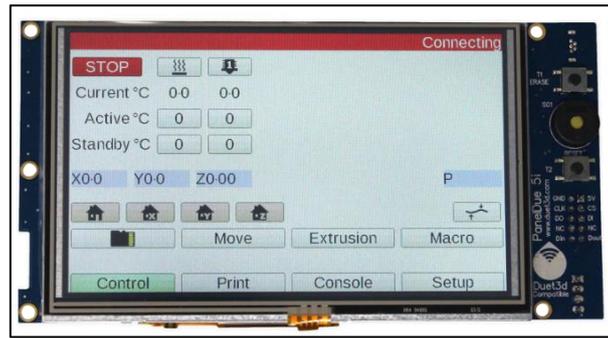


Figura 2.45 PanelDue

2.4.5 Selección de componentes electrónicos

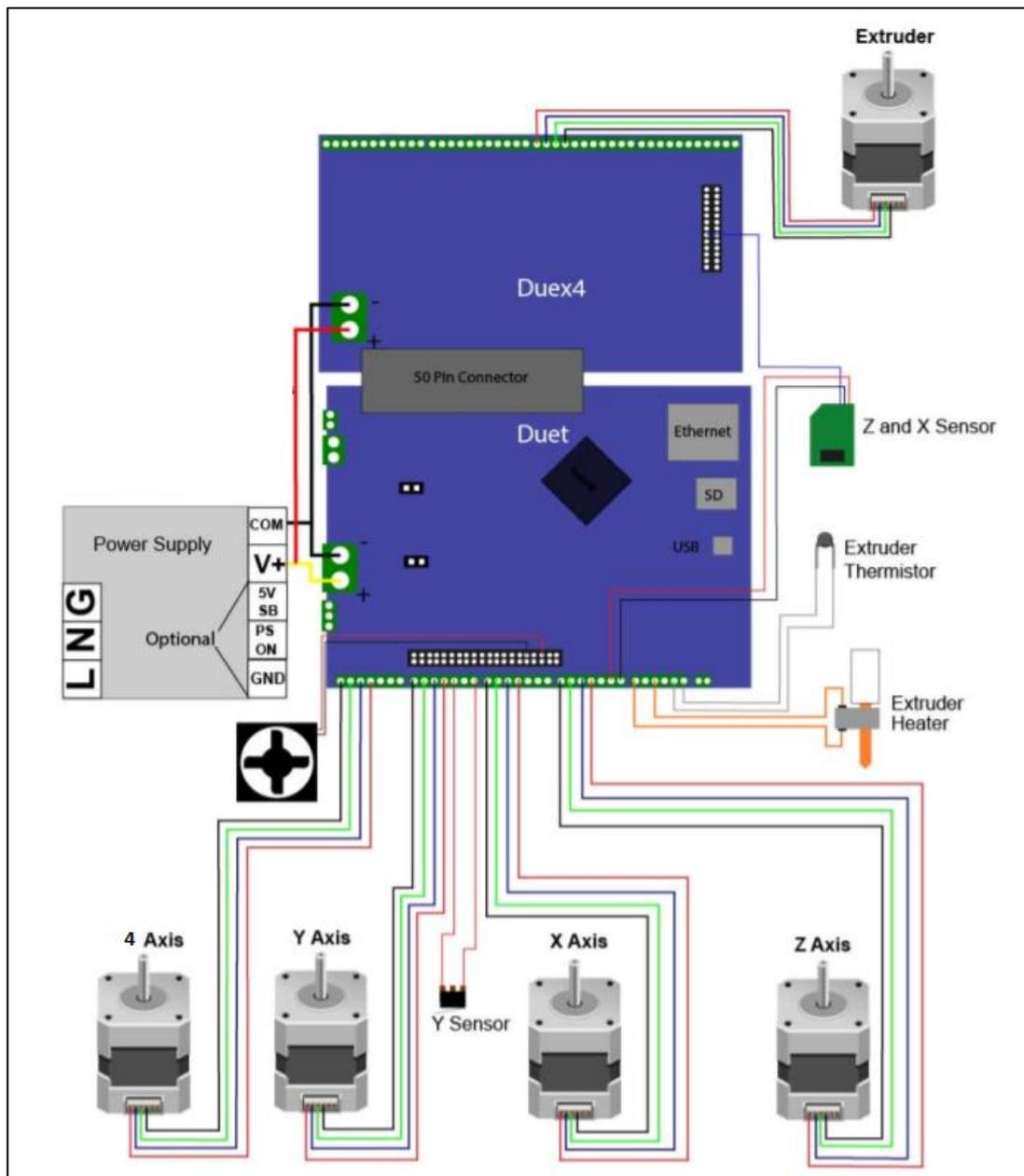


Figura 2.46 Tarjeta Duet con extensión Duex4

Como se puede observar en la Figura 2.46, se va a emplear la tarjeta Duet con una extensión de la misma denominada Duex4. En la placa Duet base, sólo hay espacio para las conexiones de 4 motores, los cuales vendrían a ser los del eje X, Y, Z y cuarto eje. La extensión da un espacio de conexión adicional para el motor del extrusor.

Cabe recalcar que, en la tarjeta de control Duet, se tienen espacios de conexión marcados para el extrusor, sin embargo, estos se pueden utilizar para los motores de los ejes, sin afectar el funcionamiento general del sistema.

La ventaja que presenta este tipo de tarjeta frente al conjunto utilizado con las placas Arduino Mega (y tarjeta Shield Ramps) es su adaptación a las necesidades del sistema, ya que, gracias a su extensión, se pueden utilizar uno o más motores asociados al funcionamiento de la impresora 3D. Por otro lado, la tarjeta de control Shield Ramps, ya viene con un esquema establecido, en donde sólo se pueden utilizar 4 motores de paso. Además, 2 de estos 4 motores sólo están destinados al eje Z. En la Tabla 2.8 se muestran las especificaciones de la tarjeta Duet.

Tabla 2.8 Especificaciones de tarjeta Duet

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Bits del procesador	32 Bits
Corriente a motores	2.4 A
Corriente a cama	18 A
Voltaje	12 V a 24 V
Termistor	PT100
Tipo de configuraciones	G-Code
Microcontrolador	Atmel SAM4E8E

2.4.6 Fuente de alimentación

La fuente de alimentación se va a seleccionar dependiendo de la potencia requerida por los componentes del sistema, cuyos valores se encuentran descritos en la Tabla 9.

Tabla 2.9 Potencia requerida por componentes

COMPONENTE	POTENCIA REQUERIDA
Tarjeta Duet	2 W
Duex4	2 W
PanelDue	3.5 W
Cama térmica	200 W
Motor de extrusor	4.23 W
Boquilla de extrusor	40 W
Motor del eje X	15.3 W
Motor del eje Y	15.3 W
Motor del eje Z	15.3 W
Motor del cuarto eje	10.4 W
TOTAL	308.03 W

Para cumplir con la demanda energética del proyecto, se va a utilizar la fuente de alimentación AVAWO de 24 V y 15 A (360 W), que se presenta en la Figura 2.47.



Figura 2.47 Fuente de alimentación AVAWO

2.4.7 Esquema de control

El proceso de impresión 3D se llevaría a cabo de la siguiente manera: primero se ingresa el modelo 3D que se desea imprimir al sistema, luego el microcontrolador procesa la información ingresada y a partir del firmware Reprap se procede a generar las órdenes que deben seguir los actuadores para llevar a cabo el proceso de manufactura aditiva. Luego, la tarjeta de control de potencia distribuye la potencia necesaria en cada uno de los componentes del sistema para que puedan efectuar su tarea sin problemas, estos componentes son los motores de paso, el extrusor y la cama térmica.

En este caso, la tarjeta Duet que se mencionó anteriormente cumple con los papeles de microcontrolador y de tarjeta de control de potencia. Además, tiene la ventaja de que a diferencia de la tarjeta Shield Ramps 1.4, esta tarjeta no necesita adicionar puentes H a cada uno de los motores de paso cuando se vayan a conectar a la tarjeta de potencia.

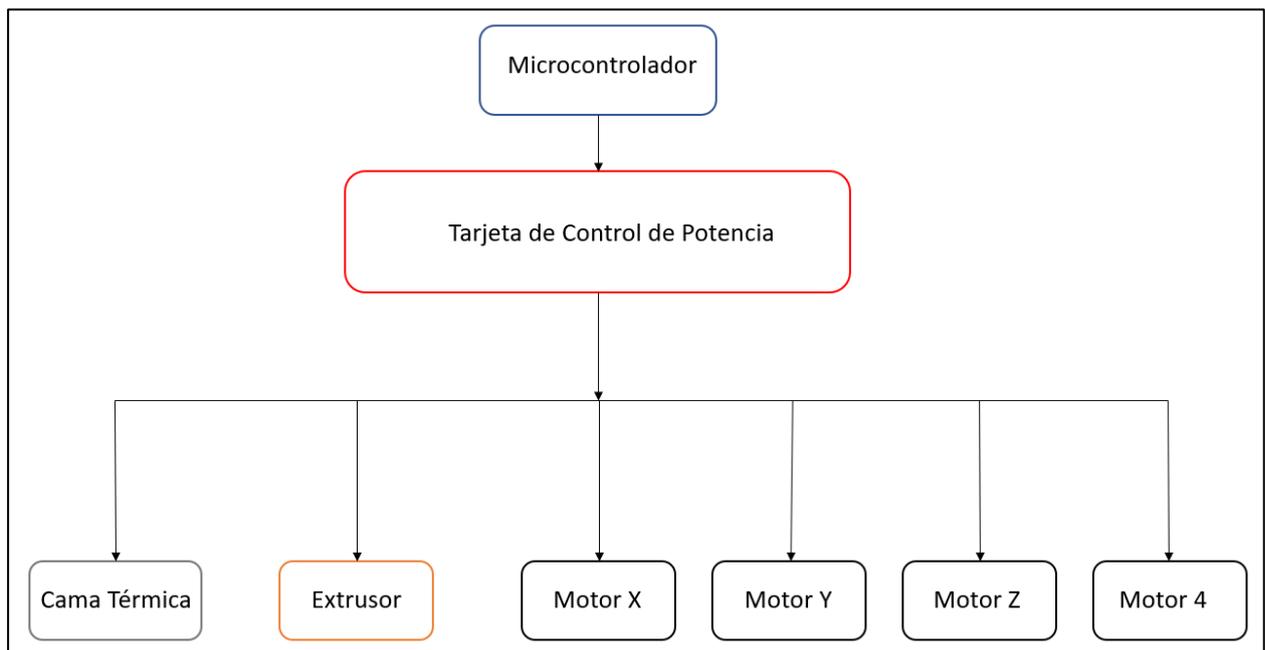


Figura 2.48 Esquema de control

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Análisis de elementos finitos

El análisis de elementos finitos es una metodología de la computación que se utiliza para determinar cómo se va a comportar un material luego de que ciertas fuerzas sean aplicadas sobre el mismo. Esta técnica computacional es muy útil al momento de testear productos, ya que ahorra recursos al momento de generar las pruebas a las que debe ser sometido el objeto. Además, un análisis de elementos finitos puede calcular cómo los elementos de la simulación pueden ser afectados por fatiga, esfuerzos mecánicos, entre otros.

Para mantener las características del entorno de simulación lo más parecido a la realidad, se debe tener en cuenta el material del cual va a estar elaborado la pieza, sus dimensiones originales y la carga que va a soportar el conjunto. Esto se puede especificar dentro del software que se vaya a utilizar para desarrollar la simulación.

El comparar los esfuerzos de Von Mises con la tensión máxima admisible por el material permitirá saber si los soportes diseñados para la máquina resistirán las cargas a las cuales estarán sometidos, de esa forma, conocer si es necesario redimensionar la estructura o cambiar el material. En este tipo de estudio se considera la computación de fuerzas en el caso más crítico del componente a analizar.

3.1.1 Análisis de elementos finitos en el soporte del eje X

El soporte del eje X va a estar sometido a la fuerza que genera la gravedad que actúa sobre los componentes que se trasladan en el eje guía y el tornillo de potencia de este sistema, que son: el extrusor, el motor del extrusor y los acoples deslizantes.

