



UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR

Escuela de Ciencias y Tecnologías Aplicadas

TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE Ingeniero en Mecatrónica

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PROGRAMACIÓN DE UNA MÁQUINA DE
CONTROL NUMÉRICO APLICADA AL PROTOTIPADO RÁPIDO DE
MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA DE MATERIAL PARA EL
LABORATORIO DE MECATRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD
INTERNACIONAL DEL ECUADOR**

Galo Xavier Maldonado Toro

**Director
Ing. Ana Rodas**

DICIEMBRE 2012

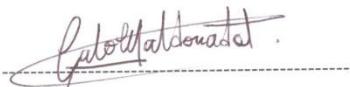
QUITO – ECUADOR

I

DECLARACIÓN

Yo, GALO XAVIER MALDONADO TORO declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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



GALO XAVIER MALDONADO TORO

II

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por GALO XAVIER MALDONADO TORO, bajo mi supervisión.



ANA RODAS

DIRECTOR DE PROYECTO

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE

1.1 INTRODUCCIÓN AL PROTOTIPADO RÁPIDO

El desarrollo tradicional de productos empieza con la generación de ideas y termina con el diseño de ingeniería; de forma tal que se obtiene un elemento apto para su comercialización, mediante algún proceso de fabricación. Los campos de competitividad para liderar el mercado mundial son: calidad, precio, tiempo de entrega, confiabilidad de entrega, flexibilidad e innovación¹. Para esto, un factor preponderante es el método de fabricación utilizado en la obtención del producto; la llamada manufactura de clase mundial, que consiste en competir con las mejores compañías manufactureras del mundo, la tienen solo aquellas compañías que lideran cada campo de competitividad. El trabajo de los ingenieros consiste en asegurar estos factores, de modo que el producto pueda ser diseñado optimizando el costo de su fabricación y tiempo, garantizando su funcionalidad y calidad, y además, teniendo en cuenta la flexibilidad del producto y de su producción, para de esta forma, continuar con el proceso de innovación y mejora del producto final.

Para medir el grado de éxito que tiene una compañía manufacturera, los factores críticos en el desarrollo del producto² se indican en la figura 1.1.

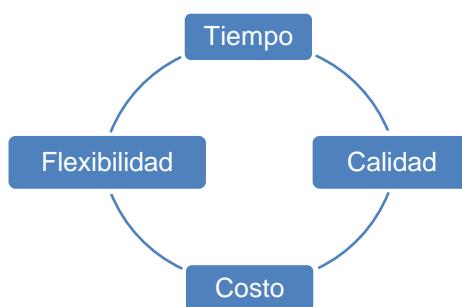


Figura 1.1: Factores críticos en el desarrollo del producto

Fuente: El autor

¹ Frank W. Liou, Rapid Prototyping and Engineering Applications, p.1.

² Andreas Gebhardt, Rapid Prototyping, p.5.

El prototipado rápido de productos tiene un impacto directo en estos factores, ya que puede ser usado en la industria para cumplir los roles que se muestran en la figura 1.2.

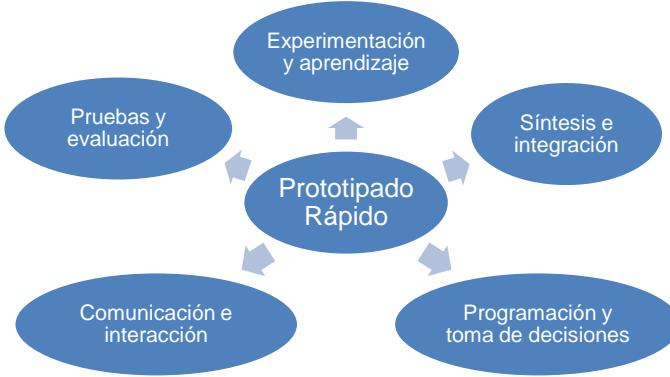


Figura 1.2: Rol del Prototipado Rápido en la Industria

Fuente: El autor

Estos roles hacen que el equipo de trabajo lleve a cabo actividades como:

- Reunir los requerimientos iniciales del cliente.
- Mostrar pruebas de conceptos a la gerencia.
- Validar las especificaciones de diseño.
- Encontrar soluciones para usos específicos de productos.
- Encontrar problemas de diseño.
- Mejorar el entendimiento en las primeras etapas de diseño.
- Resolver cambios de requerimientos.
- Aumentar la participación del usuario en el desarrollo del producto.
- Pensar, planificar, experimentar, evaluar y aprender, mientras se encuentran diseñando el producto.
- Disminuir dudas y riesgos en el desarrollo del producto, y en la acogida del usuario final, etc.

Inicialmente el prototipado rápido solo se usaba para la fabricación de prototipos, hoy en día, se utiliza como un proceso de fabricación más en la industria.

Como ejemplos de su uso, se puede citar las siguientes compañías:

- Compañías aeroespaciales, un ejemplo es la compañía Bell Helicopter que fabrica aeronaves híbridas, que combinan tecnología de aviones y helicópteros; la compañía usó máquinas de prototipado FDM, para que el

equipo de ingenieros evaluará el diseño de la aeronave y también se la usó para crear piezas finales dentro de la aeronave.³

- Compañías que manufacturan autos de gran rendimiento como BMW, donde se usa el prototipado rápido para crear prototipos de autos y construir herramientas manuales de montaje de automóviles.⁴

La fabricación de máquinas de prototipado rápido “Open Source”, ha dado cabida a la creación de empresas dedicadas a fabricar impresoras 3D de bajo costo, basadas en el proyecto RepRap, como lo son Bits from Bytes en Bristol, Fab@home y Makerbot Industries LLC en Nueva York. Las impresoras de bajo costo tienen como objetivo principal, el que cada persona pueda tener su máquina y fabricar sus modelos 3D desde el escritorio de su casa.

Se espera que en el futuro, miles de impresoras 3D personales y de gama alta destinadas a la manufactura aditiva, sean esparcidas en todo el mundo para producir objetos en tres dimensiones. Para el 2012, la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de los Estados Unidos tiene planeado implementar 1000 máquinas de prototipado rápido en escuelas secundarias en los Estados Unidos como parte de su programa de Experimentación y Enriquecimiento Manufacturero.⁵

En Ecuador, esta tecnología no ha sido difundida aún. A pesar de que varias compañías se beneficiarían de este método de fabricación, el prototipado rápido no es una necesidad actual para la industria ecuatoriana. Esto se debe a diversos factores como:

- Escaso desarrollo de tecnología propia.
- Maquinaria CAM muy poco usada en la industria nacional.
- Producción nacional no competitiva a nivel mundial.
- Fabricación de productos reducida.
- Existen escasas fuentes de inversión nacional e internacional.

³ Stratasys, FDM Helps Bell Helicopter Build Quality Prototypes, <http://www.stratasys.com/Resources/Case-Studies/Aerospace-FDM-Technology-Case-Studies/Bell-Helicopter.aspx>.

⁴ Stratasys, Manufacturing Jigs and Fixtures with FDM, <http://www.stratasys.com/Resources/Case-Studies/Automotive-FDM-Technology-Case-Studies/BMW-Manufacturing-Tools.aspx>.

⁵ Paul Wallich, “Absolutely Fab”, IEEE Spectrum 11.11, p. 18.

- La tecnología usada no está a la vanguardia y los procesos que se siguen son rudimentarios.

Sin embargo el futuro desarrollo de maquinaria de control numérico de bajo costo en el país impulsado por el contenido abierto de los proyectos, permitirá un aporte fundamental para el sector manufacturero, en especial para industrias donde no se posee los recursos económicos necesarios para importar este tipo de maquinaria y en muchas ocasiones no justifica su inversión en el proceso productivo o no genera una tasa de retorno de la inversión ROI conveniente.

A nivel educativo se puede decir que prácticamente no se realiza prototipado rápido en el país y que tardará muchos años en hacerlo si no se desarrolla maquinaria más accesible a las necesidades de la pequeña y mediana industria.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir una máquina de prototipado rápido de modelado por deposición fundida de material, mediante la integración y control de sistemas mecatrónicos, para la elaboración de prototipos plásticos a pequeña escala en el Laboratorio de Mecatrónica de la Universidad Internacional del Ecuador.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.2.1.1 Investigar máquinas comerciales similares y los diferentes proyectos “open source” de máquinas de prototipado rápido de modelado por deposición fundida de material, como base de conocimiento para sustentar el desarrollo del proyecto denunciado en esta tesis.
- 1.2.1.2 Realizar un análisis de alternativas de diseño y un prototipo virtual de la impresora 3D en el programa Inventor 2012, para determinar la viabilidad técnica del diseño propuesto.
- 1.2.1.3 Programar la máquina mediante el uso de microcontroladores con tecnología CMOS.
- 1.2.1.4 Construir una máquina de prototipado rápido de modelado por deposición fundida de material mediante el uso de la mayor cantidad posible de materia prima disponible en el mercado nacional.
- 1.2.1.5 Elaborar planos de construcción, manual técnico y manual de usuario.

1.3 PROTOTIPADO RÁPIDO

Prototipado rápido es un proceso de fabricación de libre forma, con el cual los usuarios fabrican objetos físicos directamente desde modelos sólidos generados en el sistema CAD. El proceso de prototipado rápido es conocido como manufactura aditiva, cuando es aplicado en el entorno industrial.

Para crear el modelo 3D de diseño asistido por computador, existen dos opciones:

- Crear el sólido a través de un sistema CAD.
- Digitalizar o escanear un sólido real y convertirlo en un modelo 3D en un sistema CAD.

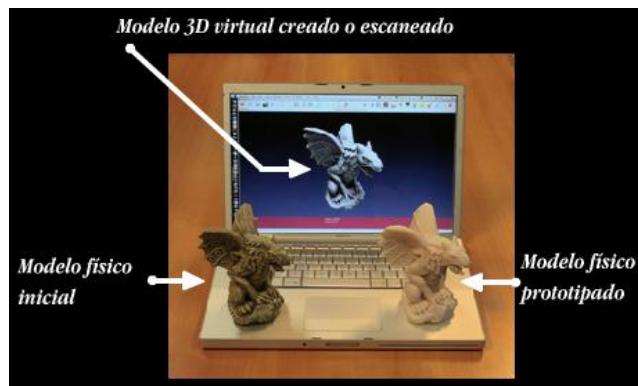


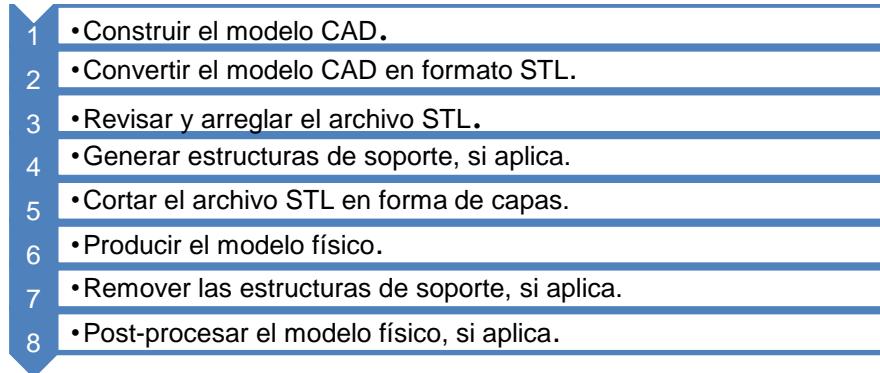
Figura 1.3: Creación del Modelo y el Prototipo 3D.

Fuente: (edición) Galo Maldonado, (fotografía) http://www.castleink.com/_a-3d-printers.htm

Al contrario de los procesos de fabricación por desbaste de material, los sistemas de Prototipado Rápido generan objetos a partir de la unión aditiva de material para obtener el modelo deseado. Las máquinas de prototipado rápido, producen piezas en plásticos, cerámica o metales. En algunos casos, los objetos son creados con propiedades físicas similares a los que se producirían por métodos convencionales, como moldeo por inyección y extrusión, o moldeo por soplado. De esta manera se evita fabricar costosos moldes para realizar un prototipo, tomando en cuenta que además, el producto podría cambiar su forma en el proceso de innovación.

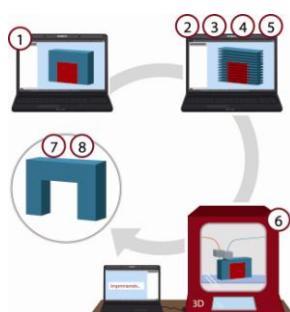
1.3.1 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE MÁQUINAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO

Actualmente existen muchos sistemas de prototipado rápido, pero los principios de operación de las máquinas son similares entre sí. Los pasos generales se describen en la figura 1.4.



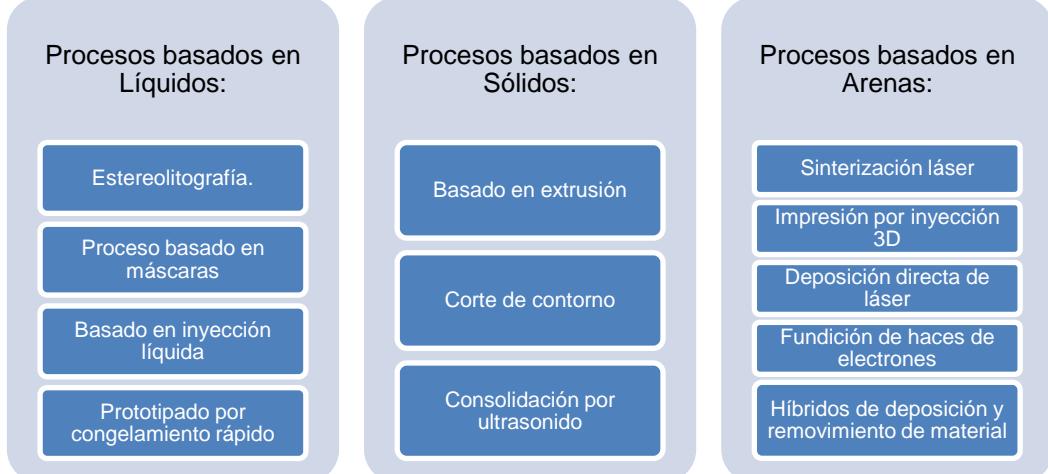
Fuente: Liou, *Rapid Prototyping and Engineering Applications*, p. 223, (ilustración y traducción) Galo Maldonado

En la figura 1.5, se explica la secuencia para prototipar en impresoras 3D.



1.3.2 TÉCNICAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO

Las técnicas de prototipado rápido se pueden clasificar acorde a su modo de fabricación, de la siguiente manera:



La técnica basada en extrusión ha sido seleccionada para el desarrollo del presente proyecto por su viabilidad técnica y económica en relación con los demás procesos de fabricación, además de las ventajas técnicas que se indican en el inciso siguiente.

1.3.3 TÉCNICA BASADA EN EXTRUSIÓN

El proceso de prototipado rápido basado en extrusión (FDM) consiste en proveer material termoplástico en forma de alambre sólido a una boquilla extrusora, la misma que se encarga de fundir el polímero e ir depositándolo capa por capa, desde abajo hacia arriba y en alguna geometría determinada por el diseño. El material fundido se solidifica al ir haciendo contacto con la superficie donde el material se va uniendo para obtener un sólido.



Figura 1.7: Termoplástico ABS en forma de alambre sólido

Fuente: <http://store.desktopfab.com/3dp-consumables/abs-plastic.html>

La impresora 3D consta de una cabeza extrusora y un sistema de movimiento en cartesiano. Para formar la primera capa la máquina realiza dos movimientos a través de sus mecanismos para cada coordenada (x, y), depositando el material con la trayectoria requerida. Después, se repite el procedimiento para que la cabeza extrusora deposite la segunda capa sobre la primera y así sucesivamente.

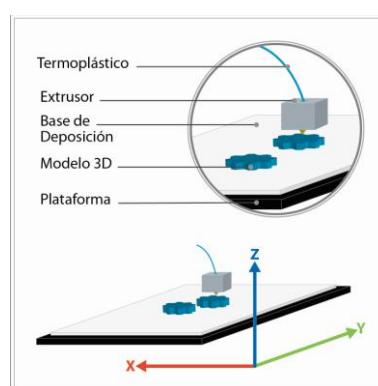


Figura 1.8: Técnica de modelado por deposición fundida de material

Fuente: El autor

Algunas máquinas cuentan con una segunda cabeza extrusora como se indica en la figura 1.9, la cual es usada para depositar material de soporte que sirve para la realización de geometrías más complejas y que se desprende del modelo creado una vez finalizada su fabricación.

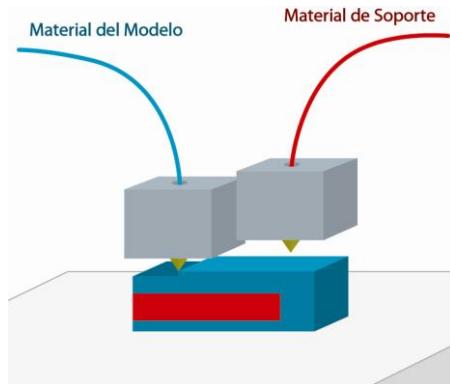


Figura 1.9: Doble cabeza extrusora

Fuente: El autor

La selección del material de soporte es muy importante y el uso de agua soluble es muy conveniente ya que es fácil de remover del modelo; además, no genera ruido, es rápido y se pueden fabricar partes muy pequeñas.

El material de soporte puede ser removido mediante los procesos BASS y WaterWorks de la siguiente forma:

- El proceso Bass consiste en romper manualmente el material de soporte y limpiar el modelo fabricado con papel arena y herramientas.
- El proceso WaterWorks consiste en remover el material de soporte automáticamente introduciéndolo en una solución basada en agua.

Los objetos creados, pueden ser fabricados a partir de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policarbonato, polifenilsulfona (PPSF), ácido poliláctico (PLA) y varias versiones de estos materiales. En la tabla 1.1 se muestran las ventajas y desventajas de esta tecnología:

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Los materiales usados permiten fabricar prototipos funcionales	Precisión limitada comparada con procesos basados en líquidos.
Los modelos pueden ser generados en varios colores	Es difícil construir diseños con detalles muy complejos

El proceso no provoca desechos tóxicos	El tamaño de construcción es limitado
Fácil de usar, seguro y usa materiales económicos	Se tiene una impredecible contracción en el material al ser depositado

Tabla 1.1: Ventajas y desventajas del método FDM

Fuente: El autor

El proyecto planteado es una máquina de prototipado rápido basada en extrusión (FDM) con una cabeza extrusora que utiliza PLA y ABS. Desde ahora en adelante al hacer referencia a la máquina se utilizará el nombre de I3D V1.0.

La selección de las alternativas de diseño se realizará en base a criterios de selección aplicados en diseño concurrente a partir de requisitos funcionales y de diseño que se describen en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

2.1 REQUISITOS FUNCIONALES

Las funciones que se enlistan a continuación, indican el trabajo que debe realizar la I3D V1.0 mediante afirmaciones cualitativas de sus acciones:

- Transmitir movimiento lineal de contorneado en los ejes cartesianos.
- Transmitir potencia a un mecanismo que permita mover linealmente el filamento sólido de polímero hacia el fundidor de la máquina.
- Calentar el polímero en el fundidor hasta llevarlo a una temperatura de fundición predeterminada para el material seleccionado.
- Calentar la base de deposición hasta la temperatura adecuada para cada material.
- Extruir polímeros PLA y ABS.
- Posicionamiento manual y automático.
- Recibir datos mediante una interfaz HMI de pantalla táctil.
- Leer memorias externas SD.
- Permitir configurar datos de temperatura, velocidad y calibración de la interfaz.

2.2 REQUISITOS DE DISEÑO

A continuación se listan cuantitativamente los requisitos de diseño de la I3D V1.0:

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Accionamiento de la máquina:	Eléctrico de 110 [V] de corriente alterna
Tamaño estimado de la máquina	Altura = 50 [cm], ancho = 50 [cm], largo = 50 [cm]
Peso estimado	50 [Kg]
Espesor de capa	0.25 [mm]
Medidas máximas del modelo impreso	Largo = 10 [cm], Ancho= 10[cm], Alto=10[cm]
Material de extrusión	PLA y ABS.
Características especiales	Lector de memorias SD-MMC y microSD, pantalla gráfica táctil, pulsante de parada, alarma sonora, indicadores

	visuales.
Mantenimiento	Si
Costo comercial estimado	1000 dólares

Tabla 2.1: Requisitos de diseño de la I3D V1.0

Fuente: El autor

2.3 SUBSISTEMAS

El análisis y selección de las alternativas de diseño de la I3D V1.0 se realiza gracias a la sinergia de sus componentes mecánicos, electrónicos y de software. Se procede a dividir la I3D V1.0 en los subsistemas siguientes:

- Subsistema A: Estructura y carcasa.
- Subsistema B: Mecanismos.
- Subsistema C: Extrusora.
- Subsistema D: Interfaces.
- Subsistema E: Tecnologías de soporte.

La metodología usada para la selección de las alternativas de diseño corresponde al método ordinal corregido de criterios ponderados⁶. El criterio se basa en tablas, donde cada criterio se confronta con los restantes criterios y se asignan los valores siguientes:

- 1: Si el criterio de filas es superior que el de las columnas.
- 0.5: Si el criterio de las filas es equivalente al de las columnas.
- 0: Si el criterio de las filas es inferior que el de las columnas.

Luego, para cada criterio, se suman los valores asignados en relación a los criterios restantes, al que se le añade una unidad para evitar que el criterio menos favorable tenga una valoración nula. Después, en otra columna se calculan los valores ponderados para cada criterio.

2.3.1 SUBSISTEMA A: ESTRUCTURA Y CARCASA

El diseño de una máquina de control numérico debe ser robusto y preciso en términos generales. Lamentablemente esta combinación abarca un incremento del costo. A menudo, el diseño de la estructura es un proceso costoso debido al

⁶ Carles Riba Romeva, Diseño Concurrente (Barcelona, Ediciones UPC), p.59-60

costo del material empleado. La precisión de la máquina va ligada con la calidad de su fabricación, por lo que se manejará una precisión moderada para su diseño.

El método de fabricación deberá ser simple y poseer la menor cantidad de componentes y procesos de manufactura involucrados, sin que esto le reste una significativa calidad al producto final. La función principal de la estructura y la carcasa es proporcionar soporte a los componentes móviles y estáticos así como mantenerlos correctamente alineados en el tiempo.

2.3.1.1 Alternativas de diseño del Subsistema A

Se ha recabado información de máquinas realizadas por los proyectos abiertos RepRap, Fab@home y Thing-O-Matic y de la máquina comercial Bfb 3000, en vista de que son 4 tipos de estructuras diferentes que se pueden utilizar en la construcción de la estructura y carcasa de la máquina.

2.3.1.1.1 Alternativa 1: Estructura RepRap

RepRap, usa una estructura basada en un conjunto de varillas de rosca triangular unidas mediante elementos plásticos y sujetadores roscados formando triadas.