El caso crítico en el soporte del eje X ocurre cuando la fuerza del peso de los elementos mencionados anteriormente se encuentra actuando sobre el extremo contrario al que se conecta con el perfil del eje Z, ya que, la fuerza aplicada en este punto generará el torque máximo. En las Figuras 3.1 y 3.2 se muestran las cargas y mallado, respectivamente, del soporte para el eje X.

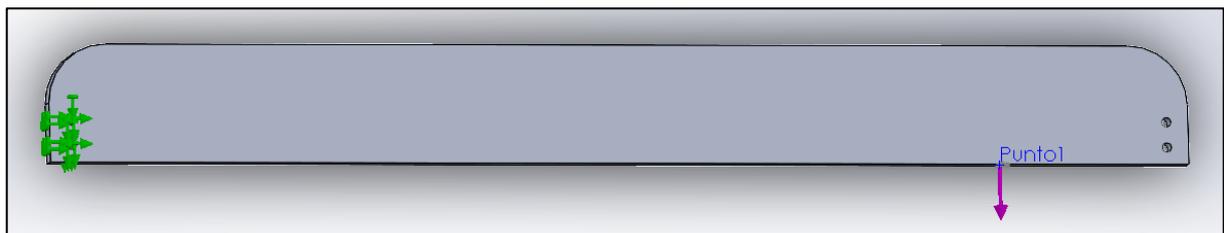


Figura 3.1 Cargas en el soporte del eje X

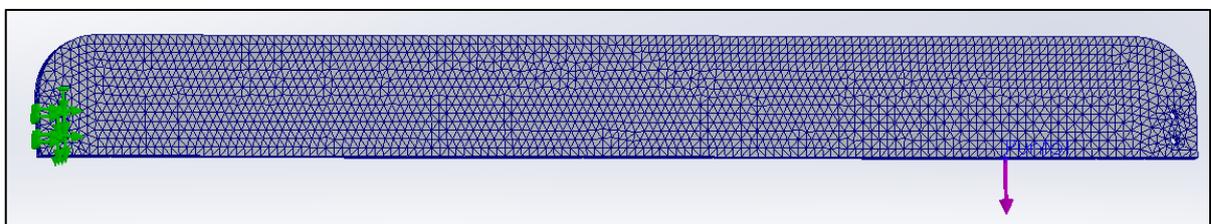


Figura 3.2 Mallado del soporte del eje X

La Tabla 3.1 muestra los parámetros de estudio establecidos para realizar el análisis de elementos finitos sobre el soporte del eje X.

Tabla 3.1 Parámetros de estudio – soporte del eje X

Parámetro	Detalle
Tipo de simulación	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Mallado utilizado	Malla estándar
Calidad de la malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	45179
Número total de elementos	26645

La Figura 3.3 muestra la simulación realizada con los esfuerzos de Von Mises que se producen a lo largo de la pieza debido a la aplicación de la fuerza mencionada anteriormente.



Figura 3.3 Esfuerzos de Von Mises – soporte del eje X

Las tensiones de Von Mises mínima y máxima obtenidas para el soporte del eje X se observan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Valores de Von Mises – soporte del eje X

Tensión de Von Mises	Mínimo (Pa)	Máximo (Pa)
	19360	$2.139 \cdot 10^7$

Como podemos observar en la Figura 3.4, el esfuerzo máximo de Von Mises se da en las perforaciones (agujeros circulares) que conectan al soporte del eje X con el perfil del eje Z. Esto debido a que, actúan como concentradores de esfuerzos cuando la pieza se encuentra sometida a una carga.

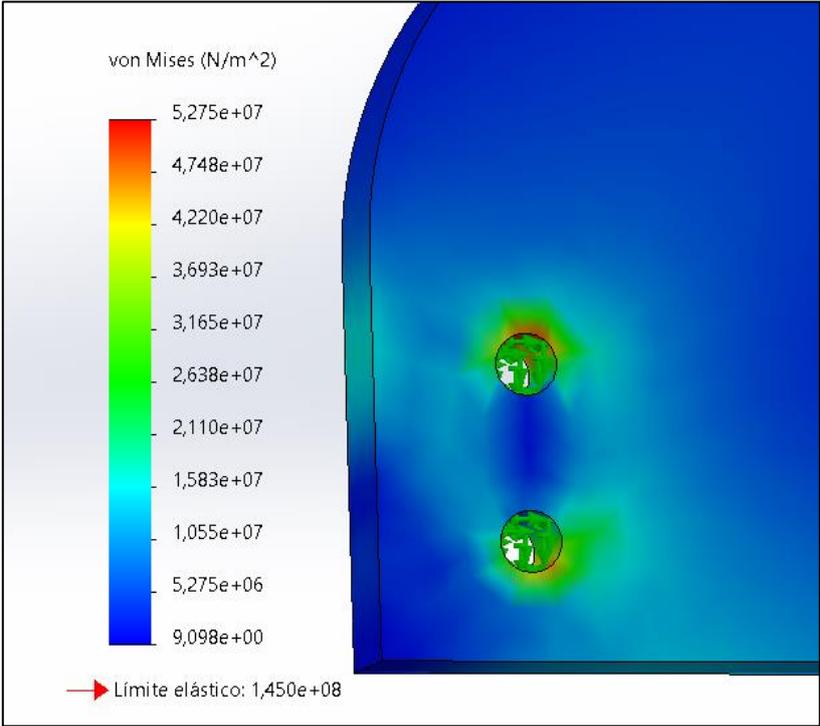


Figura 3.4 Concentrador de esfuerzos – soporte del eje X

La Figura 3.5 muestra la deformación generada en el soporte del eje X por la fuerza aplicada.

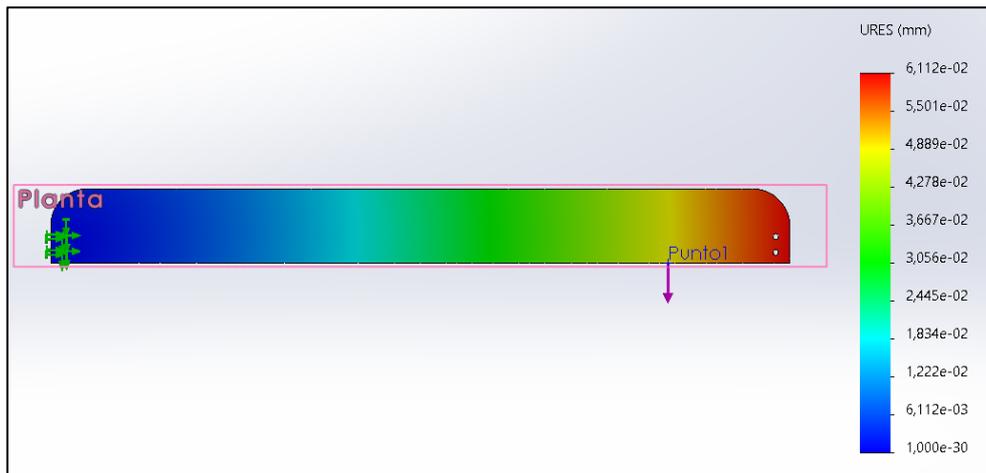


Figura 3.5 Deformación a lo largo del soporte del eje X

Tabla 3.3 Valores de desplazamiento – soporte del eje X

Desplazamiento	Mínimo (mm)	Máximo (mm)
	$1^{(-30)}$	$6.11210^{(-2)}$

El máximo desplazamiento obtenido se ubica en el extremo contrario de la junta con el eje Z. Este valor es igual a $6.11210^{(-2)}$ mm, tal y como muestra la Tabla 3.3, por lo que, esta estructura es capaz de soportar el peso del extrusor durante el proceso de impresión sin deformarse, factor importante para evitar errores en las capas de impresión, que varían entre 0.1 mm a 0.4 mm para extrusores convencionales.

Los valores del factor de seguridad mínimo y máximo obtenidos a lo largo del elemento son de 2.7 y $1.594 \cdot 10^{(7)}$, lo cual garantiza que dicho elemento no va a fallar aun cuando esté sometido a una carga que genere un caso crítico.

3.1.2 Análisis de elementos finitos en la placa para la base

La estructura del eje Y va a estar sometido a la fuerza que genera el peso de los componentes que se acoplan en él, que son: el cuarto eje, la pieza impresa con volumen crítico, bloques deslizantes y el husillo de bola.

Para la simulación, se asumen fuerzas generadas sobre los ejes guía y estructura, no se considera al tornillo de potencia, ya que éste no se enfoca en resistir el peso de los elementos, sino en desplazar al sistema del cuarto eje. En las Figuras 3.6 y 3.7 se muestran las cargas y mallado, respectivamente, de la estructura del eje Y.

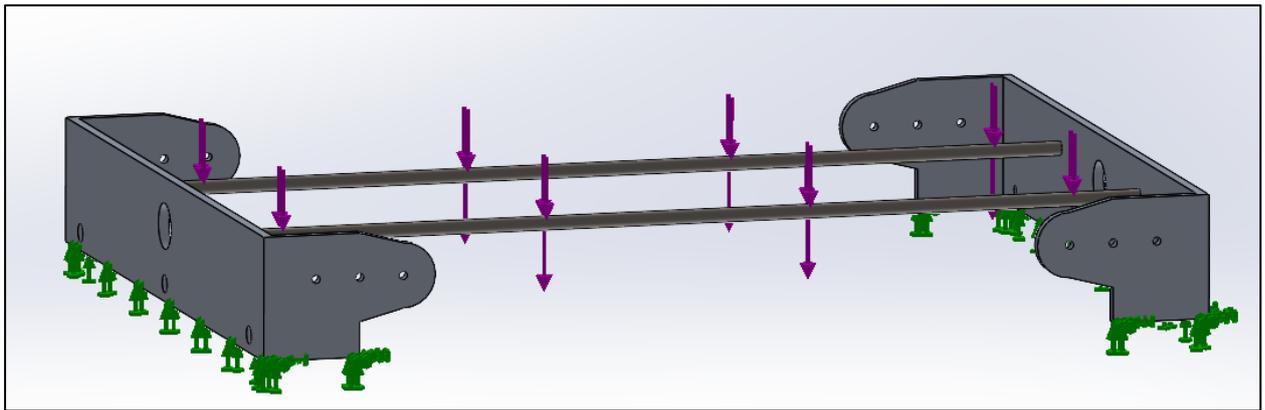


Figura 3.6 Cargas en la estructura del eje Y

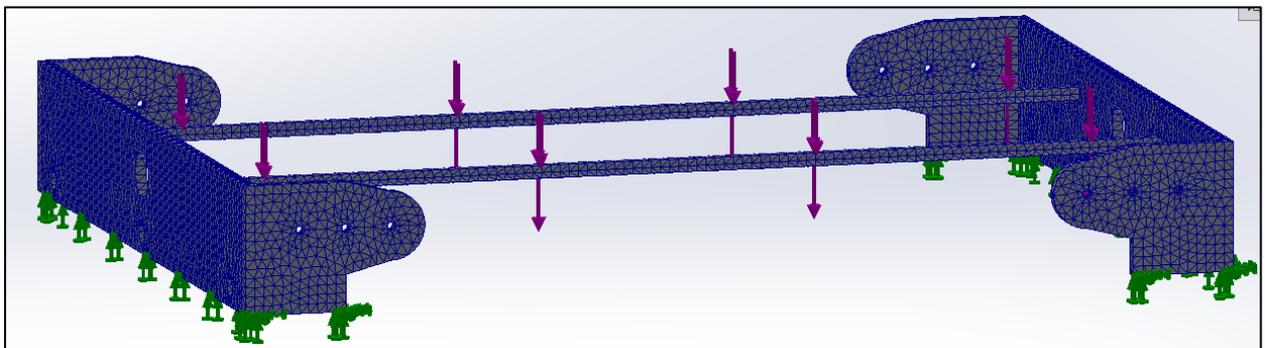


Figura 3.7 Mallado de la estructura del eje Y

La Tabla 3.4 muestra los parámetros de estudio establecidos para realizar el análisis de elementos finitos sobre la estructura del eje Y.

Tabla 3.4 Parámetros de estudio – estructura del eje Y

Parámetro	Detalle
Tipo de simulación	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Mallado utilizado	Malla estándar
Calidad de la malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	70526
Número total de elementos	39096

La Figura 3.8 muestra la simulación realizada con los esfuerzos de Von Mises que se producen a lo largo de la estructura del eje Y debido a la aplicación de las fuerzas mencionadas anteriormente.

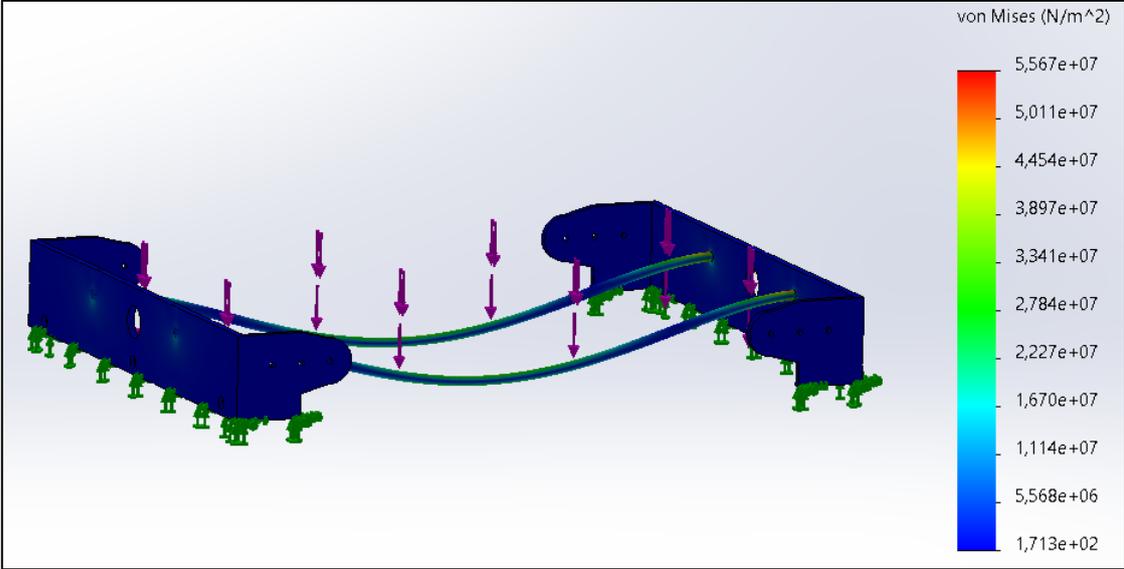


Figura 3.8 Esfuerzos de Von Mises – estructura del eje Y

Las tensiones de Von Mises mínima y máxima obtenidas para el soporte del eje X se observan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Valores de Von Mises – estructura del eje Y

Tensión de Von Mises	Mínimo (Pa)	Máximo (Pa)
	171.3	$5.567 \cdot 10^7$

La Figura 3.9 muestra la deformación generada en la estructura del eje Y.

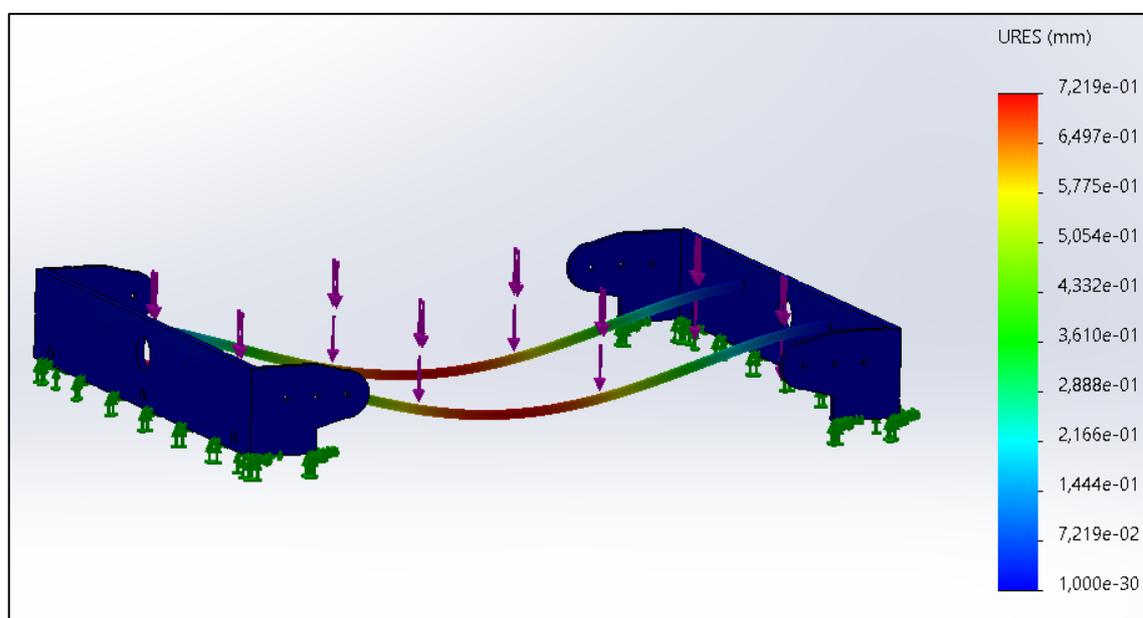


Figura 3.9 Deformación a lo largo de la estructura del eje Y

Tabla 3.6 Valores de desplazamiento – estructura del eje Y

Desplazamiento	Mínimo (mm)	Máximo (mm)
	$1 \cdot 10^{-30}$	$7.219 \cdot 10^{-1}$

El máximo desplazamiento obtenido se ubica en el centro de los ejes guía. Este valor es igual a $7.219 \cdot 10^{-1}$ mm tal y como muestra la Tabla 3.6, lo cual se considera un valor pequeño, teniendo en cuenta que se trata de un caso extremo (poco probable que

sucedan), ya que, se trata de una pieza completamente sólida con dimensiones que alcanzan los límites del volumen de impresión permitido. Por lo tanto, la deformación no afectará durante el proceso de impresión.

Adicionalmente, los valores de factor de seguridad mínimo y máximo obtenidos a lo largo del sistema son 7.063 y $8.463 \cdot 10^5$, lo cual garantiza que dicho elemento no va a fallar cuando la fuerza debido al peso de los componentes ya mencionados sea aplicada sobre los ejes guía.

3.1.3 Análisis de elementos finitos de la columna soporte para el eje Z

La columna soporte del eje Z va a estar sometida a la torsión que genera el peso de todos los componentes involucrados en el sistema del eje X, conectado por medio de un punto de sujeción en su base.

En este sistema, se va a generar torsión sobre la cara superior de la columna soporte. En las Figuras 3.10, 3.11 y 3.12 se muestran las cargas en el punto de conexión, la cara donde se genera la torsión y el mallado, respectivamente, de la columna soporte del eje Z.

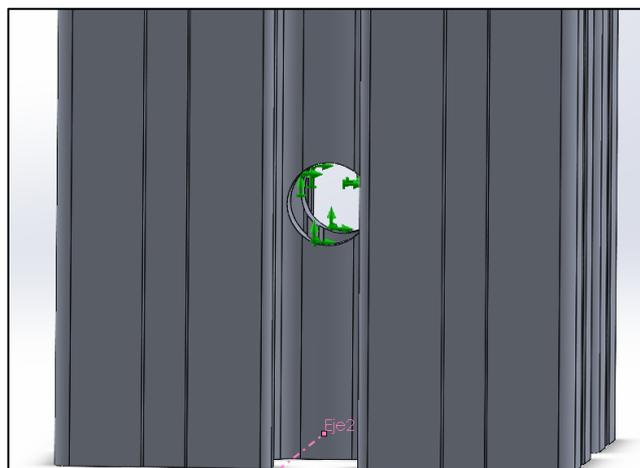


Figura 3.10 Cargas en el punto de sujeción en la base – columna eje Z

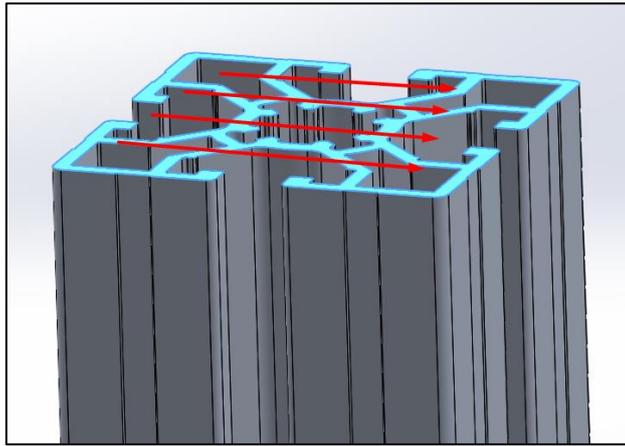


Figura 3.11 Torsión sobre cara superior - columna eje Z

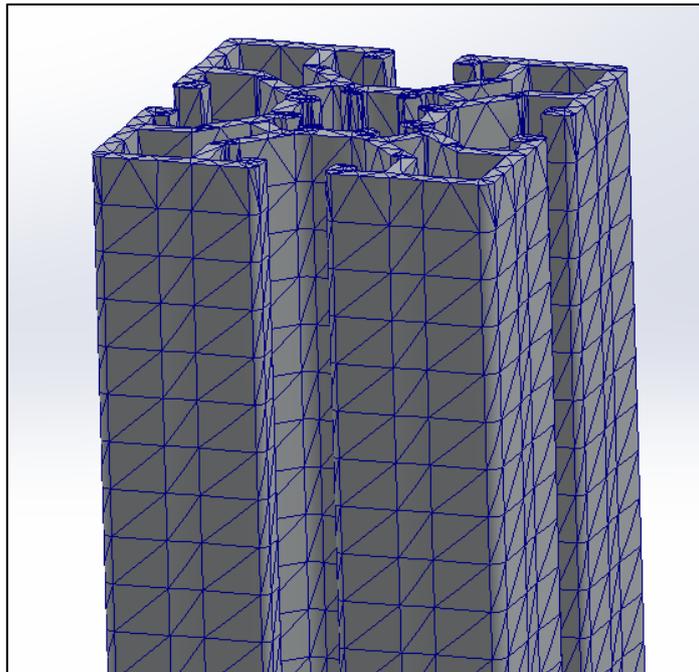


Figura 3.12 Mallado de la columna soporte del eje Z

La Tabla 3.7 muestra los parámetros de estudio establecidos para realizar el análisis de elementos finitos sobre la columna soporte del eje Z.

Tabla 3.7 Parámetros de estudio – columna soporte del eje Z

Parámetro	Detalle
Tipo de simulación	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Mallado utilizado	Malla estándar
Calidad de la malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	168416
Número total de elementos	92881

La Figura 3.13 muestra la simulación realizada con los esfuerzos de Von Mises que se producen en la zona del punto de conexión de la columna del eje Z.