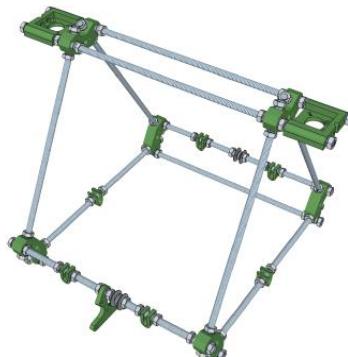
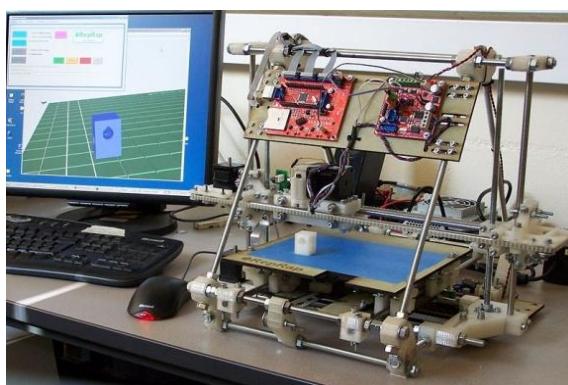


Figura 2.1: Estructura máquina RepRap

Fuente: <http://www.reprap.org/wiki/File:Mendel.jpg>

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Es la máquina más económica de fabricar actualmente.	Las uniones plásticas son creadas por una impresora 3D.
Posee buena rigidez debido a su estructura de acero y unión triada.	No existe empresa en el mercado nacional que comercialice sus partes.
No requiere mayor mantenimiento.	No posee atractivo visual y es difícil de transportar.

Usa materiales estándar en su mayoría, no requiere de muchos métodos de fabricación y la información de construcción está disponible.	No posee carcasa, sus elementos calientes no están protegidos, por lo cual es peligroso para el usuario.
Es fácil de montar, no toma mucho tiempo ensamblar si se compra el kit.	No posee un sistema de amortiguamiento efectivo.

Tabla 2.2: Ventajas y desventajas de la estructura RepRap.

Fuente: El autor

2.3.1.1.2 Alternativa 2: Estructura Fab@home

El diseño de la estructura de la máquina Fab@home está basado en piezas de acrílico cortadas con tecnología láser unidas con elementos roscados.

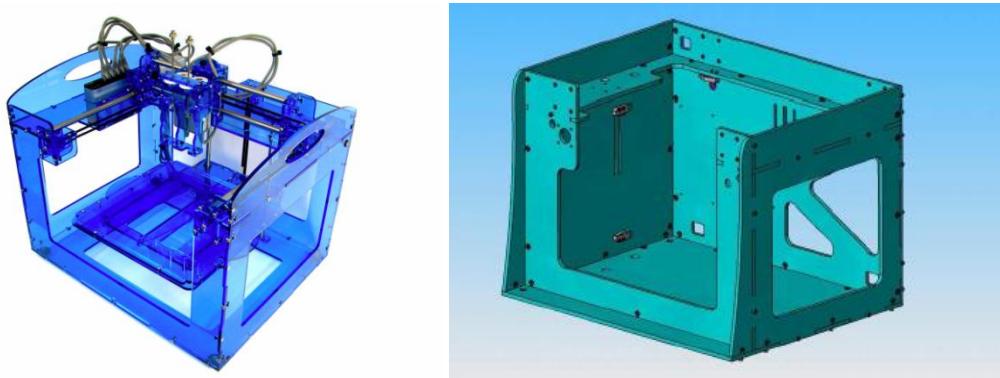


Figura 2.2: Estructura máquina Fab@Home

Fuente: <http://www.fabathome.org/>

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Visualmente atractiva.	No existe empresa en el mercado nacional que comercialice sus partes.
Buena ortogonalidad y alineamiento de la base.	No posee carcasa, sus elementos internos no están protegidos, por lo cual es peligroso para el usuario.
No requiere partes impresas por otra máquina.	Estructura de acrílico requiere corte preciso de elementos mediante cortadoras láser.
Materiales estándar, fácil de ensamblar, información de ensamblaje disponible.	El acrílico es un material frágil que puede provocar fallos irreversibles en la estructura. Difícil de modificar y reparar.

Tabla 2.3: Ventajas y desventajas de la estructura Fab@Home

Fuente: El autor

2.3.1.1.3 Alternativa 3: Estructura Thing-O-Matic

Su estructura consta de piezas de madera procesada cortadas con tecnología láser. Se encuentra unida por elementos de tornillería convencionales.



Figura 2.3: Estructura máquina Thing-O-Matic

Fuente: <http://wiki.makerbot.com/thingomatic>

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Visualmente atractiva.	No existe empresa en el mercado nacional que comercialice sus partes.
Buena ortogonalidad y alineamiento de la base.	No posee protección de sus elementos internos.
No requiere partes impresas por otra máquina.	Estructura de madera requiere corte preciso de elementos mediante cortadoras láser.
Materiales estándar, fácil de ensamblar, información de ensamblaje disponible.	Material frágil que puede provocar fallos irreversibles en la estructura.
Su estructura de madera y uniones atornilladas le permite absorber eficientemente vibraciones.	Difícil de reparar.
Permite incluir el material de extrusión dentro de la estructura.	La madera se deteriora con el calor en el tiempo si no posee un tratamiento adecuado y es susceptible a químicos.

Tabla 2.4: Ventajas y desventajas de la estructura Thing-O-Matic

Fuente: El autor

2.3.1.1.4 Alternativa 4: Estructura BfB 3000

La máquina BfB 3000 usa estructura combinada de acrílico, aluminio y tol. El tol y el acrílico son cortados con tecnología laser.



Figura 2.4: Estructura máquina BfB 3000

Fuente: <http://www.bitsfrombytes.com/content/bfb-3000-0>

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Visualmente atractiva.	Costosa.
Estructura rígida, excelente ortogonalidad y alineamiento.	Máquina comercial, no posee información de construcción.
Posee carcasa, segura para el usuario.	Difícil de fabricar, modificar o reparar.
Posee interfaz HMI ergonómica para uso manual.	Sus piezas no se pueden adquirir para ensamblar.
Estructura que permite incluir el material de extrusión adentro.	

Tabla 2.5: Ventajas y desventajas de la estructura BfB 3000

Fuente: El autor

2.3.1.2 Criterios de selección del Subsistema A

Para seleccionar la mejor alternativa tanto de la estructura como carcasa, se procede a evaluar los siguientes factores:

- Costo
- Rígidez
- Atractivo visual
- Fabricación
- Montaje

Entonces, se aplica la metodología ordinal corregida de criterios ponderados a los factores elegidos y se realizan las tablas de verificación correspondientes:

Costo > Fabricación = Montaje > Rigidez > Atractivo Visual

CRITERIO	COSTO	RIGIDEZ	ATRACTIVO	FABRICACIÓN	MONTAJE	$\sum +1$	PONDERACIÓN
COSTO		1	1	1	1	5	0.33
RIGIDEZ	0		1	0	0	2	0.13
ATRACTIVO	0	0		0	0	1	0.08
FABRICACIÓN	0	1	1		0.5	3.5	0.23
MONTAJE	0	1	1	0.5		3.5	0.23
				SUMA	15		1

Tabla 2.6: Criterios de selección del subsistema A

Fuente: El autor

Alternativa 1 > Alternativa 2 = Alternativa 3 > Alternativa 4

COSTO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	ALTERNATIVA 4	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		1	1	1	4	0.4
ALTERNATIVA 2	0		0.5	1	2.5	0.25
ALTERNATIVA 3	0	0.5		1	2.5	0.25
ALTERNATIVA 4	0	0	0		1	0.1
			SUMA	10		1

Tabla 2.7: Evaluación del criterio costo

Fuente: El autor

Alternativa 4 > Alternativa 1 > Alternativa 2 = Alternativa 3

RIGIDEZ	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	ALTERNATIVA 4	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		1	1	0	3	0.3
ALTERNATIVA 2	0		0.5	0	1.5	0.15
ALTERNATIVA 3	0	0.5		0	1.5	0.15
ALTERNATIVA 4	1	1	1		4	0.4
			SUMA	10		1

Tabla 2.8: Evaluación del criterio rigidez

Fuente: El autor

Alternativa 4 > Alternativa 2 > Alternativa 3 > Alternativa 1

ATRACTIVO VISUAL	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	ALTERNATIVA 4	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		0	0	0	1	0.1
ALTERNATIVA 2	1		1	0	3	0.3
ALTERNATIVA 3	1	0		0	2	0.2
ALTERNATIVA 4	1	1	1		4	0.4
			SUMA	10		1

Tabla 2.9: Evaluación del criterio atractivo visual

Fuente: El autor

Alternativa 1 > Alternativa 2 = Alternativa 3 > Alternativa 4

FABRICACIÓN	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	ALTERNATIVA 4	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		1	1	1	4	0.4
ALTERNATIVA 2	0		0.5	1	2.5	0.25
ALTERNATIVA 3	0	0.5		1	2.5	0.25
ALTERNATIVA 4	0	0	0		1	0.1
			SUMA	10	1	

Tabla 2.10: Evaluación del criterio fabricación

Fuente: El autor

Alternativa 1 > Alternativa 2 = Alternativa 3 > Alternativa 4

MONTAJE	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	ALTERNATIVA 4	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		1	1	1	4	0.4
ALTERNATIVA 2	0		0.5	1	2.5	0.25
ALTERNATIVA 3	0	0.5		1	2.5	0.25
ALTERNATIVA 4	0	0	0		1	0.1
			SUMA	10	1	

Tabla 2.11: Evaluación del criterio montaje

Fuente: El autor

2.3.1.3 Selección de Alternativas del Subsistema A

PONDERACIÓN	0.33	0.13	0.08	0.23	0.23		
CRITERIO	COSTO	RIGIDEZ	ATRACTIVO	FABRICACIÓN	MONTAJE	SUMA	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1	0.132	0.039	0.008	0.092	0.092	0.363	1
ALTERNATIVA 2	0.0825	0.0195	0.024	0.0575	0.0575	0.241	2
ALTERNATIVA 3	0.0825	0.0195	0.016	0.0575	0.0575	0.233	3
ALTERNATIVA 4	0.033	0.052	0.032	0.023	0.023	0.163	4

Tabla 2.12: Selección de alternativas subsistema A

Fuente: El autor

De esta manera se concluye que la alternativa 1 (estructura RepRap) alcanza la mayor valoración. El punto más débil de la alternativa 1 es el atractivo visual. La alternativa 1 al igual que la alternativa 2 y 3 no otorgan seguridad al usuario que opere la máquina al no proteger todos sus elementos contra el contacto humano, sobre todo la mesa de extrusión y el mecanismo extrusor que pueden provocar quemaduras al usuario. Además ciertos materiales plásticos pueden afectar a personas con problemas respiratorios, por lo que se tomará en cuenta la alternativa 4 para desarrollar la carcasa de la máquina.

Las mejoras que se le pueden añadir a la estructura seleccionada sin afectar significativamente los criterios de selección de alternativas, son los siguientes:

- Para ajustar la precisión de la máquina RepRap, la máquina construida en esta tesis implementará un sistema de nivelación manual con indicadores de nivel inteligentemente ubicados en la plataforma y en el extrusor de la máquina para que estén paralelos. El indicador de nivel seleccionado corresponde al nivelador de burbuja.
- Un defecto que presenta el proyecto RepRap para usuarios nuevos es que las uniones plásticas deben ser adquiridas o previamente fabricadas para poder unir la estructura. Por esta razón, se usará conexiones de tuberías roscadas.
- La sujeción y apriete de todos los elementos se realizará solo con elementos roscados.
- Se usarán materiales disponibles en el mercado nacional para su construcción.

2.3.2 SUBSISTEMA B: MECANISMOS

Los mecanismos que rigen el movimiento de la máquina se utilizan para la transmisión y transformación de movimiento requeridas para cada subsistema.

Los subsistemas de movimiento requeridos por la I3D V1.0 son:

- Subsistema de movimiento en el eje X.
- Subsistema de movimiento en el eje Y.
- Subsistema de movimiento en el eje Z.

2.3.2.1 Alternativas de diseño del Subsistema B

Los mecanismos usados deberán tener una fuente de alimentación eléctrica de 110 voltios que se tiene actualmente en el laboratorio de la universidad, por esta razón, se consideran solo mecanismos de accionamiento electromecánico. Las salidas de los subsistemas son:

Subsistema (Eje)	Número de Salidas	Tipo de Entradas Mecánicas	Tipo de Salidas Mecánicas
X	Una	Rotatoria	Lineal

Y	Una	Rotatoria	Lineal
Z	Una	Rotatoria	Lineal

Tabla 2.13: Subsistemas de mecanismos de movimiento

Fuente: El autor

Las transmisiones adecuadas para este sistema se realizan con motores y actuadores lineales. Muchas máquinas transmiten el movimiento con husillo de recirculación de bolas, sin embargo debido a las cargas bajas que se manejan en el sistema propuesto y a que el desarrollo de la I3D V1.0 debe ser económico y de fácil adquisición, se descartará del planteamiento de alternativas su uso así como la selección de accionamientos comerciales. Es así que se seleccionan las alternativas siguientes:

- Banda de Sincronización – Poleas
- Husillo – Tuerca
- Piñón – Cremallera

2.3.2.1.1 Alternativa 1: Banda de Sincronización – Poleas

Este mecanismo realiza dos acciones; primero, transmite el movimiento rotatorio de una polea acanalada (conductora) a una polea (lisa o dentada) acanalada (conducida), separadas a una distancia entre centros prefijada por el diseñador, a través de una banda de sincronización con el mismo paso de la polea dentada gracias a la fricción producida entre la polea y la banda. Además, en la banda de sincronización, se acopla en su plano perpendicular el elemento móvil que se desplazará linealmente la distancia fija entre centros (recorrido).

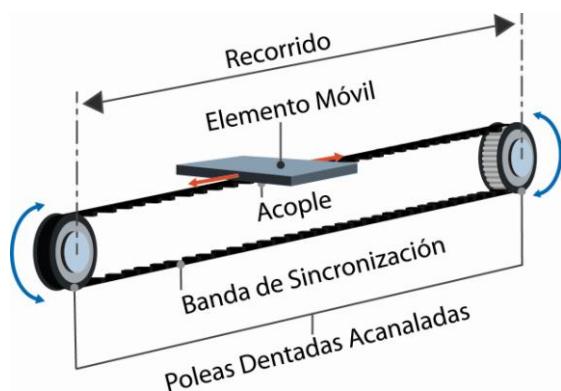


Figura 2.5: Sistema de movimiento por banda de sincronización

Fuente: El autor

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Transmite potencia a una relación constante de velocidad angular. Puede operar en un intervalo muy amplio de velocidades.	Desgaste de los dientes de la banda de sincronización puede afectar la precisión del movimiento.
Se puede transmitir a grandes distancias entre centros.	No tienen una duración tan prolongada como otros mecanismos.
No requiere alta tensión inicial. No se estira ni desliza. No requiere lubricación.	Se genera tensión por esfuerzo de tracción, lo cual puede provocar daño en el material con el pasar del tiempo.
Absorción elástica de los esfuerzos de choque.	Se genera resistencia al esfuerzo de corte de los dientes de la banda.
Su funcionamiento no provoca mucho ruido.	Se necesita un correcto alineamiento de las poleas.
Buena eficiencia mecánica (97% a 99%).	No posee protección contra sobrecargas.
Bajo costo, facilidad de adquisición de la banda y facilidad de fabricación de las poleas.	La sujeción del elemento móvil debe ser realizada efectivamente para evitar deslizamientos.

Tabla 2.14: Ventajas y desventajas del mecanismo por banda de sincronización

Fuente: El autor

2.3.2.1.2 Alternativa 2: Husillo – Tuerca

Este es un sistema de tipo irreversible que transforma el movimiento giratorio producido por el husillo dispuesto fijamente, en movimiento lineal de la tuerca que se desplaza longitudinalmente la longitud del husillo. El avance de la tuerca dependerá del paso y número de hilos de entrada de la rosca. El desplazamiento lineal de la tuerca se consigue al restringir el movimiento giratorio de la misma. El filete de los elementos roscados utilizados en máquinas herramientas es redondo rectificado (CNC), cuadrado o trapecial ACME. El husillo con recirculación es el más eficiente para máquinas CNC pero su costo es alto y su disponibilidad es limitada. La eficiencia de una tuerca deslizante (sin bolas) puede estar entre 20 y 50 %. En cambio una tuerca con recirculación de bolas puede alcanzar una eficiencia del 95 %. El uso de varilla de rosca triangular no se considera debido al gran rozamiento que produce y el paso limitado que tiene, al no estar diseñada para estos fines. De los elementos descritos, se selecciona el filete cuadrado que se puede adquirir localmente desmantelando una entenalla, por lo cual se analiza sólo este elemento.

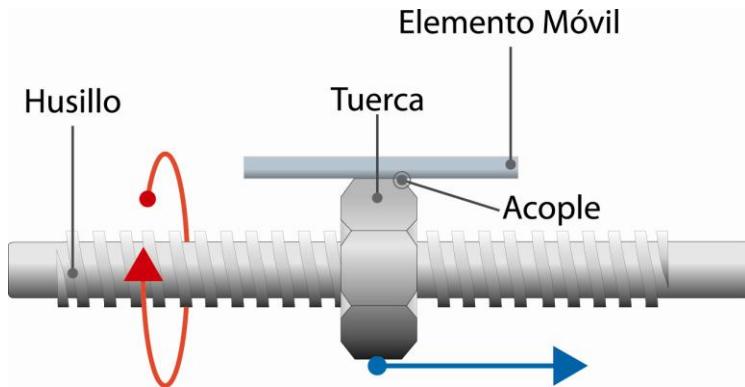


Figura 2.6: Sistema de movimiento tornillo – tuerca

Fuente: El autor

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Gran ventaja mecánica. Gran relación de transmisión, funciona bien como reductor de velocidad.	Cuando se cargue el tornillo axialmente se necesita implementar otros elementos mecánicos como collarines de empuje.
Posee una gran precisión.	Provoca más fricción que otros mecanismos. Necesita lubricación.
Se puede fabricar de varios materiales disponibles y su costo es accesible.	La velocidad es limitada y restringida por el paso del husillo.
Puede auto bloquearse.	Su eficiencia es aproximadamente del 50%.

Tabla 2.15: Ventajas y desventajas del mecanismo tornillo - tuerca.

Fuente: El autor

2.3.2.1.2 Alternativa 3: Piñón – Cremallera

Este mecanismo transforma el movimiento circular de un piñón (elemento motriz) en uno lineal continuo de una cremallera (elemento móvil o conducido) al engranar provocando su desplazamiento lineal. La cremallera deberá llevar acoplado el sistema que se desee mover.

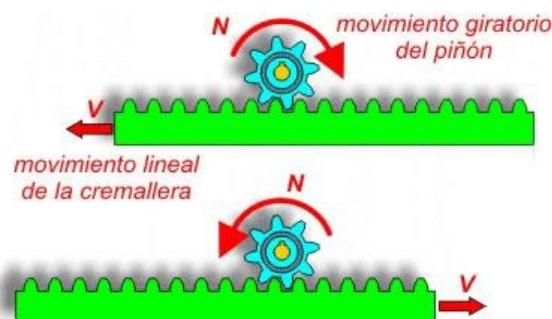


Figura 2.7: Mecanismo de movimiento piñón – cremallera

Fuente: http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/mecanismos/mec_cremallera-pinon.htm

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Gran ventaja mecánica	Fabricación y montaje más laborioso.
Gran relación de transmisión, funciona bien como reductor de velocidad.	Requiere de más elementos mecánicos que otros mecanismos. Es más costoso.
Se puede fabricar de varios materiales	Difícil de adquirir comercialmente, se requiere fabricar.
Su costo es más elevado en relación a los otros mecanismos.	La precisión está relacionada con la calidad de fabricación de sus elementos.
	Velocidad limitada. Depende del paso del piñón y la cremallera.
	Eficiencia baja.

Tabla 2.16: Ventajas y desventajas del mecanismo piñón – cremallera

Fuente: El autor

2.3.2.2 Criterios de selección del Subsistema B

Para el diseño de los subsistemas mecánicos de movimiento, no se consideran accionamientos comerciales debido a su alto costo. Los criterios que se analizan para el movimiento en X y en Y respectivamente, son los siguientes:

- Costo.
- Precisión.
- Velocidad.
- Potencia.
- Implementación (fabricabilidad y disponibilidad comercial).
- Eficiencia mecánica.

Para el movimiento en Z, se analizarán solo alternativas verticales y los mismos criterios de selección.

Costo > Implementación > Precisión > Velocidad > Eficiencia > Potencia

CRITERIO	COSTO	PRESICIÓN	VELOCIDAD	POTENCIA	IMPLE.	EFICIENCIA	$\Sigma +1$	POND.
COSTO		1	1	1	1	1	6	0.285
PRECISIÓN	0		0.5	1	0	1	3.5	0.16
VELOCIDAD	0	0.5		1	0	0.5	3	0.142
POTENCIA	0	0	0		0	0.5	1.5	0.071
IMPLE.	0	1	1	1		1	5	0.238

EFICIENCIA	0	0	0.5	0.5	0		2	0.095
						SUMA	21	1

Tabla 2.17: Criterios de selección del subsistema B

Fuente: El autor

Alternativa 1 > Alternativa 2 > Alternativa 3

COSTO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		1	1	3	0.5
ALTERNATIVA 2	0		1	2	0.33
ALTERNATIVA 3	0	0		1	0.166
				6	1

Tabla 2.18: Evaluación del criterio costo

Fuente: El autor

Alternativa 2 > Alternativa 1 > Alternativa 3

PRECISIÓN	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		0	0.5	1.5	0.25
ALTERNATIVA 2	1		1	3	0.5
ALTERNATIVA 3	0.5	0		1.5	0.25
				6	1

Tabla 2.19: Evaluación del criterio precisión

Fuente: El autor

Alternativa 1 > Alternativa 2= Alternativa 3

VELOCIDAD	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		1	1	3	0.5
ALTERNATIVA 2	0		0.5	1.5	0.25
ALTERNATIVA 3	0	0.5		1.5	0.25
				6	1

Tabla 2.20: Evaluación del criterio velocidad

Fuente: El autor

Alternativa 3 = Alternativa 2 > Alternativa 1

POTENCIA	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		0	0	1	0.166
ALTERNATIVA 2	1		0.5	2.5	0.417
ALTERNATIVA 3	1	0.5		2.5	0.417
				6	1

Tabla 2.21: Evaluación del criterio potencia

Fuente: El autor

Alternativa > Alternativa > Alternativa > Alternativa

IMPLEMENTACIÓN	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		1	1	3	0.5
ALTERNATIVA 2	0		0.5	1	0.25
ALTERNATIVA 3	0	0.5		1	0.25
				6	1

Tabla 2.22: Evaluación del criterio implementación

Fuente: El autor

Alternativa 1 > Alternativa 2 = Alternativa 3

EFICIENCIA	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		1	1	3	0.5
ALTERNATIVA 2	0		0.5	1.5	0.25
ALTERNATIVA 3	0	0.5		1.5	0.25
				6	1

Tabla 2.23: Evaluación del criterio eficiencia

Fuente: El autor

2.3.2.3 Selección de Alternativas del Subsistema B

PONDERACIÓN	0.2857	0.1667	0.1429	0.0714	0.2381	0.0952		
CRITERIO	COSTO	PRECISIÓN	VELOCIDAD	POTENCIA	IMPLEMENTACIÓN	EFICIENCIA	SUMA	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1	0.1429	0.0417	0.0714	0.0119	0.1190	0.0476	0.4345	1
ALTERNATIVA 2	0.0952	0.0833	0.0357	0.0298	0.0595	0.0238	0.3274	2
ALTERNATIVA 3	0.0476	0.0417	0.0357	0.0298	0.0595	0.0238	0.2381	3

Tabla 2.24: Selección de alternativas del subsistema B

Fuente: El autor

De la tabla 2.24 se concluye que la alternativa 1 es la más idónea para el sistema de movimiento en X y Y. Este mecanismo no es recomendable usarlo verticalmente por evitar sobrecargar el eje del motor y no tener que recurrir a otros elementos mecánicos adicionales, para el desplazamiento lineal a lo largo del eje Z (vertical) se selecciona la alternativa 2 correspondiente al mecanismo husillo – tuerca.

2.3.3 GUÍAS LINEALES

Para complementar el movimiento realizado por los mecanismos de movimiento se necesita implementar guías lineales que cumplan los siguientes 3 roles fundamentales:

- Brindar soporte y estabilidad a los componentes de la máquina en el desplazamiento de los elementos móviles en sus tres ejes de movimiento.
- Guiar los elementos móviles con fricción mínima.
- Soportar cargas secundarias (torque, cargas laterales, etc.)

Para su selección se ha considerado un factor preponderante del planteamiento de objetivos, el costo, por lo cual se ha descartado el uso de guías comerciales y se ha hecho un análisis de guías que puedan ser fabricadas manualmente cumpliendo requerimientos técnicos. Al no transmitir mucha potencia, las guías redondas son la mejor alternativa de diseño.

2.3.3.1 Sistema de guías redondas

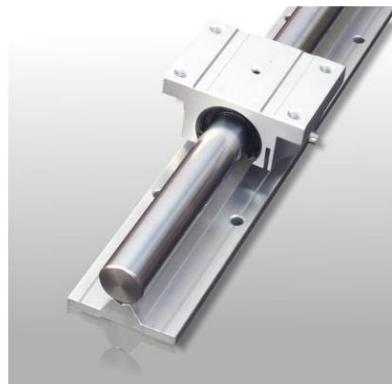


Figura 2.8: Sistema de guías redondas

Fuente: <http://spanish.alibaba.com/product-gs/linear-round-guides-228079416.html>

Este sistema se compone de un elemento fijo bien alineado para que su acabado superficial facilite el desplazamiento y deslizamiento del elemento móvil (buje o rodamiento lineal), buscando que el sistema genere un mínimo factor de rozamiento estático y dinámico. La carrera que realiza el buje o rodamiento lineal se realiza longitudinalmente a través de la guía de acero. El buje puede ser sustituido por un rodamiento lineal. El diseño debe ser realizado de manera que se garantice su durabilidad, rigidez y resistencia. Además el montaje se debe realizar de manera que las guías queden bien alineadas y se puedan lubricar.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Sistema económico	Su precisión depende del acabado del acero y del buje, así como su montaje.
Se requiere solo un método de fabricación para	Se debe alinear paralelamente las guías con el

la elaboración del buje. El rodamiento lineal se puede adquirir en el mercado nacional.	mecanismo de desplazamiento para evitar trabas y daños mecánicos.
Ejes de acero maquinado pueden ser usados como guías lineales.	Velocidad y aceleración bajas en comparación con guías comerciales.
Facilidad de montaje y mantenimiento.	No absorbe vibraciones.

Tabla 2.25: Ventajas y desventajas sistema de guías redondas

Fuente: El autor

2.3.4 TIPOS DE ACTUADORES

En máquinas herramientas de control numérico se usan 3 tipos de actuadores eléctricos/electrónicos:

- Servomotores AC
- Servomotores DC
- Motores a pasos

Debido a que los requerimientos de potencia del sistema de prototipado que se va a implementar son bajos de acuerdo a las cargas que maneja, solo se considerará motores de corriente continua. A continuación se analizan las alternativas correspondientes:

2.3.4.1 Alternativa 1: Motor a pasos

Los motores paso a paso son considerados como actuadores electromecánicos de alta precisión en su movimiento. Convierten impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, con lo cual el movimiento del eje es controlado mediante un tren de pulsos eléctricos que se suceden con una secuencia y frecuencia determinada por el programador; los pulsos alimentan las bobinas del estator del motor, lo cual permite rotar el eje a pasos en un ángulo determinado por el programador o por las características del motor. Sus ventajas y desventajas se muestran a continuación:

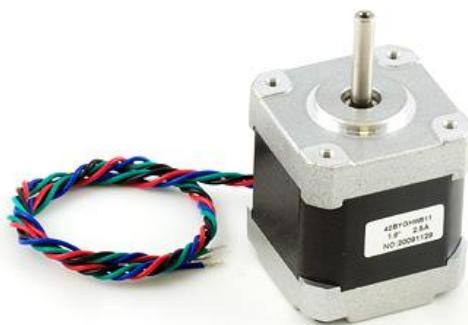


Figura 2.9: Motor a pasos

Fuente: <http://www.electronicaestudio.com/robotica.htm>

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Solución económica.	Bajas Potencias.
Alta disponibilidad.	Resonancia a altas velocidades. Genera ruido y vibraciones.
Gran resolución con micropasos.	Eficiencia aproximada del 70%. Pérdidas por calentamiento a altas velocidades.
Precisión en su movimiento.	No cuenta con un sistema en lazo cerrado.
Pueden quedar enclavadas sus bobinas para mantener una posición con el máximo torque.	Pueden funcionar óptimamente a bajas y altas velocidades con un óptimo control de corriente mediante micropasos.
Elevada respuesta dinámica	Error acumulativo debido a que se pueden perder pasos y no se tiene un control en lazo cerrado
Controladores más sencillos de realizar.	Velocidades bajas limitadas por la frecuencia de conmutación.
Menos propenso a daños por sobre torques.	Los motores a pasos poseen su mayor torque solo a bajas velocidades.

Tabla 2.26: Ventajas y desventajas de motor a pasos

Fuente: El autor

2.3.4.2 Alternativa 2: Servomotor DC continuo.

Es un motor de corriente continua con un sistema reductor incluido el cual posee un sistema de control en lazo cerrado con realimentación que permite controlar su velocidad y posición. A diferencia de los servos comunes, los servos continuos poseen la característica de rotar continuamente mediante el control del ancho de pulsos enviados, y puede quedarse enclavado en una posición mandando un ancho de pulso predeterminado por el fabricante.



Figura 2.10: Servomotor DC continuo

Fuente: http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/servomotor-dc-64608_-_6.html

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Posee repetitividad de movimiento.	Disponibilidad muy baja en el mercado nacional
Elevada respuesta dinámica.	Costoso.
Estabilidad de velocidad. Maneja altas velocidades y gran aceleración. Amplio rango de velocidad	La conmutación depende de: la resolución del encoder o la capacidad de cálculo del controlador
Gran precisión de posicionado.	Los encoders también necesitan ser cambiados.
Bajo momento de inercia	Sus escobillas deben ser cambiadas cada 2000 horas de operación.
Par a velocidad cero en servos más costosos. Alta capacidad de sobrepar	No pueden mantenerse totalmente estables en una posición con aplicación de fuerzas.
Eficiencias del 80 al 90 %. Desprenden menos calor. Generan menos ruido.	Propenso a daños mecánicos por sobre torques.
Mayores capacidades de torque.	

Tabla 2.27: Ventajas y desventajas servomotores DC continuos

Fuente: El autor

2.3.4.3 Criterios de selección de Actuadores.

Los criterios seleccionados para elegir la mejor alternativa son los siguientes:

- Costo
- Disponibilidad
- Precisión
- Velocidad
- Torque de mantenimiento
- Potencia

A continuación se evalúan estos criterios:

Costo > Disponibilidad > Precisión = Torque M. > Velocidad > Potencia

CRITERIO	COSTO	DISPONIBILIDAD	PRESIÓN	VELOCIDAD	TORQUE MANT.	POTENCIA	$\sum +1$	PODERACIÓN
COSTO		1	1	1	1	1	6	0.2857
DISPONIBILIDAD	0		1	1	1	1	5	0.2381
PRECISIÓN	0	0		1	0.5	1	3.5	0.1667
VELOCIDAD	0	0	0		0	1	2	0.0952
TORQUE MANT.	0	0	0.5	1		1	3.5	0.1667
POTENCIA	0	0	0	0	0		1	0.0476
						SUMA	21	1

Tabla 2.28: Criterios de selección de actuadores

Fuente: El autor

Alternativa 1 > Alternativa 2

COSTO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	$\sum +1$	PODERACIÓN
ALTERNATIVA 1		1	2	0.6667
ALTERNATIVA 2	0		1	0.3333
			3	1

Tabla 2.29: Evaluación del criterio costo

Fuente: El autor

Alternativa 1 > Alternativa 2

DISPONIBILIDAD	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	$\sum +1$	PODERACIÓN
ALTERNATIVA 1		1	2	0.6667
ALTERNATIVA 2	0		1	0.3333
			3	1

Tabla 2.30: Evaluación del criterio disponibilidad

Fuente: El autor

Alternativa 2 > Alternativa 1

PRESIÓN	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	$\sum +1$	PODERACIÓN
ALTERNATIVA 1		0	1	0.3333
ALTERNATIVA 2	1		2	0.6667
			3	1

Tabla 2.31: Evaluación del criterio precisión

Fuente: El autor

Alternativa 2 > Alternativa 1

VELOCIDAD	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		0	1	0.3333
ALTERNATIVA 2	1		2	0.6667
			3	1

Tabla 2.32: Evaluación del criterio velocidad

Fuente: El autor

Alternativa 1 > Alternativa 2

TORQUE DE MANT.	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		1	2	0.6667
ALTERNATIVA 2	0		1	0.3333
			3	1

Tabla 2.33: Evaluación del criterio torque de mantenimiento

Fuente: El autor

Alternativa 2 > Alternativa 1

POTENCIA	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		0	1	0.3333
ALTERNATIVA 2	1		2	0.6667
			3	1

Tabla 2.34: Evaluación del criterio potencia

Fuente: El autor

2.3.4.4 Selección de Alternativas de Actuadores.

PONDERACIÓN	0.2857	0.2381	0.1667	0.0952	0.1667	0.0476		
CRITERIO	COSTO	DISPONIBILIDAD	PRESIÓN	VELOCIDAD	TORQUE MANT	POTENCIA	SUMA	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1	0.1905	0.1587	0.0556	0.0317	0.1111	0.0159	0.5635	1
ALTERNATIVA 2	0.0952	0.0794	0.1111	0.0635	0.0556	0.0317	0.4365	2

Tabla 2.35: Selección de alternativas de actuadores.

Fuente: El autor

De la tabla 2.35 se concluye que la alternativa 1 es la más idónea para el sistema planteado. Ahora se selecciona el motor a pasos de tipo bipolar debido a las siguientes características:

- Como no tienen el doble bobinado de los unipolares, los motores bipolares ofrecen una mejor relación entre torque y tamaño/peso.

- Máxima utilización del motor y máxima eficiencia.
- Mayor torque a altas y bajas tasas de pasos.
- Menor pérdida posible en estado de torque sostenido.
- Movimiento libre de resonancia en tasas de pasos pequeñas.
- Aumento de resolución en la posición de parado.
- Mayor facilidad de implementar control de micropasos.

2.3.5 SENSORES DE POSICIÓN

Los sensores de posición para el control del recorrido final de los mecanismos pueden ser de tipo electrónico (ópticos) o electromecánico (finales de carrera). Considerando el costo como factor de selección predominante del sistema así como su disponibilidad en el mercado nacional, se ha procedido a elegir los electromecánicos. Ambos sistemas son eficientes y fáciles de montar. El sistema electromecánico requiere menor acondicionamiento.

2.3.5.1 Finales de Carrera

Son dispositivos electromecánicos de conmutación (conexión-desconexión) que actúan como sensores, normalmente situados al final del recorrido de un elemento móvil cuyo objetivo es enviar señales de información sobre su presencia o paso que puedan modificar el estado de un circuito electrónico. Uno de sus usos más extendidos es el limitador del desplazamiento de elementos móviles (ascensores, puentes-grúa) o para detectar la posición de elementos móviles. Además se pueden usar para controlar el estado de una máquina, puesta en marcha, parada, ciclos, menor velocidad, etc.

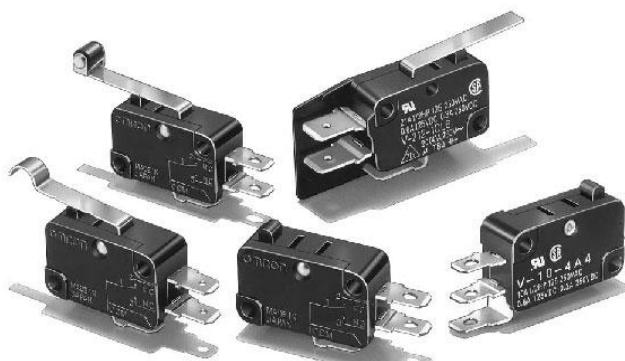


Figura 2.11: Sensores de final de carrera

Fuente: <http://www.ustudy.in/node/3045>

2.3.6 SUBSISTEMA C: EXTRUSORA

Para el subsistema extrusor se consideraron los siguientes sistemas usados en máquinas de prototipado rápido por deposición fundida de material:

2.3.6.1 Alternativa 1: Sistema embolo – jeringa:

El sistema de extrusión consta de un motor lineal que desplaza el émbolo desde arriba hacia abajo, para depositar el material a través de la punta de la jeringa. La jeringa es precargada con el material que se depositará.

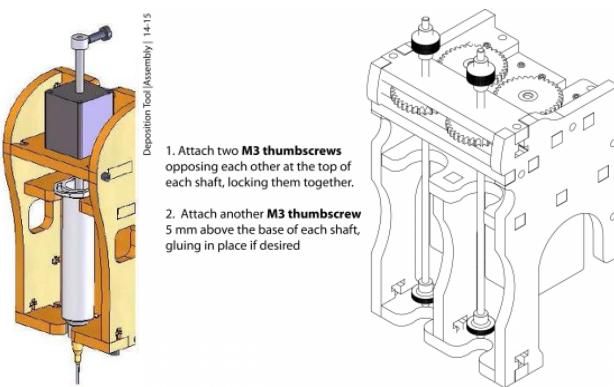


Figura 2.12: Sistema extrusor émbolo – jeringa

Fuente: <http://www.fabathome.org/>

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Variedad de materiales que se pueden usar para ser depositados: queso, masilla de caucho de silicona, arcilla de cerámica, etc. Calentando el extrusor se puede depositar chocolate.	No se puede usar materiales de ingeniería como los polímeros ABS y PLA.
Ocupa un espacio reducido.	Precisión reducida.
Fácil de fabricar y montar.	No posee sistema de alimentación continua de material.
Fácil de reparar o modificar.	Los motores lineales son difíciles de adquirir en el mercado nacional.

Tabla 2.36: Ventajas y desventajas del sistema embolo – jeringa

Fuente: El autor

2.3.6.2 Alternativa 2: Sistema de tornillo

El filamento de polímero es alimentado por un orificio de la cámara a través de un rodillo acoplado a un eje torsional que se mueve por la acción del piñón conducido del sistema reductor de potencia. El engranaje del sistema reductor (conductor) es movido por la acción de un motor, el cual al girar provoca también la acción

giratoria del husillo acoplado al engranaje que fuerza al polímero a pasar a través de la boquilla o dado, por medio del empuje generado por la acción giratoria del husillo que gira concéntricamente en una cámara donde el filamento de polímero es conducido hacia una boquilla o dado, donde se funde el material polimérico y se lo deposita en la base de extrusión.

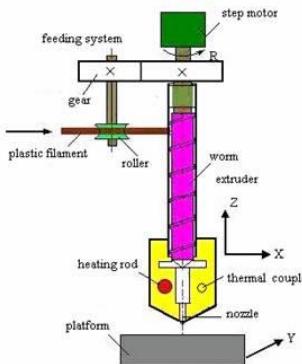


Figura 2.13: Sistema extrusor manejado por gusano

Fuente: <http://www.fabathome.org/>

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Posee alimentación continua de material.	No se puede aplicar una gran variedad de materiales.
Fácil de fabricar y montar, pero requiere más trabajo de diseño que los otros sistemas.	Sujeto a atascos sin un control efectivo de temperatura en su boquilla o dado.
Se puede implementar con polímeros de ingeniería.	Se necesita una acción de control de temperatura para cada material usado.
Mejor precisión que el sistema émbolo-jeringa.	Ocupa mayor espacio y su diseño es más complejo de realizar.

Tabla 2.37: Ventajas y desventajas del sistema extrusor de tornillo

Fuente: El autor

2.3.6.3 Alternativa 3: Sistema de ruedas motrices

El filamento de polímero es alimentado por un orificio de la cámara a través de rodillos, los cuales son alimentados por acción del rozamiento del filamento con los rodillos. En el sistema de rodillos, un elemento es conductor y el otro es conducido. El conductor es movido a través de un eje torsional acoplado a un piñón del sistema reductor de potencia. Este sistema es implementado en el proyecto RepRap

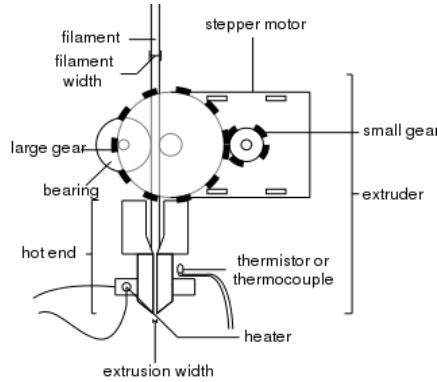


Figura 2.14: Sistema extrusor manejado por ruedas motrices

Fuente: <http://www.reprap.org/wiki/RepRap/es>

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Posee alimentación continua de material.	No se puede aplicar variedad de materiales.
Mayor eficiencia y precisión que el sistema émbolo-jeringa.	Sujeto a atascos sin un control efectivo de temperatura en su boquilla o dado.
Se puede implementar con polímeros de ingeniería.	Se necesita una acción de control de temperatura para cada material usado.
Relativamente fácil de fabricar y montar.	Difícil de modificar debido a la distancia entre centros del sistema reductor.

Tabla 2.38: Ventajas y desventajas del sistema extrusor ruedas

Fuente: El autor

2.3.6.4 Criterios de selección del Subsistema C.

Los criterios seleccionados para elegir la mejor alternativa son los siguientes:

- Precisión
- Sistema de alimentación
- Fabricabilidad
- Montaje

Precisión > Alimentación > Fabricabilidad = Montaje

CRITERIO	PRECISIÓN	ALIMENTACIÓN	FABRICABILIDAD	MONTAJE	$\sum +1$	PONDERACIÓN
PRECISION		1	1	1	4	0.4
ALIMENTACIÓN	0		1	1	3	0.3
FABRICABILIDAD	0	0		0.5	1.5	0.15
MONTAJE	0	0	0.5		1.5	0.15
				SUMA	10	1

Tabla 2.39: Criterios de selección del subsistemas C

Fuente: El autor

Alternativa 2 > Alternativa 3 > Alternativa 1

PRECISIÓN	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		0	0	1	0.16
ALTERNATIVA 2	1		1	3	0.42
ALTERNATIVA 3	1	0		2	0.42
SUMA			6	1	

Tabla 2.40: Evaluación del criterio precisión

Fuente: El autor

Alternativa 3 = Alternativa 2 > Alternativa 1

ALIMENTACIÓN	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		0	0	1	0.16
ALTERNATIVA 2	1		0.5	2.5	0.42
ALTERNATIVA 3	1	0.5		2.5	0.42
SUMA			6	1	

Tabla 2.41: Evaluación del criterio sistema de alimentación

Fuente: El autor

Alternativa 1 > Alternativa 3 > Alternativa 2

FABRICABILIDAD	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		1	1	3	0.5
ALTERNATIVA 2	0		0	1	0.17
ALTERNATIVA 3	0	1		2	0.33
SUMA			6	1	

Tabla 2.42: Evaluación del criterio fabricación

Fuente: El autor

Alternativa 1 > Alternativa 3 > Alternativa 2

MONTAJE	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	$\sum +1$	PONDERACIÓN
ALTERNATIVA 1		1	1	3	0.5
ALTERNATIVA 2	0		0	1	0.17
ALTERNATIVA 3	0	1		2	0.33
SUMA			6	1	

Tabla 2.43: Evaluación del criterio montaje

Fuente: El autor

2.3.6.5 Selección de Alternativas del Subsistema C.

PONDERACIÓN	0.4	0.3	0.15	0.15		
CRITERIO	PRECISION	ALIMENTACIÓN	FABRICABILIDAD	MONTAJE	SUMA	PRIORIDAD
ALTERNATIVA 1	0.06	0.05	0.075	0.075	0.26	3
ALTERNATIVA 2	0.17	0.125	0.025	0.025	0.34	2

ALTERNATIVA 3	0.17	0.125	0.05	0.05	0.4	1
---------------	------	-------	------	------	-----	---

Tabla 2.44: Selección de Alternativas del subsistema C

Fuente: El autor

De la tabla 2.44 se concluye que el sistema óptimo en base a los criterios elegidos es el sistema de ruedas motrices correspondiente a la alternativa 3.

2.3.7 SENSORES DE TEMPERATURA

La selección del sensor de temperatura debe basarse en su facilidad del montaje en el sistema propuesto así como el rango de temperatura requerido.

2.3.7.1 Alternativa 1: Termocupla

Se basa en el efecto Seebeck, de la circulación de corriente por un circuito cerrado formado por dos metales diferentes cuyas uniones (unión de medida o caliente y unión de referencia o fría) se mantienen a distintas temperaturas. Una termocupla es un circuito completo con dos uniones de este tipo. Si ambas están a la misma temperatura, no existe una fem neta. Si la temperatura es diferente, sí se produce una fem. La diferencia de potencial que se produce de esta fem depende de los dos metales utilizados y temperaturas de ambas uniones.



Figura 2.15: Termocupla

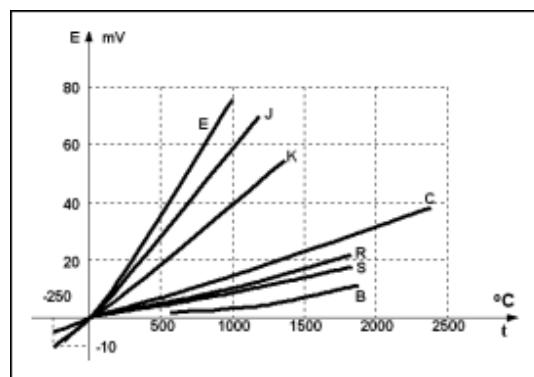
Fuente: http://www.promelsa.com.pe/producto.asp?id_producto=31343131303030342020&comefrom=L&saldos=

Figura 2.16: Curva característica de termocuplas

Fuente: <http://www.unet.edu.ve/~ielectro/Sensores%20de%20Temperatura.htm>

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Económicas.	No tienen una alta precisión.
Muy robustas.	No pueden extenderse a más de 10 o 20 metros del indicador por las interferencias de corriente y por el costo del cable.
Se puede comprar en el mercado nacional.	Su vida útil se reduce considerablemente por efectos térmicos y químicos.
Cubren amplios rangos de medición de temperatura (-180 a 1370 C)	Relación temperatura-fem no es lineal, por lo tanto su respuesta no es lineal.
Varios controladores comerciales disponibles.	Emisión de señales muy bajas.
Versatilidad de uso por su tamaño.	Es susceptible al ruido eléctrico industrial.
	Necesita compensación.

Tabla 2.45: Ventajas y desventajas de la termocupla

Fuente: El autor

2.3.7.2 Alternativa 2: RTD

Es un detector de temperatura resistivo, es decir, basado en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. La medida de temperatura utilizando sondas de resistencia depende de las características de resistencia en función de la temperatura, que son propias de los elementos de detección. El elemento consiste usualmente en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor adecuado bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o cerámica.