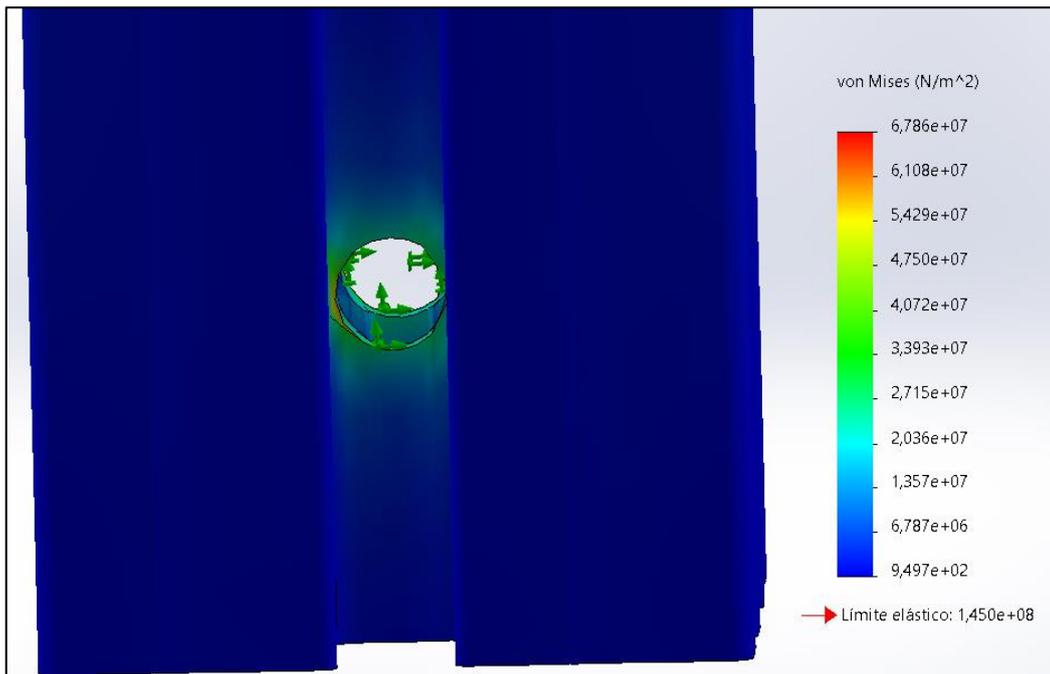


Figura 3.13 Esfuerzos de Von Mises – columna del eje Z

Las tensiones de Von Mises mínima y máxima obtenidas para la columna soporte del eje Z se observan en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Valores de Von Mises – columna soporte del eje Z

Tensión de Von Mises	Mínimo (Pa)	Máximo (Pa)
	949.7	$6.786 \cdot 10^{(7)}$

La Figura 3.14 presenta los valores de deformación obtenidos para la columna soporte del eje Z.

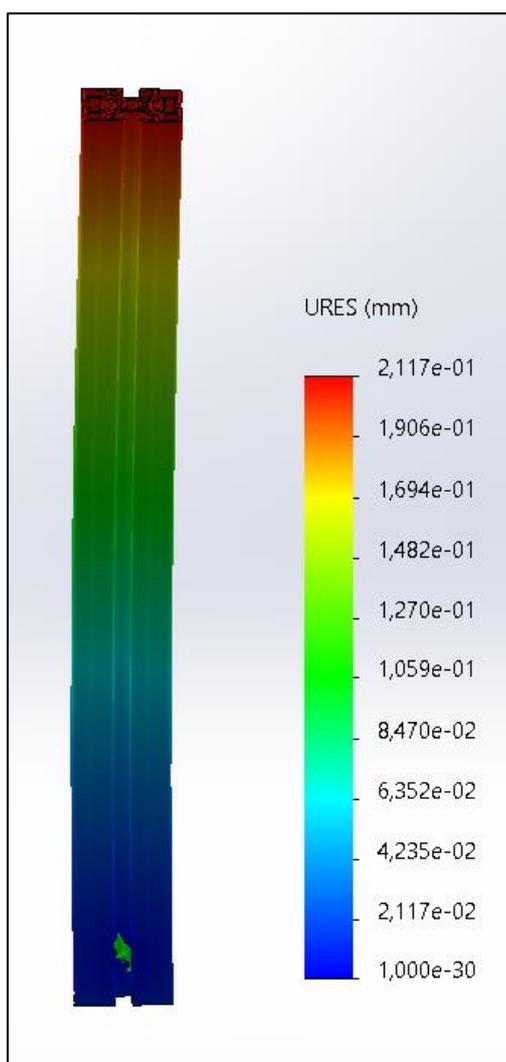


Figura 3.14 Deformación a lo largo del soporte para el Z

Tabla 3.9: Valores de desplazamiento – columna soporte del eje Z

Desplazamiento	Mínimo (mm)	Máximo (mm)
	$1 \cdot 10^{-30}$	$2.117 \cdot 10^{-1}$

El máximo desplazamiento obtenido se ubica en la cara superior de la columna del eje Z. Este valor es igual a $2.177 \cdot 10^{-1}$ mm, tal y como muestra la Tabla 3.9. Por lo tanto, se puede decir que, la columna puede soportar el torque generado por las fuerzas horizontales aplicadas. Los valores de factor de seguridad mínimo y máximo obtenidos a lo largo del sistema son de 2.137 y $1.527 \cdot 10^5$, lo cual garantiza que dicho elemento no va a fallar.

3.1.4 Análisis de elementos finitos de la estructura para el cuarto eje

La estructura del cuarto eje va a estar sometida a la fuerza que genera el peso de las partes: base rotatoria, pieza tridimensional impresa y cama térmica.

En este sistema se van a generar fuerzas sobre el eje de rotación. En las Figuras 3.15 y 3.16 se muestran las cargas y mallado, respectivamente, de la estructura para el 4to eje.

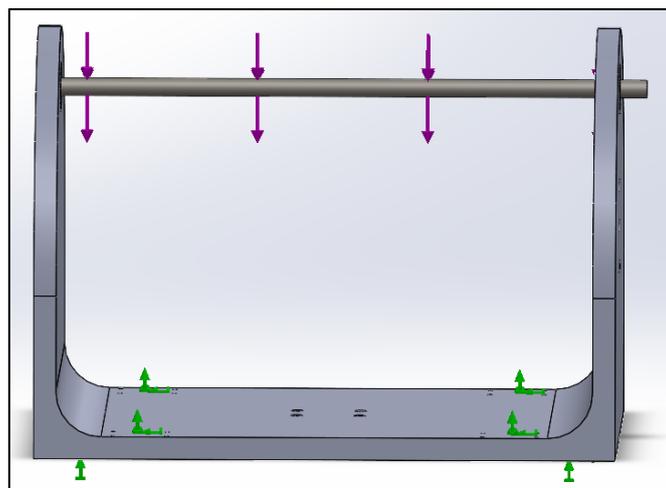


Figura 3.15 Cargas en la estructura del cuarto eje

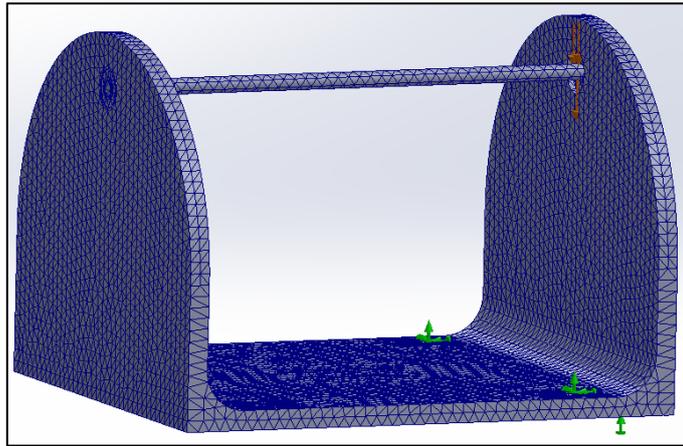


Figura 3.16 Mallado de la estructura para el cuarto eje

La Tabla 3.10 muestra los parámetros de estudio establecidos para realizar el análisis de elementos finitos sobre la estructura para el cuarto eje.

Tabla 3.10 Parámetros de estudio – estructura del cuarto eje

Parámetro	Detalle
Tipo de simulación	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Mallado utilizado	Malla estándar
Calidad de la malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	104844
Número total de elementos	63203

La Figura 3.17 muestra los esfuerzos de Von Mises que se generan en la estructura para el cuarto eje.

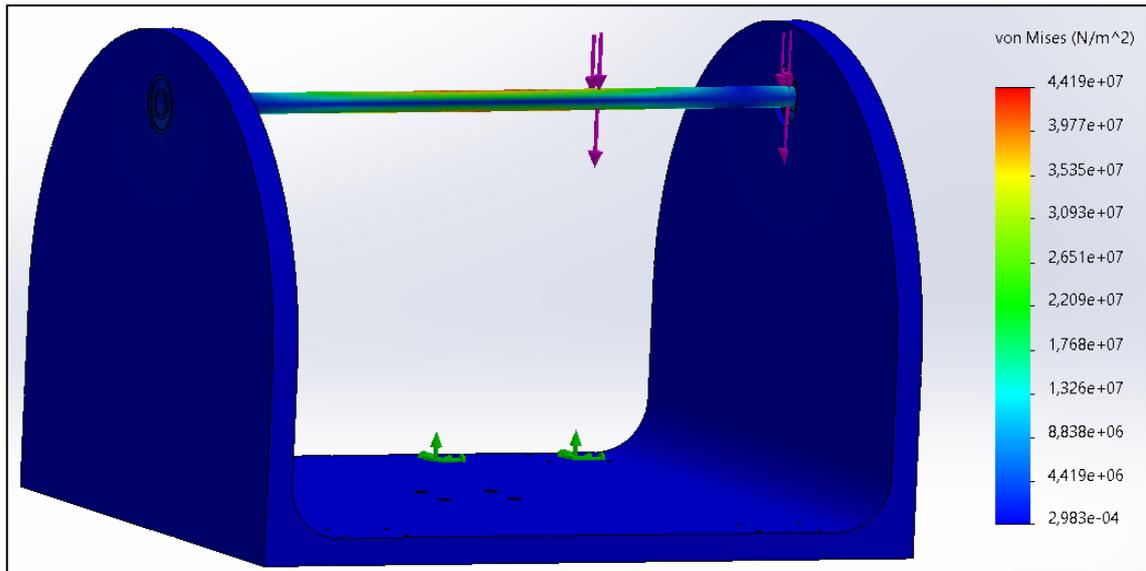


Figura 3.17 Esfuerzos de Von Mises en la estructura del cuarto eje

Las tensiones de Von Mises mínima y máxima obtenidas para la estructura del cuarto eje se observan en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11 Valores de Von Mises – estructura del cuarto eje

Tensión de Von Mises	Mínimo (Pa)	Máximo (Pa)
	$2.983 \cdot 10^{-4}$	$4.419 \cdot 10^{7}$

La Figura 3.18 muestra los valores de deformación generados para la estructura del cuarto eje.

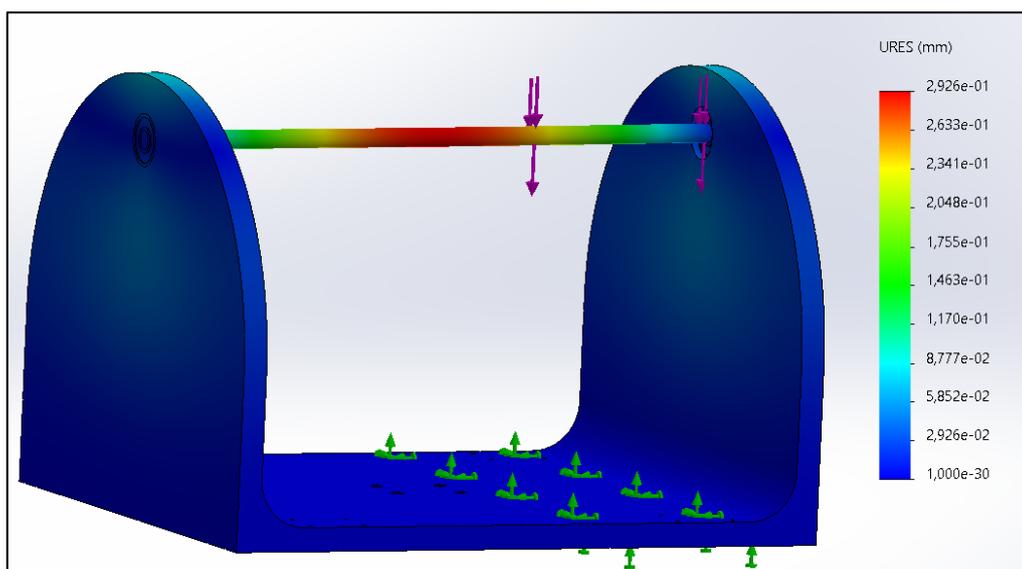


Figura 3.18 Deformación a lo largo de la estructura para el cuarto eje

Tabla 3.12 Valores de desplazamiento – estructura del cuarto eje

Desplazamiento	Mínimo (mm)	Máximo (mm)
	$1 \cdot 10^{-30}$	$2.926 \cdot 10^{-1}$

El máximo desplazamiento obtenido se ubica en el centro del cuarto eje (caso crítico). Este valor es igual a $2.926 \cdot 10^{-1}$ mm tal y como se muestra en la Tabla 3.12. Sin embargo, durante el funcionamiento real, la base giratoria se encuentra sostenida en los extremos del eje, donde el desplazamiento sería aún más pequeño, por lo tanto, no afecta al funcionamiento de la máquina.