Figura 2.17: Sensor de temperatura resistivo

Fuente: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rtd_sonda4.jpg?uselang=es

El material que forma el conductor se caracteriza por el llamado “coeficiente de temperatura de resistencia” que expresa, a una temperatura especificada, la variación de la resistencia en ohmios del conductor por cada grado que cambia su temperatura.

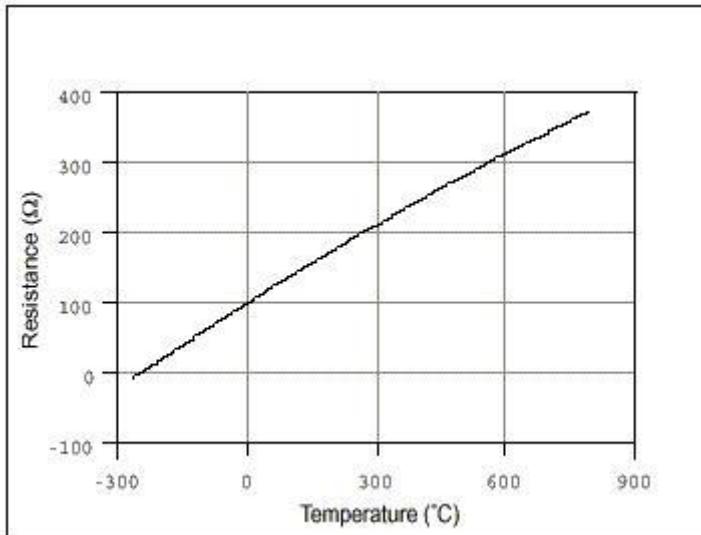


Figura 2.18: Curva característica PT100

Fuente: <http://www.ni.com/white-paper/7115/es>

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alta precisión, de hasta +/- 0.1º C.	Ligeramente más costosas que los termopares.
Mayor exactitud y repetitividad.	Necesitan acondicionamiento.
Ideal para bajas temperaturas.	Trabajan en un rango de temperatura más limitado.
Puede ser extendido hasta 30 metros con cable de cobre común.	Frágiles, no utilizables en lugares donde hay mucha vibración.
Respuesta más cercana a lineal.	Se necesita termopozo, caso contrario el tiempo de respuesta es bajo.
Mejor estabilidad.	Ocupa mayor espacio.
No requiere compensación por junta fría.	Les afecta el autocalentamiento.
Fácil de acondicionar.	Baja durabilidad frente a vibraciones

Tabla 2.46: Ventajas y desventajas del RTD

Fuente: El autor

Se elige usar el sensor de temperatura PT100 por sus características de linealidad y facilidad de acondicionamiento de la señal. Los mismos se pueden conseguir en el mercado nacional, son económicos y su tamaño se ajusta al diseño del extrusor y la base de deposición que se calienta.

2.3.8 SUBSISTEMA D: INTERFACES

Para la interfaz de usuario se selecciona la pantalla táctil. Se requiere una interfaz amigable para introducir el código numérico y visualizar operaciones.

Además se considera implementar un lector de memorias SMD-MMC para almacenar el código numérico, estas memorias permiten que el usuario no tenga que estar sometido a usar una computadora con puerto USB y un programa 3D instalado. En vez de esto, el usuario puede descargar el código numérico del internet de páginas como www.thingiverse.com y grabarlo sin necesidad de ningún software.

2.3.8.1 Pantalla táctil

Es una pantalla gráfica compuesta por una cubierta generalmente resistiva que actúa como periférico de entrada y salida a la vez. Una vez tocado un punto de la superficie, la pantalla envía datos de entrada al dispositivo que maneja la pantalla. El contacto puede ser realizado con los dedos, un lápiz óptico u otras herramientas similares. La pantalla seleccionada es JHD12864E de 128 por 64 pixeles.



Figura 2.19: Pantalla gráfica JHD12864E

Fuente: http://www.itron.com.cn/enpro_grap_modu.asp

2.3.8.2 Memoria MMC

MultiMediaCard o MMC es un estándar de tarjeta de memoria para almacenamiento de datos prácticamente igual a la Secure Digital, solo que carece de la pestaña de seguridad que evita sobrescribir la información grabada en ella. Actualmente ofrece una capacidad máxima de 8 GB. Originalmente usaba una interfaz serie de 1-bit, pero versiones recientes de la especificación permite

transferencias de 4 o a veces incluso 8 bits de una vez. Se usará una memoria de 2 GB estándar para el proyecto.



Figura 2.20: Memoria SD-MMC

Fuente: http://www.bestpc.lv/?cPath=85_128_535&sort=3a&main_page=index&filter_id=576

2.3.9 SUBSISTEMA E: TECNOLOGÍA DE SOPORTE

Las tecnologías de soporte utilizadas en el sistema se dividen en dos:

- Sistema de control.
- Programa de soporte.

La tecnología de soporte del sistema de control se basa en un sistema microprocesado que incluye a microcontroladores AVR (familia Atmel). El programa de soporte usado para la conversión del formato STL en código G es el programa de código abierto ReplicatorG. Se selecciona este programa ya que puede ser utilizado abiertamente al no poseer licencias de funcionamiento.

2.3.9.1 Microcontroladores AVR

Son una familia de microcontroladores con procesador tipo RISC de la marca ATTEL que poseen arquitectura Harvard con memorias y buses separados para el programa y los datos.

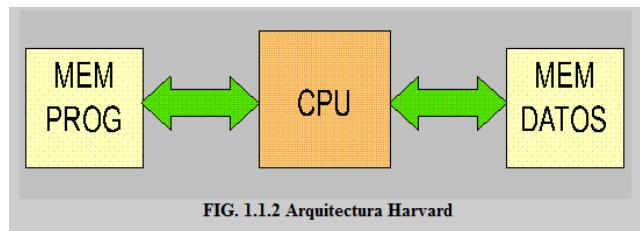


FIG. 1.1.2 Arquitectura Harvard

Fuente: http://www.oocities.org/micros_uan/cap11.html

Tiene 32 registros de 8 bits. La concatenación de los 32 registros, los registros de entrada/salida y la memoria de datos conforman un espacio de direcciones unificado, al cual se accede a través de operaciones de carga/almacenamiento. A diferencia de los microcontroladores PIC, la pila se ubica en este espacio de memoria unificado, y no está limitada a un tamaño fijo. Estos microcontroladores están divididos en tres grupos:

- TinyAVR
- AVR Clásico
- MegaAVR.

De acuerdo a los requerimientos de diseño, se necesita la siguiente cantidad de puertos:

Elementos	Cantidad	Puertos	Tipo
Finales de carrera	6	6	Análogo o Digital
Motores	4	18	Digital
Pantalla	1	14	Digital
Touch	1	4	Análogo
Calentador	2	2	Digital
Enfriador	1	1	Digital
Sensores	2	2	Análogo
Comunicación	1	2	Digital
Memoria MMC	1	4	Digital
Indicadores	4	4	Digital
TOTAL:		57	45 D y 12 A o 51 D y 6 A

Tabla 2.47: Requerimientos generales del sistema microcontrolado

Fuente: El autor

Por costos y con el fin de asignar tareas específicas, se escoge trabajar con 2 microcontroladores ATmega644P.

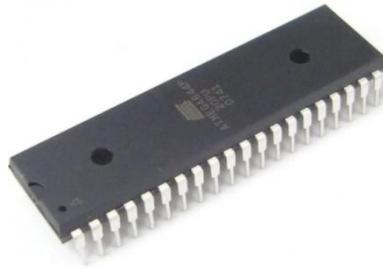


Figura 2.22: Microcontrolador ATmega644P

Fuente: <http://octopart.com/atmega644p-20pu-atmel-666821>

Sus características principales son las siguientes:

- Microcontrolador de 8 bits con tecnología CMOS.
- Alto rendimiento y bajo consumo
- Arquitectura Risc avanzada (Harvard modificada)
- 64 Kb de memoria flash
- 2 Kb de memoria eeprom
- 4 Kb de memoria ram
- Timer 0, Timer 1 y Timer 2
- 6 canales PWM
- 32 líneas de entradas y salidas programables
- 2 puertos seriales USART programables
- Interfaz serial SPI maestro – esclavo.
- ADC de 10 bits y 8 canales.
- 40 pines

Con lo cual se tienen los requerimientos del microcontrolador para controlar los periféricos al tener 64 canales digitales y 16 canales análogos, comunicación serial y salidas PWM. Es importante tener en cuenta que la capacidad de memoria que posee el ATmega644P es óptima ya que se maneja pantallas gráficas y periféricos como el lector de memorias SD, los cuales consumen muchos recursos. Su arquitectura se puede observar en el diagrama de bloques siguiente:

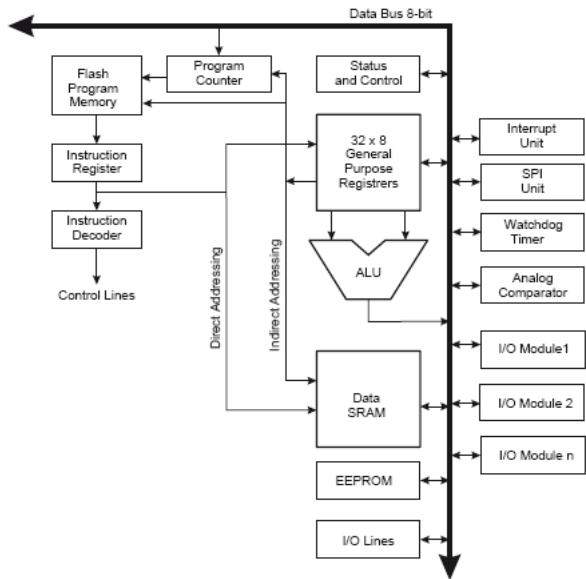


Figura 2.23: Diagrama de bloques arquitectura ATmega644P

Fuente: Datasheet del microcontrolador ATmega644P

2.3.9.2 Replicator G

Es un programa de código abierto creado para enviar comandos de la computadora donde está instalado hacia una máquina impresora 3D compatible. El programa permite además realizar la conversión de formato STL a código G adaptable para trabajar con impresoras 3D compatibles.

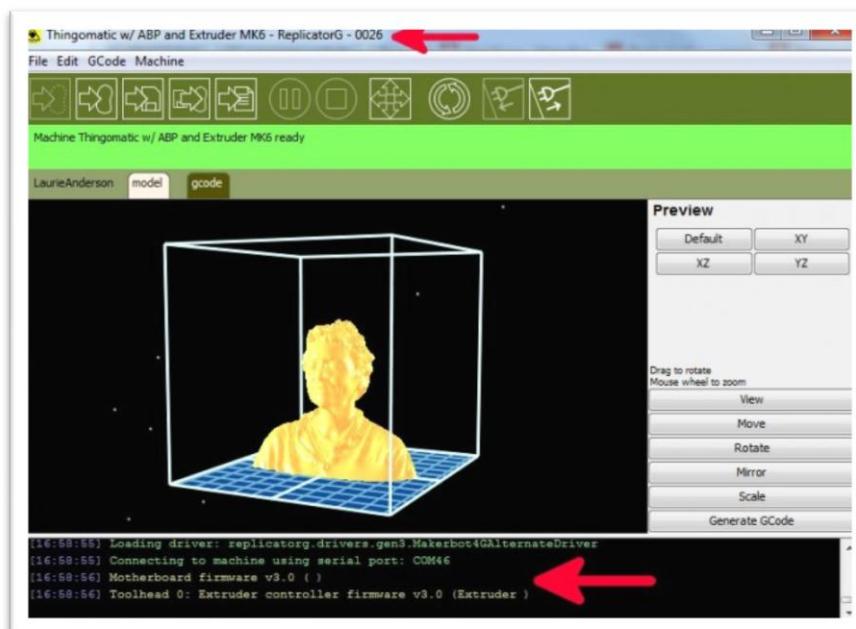


Figura 22.24: Interfaz Replicator G

Fuente: <http://www.makerbot.com/blog/tag/replicatorg/>

Entre otras funciones el programa permite hacer lo siguiente:

- Posicionar, escalar y rotar la pieza.
- Controlar la posición del extrusor en base a su temperatura.
- Generar archivos “*.txt” que contengan el código g de impresión.

2.3.9.3 Formato stl

El estándar industrial para prototipado rápido, es el uso de archivos con extensión “*.stl”, el cual es un archivo que usa una malla de triángulos para formar el sólido, donde cada triángulo comparte aristas y vértices comunes. En el formato “*.stl”, el archivo tiene las orientaciones X, Y, y Z positivas y la normal a la superficie.

La orientación en cada capa de prototipado rápido se especifica de manera redundante y coherente de la siguiente forma:

- En primer lugar, se especifica la dirección de la normal hacia el exterior.
- En segundo lugar, los vértices se enumeran en el orden de las agujas del reloj, cuando se mira el objeto desde el exterior (regla de la mano derecha).

El uso de archivos STL como estándar en la industria, se debe en parte a que resulta más fácil cortar un objeto, que usar métodos más complejos como el usado por los formatos “B-rep” (boundary representation) y “CSG” (constructive solid geometry), que necesitan más razonamiento geométrico y conversión de datos. Otra razón es que el formato “*.stl” hace que el proceso sea robusto y confiable, para obtener el resultado correcto. Cuando se están generando archivos con formato “*.stl”, se aproxima el modelo sólido por pequeños triángulos. Cuanto más pequeños sean estos triángulos, mejor la aproximación de la superficie, lo cual en contraste aumenta el tamaño del archivo “*.stl”, y el tiempo de procesamiento.

Una vez que el archivo “*.stl” es generado, las demás operaciones son ejecutadas por el propio programa que acompaña a las máquinas de Prototipado Rápido. Básicamente este programa realizará operaciones básicas de visualización y la generación de secciones transversales del modelo que será construido. Tales datos serán entonces transmitidos a la máquina, que irá depositando sucesivas capas hasta que la pieza sea generada.

2.3.9.3 Código G

Código G es el nombre del lenguaje de programación más ampliamente utilizado en máquinas de control numérico (CNC) lenguaje de programación. El código G contiene un set de instrucciones que definen dónde moverse, qué tan rápido moverse, y que trayectoria sigue. El código G compatible con la máquina de la I3D V1.0 se genera mediante el programa Replicator G y es el código que entiende el interprete programado en el sistema microcontrolado.

2.3.10 SISTEMAS DE CONTROL

La I3D V1.0 deberá trabajar con control numérico de impresoras 3D. Los controles adicionales se eligen en base al tipo de actuadores y sensores seleccionados de acuerdo a tabla 2.48:

ELEMENTO SUJETO DE CONTROL	SISTEMA DE CONTROL APLICADO
Motor a pasos	Control en lazo abierto con micropasos y PWM.
Sensores de posición	Control on - off.
Calentadores	Control on-off con histéresis.
Enfriador	Control on – off con histéresis.

Tabla 2.48: Sistemas de control propuestos para la I3D V1.0

Fuente: El autor

2.3.10.1 Control numérico

El control numérico es un sistema de automatización flexible cuyo principio básico es controlar máquinas usadas en manufactura como tornos CNC y fresadoras CNC. Las instrucciones son valores numéricos conocidas como código G o simplemente código numérico, el cual indica las operaciones con las que deben operar los elementos finales de control de una máquina CNC.

2.3.10.2 Sistema de control en lazo abierto

Su salida es un actuador que controla el proceso directamente, sin emplear realimentación. La precisión depende de una adecuada calibración del sistema controlado. Este sistema no es recomendable cuando se tiene perturbaciones, razón por lo cual, se recomienda utilizarlo cuando estas no intervengan en el sistema, y además, cuando se conozca la relación entre la entrada y la salida.

2.3.10.3 Micropasos

Es una técnica de control usada para manejar motores paso a paso, a través de micropasos. Sus propósitos esenciales son el permitir al motor a pasos, parar y sostener la posición entre las posiciones full y medio paso, eliminar fallos producidos en operación a baja velocidad y el ruido en velocidades intermedias, además de reducir el problema con la resonancia.

Aunque algunos controladores microstepping ofrecen cientos de posiciones intermedias entre los pasos, vale la pena señalar que microstepping por lo general no ofrecen una gran precisión, tanto por problemas de linealidad como por los efectos de fricción estática.

2.3.10.4 Sistema de control on / off

Es un control conocido como todo o nada, ya que su salida es discreta. Un amplificador operacional como comparador puede usarse en este tipo de control.

2.3.10.5 Sistema de control en lazo cerrado

Su salida real, usa una señal de realimentación para compararla con la salida deseada. Esta comparación entrega el error actuante, el mismo que ingresa al controlador para realizar el cálculo de la señal, esto permite reducir el error del sistema controlado. Actúa adecuadamente con perturbaciones y es recomendable usarlo cuando se desconozca la relación entre la señal de salida y entrada.

2.3.10.5 Modulación por ancho de pulso (PWM)

Es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica usada normalmente para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga. El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación con el período.

2.4 PROTOCOLO DE PRUEBAS

Una vez que se construya la máquina, esta deberá ser verificada para ver si cumple con los requerimientos de diseño planteados. Los puntos importantes en consideración son los siguientes:

- Tolerancias de piezas regulares.

2.4.1 TOLERANCIAS DE PIEZAS REGULARES

Mediante un calibrador o pie de rey se procede a medir el ancho, el alto y el espesor de una muestra de cubos para medir las tolerancias obtenidas con respecto al modelo CAD. En caso de no obtenerse los resultados deseados se procede a medir la perpendicularidad de la boquilla con la mesa de deposición, así como a verificar los niveles de burbujas y se vuelve a realizar la prueba.

CAPÍTULO 3.

DISEÑO MECATRÓNICO DE LA MÁQUINA

3.1 PROCESO DE DISEÑO

Una vez seleccionadas las alternativas de diseño, se procede a calcular y seleccionar los componentes mecatrónicos de la I3D V1.0. El proceso de diseño implementado se muestra en el diagrama de flujo siguiente:

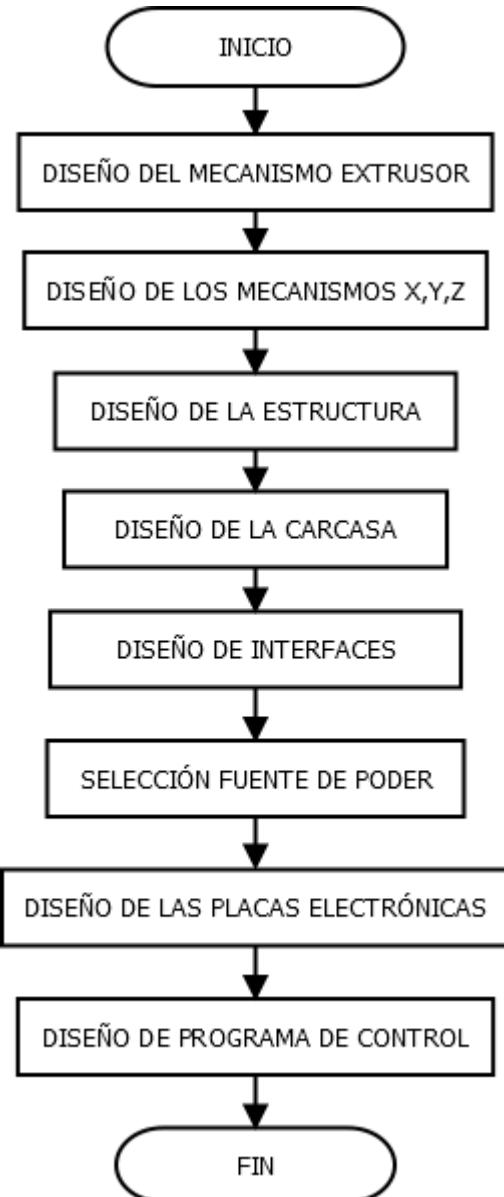


Figura 3.1 Diagrama de flujo del proceso de diseño

Fuente: El autor

3.2 DISEÑO DEL MECANISMO EXTRUSOR

El mecanismo extrusor es el encargado de depositar el material fundido capa por capa mediante instrucciones dictadas por el controlador. Para llevar a cabo este proceso, los siguientes elementos deben ser diseñados o seleccionados:

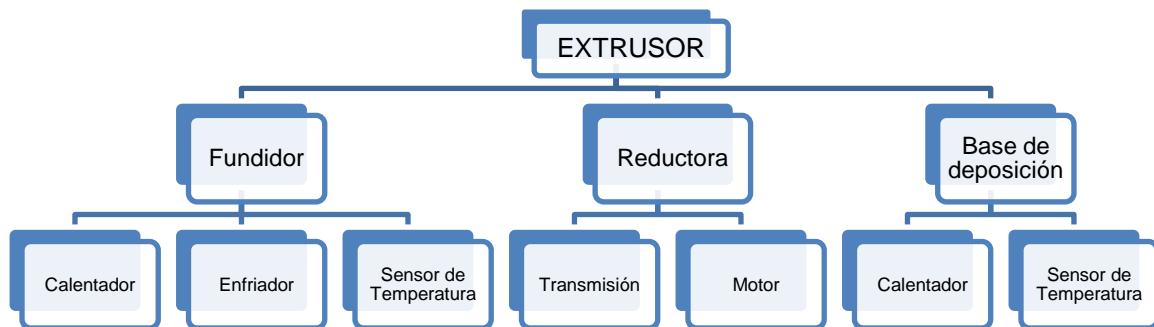


Figura 33.2: Componentes del mecanismo extrusor

Fuente: El autor

3.2.1 FUNDIDOR

Es el encargado de fundir el material termoplástico para que sea depositado a través de una boquilla extrusora. El diseño del fundidor es crítico ya que de éste dependerá la fuerza que deba ser implementada en las ruedas motrices y afectará directamente a la calidad de impresión que es función de las velocidades y temperaturas del sistema así como del diámetro de la boquilla y el tipo de control aplicado en el fundidor. Su diseño de muestra en la figura 3.3:

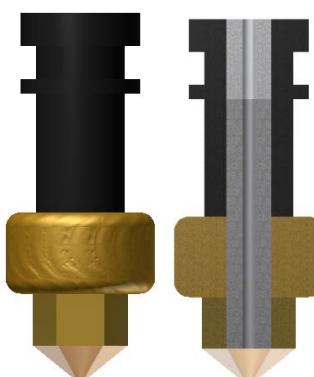


Figura 3.3: Elemento fundidor de polímero

Fuente: El autor

Comercialmente, se pueden encontrar las siguientes boquillas de 0.6 [mm], 0.5 [mm], 0.4 [mm], 0.35 [mm], 0.3 [mm] y 0.25 [mm] en el mercado internacional. Las boquillas de 0.25 [mm] y 0.3 [mm] se usan para imprimir objetos muy pequeños porque permiten dar mayor detalle al acabado, mientras que las boquillas de 0.5 [mm] y 0.6 [mm] no son muy comunes ya que no permiten tener una buena resolución en piezas con geometrías más complejas. Las boquillas de 0.3 y 0.35 milímetros son las boquillas más utilizadas actualmente y las recomiendan sus fabricantes debido a que trabajan bien con geometrías pequeñas y se imprime a mayor velocidad que con boquillas de diámetro mayor.

La punta seleccionada para la boquilla es de 0.35 milímetros y es de acero inoxidable. En su interior posee un tornillo sin fin de acero inoxidable de 2 milímetros de diámetro por donde ingresa el material PLA o ABS de 1.75 milímetros en forma de alambre sólido y donde se debe calentar para depositarlo fundido a través de la boquilla en la base de deposición.

3.2.1.1 Dinámica del fundidor

El cálculo de caídas de presión del fundidor ayuda a determinar la potencia que se necesita en las ruedas motrices de la extrusora, de modo que la fuerza de compresión aplicada al filamento supere la presión ejercida en el fundidor que depende tanto de la viscosidad del material de fundición como de la geometría de la fundidora. La viscosidad disminuye con el aumento de esfuerzo cortante. Debido a que el material fundido se adhiere a las paredes del fundidor, el flujo está sometido a un esfuerzo cortante. El fundidor consta de las siguientes partes:

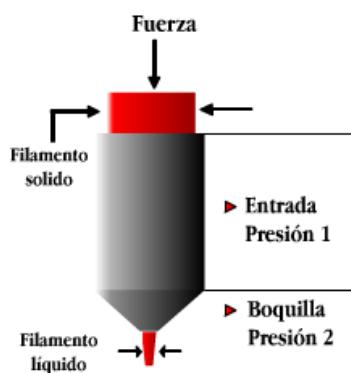


Figura 34.4: Partes del elemento fundidor

Fuente: El autor

De manera que la caída de presión total será la sumatoria de la caída de presión en la entrada ΔP_e más la caída de presión en la boquilla ΔP_b :

$$\Delta P_T = \Delta P_e + \Delta P_b \quad (\text{Ec. 3.1})$$

3.2.1.2 Modelo matemático del fundidor:

Las bases computacionales correspondientes a los procesos de flujos son las leyes de conservación de masa, momento y energía. Para modelar el flujo de polímero que fluye a través de un canal se sigue el proceso realizado por Micheli⁷ donde se toman las siguientes consideraciones:

- El flujo es estacionario. No hay cambio transitorio en el flujo.
- El flujo de movimiento es lento y fluye constante independientemente del tiempo.
- Las fuerzas de inercia pueden ser despreciables al ser comparadas con las fuerzas de fricción.
- El flujo es isotérmico.
- El flujo hidrodinámico está completamente desarrollado, esto quiere decir que tiene el perfil de velocidad constante a lo largo de la longitud del conducto.
- El fluido es incompresible, su densidad es constante y permanece así a lo largo del canal.
- No existen fuerzas externas (de superficie). La fuerza de gravedad es despreciable.
- En las paredes del canal, el flujo es igual a cero, no existe deslizamiento, por lo cual no se tomará esta condición de frontera.
- Se lo tratará como un fluido newtoniano (viscosidad constante).
- Es un flujo laminar.

3.2.1.3 Caídas de presión en el fundidor:

La caída de presión (entrada de presión 1 en la figura 3.4) de una sección cilíndrica se obtiene así:

⁷ Walter Micheli, Extrusion Dies for Plastics and Rubber (Munich: Hanser Publishers), p.51

$$\Delta P_e = 2L_1 \left(\frac{V}{\phi} \right)^{\frac{1}{m}} \left(\frac{m+3}{r_1^{m+1}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde L_1 y r_1 son la longitud y el radio del fundidor por donde ingresa el filamento plástico de alambre sólido y V es la velocidad del filamento a la entrada al fundidor, m es el exponente de flujo del material y ϕ representa la fluidez. Debido a que el material entra en estado sólido, el valor de V se considera constante y uniforme a lo largo de la sección.

Para el área cónica (boquilla) se tiene:

$$\Delta P_b = \frac{2m^2 L_2}{3(d_1 - d_2)} \left(\frac{1}{r_2^{\frac{3}{m}}} - \frac{1}{r_1^{\frac{3}{m}}} \right) \left(\frac{V}{\phi} \right)^{\frac{1}{m}} [r_1^2 * (2^{m+3}) * (m+3)]^{\frac{1}{m}} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde d_1 es el diámetro del fundidor, d_2 es el diámetro de la boquilla y r_2 su radio, L_2 es la altura de la boquilla.

En las ecuaciones, el fluido ha sido considerado como isotérmico a una temperatura T igual a la temperatura de deposición. Con la introducción de un nuevo material al sistema, la velocidad promedio del fluido incrementa y la temperatura promedio cae. Para estabilizar estas nuevas condiciones de estado estacionario, la tasa de flujo calorífico debe ser incrementada.

El comportamiento de adelgazamiento por corte (pseudoplástico) de los fluidos se refiere al aumento de la tasa cortante con la disminución de la viscosidad o viceversa, la cual es una propiedad común de los polímeros. Para describir este comportamiento, la ley de potencia de los fluidos de la tasa cortante dependiente de la viscosidad se puede expresar en combinación con la relación de Arrhenius modificada⁸ la cual indica la relación entre la temperatura y la viscosidad. Entonces se tiene la ecuación siguiente:

$$\mathbf{u}(\dot{\gamma}, T) = K * \dot{\gamma}^{n-1} * H(T) = \mathbf{u}(\dot{\gamma}) * H(T) \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde $H(T)$ es una modificación de la relación de Arrhenius dependiente de la temperatura para polímeros, $\dot{\gamma}$ es la tasa cortante o gradiente de velocidad

⁸ Doctor Anna Bellini, Fused Deposition of Ceramics, p. 54.

perpendicular al plano de corte y K es el índice de consistencia del material. La relación de Arrhenius se expresa como:

$$H(T) = \exp \left[\alpha \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_\alpha} \right) \right] \quad (\text{Ec.3.5})$$

Donde α representa la energía de activación, T_α es la temperatura de fundición y T_e es la temperatura a la entrada del fundidor.

La viscosidad en el modelo fue tomada como constante. Ahora con la relación de Arrhenius de la temperatura dependiente de la viscosidad, la expresión para las caídas de presiones se transforman en:

$$\Delta P_e = 2L_1 \left(\frac{V}{\emptyset} \right)^{\frac{1}{m}} \left(\frac{m+3}{r_1^{m+1}} \right)^{\frac{1}{m}} * e^{\left[\alpha \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_\alpha} \right) \right]} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

$$\Delta P_b = \frac{2m2L_2}{3(d_1-d_2)} \left(\frac{1}{r_2^m} - \frac{1}{r_1^m} \right) \left(\frac{V}{\emptyset} \right)^{\frac{1}{m}} [r_1^2 * (2^{m+3}) * (m+3)]^{\frac{1}{m}} * e^{\left[\alpha \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_\alpha} \right) \right]} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

El PLA tiene un factor de fricción más elevado, por lo cual se diseña en base a este polímero. El fundidor tiene un diámetro de 2 [mm] a la entrada y 0.35 [mm] de salida en la boquilla. Para una velocidad máxima determinada por el fabricante del polímero para la fundición $V = 210[\text{mm/s}]$, un $m = 1.51$ ⁹, un índice de fluidez MFI $\emptyset = 1.67 \times 10^{-3}$ ¹⁰, una energía de activación $\alpha = 200[\text{KJ/mol}]$ ¹¹, una temperatura de fundición máxima de 220°C de acuerdo a los datos del fabricante del polímero, se reemplaza los datos en la ecuación 3.6 y 3.7, se tiene que la presión en el cilindro será de 394.3 [KPa] y la presión en la boquilla será de 14684.4 [KPa]. Entonces:

$$\Delta P_T = 394.3 \text{ [KPa]} + 14684.4 \text{ [KPa]} = 15078.75 \text{ [KPa]}$$

En el extracto de la tabla de excel, se muestra el cálculo para la obtención de estos valores:

⁹ Vallenberger, Norman Weston, Natural Fibers, Plastics and Composites (USA: Kluwer Academic Publishers), p.154.

¹⁰ Kotiba Hamad, Mosab Kaseem, Fawaz Deri, Melt Rheology of Poly(Lactic Acid)/Low Density Polyethylene Polymer Blends. Faculty, p.210.

¹¹ Lbid, p.213.

	R1 (m)	R2 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	Temp Entrada(K)	Temp Fundición(K)	m	Ø	Ea (kJ mol)	v(m/s)	P1(Pa)	P2(Pa)	PT(Pa)
PLA	0.001	0.000175	0.05	0.005	313.15	493.15	1.515151515	1.67E-03	200	0.21	394318.174	14684436.12	15078754.3

Tabla 3.1: Cálculo de caída de presión en el fundidor con PLA

Fuente: El autor

Para obtener las gráficas de Presión vs Temperatura y Presión vs Velocidad del PLA, se realizó la tabla de Excel siguiente:

°C	K	mm/s	m/s	Varío Temp a 210mm/seg				Varío Temp a 100mm/seg				Varío Temp a 50mm/seg				Varío Vel a 220C				Varío Vel a 40C				
				P1	P2	PT	P1	P2	PT	P1	P2	PT	P1	P2	PT	P1	P2	PT	P1	P2	PT	P1	P2	PT
160	423.15	50	0.05	523282.865	52704047	16235.7891	225265.68	9523410	3848.65	20480.77	6004450	62863390	1800824	5556245.5	56988.325	243772	768407	7434.176	208565	210624	64	563.395	563.395	563.395
161	424.15	52	0.052	531780.043	532710.777	16237.077	225283.33	9512398	3923.589	206250.01	60038387	6287896	1800824	5544529.4	6042.245	250484.6	7373896	763215	214323.5	622375	67	658.405	658.405	658.405
162	425.15	54	0.054	532100.665	53689530	16193.7307	22532.08	9502040	9927.572	206022.19	6075323	6202.945	20014.4	5532008.5	6195.65	259474.1	7565074	7621540	21979.3	649527	65	670.267	670.267	670.267
163	426.15	56	0.056	530614.502	53651243	16181.8573	225172.33	9511447	916.619	205794.89	6070218	6276.012	208078.4	5157572.5	6345.651	2523704	7749852	8015557	225077.4	663983	57	584.061	584.061	584.061
164	427.15	58	0.058	53003128	53634056	16164.0883	224815.85	9508014	3905.73	205683.9	6063553	6263.124	212853.7	6281373.3	6494.233	2688953.9	7330412	8193.272	2300511	6794538	683	7024.69	7024.69	7024.69
165	428.15	60	0.06	523452.506	53618369	16164.4211	224460.83	9570442	9894.903	205344.22	6056325	6262.2693	21772.3	6425974.3	66412.04	274943.5	8109856	8384739	235953.3	694820	17	783.843	783.843	783.843
166	429.15	62	0.062	528876.56	5593937	16128.4554	324107.85	9560030	9884.138	205120.82	6050336	6255.4568	222536.5	6554032.7	6766.574	280958.4	8287276	8568.234	240716.7	7100288.76	7341005			
167	430.15	64	0.064	528303.825	5593807	16113.3904	323756.89	9549678	9873.435	204898.71	6043784	6248.683	227248.8	670302.5	6930.281	286907.8	8462761	8749.669	245814	7250638	94	7496.453	7496.453	7496.453
168	431.15	66	0.066	527734.407	55966291	16094.0252	323407.94	9539386	9862.794	204677.86	6037270	6241948	23191.2	6840558.1	7072.469	292794.3	8636391	8829.85	250587.3	7399399.81	7650.257			
169	432.15	68	0.068	527734.407	55966291	16094.0252	323407.94	9539386	9862.794	204677.86	6037270	6241948	23191.2	6840558.1	7072.469	292794.3	8636391	8829.85	250587.3	7399399.81	7650.257			

Tabla 3.2: Cálculo de variaciones de la presión con la temperatura y velocidad del PLA

Fuente: El autor

En la figura 3.5 se muestra como varía linealmente la presión en base a un rango de temperatura con la cual se funde el PLA para 3 velocidades.

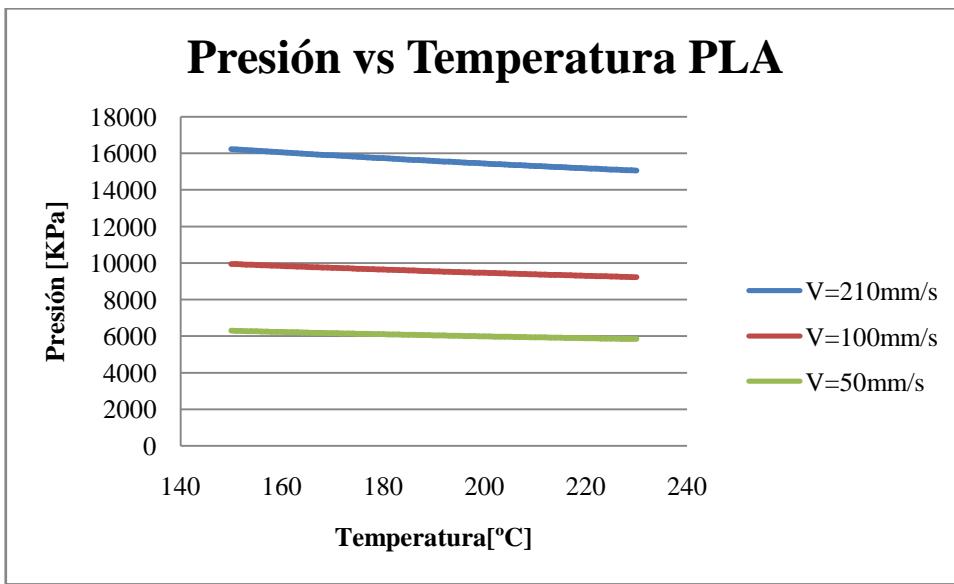


Figura 35.5: Presión vs Temperatura del PLA en el fundidor

Fuente: Tabla 3.2

Como se observa al disminuir la temperatura se necesita más presión, esto se debe a que en el interior la viscosidad aumenta al ir bajando de temperatura por lo que se produce más esfuerzo cortante, el cual es directamente proporcional a la presión según las ecuaciones indicadas anteriormente.

De igual manera se puede verificar que al aumentar la velocidad de extrusión, la presión necesaria aumenta.

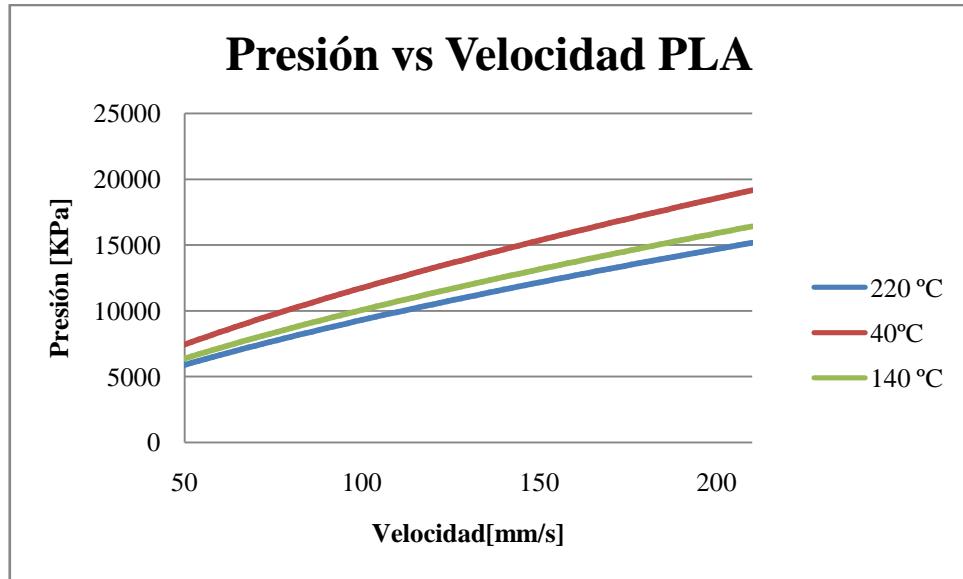


Figura 36.6: Presión vs Velocidad del PLA en el fundidor.

Fuente: Tabla 3.2

Entonces la fuerza que se necesita aplicar a la entrada del fundidor se calcula:

$$F = \Delta P * A \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$F = 15078754.3 * \pi * 0.001^2 = 47.37[\text{N}]$$

Donde 0.001 [m] es el radio por donde entra el filamento sólido que es el lugar donde se calcula la fuerza que se necesita. Entonces aplicando:

$$T = F * r_{en} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Donde r_{en} corresponde al radio tentativo del engrane que moverá el mecanismo de ruedas motrices y que se diseña en el siguiente inciso. El torque que debe proveer el motor para el mecanismo extrusor es:

$$T_e = 47.37[\text{N}] * 0.025[\text{m}] = 1.18[\text{Nm}]$$

Los motores a pasos Nema comunes para aplicaciones de control numérico son los siguientes:

- Nema 14: Aplicaciones que no requieren mayor torque. Torque promedio: 0.05 [Nm]
- Nema 17: Aplicaciones de torque moderado. Torque promedio: 0.4 [Nm]
- Nema 23: Aplicaciones que requieren mayor torque. Torque promedio: 1.2 [Nm].

Cada serie Nema puede contener motores con torques diferentes, ya que depende del tamaño del motor a pasos (debido al diámetro de su bobinado interno). Los valores de torque indicados, se refieren al torque de mantenimiento y no al torque dinámico. El torque de mantenimiento es mayor al torque dinámico.

Se selecciona el motor a pasos Nema 17 debido a su disponibilidad en el mercado nacional, en la práctica se pudo determinar su torque dinámico promedio T_m a una velocidad promedio de 77 RPM igual a 0.37 [Nm].



Figura 37.7: Pruebas de torque dinámico motor a pasos Nema 17.

Fuente: El autor

La prueba se realizó con un encoder incremental, una pantalla gráfica y poniendo pesos en el elemento mostrado en la figura 3.7 hasta detener el motor.

Se concluye que se necesita implementar un sistema de reducción para obtener el torque necesario. La relación de transmisión necesaria tiene que ser mayor a 3.19, ya que:

$$\text{Relación} = \frac{T_e}{T_m} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

$$\text{Relación} = \frac{1.18}{0.37} = 3.19$$

Como se pudo observar, la presión es muy susceptible a variaciones en la velocidad de extrusión, por lo cual es preferible sobredimensionar el torque. Se recomienda una relación de 3.509 para un factor de servicio de 1.1 seleccionado debido a las consideraciones asumidas en el modelo matemático del fundidor.

El par motor requerido P_{me} viene dado por la siguiente fórmula:

$$P_{me} = T * w_m \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Donde w_m es la velocidad angular. Para calcular la velocidad angular máxima a la que se puede extruir el material w_e , se tiene:

$$V = 210 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] * 3.509 = 736.89 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$$

$$w_e = \frac{210 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]}{r_r}$$

Donde r_r es el radio de las ruedas motrices que tiene el mecanismo extrusor de acuerdo a la alternativa de extrusor seleccionada en el capítulo 2, se tiene:

$$w = \frac{210 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]}{10[\text{mm}]} = 21 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

$$w = \frac{21 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] * 60}{2 * \pi} = 200.53[\text{rpm}]$$

La velocidad angular que se desea conocer, es la del motor a pasos, por lo cual se debe multiplicar el valor de la relación de transmisión por la velocidad angular del mecanismo de ruedas extrusoras.

$$w_m = 200.53[\text{rpm}] * 3.509 = 703.87 [\text{rpm}] = 73.71 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

El par motor necesario es:

$$P_{me} = T_m * w_m = 0.37[\text{Nm}] * 73.71 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] = 27.22[\text{W}]$$

$$P_{me} = 27.22[\text{W}] * \frac{1}{746} \left[\frac{\text{HP}}{\text{W}} \right] = 0.037 [\text{HP}]$$

La potencia del motor a pasos Nema 17 a 4.2 voltios es 6.3 [W]. Normalmente se operan los motores a pasos en potencias mayores a las nominales para tener mayor potencia, aplicando un voltaje de 12 voltios al motor se tiene una potencia de 18 [W]. Entonces teóricamente, se tiene que la velocidad máxima de extrusión con el motor Nema 17 trabajando a 12 voltios será aproximadamente de 138 [mm/s] ya que:

$$w = \frac{138 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] * 3.509 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]}{10[\text{mm}]} = 48.42 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

$$w = \frac{48.42 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] * 60}{2 * \pi} = 462.4 [\text{rpm}]$$

$$P_{me} = 0.37[\text{Nm}] * 48.42 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] = 17.91[\text{W}] = 0.024 [\text{HP}]$$

3.2.2 DISEÑO DE LA REDUCTORA

La necesidad de aumentar el torque en un espacio de trabajo reducido lleva a implementar una reductora de engranajes rectos con el fin de cumplir las siguientes funciones de transmisión de potencia:

- Recibir potencia de un motor a pasos a través de un eje giratorio o flecha.
- Transmitir la potencia a través de los elementos de la máquina que reducen la velocidad de giro hasta un valor deseado.
- Entregar la potencia a la menor velocidad, a un eje de salida acoplado a una rueda motriz o rodillo conductor de filamento.

Los requisitos de diseño considerados son:

- El reductor debe transmitir un torque de 1.18 [Nm].
- La salida del reductor entrega la potencia a las ruedas conductoras (motriz y conducida), por medio de un eje que gira a 462.4 [rpm].
- La relación de transmisión debe ser mayor a 3.51.
- Se requiere una eficiencia alta.

Los datos iniciales obtenidos son los siguientes:

- Potencia a transmitir: $P_s = 0.024$ [HP].
- Velocidad de giro del piñón: $n_p \approx 462.4$ [rpm].
- Número tentativo de dientes del piñón: $N_p = 11$.
- Paso diametral tentativo: $P_d = 20$ (paso fino).
- Relación tentativa de trabajo: 3.51.

Entonces se calcula el diámetro del piñón así:

$$D_p = \frac{N_p}{P_d} \quad (\text{Ec.3.12})$$

$$D_p = \frac{11}{20} = 0.55 \text{ [pulg]}$$

Se calcula la velocidad de giro del engrane:

$$n_g = \text{Velocidad piñón} / \text{Relación de transmisión} \quad (\text{Ec.3.13})$$

$$n_g = 462.4 / 3.51 = 131.74 \text{ [rpm]}$$

Se calcula la carga transmitida W_t :

$$W_t = \frac{126000 * P_s}{n_p * D_p} \quad (\text{Ec.3.14})$$

Donde:

n_p = Velocidad angular del piñón.

$$W_t = \frac{126000 * 0.024 \text{ [HP]}}{462.4 \text{ [rpm]} * 0.55 \text{ [pulg]}} = 11.89 \text{ [lb]}$$

El factor de forma de diente de Lewis Y que depende de la geometría del diente y es un parámetro determinante en el cálculo de la resistencia de los dientes en transmisión por engranajes, se determina del anexo 1. Para una profundidad completa de 11 dientes de 20° el factor de Lewis es $Y_p = 0.512$.

De acuerdo con el anexo 1, no se implementa factor de seguridad ($SF = 1$) ya que el proceso de extrusión se produce a una velocidad baja y uniforme. También se escoge Nylon sin carga para el diseño de los engranajes, de acuerdo con el anexo1 el esfuerzo flexionante admisible S_{at} es de 6000 [Psi].