Adicionalmente, los valores de factor de seguridad mínimo y máximo obtenidos a lo largo del sistema son de $1.199 \cdot 10^1$ y $2.011 \cdot 10^{11}$, lo cual garantiza que dicho elemento no va a fallar.

3.2 Caso de estudio

En este apartado se analiza un caso de estudio que demuestra las ventajas de emplear un cuarto eje en los sistemas de impresión 3D FDM tradicionales. Para este estudio se va a considerar la impresión 3D de una pieza, a través de un simulador, con generación de soportes (considerando 3 ejes) y sin generación de soportes (emulando el uso del cuarto eje). Además, se tuvo en cuenta la dimensión de la impresora 3D de cuatro ejes (para la selección geométrica de la pieza) y se seleccionó como material de impresión el plástico PLA.

La pieza que se consideró para el caso de estudio se muestra en la Figura 3.19.

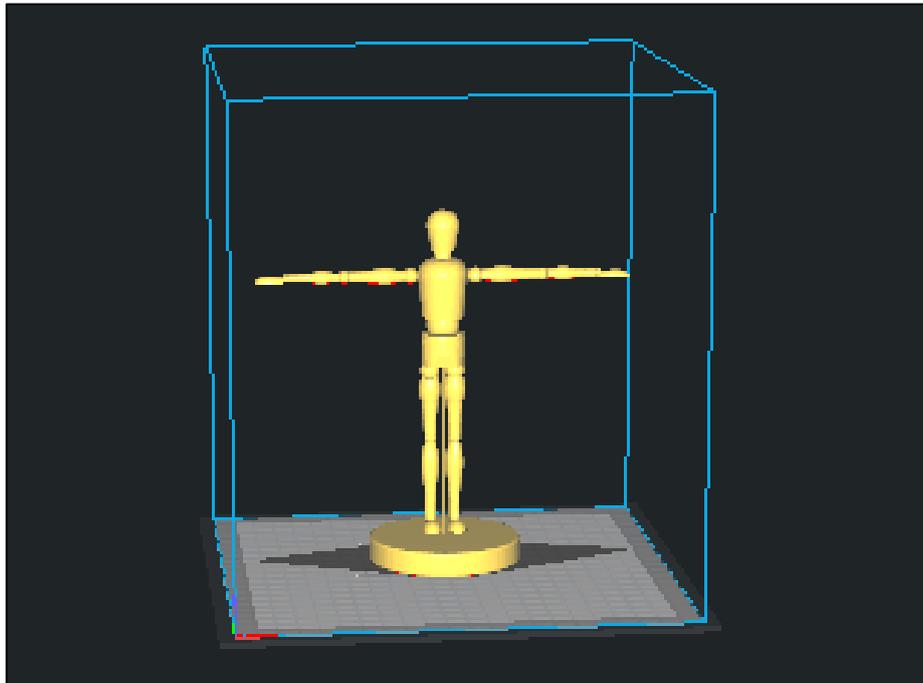


Figura 3.19 Pieza seleccionada para el caso de estudio

La pieza seleccionada es un muñeco con los brazos extendidos, con motivo de que, en el sistema tradicional de impresión con 3 ejes requiera la generación de soportes para poder fabricar adecuadamente dichos elementos. Por otro lado, con el uso de la impresora 3D de cuatro ejes, la pieza puede rotar, logrando adicionar el material de impresión, y así, crear los brazos de la pieza sin la necesidad de soportes, como se presenta en la Figura 3.20.

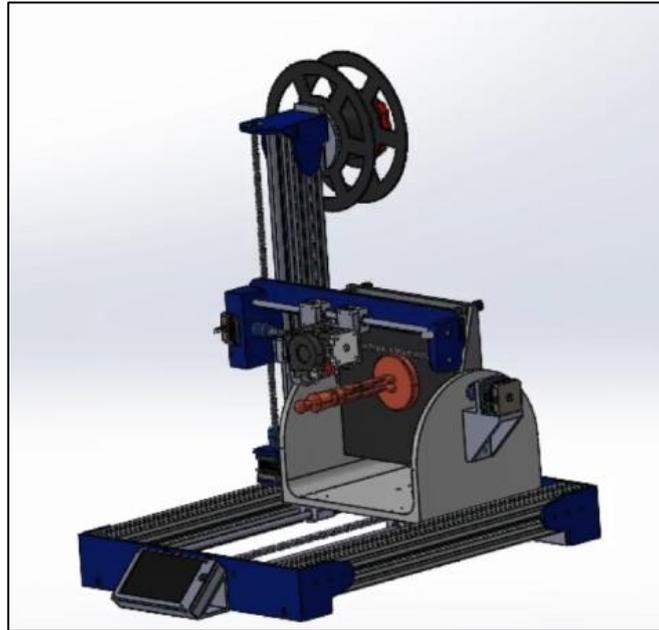


Figura 3.20 Pieza impresa con cuarto eje

La Tabla 3.13 muestra los resultados de masa de material empleada para la impresión y de tiempo de impresión para el caso simulado con 3 (con soportes) y 4 ejes (sin soportes).

Tabla 3.13 Resultados de la simulación del caso de estudio

Simulación	Masa de PLA (g)	Longitud de PLA (m)	Tiempo de impresión
Con soportes	110	36.72	16 horas 46 minutos
Sin soportes	43	14.32	6 horas 4 minutos

Se puede observar que, para este caso de estudio, con la adición de un cuarto eje se ahorra hasta un 155.81% de material (PLA), lo cual equivaldría a producir 1.6 piezas más por cada impresión que involucre la generación de soportes. Además, en tiempo de ejecución del trabajo, con el cuarto eje se ahorra aproximadamente 11 horas por cada impresión, lo cual representa 2 piezas adicionales fabricadas en el mismo tiempo que toma fabricar 1 pieza en la máquina de impresión 3D con 3 ejes (Figuras 3.21 y 3.22).

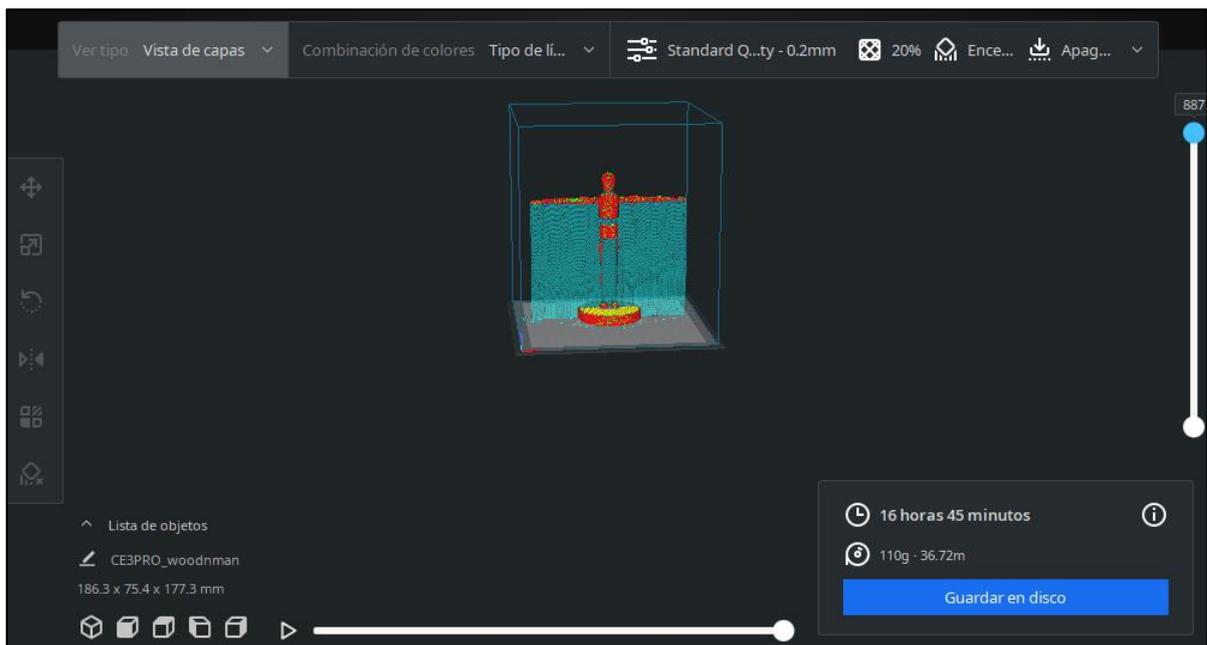


Figura 3.21 Caso de estudio con generación de soportes (3 ejes)

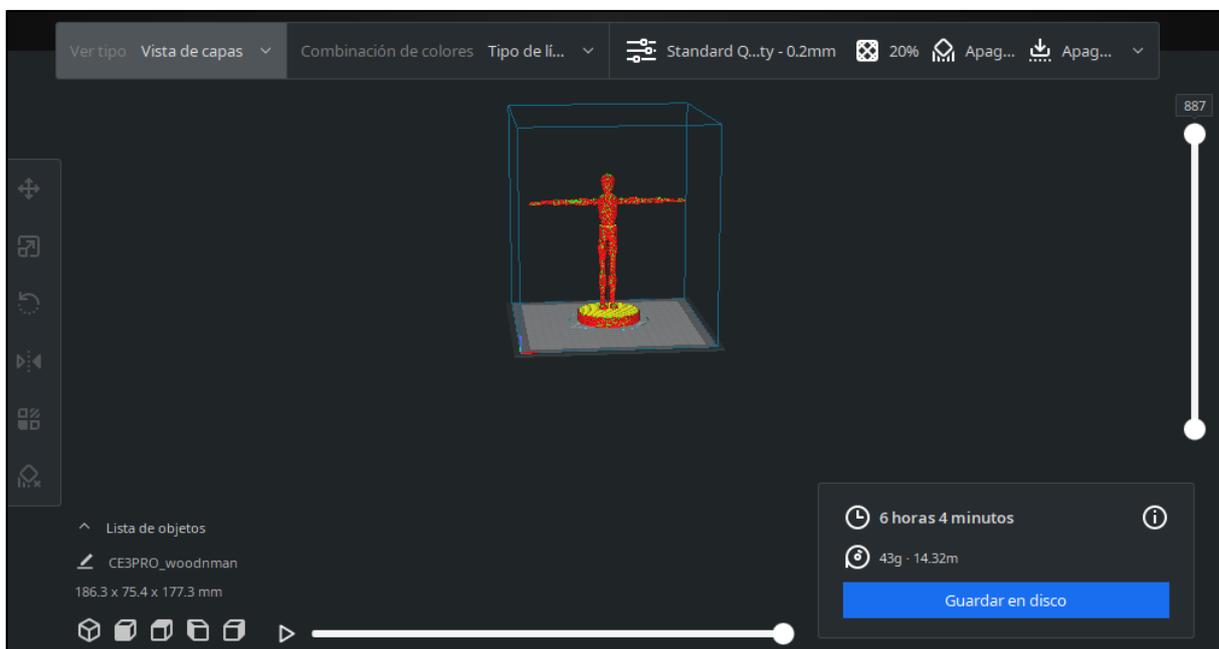


Figura 3.22 Caso de estudio sin generación de soportes (4 ejes)

Escalando este caso de estudio a producción en masa, el uso de una impresora 3D de 3 ejes, en el que se requiere generar soportes para la impresión del modelo, los gastos serían aún mayores. Por ejemplo, si se tiene una demanda de 100 piezas, se

necesitarían 11 kilos de PLA y aproximadamente 70 días de producción. En cambio, si se emplea la impresora con cuarto eje, sólo se necesitarán 4.3 kilos de PLA y un tiempo estimado de 25 días de producción. Por lo tanto, la implementación de un cuarto eje a un sistema de impresión 3D mejora notablemente la eficiencia del proceso de manufactura, especialmente, para el caso de producción en masa, donde incluso, se podría llegar a cumplir la demanda en la mitad del tiempo (como resultó en el caso de estudio analizado) de lo que se demora una impresora 3D tradicional de 3 ejes.

3.2.1 Programación de la impresora con 4 ejes

El principio de funcionamiento del sistema se enfoca en la programación indexada del 4to eje, la cual se basa en posicionar la base giratoria en un ángulo específico entre 0 y 90° o 0 y -90°, y luego, mover los otros ejes restantes (X Y, Z), lo que implica que, solo se hará uso del eje giratorio para secciones de la pieza a imprimir que sobresalen o exceden los ángulos permitidos por el proceso de impresión con 3 ejes, quitando la necesidad de generar material de apoyo. Para ello, es necesario dividir el modelo tridimensional en secciones, de tal forma que, cada sección sea fabricada en un ángulo específico. La cantidad de secciones dependerá de la complejidad de la pieza.

Una vez dividido el modelo 3D de la pieza en secciones, cada una es llevada a líneas de programación G-code en donde se crean los comandos que seguirá la máquina para realizar la impresión. Para unir las diferentes secciones durante el proceso de impresión se debe considerar el ángulo y el punto de origen en el que se empezará a crear cada sección independiente del modelo 3D. El comando utilizado para el cambio de ángulo de acuerdo con el lenguaje de programación G-code se define con las primeras letras del abecedario A, B y C que giran respecto a X, Y y Z respectivamente.

Para este caso de estudio, se ha dividido el modelo del muñeco en tres secciones, en donde la primera sección estará conformada por la silueta del muñeco sin los brazos. Esta sección será impresa fijando la base giratoria en un ángulo de 0°. En la Figura 3.23, se puede visualizar la trazabilidad de las rutas que tomará el extrusor para imprimir esta sección del modelo.

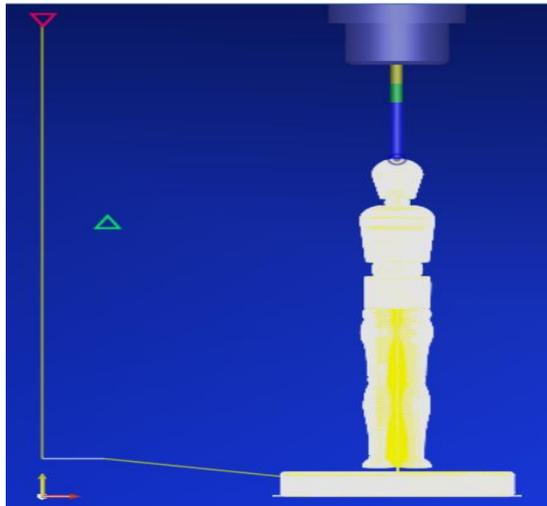


Figura 3.23 Ruta del extrusor en un ángulo de rotación de 0°

La segunda sección estará conformada por los comandos que crean las rutas de impresión del brazo izquierdo del muñeco, el cual será impreso con la base giratoria en un ángulo de 90°, como se puede apreciar en la Figura 3.24.

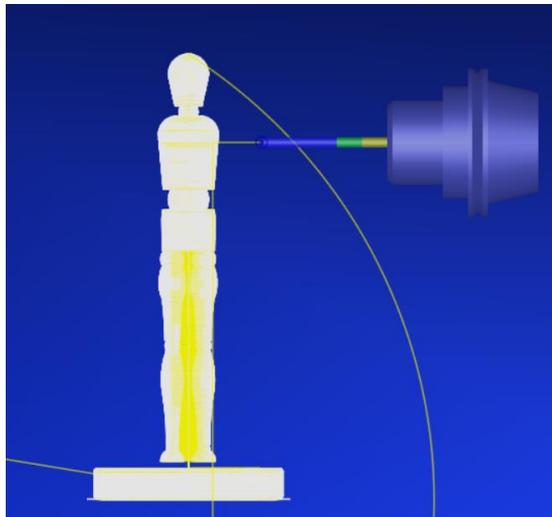


Figura 3.24 Ruta del extrusor en un ángulo de rotación de 90°

Por último, la tercera sección está conformada por las rutas de impresión del brazo derecho el cual será impreso con la base giratoria en un ángulo de -90° (Figura 3.25).

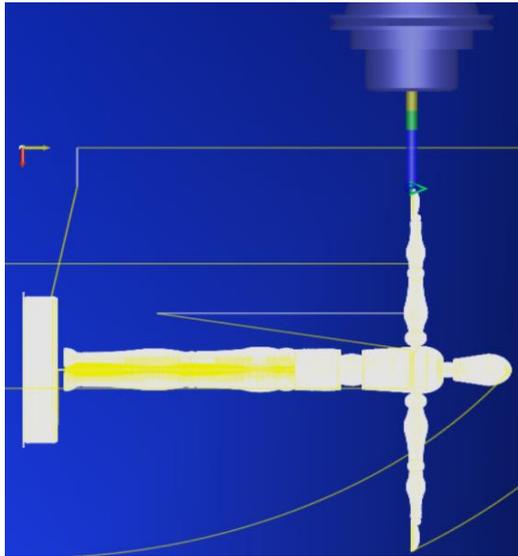


Figura 3.25 Ruta del extrusor en un ángulo de rotación de -90°

3.3 Análisis de costos

Para obtener el costo total del proyecto, se tomó en cuenta el tiempo de diseño, el precio de sus componentes y la mano de obra. Se establece un costo de \$15 por hora de diseño, considerando un tiempo de 120 horas, se obtuvo un costo total por diseño de \$1800.

El precio de todos los componentes requeridos para la elaboración de la impresora 3D de cuatro ejes se muestra en la Tabla 3.14, en donde, además se indica la cantidad de elementos, el precio unitario y precio total.

Tabla 3.14 Cotización de componentes para la impresora de 4 ejes

Tipo de sistema	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio UNIT (USD)	Precio Total (USD)
Sistema mecánico	Perfil de aluminio (50x50x1600)	1	u	\$ 16,00	\$ 16,00
	Tornillo de potencia M8 (L780 mm)	1	u	\$ 35,00	\$ 35,00
	Tornillo de potencia M10 (L560 mm)	1	u	\$ 21,00	\$ 21,00
	Fabricación y mecanizado del eje de rotación 8 mm (L395 mm)	1	u	\$ 15,00	\$ 15,00
	Eje varilla acero 8 mm (L1500mm)	1	u	\$ 30,00	\$ 30,00
	Rodamientos de bolas SC8UU	8	u	\$ 6,50	\$ 52,00
	Tornillo tuerca trapezoidal 8 mm	2	u	\$ 4,50	\$ 9,00
	Tornillo tuerca trapezoidal 10 mm	1	u	\$ 5,00	\$ 5,00
	Acople flexible 4 mm a 8 mm	1	u	\$ 4,00	\$ 4,00
	Acople flexible 4 mm a 10 mm	1	u	\$ 4,50	\$ 4,50
	Rodamiento de bola de 8 mm	4	u	\$ 1,50	\$ 6,00
	Rodamiento de bola de 10 mm	2	u	\$ 1,70	\$ 3,40
	Kit de tuerca y resorte de nivelación M4	1	u	\$ 48,00	\$ 48,00
	Mecanizado de la placa de unión escuadra	1	u	\$ 7,00	\$ 7,00
	Mecanizado de la placa de unión para el motor del eje Z	1	u	\$ 8,00	\$ 8,00
	Placas de aluminio para la base	2	u	\$ 25,00	\$ 50,00
	Mecanizado de la placa base	2	u	\$ 15,00	\$ 30,00
	Mecanizado de las placas de unión con 4 orificios	2	u	\$ 6,00	\$ 12,00
Mecanizado del soporte del eje X (Parte 1)	1	u	\$ 12,00	\$ 12,00	

	Mecanizado del soporte del eje X (Parte 2)	1	u	\$ 9,00	\$ 9,00
	Mecanizado del soporte del eje X (Parte 3)	1	u	\$ 6,00	\$ 6,00
	Mecanizado del soporte del extrusor	1	u	\$ 12,00	\$ 12,00
	Mecanizado del soporte de motor	2	u	\$ 10,00	\$ 20,00
	Mecanizado del soporte de la cama térmica	1	u	\$ 15,00	\$ 15,00
	Mecanizado del soporte de la base giratoria	1	u	\$ 35,00	\$ 35,00
Sistema electrónico y de control	Servo motor 17HS4401-S Nema 17	3	u	\$ 17,00	\$ 51,00
	Servo motor 57HD4016-01 Nema 23	1	u	\$ 39,00	\$ 39,00
	Tarjeta Duet 2, WIFI V1.04	1	u	\$ 70,00	\$ 70,00
	Duex4 placa de expansión	1	u	\$ 35,00	\$ 35,00
	PanelDue	1	u	\$ 15,00	\$ 15,00
	Extrusor	1	u	\$ 35,00	\$ 35,00
	Fuente de alimentación	1	u	\$ 40,00	\$ 40,00
	Cama térmica	1	u	\$ 25,00	\$ 25,00
Varios	Diseño del prototipo	120	h	\$ 15,00	\$ 1.800,00
Total					\$2.574,90

En la Tabla 3.15, se detalla el costo de la mano de obra correspondiente al ensamblaje y dirección técnica. En este caso no se consideró el costo del maquinado de piezas debido a que este costo ya se encuentra incluido en los precios mencionados en tabla anterior.

Tabla 3.15 Costo de ensamblaje y dirección para la impresora de 4 ejes

Descripción	Cantidad horas/hombre	Precio \$/hora	Subtotal
Ensamblaje	20	15	300
Dirección técnica	8	10	80
Total			380

Por lo tanto, el precio de materiales, componentes y diseño para la impresora 3D sumado a la mano de obra para la implementación y ensamblaje tiene un resultado total del \$2954,9 dólares.

3.3.1 Rentabilidad del proyecto

La rentabilidad del proyecto se analizó bajo el caso de estudio expuesto en la sección 3.2, en donde se logra ahorrar \$3440 al proyectar 100 piezas impresas. Se aproximó el costo total de una impresora 3D de cuatro ejes puesta en venta en el mercado (con costo de diseño y ensamblaje amortizado por el volumen de impresoras construidas) a un valor de \$774.9. Con todo esto, el dinero invertido se recuperaría al producir 24 piezas (como cada pieza toma un tiempo de 6 horas con 4 minutos de fabricación) en aproximadamente 19 días.

Adicionalmente, se garantiza una alta durabilidad del sistema mecánico, ya que, durante el diseño de cada uno de sus componentes, se analizaron los casos más críticos (cargas sobredimensionadas) con relación a los casos en los que normalmente funcionarían dichos elementos. Finalmente, el sistema de control cuenta con una alta adaptabilidad electrónica y flexibilidad de software (con respecto a los puertos de los motores y el PanelDue). Esto debido a que, los puertos de la placa electrónica Duet no están limitados a una sola configuración, se puede configurar motores con cualquier tipo de finalidad a este sistema, por ejemplo, se podría agregar en la placa de extensión un motor asociado al sistema de ventilación de la placa en caso de ser necesario. Con respecto al PanelDue, este sistema permite modificar manualmente procesos relacionados a la etapa de calibración, verificación de componentes, e incluso, se puede ingresar G-code manualmente para visualizar el comportamiento del sistema.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se tuvo como objetivo principal elaborar el diseño de una impresora 3D de cuatro ejes con el fin de optimizar el proceso de fabricación de piezas tridimensionales en cuanto a tiempo, cantidad de material empleado y calidad de estas. Esto se logró por medio de la implementación de un eje rotacional en la base del diseño convencional de una impresora 3D (3 ejes), las cuales se ven obligadas a generar soportes estructurales cuando deben crear piezas con geometrías complejas.
- Se logró desarrollar un diseño adecuado (materiales y geometría) para las estructuras de soporte del sistema, las cuales son capaces de resistir las vibraciones generadas por el movimiento del extrusor y la rotación de la base a lo largo del eje X (4to eje).
- Se pudo seleccionar un sistema de control flexible al utilizar la tarjeta Duet. Esta tarjeta sirve como suministro de potencia y centro de control de la parte electrónica de la impresora 3D, además, cuenta con puertos configurables, a los cuales se les puede atribuir una función deseada. Una de las ventajas es que cuenta con una tarjeta de extensión (DuetX), la cual permite agregar más actuadores al sistema y que fue de vital importancia para implementar el motor del cuarto eje en el diseño.
- La impresora 3D de cuatro ejes posee un diseño robusto asociado al sistema mecánico. Para el diseño de este sistema, se tuvieron en consideración los casos más críticos con respecto a la aplicación de las cargas sobre sus

componentes, asegurando que estos puedan resistir las máximas fuerzas ocasionadas por efecto del peso que soportan.