En el anexo1, la tabla referida posee un error, la unidad correcta de los valores es en [Psi] no [Ksi]. Se calcula el ancho de cara mínimo de la reductora mediante la ecuación siguiente:

$$F = \frac{W_t * P_d * SF}{S_{at} * Y_p} \quad (\text{Ec. 3.15})$$

$$F = \frac{11.89 [\text{lb}] * 20 * 1}{6000[\text{Psi}] * 0.512} = 0.077 [\text{pulg}]$$

Se escoge un ancho de cara mínimo para la fabricación de 2 milímetros (0.0787 [pulg]). Se calcula el número de dientes en el engrane del siguiente modo:

$$N_G = N_P \left(\frac{n_p}{n_g} \right) \quad (\text{Ec. 3.16})$$

$$N_G = 11 * \left(\frac{462.4 [\text{rpm}]}{131.74 [\text{rpm}]} \right) = 38.61 = 39 \text{ dientes}$$

El diámetro de paso del engranaje se obtiene de la fórmula siguiente:

$$D_G = \frac{N_G}{P_d} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

$$D_G = \frac{39}{20} = 1.95 [\text{pulg}]$$

Para una profundidad completa de 39 dientes de 20° , el factor de Lewis del engrane es aproximadamente $Y_e = 0.651$ según el anexo 1. Se procede a calcular el esfuerzo de dientes del piñón y el engrane para un ancho de cara mínimo de 0.0787 [pulg] :

Para el piñón se tiene:

$$\sigma_p = \frac{W_t * P_d * SF}{F * Y_p} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

$$\sigma_p = \frac{11.89 [\text{lb}] * 20 * 1}{0.0787[\text{pulg}] * 0.512} = 5901.8[\text{psi}]$$

$$5901.8[\text{psi}] < 6000 [\text{psi}]$$

Para el engrane se tiene:

$$\sigma_G = \frac{W_t * P_d * SF}{F * Y_G} = \frac{11.89 [lb] * 20 * 1}{0.0787[pulg] * 0.651} = 4641.6 [psi]$$

$$4641.6 [psi] < 6000 [psi]$$

Con lo cual se asegura que el nylon sin carga es un material que soportará satisfactoriamente las cargas que provocan los esfuerzos flexionantes sin fallar y con seguridad. En polímeros que trabajan a estas potencias no se selecciona el material considerando la resistencia a la picadura.

El diseño del reductor se muestra en la figura 3.8.

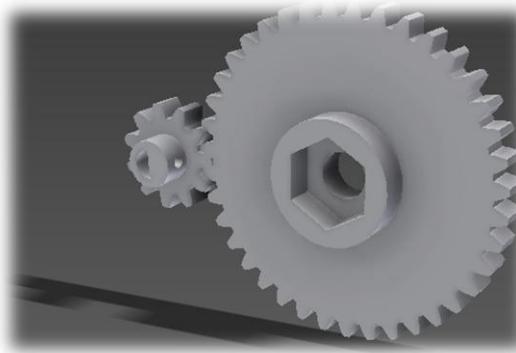


Figura 3.8: Diseño de la reductora

Fuente: El autor

El sistema de ruedas motrices que empuja el filamento sólido de polímero diseñado de acuerdo al modelo planteado en el capítulo 2 es el siguiente:

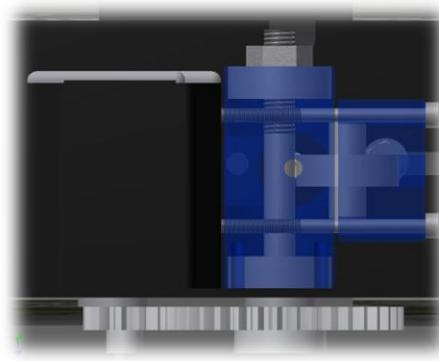


Figura 3.9: Sistema de ruedas motrices

Fuente: El autor

Se observa en transparencia las piezas portadoras de las ruedas motrices que son un tornillo acoplado al engrane y un rodamiento que gira en torno a un eje fijo.

Así mismo se puede observar el agujero por donde ingresará el polímero en estado de alambre sólido. El diseño final del mecanismo extrusor se muestra:

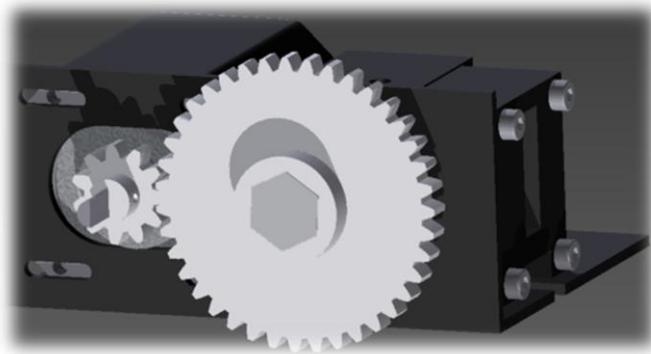


Figura 3.10: Diseño del mecanismo extrusor

Fuente: El autor

3.2.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE DEPOSICIÓN DE MATERIAL

3.2.3.1 Selección del motor

Con los datos obtenidos de torque y potencia, y en base a las alternativas seleccionadas para elegir el motor en el mecanismo extrusor, se eligió el motor a pasos bipolar Nema 17 con las siguientes características:

SERIE:	Nema 17
TIPO:	Bipolar
ANGULO DE PASO:	1.8 ° (+- 5%)
PASOS POR REVOLUCIÓN:	200
FASES:	2
VOLTAJE NOMINAL:	4.2 V
CORRIENTE DE FASE:	1.5 A
RESISTENCIA DE FASE:	2.8 Ω +- 10%
TORQUE DE MANTENIMIENTO:	5.5 [Kg.cm], 0.54 [N.m]
PESO:	0.34 kg

Tabla 33.3: Características del motor a pasos Nema 17

Fuente: Hoja de datos del motor a pasos Nema 17

3.2.3.2 Selección del controlador del motor

Para el control del motor a pasos seleccionado se debe tomar en cuenta las consideraciones siguientes:

- El voltaje lógico que debe manejar el controlador debe ser de 5VDC y que entregue al menos 12VDC a los bobinas del motor.
- La corriente que entregue a cada bobina debe ser de al menos 1.5 amperios.
- El control efectivo de un motor a pasos se realiza mediante la técnica de micropasos.
- Protecciones de seguridad mínimas de corriente, voltaje y temperatura.
- Existe disponibilidad en el mercado nacional y el costo es accesible.

Para el control de motores a pasos bipolares con micropasos existen varias alternativas en el mercado internacional y unas pocas en el nacional, además es factible diseñar una tarjeta propia de micropasos. Uno de los factores preponderantes en el desarrollo de la tesis denunciada es el costo de la máquina, este factor ha sido tomado en consideración al momento de seleccionar un controlador comercial en el mercado nacional en vez de diseñar uno propio.

Con esta información se ha procedido a seleccionar el controlador A4988 Stepper Motor Driver Carrier.



Figura 3.11: A4988 Stepper Motor Driver Carrier

Fuente: <http://www.pololu.com/catalog/product/1182>

Este controlador es una tarjeta de soporte y control, que está integrada con el microcontrolador Allegro A4988, el cual, permite manejar motores a pasos bipolares de hasta 2 amperios por bobina y que opera en un rango de 8 a 35 voltios, el motor se puede controlar mediante la técnica de micropasos.

Las características principales de este controlador son las siguientes:

- Interface para control de pasos y dirección sencilla.
- Posee 5 resoluciones diferentes de pasos: paso completo, medio paso, un cuarto de paso, un octavo de paso y un dieciseisavo de paso.
- Control de corriente ajustable mediante un potenciómetro, lo cual permite usar voltajes arriba de las nominales del motor a pasos usado para lograr mayores tasas de paso.
- Control de troceo inteligente, el cual, detecta y selecciona automáticamente el modo de caída de corriente (caída mixta, caída lenta).
- Apagado térmico por exceso de temperatura, bloqueo de bajo voltaje, protección para sobre corriente.
- Corto a tierra y protección de corto-circuito.

El controlador “Pololu carrier A4988” consta de los siguientes puertos:

PIN	PUERTO	DESCRIPCIÓN
1	Enable	Entrada para encender o apagar el controlador.
2	MS1	Entrada de selección de modo de paso.
3	MS2	Entrada de selección de modo de paso.
4	MS3	Entrada de selección de modo de paso.
5	RESET	Entrada usada para setear el controlador a su estado inicial.
6	SLEEP	Entrada para poner el controlador en modo de bajo consumo
7	STEP	Entrada de tren de pulsos equivalentes a cada micropaso.
8	DIR	Entrada de direccionamiento del sentido de giro del motor.
9	GND	Conexión a tierra del controlador.
10	VDD	Voltaje lógico del controlador.
11	1B	Salida a bobina de motor.
12	1A	Salida a bobina de motor.
13	2A	Salida a bobina de motor.
14	2B	Salida a bobina de motor.
15	GND	Conexión a tierra del motor.
16	VMot	Voltaje de referencia del motor.

Tabla 3.4: Descripción de pines del controlador para el integrado A4988

Fuente: Hoja de datos del controlador para el integrado A4988

El controlador requiere un voltaje lógico (VDD) de 3 a 5.5 voltios y soporta de 8 a 35 voltios para la alimentación del motor (Vmot). Para proteger el motor de picos

de tensión destructivos, el fabricante recomienda usar un capacitor electrolítico mayor a 50 [μF] a través del motor y tierra.

La configuración de micropasos se realiza a través de las entradas MS1, MS2 y MS3 de la siguiente manera:

MS1	MS2	MS3	Resolución de micropasos
Bajo	Bajo	Bajo	Paso completo
Alto	Bajo	Bajo	Medio paso
Bajo	Alto	Bajo	Un cuarto de paso
Alto	Alto	Bajo	Un octavo de paso
Alto	Alto	Alto	Un dieciseisavo de paso

Tabla 3.5: Configuración de pasos del controlador A4988

Fuente: Hoja de datos del controlador para el integrado A4988

La configuración dependerá de la resolución y frecuencias a las que se necesite operar el motor. Para enviar la señal de movimiento al motor, necesitamos enviar pulsos a la entrada STEP de la tarjeta y para controlar la dirección lo hacemos a través de la entrada DIR. El controlador puede manejar una corriente máxima de 2 [A] por bobina siempre y cuando el circuito se encuentre a una temperatura no muy alta. Para corrientes mayores a 1[A] por bobina, se recomienda usar disipadores de calor u otro método de enfriamiento en el controlador. El motor Nema 17 maneja hasta 1.5 [A] por bobina, por lo cual es necesario implementar un disipador de calor.

La entrada ENABLE activa o desactiva el controlador, cuando se envía un cero lógico se activan las salidas mientras que con la señal en uno lógico las desactiva.

La entrada de RESET sirve para resetear el controlador aplicando una señal en alto mientras que la entrada SLEEP sirve como modo de bajo consumo. Debido a que en el circuito se necesita mantener enclavados los motores para mantener la posición, la entrada SLEEP debe permanecer en bajo para mantenerse activa la controladora por lo cual se conecta en serie a la entrada RESET que se encuentra flotando se acuerda a las recomendaciones del fabricante.

3.2.3.3 Diseño del circuito de control del actuador del extrusor

El sistema de control aplicado a los motores a pasos es un sistema en lazo abierto como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 3.12.



Figura 3.12: Sistema de control de ruedas motrices

Fuente: El autor

El motor a pasos seleccionado tiene una resolución de 1.8° . El driver de micropasos A4988 permite resoluciones mayores al permitir usar pasos intermedios que se logran energizando las bobinas con niveles de corriente intermedios. La máxima capacidad de micropasos con este controlador es de una resolución de 16 micropasos por paso. De manera que la resolución se puede calcular mediante número de pasos por vuelta o revolución.

Trabajando a paso completo se obtiene 200 pasos por revolución.

$$\# \text{pasos} = \frac{360^\circ}{\text{Resolución}} \quad (\text{Ec. 3.19})$$

$$\# \text{pasos} = \frac{360^\circ}{1.8^\circ} = 200 \text{ pasos}$$

Trabajando con el controlador a 16 micropasos se tiene:

$$\# \text{pasos} = \frac{360^\circ}{\text{Res}_\frac{1}{16}} \quad (\text{Ec. 3.20})$$

$$\# \text{pasos} = \frac{360^\circ}{\left(\frac{1.8^\circ}{16}\right)} = 3200 \text{ pasos}$$

Según los datos del fabricante, la tarjeta me permite trabajar a una frecuencia de:

$$f = \frac{1}{s} \quad (\text{Ec. 3.21})$$

$$f = \frac{1}{0.000001 [s]} = 1 [\text{MHz}]$$

El cual es un rango de frecuencia muy amplio que permite operar los motores en diferentes frecuencias sin ninguna restricción del controlador.

El diseño del circuito del controlador del motor a pasos mediante micropasos usando un microcontrolador es el siguiente:

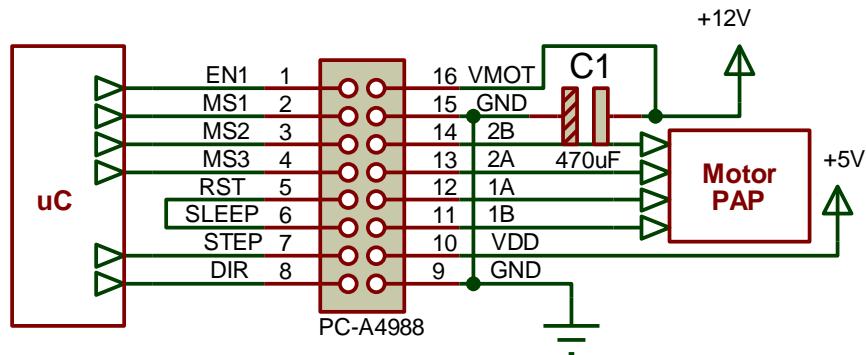


Figura 3.13: Diseño circuito del controlador de motor a pasos

Fuente: El autor

3.2.3.4 Diseño de control de temperatura en el fundidor

Ya que el control se basa en una entrada desde el sensor de temperatura ubicado en la punta del fundidor y la salida a través de un calentador resistivo, la respuesta del sistema tiene retardo. El sistema debe ajustar continuamente la potencia suministrada al calentador de acuerdo a la diferencia de temperatura entre el valor deseado (entrada de referencia) y el valor medido (sensor de temperatura). El tiempo de respuesta del lazo de control de temperatura es entonces del orden de los segundos debido a la inercia térmica del sistema fundidor.

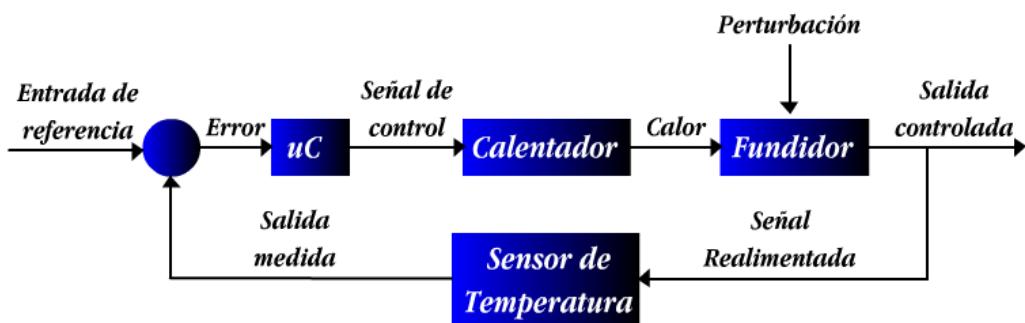


Figura 3.14: Sistema de control del fundidor

Fuente: El autor

3.2.3.4.1 Calentador

Debido a que el espacio de trabajo en el fundidor es reducido, se elige instalar un calentador resistivo basado en alambres de nicromo delgados envueltos en el tornillo metálico vaciado y envuelto en un compuesto cerámico que se adhiere a las paredes del tornillo (figura 3.15) y que posee buenas características de conducción térmica (dispersión uniforme del calor y mejor control electrónico) versus aislamiento térmico (característica que permite almacenar el calor disminuyendo pérdidas) y es muy resistente (hasta 3000°F).

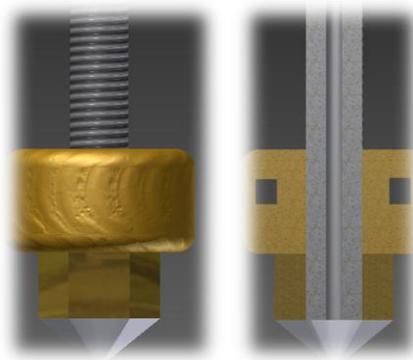


Figura 3.158: Fundidor de polímero

Fuente: El autor

Para analizar el calentamiento del fundidor se considera un sistema cerrado por la ausencia de intercambio de masa donde:

$$\text{Calor Total} = \text{Calor polímero} + \text{Pérdidas} \quad (\text{Ec. 3.22})$$

El calor necesario para calentar cada polímero hasta su temperatura de impresión máxima (PLA = 220 °C, ABS = 250°C) se obtiene de la ecuación de calor a presión constante. El ABS requiere mayor calor para fundirse por lo cual se diseña en base a este polímero, entonces:

$$Q_{ABS} = c_{ABS} * m_{ABS} * \Delta T_{ABS} \quad (\text{Ec. 3.23})$$

Donde:

Q_{ABS} = Calor entregado a la masa de polímero, [KJ].

m_{ABS} = Masa del polímero, [Kg].

c_{ABS} = Calor específico del polímero, [KJ / Kg * °C].

ΔT_{ABS} = Diferencia de temperaturas, [°C].

La masa del ABS se puede calcular a partir de su densidad¹² 1.06 $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$, se tiene:

$$m = \rho * v \quad (\text{Ec. 3.24})$$

$$v = 2 * \pi * r^2 * h = 2 * \pi * 0.875^2 * 11 = 52.916 [mm^3]$$

$$m = 1.06 \left[\frac{g}{cm^3} * \frac{1cm^3}{1000mm^3} \right] * 52.916 [mm^3] = 0.056 [g] = 5,6 \times 10^{-5} [Kg]$$

El calor específico a su temperatura máxima¹³ es:

$$c = 1.675 \left[\frac{KJ}{Kg * ^\circ C} \right]$$

Entonces se tiene que el calor que se necesita para calentar el polímero es:

$$Q_{ABS} = 1.675 \left[\frac{KJ}{Kg * ^\circ C} \right] * 0.056 [Kg] * (250^\circ C - 15^\circ C) = 0.02207 [KJ] = 22.078 [J]$$

La diferencia de temperatura de 15°C se asume considerando la temperatura promedio desde la cual se calienta el fundidor. Las pérdidas en el sistema son analizadas del esquema de resistencias térmicas siguiente:

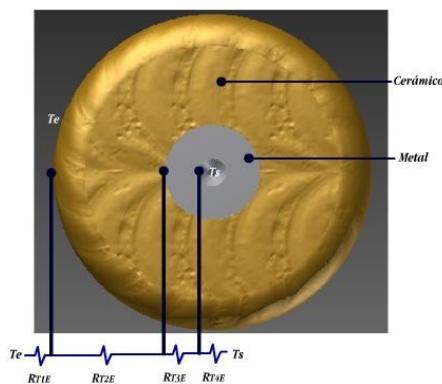


Figura 3.16: Esquema de resistencias térmicas del fundidor

Fuente: El autor

¹² MATBASE, <http://www.matbase.com/material/polymers/commodity/abs-general-purpose/properties>

¹³ MATBASE, <http://www.matbase.com/material/polymers/commodity/abs-general-purpose/properties>

El cual es un sistema análogo a un circuito de resistencias en serie, donde:

$$R_{T1E} = \text{Resistencia térmica por convección del aire } \left[\frac{\text{°C}}{\text{W}} \right].$$

$$R_{T2E} = \text{Resistencia térmica por conducción del cerámico } \left[\frac{\text{°C}}{\text{W}} \right].$$

$$R_{T3E} = \text{Resistencia térmica por conducción del tornillo roscado vaciado } \left[\frac{\text{°C}}{\text{W}} \right].$$

$$R_{T4E} = \text{Resistencia térmica por convección del polímero } \left[\frac{\text{°C}}{\text{W}} \right].$$

Además:

T_e = Temperatura promedio del aire ($15^{\circ}\text{C} = 59^{\circ}\text{F}$)

T_s = Temperatura del polímero fundido ($250^{\circ}\text{C} = 482^{\circ}\text{F}$)

En la figura 3.17 se muestra los diámetros de cada sección, los cuales serán útiles para los cálculos posteriores.

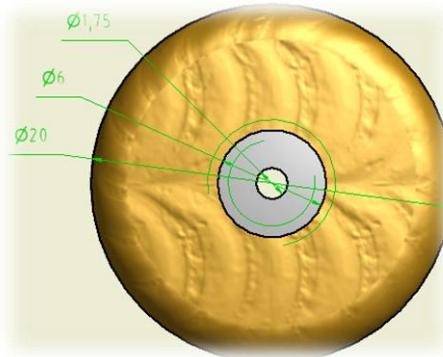


Figura 3.17: Diámetros por sección del fundidor

Fuente: El autor

Donde 1.75 [mm] es el diámetro interno del tornillo vaciado por donde ingresa el polímero en estado de alambre, 6 [mm] es el diámetro externo del tornillo vaciado y 20 [mm] milímetros es el diámetro tentativo del compuesto cerámico a ser aplicado.

- **Resistencia térmica por convección del aire**

Se obtiene mediante la siguiente relación:

$$R_{T1E} = \frac{1}{h_e * A_e} \quad (\text{Ec.3.25})$$

Dónde:

h_e = coeficiente de transferencia de calor por convección del aire $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

A_e = área en contacto con el aire $[m^2]$

Se utiliza el coeficiente convectivo del aire que se determina mediante convección natural para tubos verticales¹⁴ así:

$$h_e = 0.4 * \frac{\Delta T^{0.26}}{d} \quad (\text{Ec. 3.26})$$

Donde los datos se encuentran en el sistema de medidas inglesas, entonces:

$$h_o = 0.5 * \frac{(482^\circ F - 59^\circ F)^{0.26}}{0.787[\text{pulg}]} = 2.3 \left[\frac{Btu}{h * ft^2 * ^\circ F} \right]$$

Se transforma de Btu a Wattse con la siguiente relación¹⁵:

$$h_o = 2.3 \left[\frac{Btu}{h * ft^2 * ^\circ F} \right] * \frac{1 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]}{0.1761 \left[\frac{Btu}{h * ft^2 * ^\circ F} \right]} = 13.08 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$$

El área en contacto de la superficie en contacto con el aire es:

$$A_o = 2 * \pi * r_c * L_c \quad (\text{Ec. 3.271})$$

Dónde:

r_c = radio exterior del cerámico = 10 [mm].

L_c = longitud del cilindro cerámico = 11 [mm].

$$A_o = 2 * \pi * 10[mm] * 11[mm] = 691.15[mm^2] = 6.91 \times 10^{-4}[m^2]$$

Por lo tanto, la resistencia R_{1T} se calcula así:

¹⁴ Donald Q. Kern, Procesos de Transferencia de calor [Méjico: Compañía Editorial Continental], p.260.