- Los diferentes materiales y elementos seleccionados para la construcción de la impresora 3D de cuatro ejes son altamente accesibles, debido a que se emplearon los más comunes que venden e implementan para las impresoras 3D convencionales, como: motores, tornillos de potencia, cama térmica, etc.
- Se logró diseñar una impresora 3D de cuatro ejes rentable, ya que, de acuerdo con el caso de estudio analizado, se ahorran grandes cantidades de recursos y tiempo de producción (dependiendo de la demanda). Además, se podría llegar a recuperar la inversión (en un panorama ideal) en corto plazo.

4.2 Recomendaciones

- Se puede optimizar el sistema de transmisión de la impresora 3D, reemplazando los tornillos de potencia por bandas dentadas, así se logra disminuir el peso general del sistema y, por lo tanto, seleccionar componentes de menor dimensión, lo que también disminuye el costo total del sistema. Sin embargo, hay tener en cuenta que este tipo de sistema de transmisión presenta una menor precisión que la de los tornillos de potencia.
- Para mejorar la estabilidad del sistema respecto a las vibraciones que se pueden generar durante su funcionamiento, se recomienda colocar topes de caucho en la base de la estructura que se va a asentar sobre la superficie o mesa de trabajo.
- Se recomienda realizar pruebas de funcionamiento de la máquina diseñada, con el fin de observar fallos respecto al sistema mecánico y obtener retroalimentación respecto al sistema de control. De esta forma, se podrá corregir o ajustar cualquier problema operacional.

- Se sugiere desarrollar un software dedicado al proceso previo de partición del modelo 3D, para obtener secciones adecuadas a ser impresas en el equipo de cuatro ejes.
- Se recomienda profundizar en la selección de materiales y componentes para los elementos de movimiento y control, buscando mayor precisión. Sin embargo, esto también va a depender de la máxima resolución que se requiera y limitaciones de la tecnología de impresión 3D empleada.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] I. Moreno & P. Serracín, (2017). Impresora 3D (Vol. 27, Núm. 1) [Online]. Disponible en: <https://ridda2.utp.ac.pa/handle/123456789/263>
- [2] J. Hiemenz, “La impresión 3D con FDM”, en Stratasys , Rheinmuster, Alemania, 2011, pp 1-2.
- [3] J. De La Cruz, “¿Qué significan los grados de libertad?”, Revista Peruana de Epidemiología, vol 7, no. 2, pp 1-6, agosto, 2013.
- [4] M. Zahera, La fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y desarrollo de productos, XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Valencia, España, 2012, pp. 2089-2092.
- [5] J. Velásquez, procesos de Manufactura con tecnología 3D, Revista de Investigación Multidisciplinaria CTScafe, CTScafe, vol. III, no. 7, pp. 40-46, marzo, 2019.
- [6] A. Josrquera, Introducción ¿Dónde nos encontramos?, en el Fabricación digital: Introducción al modelado e impresión 3D, Ed. Madrid: Secretaría General Técnica, 2016, pp. 5-21.
- [7] Trapero, D. (20 de Diciembre de 2019). *Las partes de una impresora 3D ¿Qué componentes elegir?* Obtenido de Bitfab: <https://bitfab.io/es/blog/partes-impresora-3d/>.
- [8] W. Montalvo, Diseño de un sistema de cuarto eje para el centor de mecanizado del Laboratorio CAMPRO de la FIMC-ESPOL, Tesis de Grado, FIMCP, ESPOL, Guayaquil, Ecuador, 2016.
- [9] P. Vilar, Diseño y fabricación de una máquina CNC de 4 ejes (Componentes electromecánicos), Fundación UADE, Buenos Aires, Argentina, A19S07, Nov. 2019.
- [10] V. Morales, Desarrollo de un controlador básico de impresión 3D, Trabajo de fin de grado, Universidad Politécnica de Valencia, 2016.

[11] BobCAD-CAM (18, enero, 2021). Diferentes tipos de cuarto eje en máquinas CNC [Online]. Disponible en: <https://clasescadcam.com/blog/f/diferentes-tipos-de-cuarto-eje-en-m%C3%A1quinas-cnc?blogcategory=CAD>

[12] BobCAD-CAM (20, noviembre, 2021). Mecanizado de 4 ejes simultáneos sin complicación (1ra edición) [Online]. Disponible en: <http://www.softwarecadcam.com/productos-bc-fresadora-4-ejes-pro.html>

APÉNDICES

APÉNDICE A

MATRIZ DE SOLUCIONES

Tabla A.1 Soluciones propuestas

Integrantes: Joseph Baquerizo y Darwin Bermeo	
Soluciones	
SA	Impresora 3D con sistema de transmisión de banda dentada y cuarto eje en la herramienta del sistema
SB	Impresora 3D con sistema de transmisión de banda dentada y cuarto eje en la base del sistema
SC	Impresora 3D con sistema de transmisión de tornillo sin fin y cuarto eje en la herramienta del sistema
SD	Impresora 3D con sistema de transmisión de tornillo sin fin y cuarto eje en la base del sistema

Tabla A.2 Criterios de selección

VARIABLES - CRITERIOS	
Costo	Suma total de los costos de cada componente del diseño.
Mantenimiento	Dificultad de mantener el sistema elaborado en buen estado. Frecuencia de inspección de actividades de mantenimiento.
Seguridad	Característica del sistema relacionada con el nivel de protección de la solución para no perjudicar al usuario.
Control	Capacidad de la solución para comandar a los actuadores a realizar una acción específica.
Dimensionamiento	Espacio de impresión disponible.

Tabla A.3 Prioridad de criterios

Control > Dimensionamiento > Seguridad > Mantenimiento > Costo							
	Costo	Mantenimiento	Seguridad	Control	Dimensionamiento	SUMA	POND.
Costo		0	0	0	0	1	0,066666667
Mantenimiento	1		0	0	0	2	0,133333333
Seguridad	1	1		0	0	3	0,2
Control	1	1	1		1	5	0,333333333
Dimensionamiento	1	1	1	0		4	0,266666667
						15	1

Tabla A.4 Análisis comparativo del criterio de costo

CRITERIO	SD > SC = SB > SA					
	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	SUMA	POND.
Solución A		0	0	0	1	0,1
Solución B	1		0,5	0	2,5	0,25
Solución C	1	0,5		0	2,5	0,25
Solución D	1	1	1		4	0,4
					10	1

Tabla A.5 Análisis comparativo del criterio de mantenimiento

CRITERIO	SD = SB > SC > SA					
MANTENIMIENTO	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	SUMA	POND.
Solución A		0	0	0	1	0,1
Solución B	1		1	0,5	3,5	0,35
Solución C	1	0		0	2	0,2
Solución D	1	0,5	1		3,5	0,35
					10	1

Tabla A.6 Análisis comparativo del criterio de seguridad

CRITERIO	SD > SC > SB > SA					
SEGURIDAD	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	SUMA	POND.
Solución A		0	0	0	1	0,1
Solución B	1		0	0	2	0,2
Solución C	1	1		0	3	0,3
Solución D	1	1	1		4	0,4
					10	1

Tabla A.7 Análisis comparativo del criterio de control

CRITERIO	SD = SC > SB = SA					
CONTROL	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	SUMA	POND.
Solución A		0,5	0	0	1,5	0,15
Solución B	0,5		0	0	1,5	0,15
Solución C	1	1		0,5	3,5	0,35
Solución D	1	1	0,5		3,5	0,35
					10	1

Tabla A.8 Análisis comparativo del criterio de dimensionamiento

CRITERIO	SD > SC > SB > SA					
DIMENSIONAMIENTO	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	SUMA	POND.
Solución A		0	0	0	1	0,1
Solución B	1		0	0	2	0,2
Solución C	1	1		0	3	0,3
Solución D	1	1	1		4	0,4
					10	1

APÉNDICE B

PARÁMETROS PARA EL ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

B.1 Análisis de elementos finitos en el soporte del eje X

Tabla B.1.1 Parámetros del análisis

Parámetro	Detalle
Carga total (Sistema X)	28.56 N
Material del soporte	Aleación de Aluminio 6063 – T5
Espesor del soporte	5 mm

Tabla B.1.2 Características mecánicas

Característica	Valor
Densidad de masa	2700 kg/m ³
Volumen	77832.22 milímetros cúbicos
Límite de tracción	185000000 N/m ²
Límite elástico	145000000 N/m ²

B.2 Análisis de elementos finitos en la placa para la base – estructura del eje Y

Tabla B.2.1 Parámetros de análisis

Parámetro	Detalle
Carga total (Sistema X)	136.8 N
Material del soporte	Aleación de Aluminio 6063 – T5
Espesor del soporte	6 mm

Tabla B.2.2 Características mecánicas de placa base

Característica	Valor
Material	Aleación de Aluminio 6063 – T5
Densidad de masa	2700 kg/m ³
Volumen	228385.61 milímetros cúbicos
Límite de tracción	185000000 N/m ²
Límite elástico	145000000 N/m ²

Tabla B.2.3 Características mecánicas de ejes guías en Y

Característica	Valor
Material	Acero AISI 1045
Densidad de masa	7850 kg/m ³
Volumen	27143.36 milímetros cúbicos
Límite de tracción	625000000 N/m ²
Límite elástico	530000000 N/m ²

B.3 Análisis de elementos finitos de la estructura para el eje Z

Tabla B.3.1 Parámetros de análisis

Parámetro	Detalle
Carga total (Sistema X y soportes del eje X)	30 N
Distancia al eje de giro	362.39
Material del soporte	Aleación de Aluminio 6063 – T5
Dimensión de la estructura	50x50x475 mm

Tabla B.3.2 Propiedades mecánicas

Característica	Valor
Material	Aleación de Aluminio 6063 – T5
Densidad de masa	2700 kg/m ³
Volumen	228385.61 milímetros cúbicos
Límite de tracción	185000000 N/m ²
Límite elástico	145000000 N/m ²

B.4 Análisis de elementos finitos de la estructura para el cuarto eje**Tabla B.4.1 Parámetros de análisis**

Parámetro	Detalle
Carga total (Sistema de 4to Eje incluida el material plástico de la impresión 3D)	105.468N
Material del eje guía	Acero AISI 1045
Espesor del eje guía	8 mm
Material del soporte de la base giratoria	Duralon
Espesor del soporte de la base giratoria	10 mm

Tabla B.4.2 Propiedades mecánicas de la estructura para la base giratoria

Característica	Valor
Material	Duralon
Densidad de masa	1150 kg/m ³
Volumen	1253381.60 milímetros cúbicos
Límite de tracción	7.92897 * 10 ⁷ N/m ²
Límite elástico	6 * 10 ⁷ N/m ²

Tabla B.4.3 Propiedades mecánicas del eje para rotación

Característica	Valor
Material	Acero AISI 1045
Densidad de masa	7850 kg/m ³
Volumen	228385.61 milímetros cúbicos
Límite de tracción	625000000 N/m ²
Límite elástico	530000000 N/m ²

APÉNDICE C

CÓDIGO G DEL CUARTO EJE

```

153371 G0 F9000 X115.24 Y102.795
153372 M204 S1000
153373 G1 F300 X114.903 Y102.458 E1286.43068
153374 M204 S2000
153375 G0 F9000 X114.87 Y102.145
153376 ;TIME ELAPSED:10201.140712
153377 G1 F1500 E1279.93068
153378 M204 S3000
153379 M107
153380
153381 M82 ;absolute extrusion mode
153382 M104 S0
153383 M104 T1 S0
153384
153385 G0 B90 ←
153386 G0 F9000 Z200 Y101.444
153387 G0 Z124.635
153388 G0 X-143.6
153389
153390 T0
153391 M82 ;absolute extrusion mode
153392
153393 G92 E0
153394 M109 S210
153395 G280 S1
153396 G0 Z20.001
153397 G1 F1500 E-6.5
153398 ;LAYER COUNT:283
153399 ;LAYER:0
153400 M107
153401 M204 S1000
153402 G0 F600 X+114.421 Y+95.243 Z3+0.57
153403 G0 F3600 X1+115.502 Y2+96.086
153404 ;TIME ELAPSED:22.105875