¹⁵ MeTAL PASS, URL <http://www.metalpass.com/unit/unit8.aspx>.

$$R_{T1E} = \frac{1}{13.08 \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] * 6.91 \times 10^{-4} [m^2]} = 110.59 \left[\frac{^\circ C}{W} \right]$$

- **Resistencia térmica por conducción del cerámico**

Los datos del compuesto cerámico Resbond 920 seleccionado de obtienen del anexo 2. Se transforma de Btu a Wattse para obtener la conductividad térmica en las unidades deseadas:

$$k_c = 15 \left[\frac{Btu * in}{h * ft^2 * ^\circ F} \right] * \frac{1 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]}{6.93 \left[\frac{Btu}{h * ft^2 * ^\circ F} \right]} = 2.16 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$$

Asumiendo un área cilíndrica del compuesto cerámico se tiene que:

$$R_{T2E} = \left[\frac{\ln(rc_2/rc_1)}{2 * \pi * L_c * k_c} \right] \quad (\text{Ec. 3.28})$$

Donde:

rc_1 = Radio interior del cerámico, 3 [mm]

rc_2 = Radio exterior del cerámico, 10 [mm]

L_c = Longitud de la superficie cerámica, 11 [mm]

k_c = conductividad térmica del compuesto cerámico, 2.16 $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]$

Entonces se reemplaza y se tiene que la resistencia térmica es:

$$R_{T2E} = \left[\frac{\ln(10[mm]/6[mm])}{2 * \pi * 11[mm] * 2.16 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right]} \right] = 8.06 \left[\frac{^\circ C}{W} \right]$$

- **Resistencia térmica por conducción del tornillo roscado vaciado**

Para el tornillo roscado se asume un cilindro de igual manera, entonces:

$$R_{T3E} = \left[\frac{\ln(rt_2/rt_1)}{2 * \pi * L_t * k_t} \right] \quad (\text{Ec. 3.29})$$

Donde:

rt_1 = Radio interior del tornillo, 0.875[mm]

rt_2 = Radio exterior del tornillo, 3 [mm]

L_r = Longitud de la superficie tornillo en contacto, [11mm]

k_t = conductividad térmica del tornillo; $360 \left[\frac{Btu}{h * ft^2 * ^\circ F} \right]$

La conductividad térmica del tornillo del acero 1020¹⁶ es:

$$k_t = 360 \left[\frac{Btu}{h * ft^2 * ^\circ F} \right] * \frac{1 \left[\frac{W}{m^\circ C} \right]}{6.93 \left[\frac{Btu}{h * ft^2 * ^\circ F} \right]} = 51.94 \left[\frac{W}{m^\circ C} \right]$$

Entonces reemplazamos y tenemos que:

$$R_{T3E} = \left[\frac{\ln(3[mm]/0.875[mm])}{2 * \pi * 11[mm] * \left[51.94 \frac{W}{m^\circ C} \right]} \right] = 0.34 \left[\frac{^\circ C}{W} \right]$$

- **Resistencia térmica por convección del polímero**

La resistencia por convección del flujo de ABS no se ha podido determinar por falta de datos técnicos por parte del proveedor, sin embargo se puede despreciar debido a la velocidad reducida con la que fluye el polímero.

De modo que la resistencia térmica total es la siguiente:

$$RTE = R_{T1E} + R_{T2E} + R_{T3E} + R_{T4E} \quad (\text{Ec. 3.30})$$

Donde $R_{T4E} = 0$, entonces:

$$RT = 110.6 \left[\frac{^\circ C}{W} \right] + 8.06 \left[\frac{^\circ C}{W} \right] + 0.34 \left[\frac{^\circ C}{W} \right] = 119 \left[\frac{^\circ C}{W} \right]$$

Aplicando la analogía eléctrica donde la diferencia de temperatura equivale a la diferencia de potencial, se encuentra el flujo calor perdido (corriente) así:

$$Q_P = \frac{T_s - T_e}{RT} \quad (\text{Ec. 3.31})$$

¹⁶ MatWeb,

<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=10b74ebc27344380ab16b1b69f1cffbb>

$$Q_P = \frac{(250 - 15)^\circ\text{C}}{119 \left[\frac{\text{C}}{\text{W}} \right]} = \frac{235^\circ\text{C}}{119 \left[\frac{\text{C}}{\text{W}} \right]} = 1.97[\text{W}] = 1.97 \left[\frac{\text{J}}{\text{s}} \right]$$

Para un tiempo de calentamiento de 1 segundo se tiene que el calor perdido es:

$$Q_P = 1.97 \left[\frac{\text{J}}{\text{s}} \right] * 1[\text{s}] = 1.97 [\text{J}]$$

El calor total se calcula:

$$Q_T = Q_{ABS} + Q_P \quad (\text{Ec. 3.32})$$

$$Q_T = 22.078 [\text{J}] + 1.97 [\text{J}] = 24.05 [\text{J}]$$

Debido a que la potencia disipada por un resistor es la cantidad de energía usada (trabajo eléctrico aplicado) por unidad de tiempo, es equivalente a la energía total (flujo calorífico) consumida y disipada en el tiempo, según la primera ley de Joule del calentamiento que expresa la potencia disipada en una resistencia, se calcula la potencia que se necesita disipar por el calentador resistivo:

$$P_e = \frac{Q}{t} \quad (\text{Ec. 3.33})$$

$$P_e = \frac{24.05 [\text{J}]}{1[\text{s}]} = 24.05 [\text{W}]$$

Entonces la resistencia eléctrica necesaria se determina por:

$$R = \frac{V^2}{P_e} \quad (\text{Ec. 3.34})$$

Donde R es la resistencia del calentador y V la diferencia de potencial. La resistencia eléctrica máxima para calentar el sistema a la velocidad establecida es:

$$R = \frac{(12[\text{V}])^2}{24.05[\text{W}]} = 5.98 [\Omega]$$

La corriente que debe proveer la fuente a la carga resistiva tiene que ser:

$$I = \frac{V}{R} \quad (\text{Ec. 3.35})$$

$$I = \frac{12[V]}{5.98[\Omega]} = 2 [A]$$

Entonces se necesita tener una resistencia total de 5.98 [Ω] que disipe 24.05 [W] aplicando un voltaje de 12 [V] de la fuente disponible y que además provea una corriente 2 [A] al calentador. Debido a que se necesita setear constantemente los valores de temperatura para los termoplásticos a utilizarse alrededor del punto de fundición y a los efectos de inercia térmica, el circuito tendrá que switchear continuamente para mantener los valores óptimos de temperatura. Por esto, se seleccionó usar un transistor de tecnología mosfet (**Metal–Oxide–Semiconductor – Field Effect Transistor**) de potencia como switch, ya que en el caso de usar un relé limitaríamos su tiempo de vida. El tiempo de calentamiento entonces aumentara al doble (2 segundos) si se usa un ciclo de trabajo del 50. El mosfet se puede controlar por tensión y tiene una velocidad de commutación rápida. El diseño del circuito se basa en un mosfet de canal “n”, el cual presenta menos pérdidas y mayor velocidad. Los parámetros fundamentales para seleccionar el mosfet son los siguientes:

Siglas	Descripción	Valor	Medida
V_{DSS}	Tensión de Ruptura	>12	V
I_D	Corriente Máxima	>2	A
$R_{DS(ON)}$ a 5v	Resistencia de conducción	Baja	Mili-ohmios
$V_{GS(TH)}$	Tensión Umbral Activación	<5	V

Tabla 3.6: Requisitos de diseño para selección del mosfet del extrusor

Fuente: El autor

El mosfet seleccionado en base a los parámetros de diseño es el IRFZ44N. Sus características se muestran en el anexo 3.

Si bien el voltaje y la corriente se encuentran sobredimensionados, el resto de características lo hace ideal para PWM (Modulación por ancho de pulso) que es el control que se requiere efectuar y su valor bajo de resistencia $R_{DS(ON)}$ que evita el sobrecalentamiento del mosfet. La potencia que disipa es la siguiente:

$$P_{DM} = I_O^2 * R_{(DS(ON))} * \delta + 0.5 * V_{DC} * I_O * (tr + tf) * fs \quad (\text{Ec. 3.36})$$

Dónde:

P_{DM} = Potencia que disipa el mosfet [W]

I_O = Corriente de salida [A]

$R_{(DSO_N)}$ = Resistencia drenaje fuente [Ω]

δ = Relación de trabajo

V_{DC} = Voltaje de alimentación [V].

tr = Tiempo de subida [s].

tf = Tiempo de bajada [s].

fs = Frecuencia de conmutación [Hz]

Con una frecuencia de conmutación de 10 [KHz] (100 [uS]) aplicada desde el microcontrolador para generar el PWM y considerando una relación de trabajo del PWM igual a 1 (ancho de pulso igual a período) para encontrar la máxima dissipación, se reemplaza y se tiene que:

$$P_{DM} = (2[A])^2 * 22[m\Omega] * 1 + 0.5 * 12[V] * 2[A] * (60 + 45)[ns] * 10[KHz]$$

$$P_{DM} = 0.07[W] + 0.0126[W] = 0.083[W]$$

Para saber si necesitamos implementar disipador térmico en el elemento semiconductor, se aplica la ley de ohm térmica:

$$T_j - T_a = P_{DM} * R_{tht} \quad (\text{Ec. 3.37})$$

Donde:

T_j = Temperatura de juntura máxima de la unión del mosfet [°C].

T_a = Temperatura ambiente [°C].

R_{tht} = Resistencia térmica total entre la unión y el ambiente $\left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}\right]$.

Entonces se estima la temperatura de juntura para comprobar con T_j . La resistencia entre juntura y ambiente se obtiene de la tabla térmica del elemento que se encuentra en el anexo 3.

Estimando una temperatura ambiente de 30°C en funcionamiento debido al calentamiento de los demás componentes y por estar encerrado en una caja metálica, se tiene:

$$T_{jest} - T_a = P_{DM} * R_{th(j-a)} \quad (\text{Ec. 3.38})$$

$$T_{jest} = T_a + (P_{DM} * R_{th(j-a)}) = 30^\circ\text{C} + \left(0.083 [\text{W}] * 62 \left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}\right]\right) = 35.14 [^\circ\text{C}]$$

Del anexo 3 se tiene que la temperatura de juntura máxima del elemento es 175 °C, por lo cual no es necesario usar disipador térmico. El diseño del circuito calentador del extrusor se muestra en la figura 3.18.

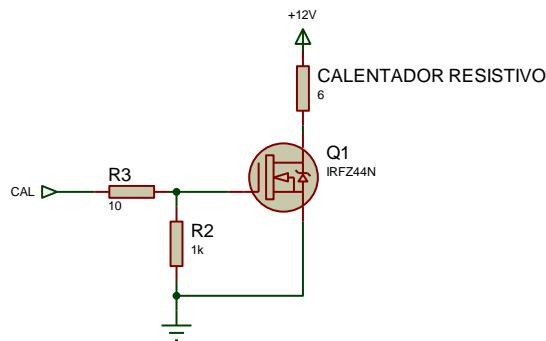


Figura 3.18: Diseño del circuito calentador del extrusor

Fuente: El autor

Donde CAL es la señal PWM proveniente del microcontrolador al circuito calentador.

3.2.3.4.2 Sensor de temperatura

El bloque de sensor de temperatura se puede descomponer de la siguiente forma:



Figura 3.19: Diagrama de bloques del sensor de temperatura

Fuente: El autor

3.2.3.4.3 RTD

La relación aproximada entre la resistencia de salida y la temperatura de un RTD puede verse en la expresión lineal siguiente:

$$R_{PT100} = R_o(1 + \alpha * T) \quad (\text{Ec. 3.39})$$

Donde:

R_{PT100} = Resistencia equivalente a la temperatura en $[\Omega]$

R_o = Resistencia del alambre de platino @ 0°C en $[\Omega]$

T = Temperatura medida en $[\text{ }^\circ\text{C}]$

α = Coeficiente de temperatura de la resistencia igual a 0.00385, [Adimensional]

Entonces aplicando la ecuación 3.39 se calcula la resistencia máxima que entregará el sensor resistivo del extrusor a 280°C para tener un rango más amplio de control ya que el ABS se imprime hasta 250°C :

$$R_{PT100} = 100(1 + 0.00385 * 280) = 207.8 [\Omega]$$

3.2.3.4.4 Acondicionamiento de la señal del PT100

Para acondicionar el sensor seleccionado, se necesita tomar la salida resistiva entregada por el PT100 de tres hilos y acondicionarla mediante un puente Wheatstone para obtener una señal de voltaje.

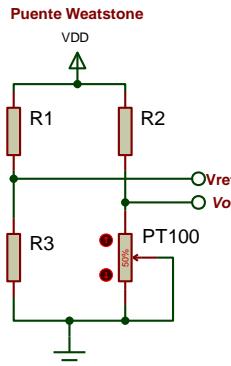


Figura 3.209: Diseño del puente de weatstone

Fuente: El autor

Para determinar los valores de R1, R2 y R3 es necesario tomar en cuenta el error por exceso que se puede producir por el autocalentamiento del sensor, para esto es necesario tener valores resistivos altos en R1 y R2. Además es necesario balancear el puente con $R1 = R2$.

Para $R1 = R2 = 10K$, un voltaje de polarización de 12 voltios y los valores resistivos entregados por el Pt100, se tiene que la corriente que circula por el sensor es:

$$I_{PT100} = \frac{VDD [V]}{(R2 + R_{PT100}) [\Omega]} \quad (\text{Ec. 3.40})$$

$$I_{PT100} = \frac{12 [V]}{(207.8 + 10000) [\Omega]} = 0.001175 [A]$$

Para una pendiente del sensor tomada de 5 [$\text{mW} / {}^\circ\text{C}$], el error por exceso será:

$$e_{Pt100} = \left(\frac{\text{Potencia disipada máxima}}{\text{Pendiente}} \right) \quad (\text{Ec. 3.41})$$

$$e_{Pt100} = \left(\frac{(0.00117[A])^2 * 100[\text{ohmios}]}{5 [\text{mW}/{}^\circ\text{C}]} \right) = 0.0276 {}^\circ\text{C}$$

Para equilibrar el puente se usa una resistencia $R3$ de 100 $[\Omega]$ y se calcula el voltaje de referencia V_{ref} con la ley de ohm con la corriente de referencia I_{ref} .

Entonces:

$$I_{ref} = \left(\frac{V_{DD}}{R1 + R3} \right)$$

$$I_{ref} = \left(\frac{12[V]}{(10000 + 100)[\Omega]} \right) = 0.001188[A]$$

$$V_{ref} = I_{ref} * R3$$

$$V_{ref} = 0.001188[A] * 100[\Omega] = 0.1188 [V]$$

El voltaje de salida V_o máximo ($280 {}^\circ\text{C}$) es:

$$V_o = I_{PT100} * R_{PT100} = 0.001175 [A] * 207.8[\Omega] = 0.2442 [V]$$

Por lo cual es necesario amplificar el voltaje.

3.2.3.4.5 Diseño del amplificador de señal del puente wheatstone

La señal entregada por el puente necesita ser amplificada para poder usarla con el microcontrolador mediante un conversor AD. El microcontrolador funciona con lógica CMOS por lo cual el rango de operación del sensor con la señal amplificada

debe variar de 0 a 5 voltios con las diferentes temperaturas sensadas. La ganancia que debe tener el amplificador se obtiene aplicando la ley de ohm para el voltaje de salida máximo de la diferencia entre V_o y V_{ref} y el voltaje VDD con el que funciona el microcontrolador.

Primero se calcula la ganancia de la siguiente manera:

$$G = \frac{5 [V]}{(V_o - V_{ref}) [V]} \quad (\text{Ec. 3.42})$$

$$G = \frac{5 [V]}{0.24 [V] - 0.1188 [V]} = 39.849$$

El voltaje amplificado a una temperatura de 280 °C es:

$$V_{amp@280} = 39.849 * 0.1254 = 5 [V]$$

Cuando la temperatura es 15 °C (temperatura ambiente promedio) se tiene:

$$V_{amp@0} = 39.849 * 0.0067 = 0.27[V]$$

Con lo cual la salida acondicionada varía de 0.27 a 5 voltios midiendo temperaturas entre 15 °C y 280 °C. La ganancia G para el amplificador es de 39.849. Se usa un amplificador de instrumentación, el cual ayuda a obtener un funcionamiento más óptimo y confiable que los comunes. Se selecciona el integrado AD620, el cual requiere de una resistencia externa para obtener ganancias de 1 hasta 1000 y presenta las siguientes características importantes:

- Fuente de alimentación de ± 2.3 voltios a ± 18 voltios.
- Bajo ruido 0.28 uV p-p (0.1 Hz a 10 Hz)
- Gran precisión (no linealidad de 40ppm)

En la tabla 3.7 se describe cada uno de sus pines:

PIN	PUERTO	DESCRIPCIÓN
1	RG	Resistencia de ganancia.
2	-IN	Entrada de voltaje diferencial negativa.
3	+IN	Entrada de voltaje diferencial positiva.
4	-VS	Voltaje lógico del integrado negativo.

5	REF	Voltaje de referencia.
6	OUTPUT	Salida amplificada
7	+VS	Voltaje lógico del integrado positivo.
8	RG	Resistencia de ganancia.

Tabla 3.7: Descripción de pines del amplificador AD620

Fuente: Hoja de datos pines del integrado AD620

El anexo 4 detalla la información del integrado AD620. Para calcular el valor de la resistencia de ganancia, acorde a la hoja de datos del integrado, se tiene:

$$R_G = \frac{49.4 K}{G-1} \quad (\text{Ec. 3.43})$$

$$R_G = \frac{49.4 [K]}{39.849 - 1} = 1.2715[K]$$

El diseño del circuito de amplificación es el siguiente:

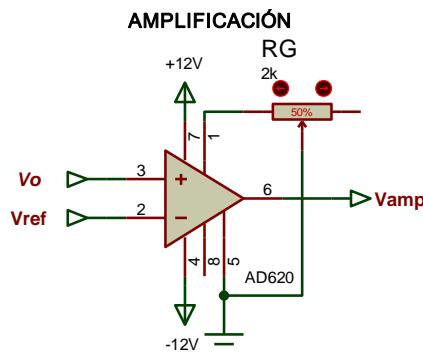


Figura 3.21: Circuito de amplificación con AD620

Fuente: El autor

Donde RG es un potenciómetro de precisión de 2[K] para poder calibrar manualmente el sensor de temperatura PT100.

3.2.3.4.6 Diseño del filtro

Se implementa un filtro digital realizado mediante código en el microcontrolador para determinar la temperatura media T_m en base a un muestreo de n datos de temperaturas medidas T_{med} por el sensor de esta forma:

$$T_m = \left(\frac{\sum_{i=1}^n T_{med}}{n} \right) [\text{°C}] \quad (\text{Ec. 3.44})$$

Con esto se obtiene una señal más estable y confiable. El número de datos tomados y la frecuencia de muestreo se obtienen de las pruebas de calibración.

3.2.3.4.7 Conversor análogo – digital.

Una vez acondicionada la señal para el microcontrolador se procede a realizar el cálculo de la resolución. En base al conversor interno del microcontrolador de 10 bits se tiene un valor digital de 1024, entonces:

$$Res = \frac{\text{Voltaje uc}}{2^n} \quad (\text{Ec. 3.45})$$

$$Res = \frac{5}{2^{10}} = \frac{5}{1024} = 4.8[mV]$$

Entonces el cambio de temperatura medible viene dado por regla de regla de tres en el rango de alimentación, así:

$$\Delta T = \frac{0.0048[V] * 280^{\circ}\text{C}}{5[V]} = 0.268^{\circ}\text{C}$$

3.2.3.5 Mesa de deposición

Una mesa calentada uniformemente ayuda a mejorar la calidad del elemento impreso ya que ayuda a evitar deformaciones producidas por la contracción del polímero al solidificarse manteniendo una temperatura alta del elemento durante el proceso de impresión. El efecto de contracción del filamento de polímero depositado es evidente en las esquinas donde se observa cómo se expande el polímero.

Bellini realizó simulaciones para determinar el comportamiento del polímero al ser impreso en la primera y segunda capa, los resultados son los siguientes:

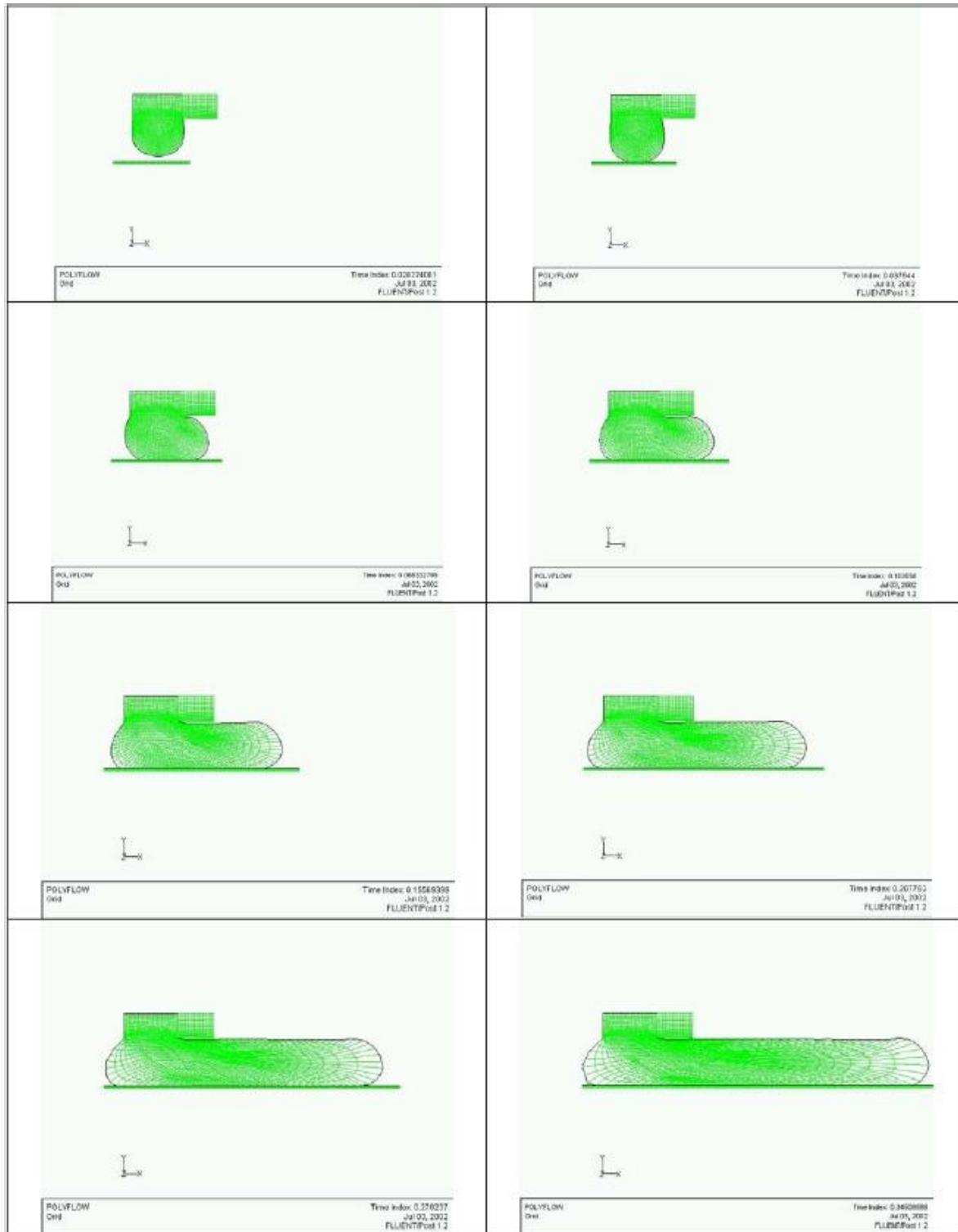


Figura 3.22: Evolución de la forma del polímero depositado en la primera capa

Fuente: Anna Bellini: Fused Deposition of Ceramics

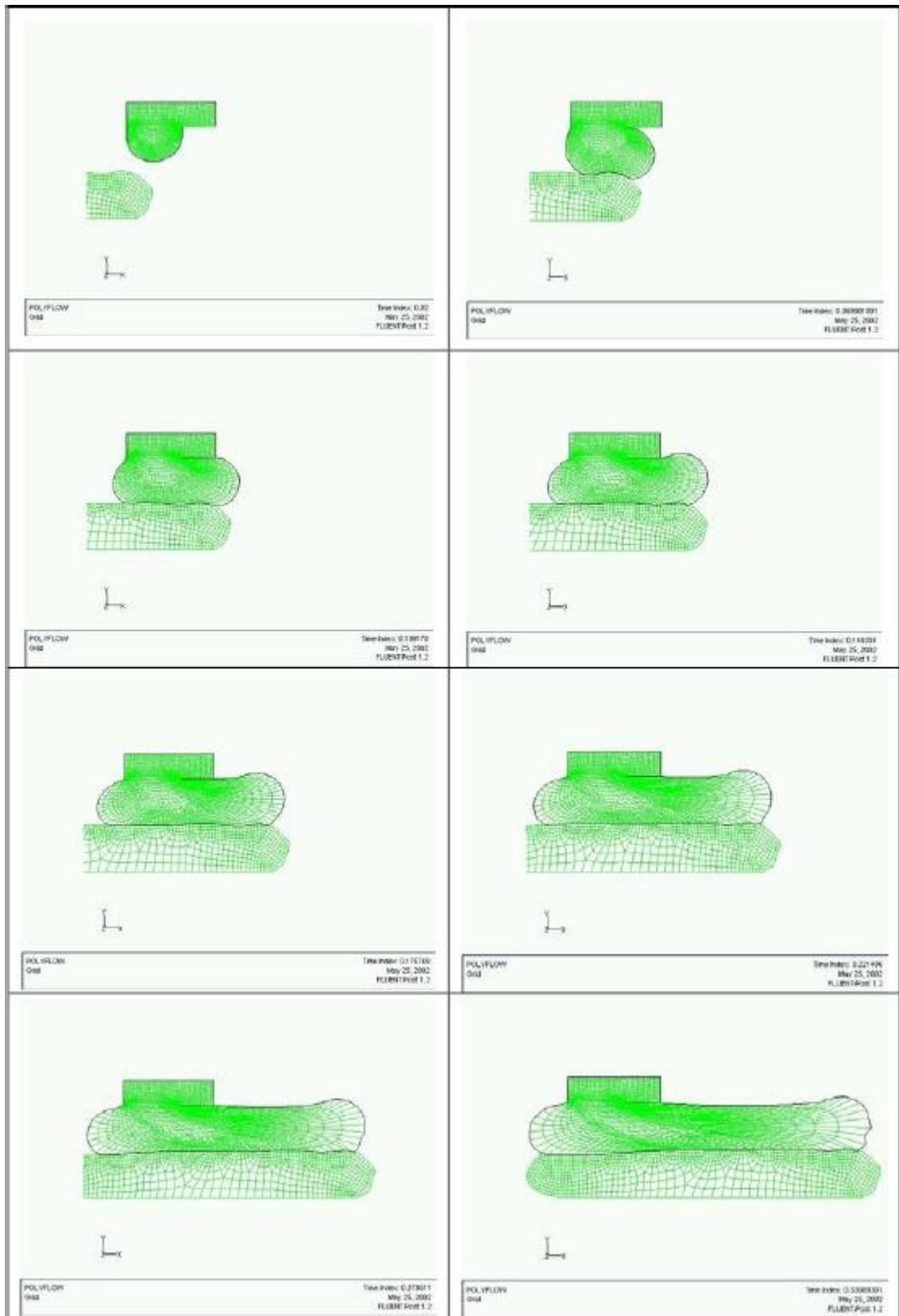


Figura 3.23: Evolución de la forma del polímero depositado en la segunda capa

Fuente: Anna Bellini: Fused Deposition of Ceramics

Como se observa es necesario implementar un sistema de calentamiento resistivo en la base para mejorar el acabado del modelo final. El calentador puede afectar a los elementos plásticos que se ubiquen debajo. Por esto es necesario mantener aislada la mesa hacia abajo y permitir la conducción hacia arriba.