```

Movimiento del eje de rotación de 90° en sentido antihorario

Posicionamiento del extrusor en zona del brazo izquierdo

Inicio de la creación del modelo del brazo izquierdo

Figura C.1 Operación de brazo izquierdo de la pieza

```

177461 G0 X116.655 Y94.31
177462 M204 S1000
177463 ;TYPE:SKIN
177464 G1 F388.2 X116.589 Y94.527 E325.9857
177465 G1 X116.498 Y95.285 E326.00633
177466 M204 S2000
177467 G0 F9000 X116.493 Y95.027
177468 ;TIME ELAPSED:1489.441756
177469 G1 F1500 E319.50633
177470 M204 S3000
177471 M107
177472
177473 M82 ;absolute eX#1+trusion mode
177474 M104 S0
177475 M104 T1 S0
177476
177477 G0 B-90 ←
177478 G0 F9000 Z-60 Y101.444
177479 G0 X143.6
177480 G0 Z-106.335
177481
177482 T0
177483 M82 ;absolute extrusion mode
177484
177485 G92 E0
177486 M109 S210
177487 G280 S1
177488 G0 Z20.001
177489 G1 F1500 E-6.5
177490 M107
177491 M204 S1000
177492 M205 X20 Y20
177493 G0 F600 X115.267 Y94.365 Z0.57
177494 G0 F3600 X115.45 Y95.886
177495 M106 S85

```

Final de la creación del modelo del brazo izquierdo

Movimiento del eje de rotación de 90° en sentido horario

Posicionamiento del extrusor en zona del brazo derecho

Inicio de la creación del modelo del brazo derecho

Figura C.2 Operación de brazo derecho de la pieza

APÉNDICE D

PLANOS

4

3

2

1

F

F

E

E

D

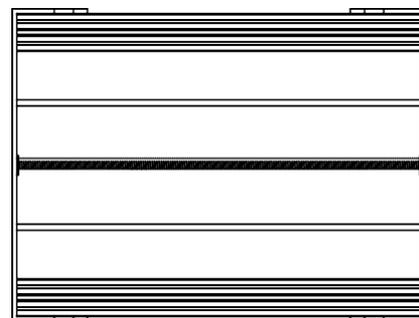
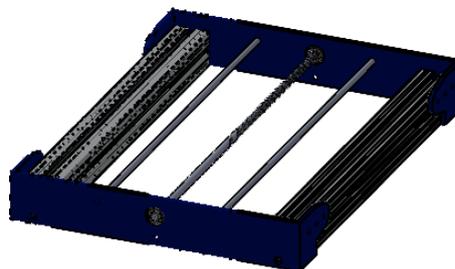
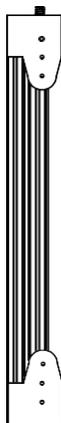
D

C

C

B

B



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:	ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN

A	DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO: Eje Y	N.º DE DIBUJO	A4
	DIBUJ.	D. BERMEO	DABERMEO	17/2/2022			
	DIBUJ.	J. BAQUERIZO	JOSANBAQ	17/2/2022			
	VERIF.	F. MALDONADO	FAMALDON	17/2/2022			
APRO.							
FABR.				MATERIAL:			
CALID.							
				PESO:	ESCALA:1:10	HOJA 1 DE 1	

4

3

2

1

A

4

3

2

1

F

F

E

E

D

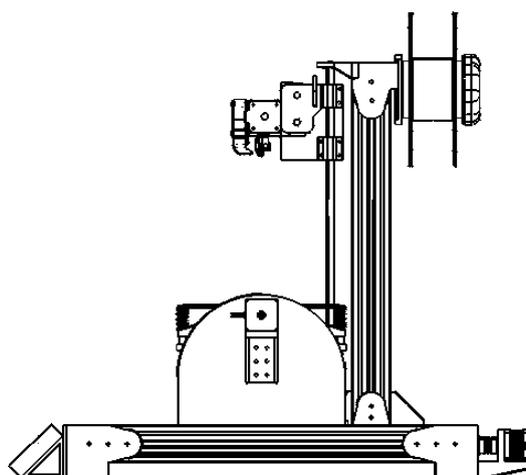
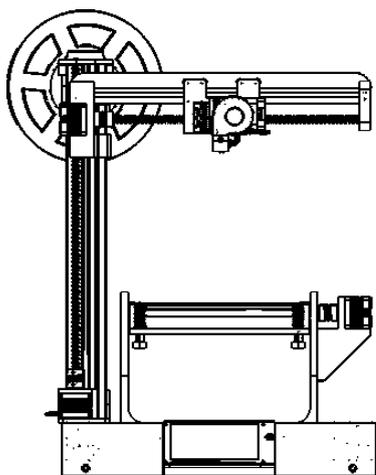
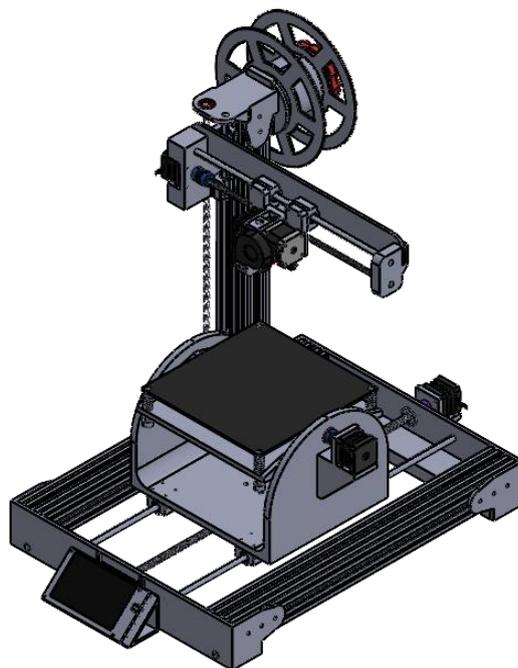
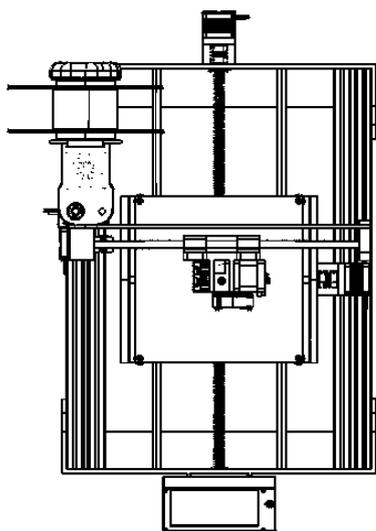
D

C

C

B

B



A

A

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	D. BERMEO	DABERMEO	17/2/2022
DIBUJ.	J. BAQUERIZO	JOSANBAQ	17/2/2022
VERIF.	F. MALDONADO	FAMALDON	17/2/2022

TÍTULO:

Impresora 3D

APRO.
 FABR.
 CALID.

MATERIAL:

N.º DE DIBUJO

A4

PESO:

ESCALA:1:20

HOJA 1 DE 1

4

3

2

1

4 3 2 1

F F

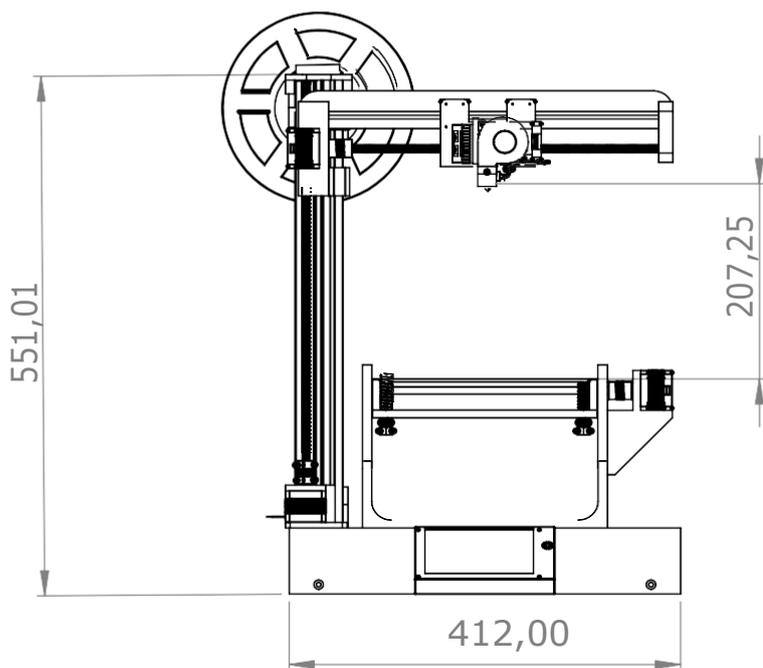
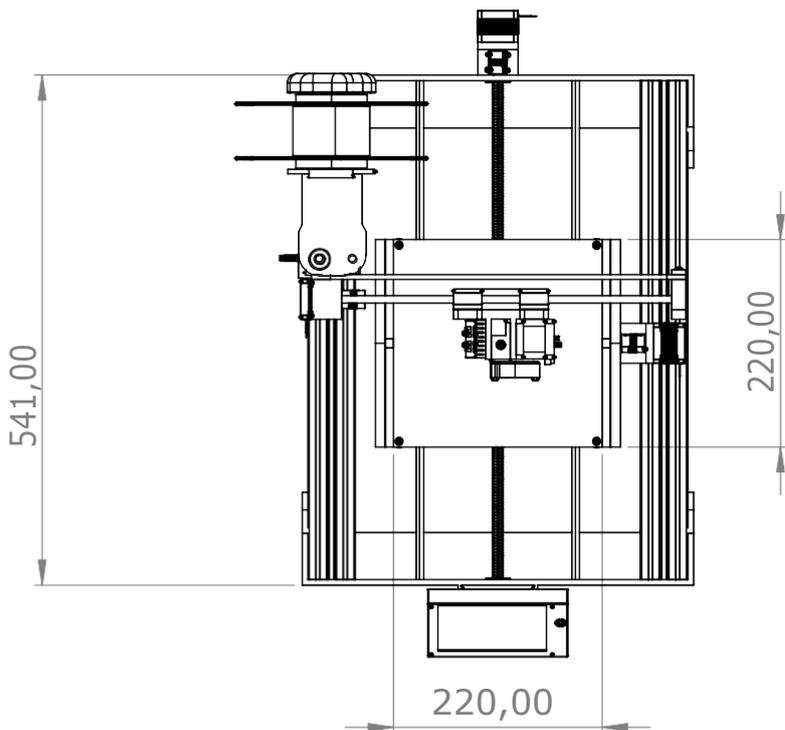
E E

D D

C C

B B

A A



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.	D. BERMEO	DABERMEO	17/2/2022
VERIF.	F. MALDONADO	FAMALDON	17/2/2022
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:

IMPRESORA 3D

N.º DE DIBUJO

A4

MATERIAL:

PESO:

ESCALA: 1:20

HOJA 1 DE 1

4 3 2 1

APÉNDICE E
AUTORIZACIÓN DE LA EMPRESA



16/03/22

AUTORIZACIÓN

Yo, Henry Steven Freire Vásconez, con cédula de ciudadanía #0927646455, representante legal de Play and Learning PLANLEAR S.A., autorizo usar el nombre de nuestra organización para el tema del proyecto integrador **"Diseño de un prototipo de impresora 3D de 4 ejes"**, realizado por la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), perteneciente a los/las estudiantes **Darwin Bermeo** con número de cédula de ciudadanía 0925624371 y **Joseph Baquerizo** con número de cédula de ciudadanía 0919910091.



Firma

Henry Steven Freire Vásconez
Cédula de Ciudadanía #: 0927646455
Teléfono: 04 5021561