Figura 3.2410: Vista lateral del sistema mesa de deposición

Fuente: El autor

Se calcula el calor necesario para llevar la base de deposición hasta una temperatura de 120 °C de acuerdo al rango de mesas comerciales¹⁷. El objetivo de diseño es determinar la resistencia que se necesita implementar para calentar la base. Para una mesa de aluminio se tiene que la masa se puede calcular a partir de su densidad y volumen tomando en cuenta sus medidas propuestas de 150 x 150 x 2 milímetros:

$$\rho_{al} = 2.71 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

$$v_{al} = 150 * 150 * 2 = 45000 [mm^3]$$

$$m_{al} = 2.71 \left[\frac{g}{cm^3} * \frac{1cm^3}{1000mm^3} \right] * 45000 [mm^3] = 121.95 [g] = 0.12 [Kg]$$

Entonces tenemos que el calor que necesitamos para calentar el aluminio es:

$$Q_{AL} = 1.256 \left[\frac{J}{g * ^\circ C} \right] * 121.95 [g] * (120^\circ C - 15^\circ C) = 16082.766 [J] = 16.083 [KJ]$$

¹⁷ PCB heated bed [Documento WWW], URL <http://www.cubic-print.com/PCB-heated-bed>

Donde $1.256 \left[\frac{J}{g \cdot ^\circ C} \right]$ es el calor específico del aluminio 6061¹⁸. El modelo de resistencias térmicas se muestra a continuación:



Figura 3.25: Esquema de resistencias térmicas del calentamiento del sólido en fabricación

Fuente: El autor

El cual es un sistema análogo a un circuito de resistencias en serie, donde:

R_{T1B} = Resistencia térmica por conducción de la caja de transferencia donde se aloja el calentador resistivo en forma de serpentín, $\left[\frac{^\circ C}{W} \right]$.

R_{T2B} = Resistencia térmica por conducción de la base de deposición, $\left[\frac{^\circ C}{W} \right]$.

R_{T3B} = Resistencia térmica por convección del aire, $\left[\frac{^\circ C}{W} \right]$.

Además:

T_e = Temperatura promedio del aire ($15^\circ C = 59^\circ F$)

T_s = Temperatura promedio del polímero calentado ($120^\circ C = 248^\circ F$)

- **Resistencia térmica por conducción de la base de deposición**

Se selecciona como material de la caja de transferencia fibra de vidrio laminada usada en la industria electrónica para la fabricación de circuitos debido a sus características térmicas, disponibilidad y costo. La fibra propuesta tiene un área de $22500 [mm^2]$ y un espesor de 2 milímetros, entonces la resistencia térmica se calcula con:

¹⁸ Engineers EDGE, http://www.engineersedge.com/properties_of_metals.htm

$$R_{T1B} = \left[\frac{L}{k_t A} \right] \quad (\text{Ec. 3.46})$$

La conductividad térmica de la fibra de vidrio laminada¹⁹ es $0.288 \left[\frac{W}{m^{\circ}\text{C}} \right]$, entonces se tiene:

$$R_{T1B} = \left[\frac{2 \left[mm \right]}{0.288 \frac{W}{m^{\circ}\text{C}} * 22500 \left[mm^3 \right]} \right] = 0.308 \left[\frac{{}^{\circ}\text{C}}{W} \right]$$

- **Resistencia térmica por conducción de la base de deposición**

Se selecciona como material de la base de deposición aluminio 6061 de $15 \left[\text{cm}^2 \right]$ y 2 cm de espesor, debido a que la pieza a imprimir es de máximo 10 centímetros cúbicos, la conductividad térmica del aluminio es $167 \left[\frac{W}{m^{\circ}\text{C}} \right]$, entonces se tiene:

$$R_{T2B} = \left[\frac{2 \left[mm \right]}{22500 \left[mm^3 \right] * \left[167 \frac{W}{m^{\circ}\text{C}} \right]} \right] = 0.00053 \left[\frac{{}^{\circ}\text{C}}{W} \right]$$

- **Resistencia térmica por convección del aire**

La resistencia térmica por convección del aire se calcula con:

$$R_{T3B} = \frac{1}{h_b * A_b} \quad (\text{Ec. 3.47})$$

El coeficiente de convección libre obtenemos mediante la relación de Mc. Adams para placas horizontales hacia arriba [45]:

$$h_b = 0.2 * \Delta T^{0.25} \quad (\text{Ec. 3.48})$$

$$h_b = 0.2 * (248 - 59)^{0.25} = 0.74 \left[\frac{Btu}{h * ft^2 * {}^{\circ}\text{F}} \right] = 4.21 \left[\frac{W}{m^2 {}^{\circ}\text{C}} \right]$$

El área en contacto de la superficie en contacto con el aire es $22500 \left[mm^2 \right]$, por lo tanto, la resistencia R_{T3B} se calcula así:

¹⁹ MatWeb,
<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=8337b2d050d44da1b8a9a5e61b0d5f85>

$$R_{T3B} = \frac{1}{4.21 \left[\frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}} \right] * 0.0225[m^2]} = 10.55 \left[\frac{\text{ }^\circ\text{C}}{W} \right]$$

De modo que la resistencia térmica total es la siguiente:

$$RTB = 0.308 \left[\frac{\text{ }^\circ\text{C}}{W} \right] + 0.00053 \left[\frac{\text{ }^\circ\text{C}}{W} \right] + 10.55 \left[\frac{\text{ }^\circ\text{C}}{W} \right] = 10.86 \left[\frac{\text{ }^\circ\text{C}}{W} \right]$$

El flujo calor perdido es:

$$Q_{PB} = \frac{(120 - 15) \text{ } ^\circ\text{C}}{10.86 \left[\frac{\text{ }^\circ\text{C}}{W} \right]} = 9.6[W] = 9.6 \left[\frac{J}{s} \right]$$

En este caso es necesario encontrar un tiempo corto que el usuario deberá esperar hasta que la mesa de aluminio llegue a la temperatura deseada para empezar imprimir. Para un tiempo de 3.2 minutos tenemos:

$$Q_{PB} = 9.6 \left[\frac{J}{s} \right] * 192[s] = 1855.75 [J]$$

El calor total se calcula:

$$Q_{TB} = Q_{AL} + Q_{PB} \quad (\text{Ec. 3.49})$$

$$Q_{TB} = 16082.766 [J] + 1855.75 [J] = 17938.5[J]$$

La potencia eléctrica necesaria es:

$$P_{eB} = \frac{Q_{TB}}{tB} \quad (\text{Ec. 3.50})$$

Donde tB es el tiempo de calentamiento de la base, entonces:

$$P_e = \frac{17938.5[J]}{192[s]} = 93.43[W]$$

La resistencia eléctrica necesaria se determina por:

$$R = \frac{(12[V])^2}{93.43[W]} = 1.54 [\Omega]$$

Esta resistencia se puede obtener fácilmente con alambre de nicromo de 0.4 Ω por metro. Al colocar 4 metros en serpentín se obtiene 1.6 ohmios.

La corriente que debe proveer la fuente a la carga resistiva tiene que ser:

$$I = \frac{12[V]}{1.627[\Omega]} = 7.785[A]$$

Se realiza el mismo análisis electrónico que en el calentador del fundidor. Se seleccionó un transistor de tecnología mosfet para encender y apagar el calentador continuamente. Los parámetros fundamentales para seleccionar el mosfet son los siguientes:

Siglas	Descripción	Valor	Medida
V_{DSS}	Tensión de Ruptura	>12	V
I_D	Corriente Máxima	>7.8	A
$R_{DS(ON)}$ a 5v	Resistencia de conducción	Baja	Mili-ohmios
$V_{GS(TH)}$	Tensión Umbral Activación	<5	V

Tabla 3.8: Requisitos de diseño para selección del mosfet de la base

Fuente: El autor

El mosfet seleccionado en base a los parámetros de diseño es el IRFZ44N. La potencia que disipa a una frecuencia de 20 [Hz] propuesta para no sobrecalentar el dispositivo y con una relación de trabajo de 1 es la siguiente:

$$P_{DM} = (7.78[A])^2 * 17.5[m\Omega] * 1 + 0.5 * 12[V] * 7.78[A] * (60 + 45)[ns] * 20[Hz]$$

$$P_{DM} = 1.06[W] + 0.000098[W] = 1.06 [W]$$

Para saber si se necesita implementar dissipador térmico en el elemento semiconductor, para una temperatura ambiente de 30°C seleccionada debido a las mismas consideraciones del calentador del extrusor, aplicando la ley de ohm térmica se tiene:

$$T_{jest} = T_a + (P_{DM} * R_{th(j-a)}) = 30^\circ C + \left(1.06 [W] * 62 \left[\frac{^\circ C}{W} \right] \right) = 95.7 [^\circ C]$$

La temperatura de juntura máxima del elemento es 175 °C, por lo cual no se necesita usar dissipador térmico. El diseño del circuito calentador de la base es igual al circuito calentador del extrusor.

El sensor de temperatura y acondicionamiento se lo implementa al igual que el sensor del mecanismo extrusor.

3.2.3.6 Enfriador

Considerando el hecho de que el proceso de solidificado del polímero recién depositado aumenta la calidad de su acabado y a que una vez terminado de imprimir el modelo 3D se necesita enfriarlo para poder removerlo, se procede a implementar un sistema que enfría mínimamente las capas de polímero depositado para controlar este proceso y al final de cada proceso de impresión.

La corriente del ventilador propuesto es de 0.16 [A] y el voltaje nominal es de 12 [VDC], con estos datos se procede a diseñar el circuito electrónico. Se selecciona un transistor configurado como emisor común cuya corriente de colector I_C , soporte los 160 [mA]. De la hoja de datos del transistor TIP 31C, se tiene que I_C es de 3 [A] con lo que se satisface el requerimiento. Para obtener la corriente de base se tiene:

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad (\text{Ec. 3.51})$$

Donde:

I_C = Corriente de colector = 160 [mA].

I_B = Corriente de base.

β = Ganancia de corriente continua mínima = 25.

Entonces:

$$I_B = \frac{160[\text{mA}]}{25} = 6.4[\text{mA}]$$

Se calcula la resistencia para la base:

$$R_B = \frac{V}{I_B} = \frac{5[V]}{6.4[A]} = 470 [\Omega]$$

Se escoge una resistencia comercial de 470 [Ω] con la cual se asegura que el diseño trabaje en corte y saturación. Se utiliza un diodo en estado de corte para proteger el circuito contra sobretensiones debidas a la fuerza electromotriz de la bobina del motor del ventilador producto de la conmutación. Para seleccionar el

diodo se requiere que el voltaje de ruptura de continua V_R sea mayor que 12 [V] y que la corriente en sentido directo I_F sea mayor a 160 [mA]. Se selecciona el diodo 1N4001 de acuerdo a las características que se señalan en el anexo 5. El diseño del circuito se muestra a continuación:

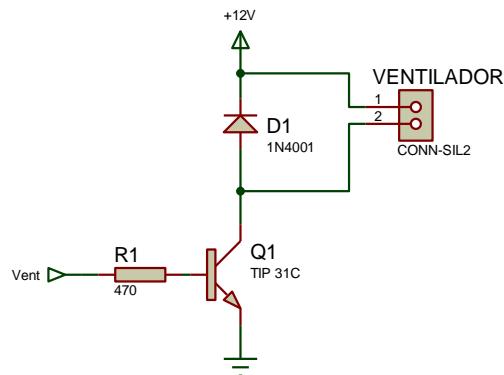


Figura 3.26: Diseño del circuito de enfriamiento

Fuente: El autor

La señal Vent corresponde a la salida proveniente del microcontrolador que maneja el encendido y apagado del circuito de ventilación.

3.3 DISEÑO DE LOS MECANISMOS DE MOVIMIENTO EN COORDENADAS X, Y

El sistema de movimiento en (X, Y), es el encargado de mover el extrusor de filamento a lo largo del eje “X” y la mesa de deposición de material con su plataforma a lo largo del eje “Y” capa por capa. Los componentes principales a ser diseñados o seleccionados son los siguientes:

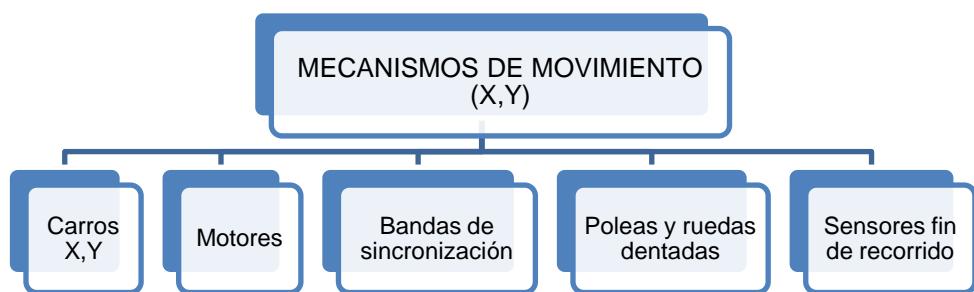


Figura 3.27: Mecanismos ejes X, Y

Fuente: El autor

3.3.1 DISEÑO DEL CARRO DEL EJE Y

Consta de la plataforma deslizante que tiene como función principal sostener la base de deposición de material fundido que se mueve linealmente a lo largo del eje "Y" mediante bujes.

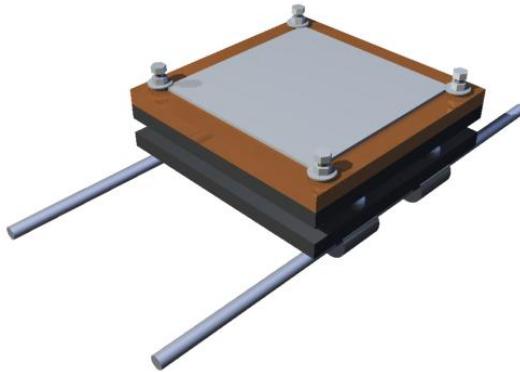


Figura 3.28: Carro eje Y

Fuente: El autor

La plataforma de deslizamiento se asienta en dos guías mediante bujes como se muestra en la figura 3.28. La relación de soporte se define como la longitud del deslizador sobre el diámetro efectivo del buje.

$$BR = \frac{Le}{De} \quad (\text{Ec. 3.52})$$

Donde:

BR = Relación de soporte, [Adimensional].

Le = Longitud del deslizador, [m].

De = Diámetro efectivo del buje, [m].

Para un funcionamiento correcto esta relación deberá ser mayor a 1.5^{20} y nunca menor a 1. Mientras mayor es, mejor es. La longitud efectiva Le se define como la distancia sobre la cual el deslizador hace contacto con la guía estacionaria. No es necesario que el contacto se continúe a lo largo de esa distancia. Es decir, dos bujes cortos espaciados son efectivos siempre que su separación total sea mayor

²⁰ Robert Norton, An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines, p.58.

que sus longitudes y sean cinemáticamente equivalentes a un tubo largo. El diámetro efectivo D_e es la distancia más larga entre las guías fijas, en cualquier plano perpendicular al movimiento de deslizamiento. Para una longitud de guía de 32 [cm] y una distancia de 14 [cm] entre los extremos de las guías se tiene:

$$BR = \frac{28[cm]}{14[cm]} = 2.29$$

Con lo cual se verifica una relación correcta. La condición para determinar el diámetro interno de los bujes D_b y por lo tanto de las guías, se expresar así²¹:

$$\frac{L_e}{D_b} > 6$$

Entonces se reemplaza y analiza la relación:

$$\frac{28[cm]}{0.8[cm]} = 35 > 6$$

Lo cual garantiza un correcto dimensionamiento.

La carga que soportan las guías corresponde al peso total de la plataforma, del modelo fabricado y el peso de la base de deposición. La madera aislante se puede despreciar en este caso. Las dimensiones de los elementos más significativos son:

Elemento	Longitud [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]
Plataforma	150	150	10
Base	150	150	6.35
Modelo fabricado	100	100	100

Tabla 3.9: Dimensiones de elementos más significativos en el diseño del carro Y

Fuente: *El auto*

Para un tablero MDF de 10 [mm] de espesor, su densidad²² es:

$$\rho_{MDF} = 780 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

²¹ McCauley C., Machinery's Handbook, p.2155.

²² http://es.wikipedia.org/wiki/Tablero_de_fibra_de_densidad_media

El volumen V_{MDF} y la masa m_{MDF} del MDF se calculan así:

$$V_{MDF} = 150\text{mm} * 150\text{mm} * 10\text{mm} = 225000[\text{mm}^3]$$

$$m_{MDF} = \rho_{MDF} * V_{MDF} = 0.175[\text{Kg}]$$

Con lo cual se tiene que su peso W_{MDF} es:

$$W_{MDF} = 1.72[\text{N}]$$

Para la base de deposición de aluminio se tiene:

$$\rho_{Al} = 2700 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$V_{Al} = 150\text{mm} * 150\text{mm} * 2\text{ mm} = 45000[\text{mm}^3]$$

$$m_{Ac} = 0.12[\text{Kg}]$$

$$W_{Ac} = 1.19[\text{N}]$$

Para el cálculo de los modelos 3D se tiene que la densidad del PLA es mayor que la del ABS, por lo cual el peso del sólido en ABS es menor y no se calcula. Del anexo 6 se tiene la densidad del PLA es:

$$\rho_{PLA} = 1240 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$V_{PLA} = 1000000[\text{mm}^3]$$

$$m_{PLA} = 1.24[\text{Kg}]$$

$$W_{PLA} = 12.16[\text{N}]$$

Elemento	Peso unitario [N]	No. de elementos	Peso Total [N]
Plataforma MDF	1.72	1	1.72
Base Aluminio	1.19	1	1.19
Modelo fabricado	12.16	1	12.16
TOTAL			15.07

Tabla 3.10: Peso aproximado de los elementos que soportan las guías del carro Y

Fuente: El autor

Para cálculos posteriores sobre las guías es necesario establecer el peso de los elementos principales que soportan los cuales se detalla en la tabla 3.10.

Se escoge un peso total de 18 [N] sumando la tornillería, el nivelador y el calentador resistivo. Debido a la geometría del carro Y, el peso se divide para 4 bujes (4.5 [N] por buje). Para las guías del carro Y, el factor predominante de diseño es la deflexión, por lo cual se debe diseñar para llegar a tener una precisión de máquina moderada en vez de diseñar para evitar fallas debidas a flexión. Mott²³ señala que para una viga sometida a flexión, la deflexión debe estar en el rango de 0.00001 a 0.0005 pulg/ pulg de longitud de la viga, entonces la deflexión y_{gymax} debe ser menor a:

$$y_d = 0.0005[\text{pulg}] * 11.023[\text{pulg}] = 5.5 * 10^{-3}[\text{pulg}]$$

$$y_d = 5.5 * 10^{-3}[\text{pulg}] * \frac{25.4 [\text{mm}]}{1 [\text{pulg}]} = 0.14 [\text{mm}]$$

Donde y_d es la deflexión máxima recomendada por Mott para máquinas de precisión moderada. Ya que 280 [mm] es 11.023 [pulg]. La deflexión máxima para guías de 280 [mm] se obtiene de la ecuación siguiente:

$$y_{gymax} = -\frac{F_y * a_y^3}{24 * E * I_g y} * (3L_y^2 - 4a_y^2)$$

(Ec. 3.53)

Donde:

y_{gymax} = Deflexión de la guía Y, [mm]

F_y = Fuerza actuante, 4.5[N]

a_y = Longitud de la fuerza actuante al extremo de la guía, 105[mm]

L_y =Longitud de la guía, 280 [mm]

E = Módulo de Young del acero 1040, $2.1 * 10^{11} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$

²³ Mott, Diseño de elementos de máquinas, p.777

El momento de inercia I_{gy} de la guía para un diámetro propuesto D_{gy} de 8 [mm] se calcula así:

$$I_{gy} = \frac{\pi * D_{gy}}{64}$$

$$I_{gy} = \frac{\pi * (8[mm])^4}{64} = 201.06[mm]^4$$

Entonces:

$$y_{gymax} = -\frac{4.5[N] * (105[mm])^3 * 1000000}{24 * 2.1 * 10^{11} \left[\frac{N}{m^2}\right] * (201.06[mm]^4)} * (3 * (280[mm])^2 - 4 * (105[mm])^2) = -0.089[mm]$$

Se comprueba en el software MDSolids la deflexión máxima que se produce en el centro de la viga (140 [mm]):

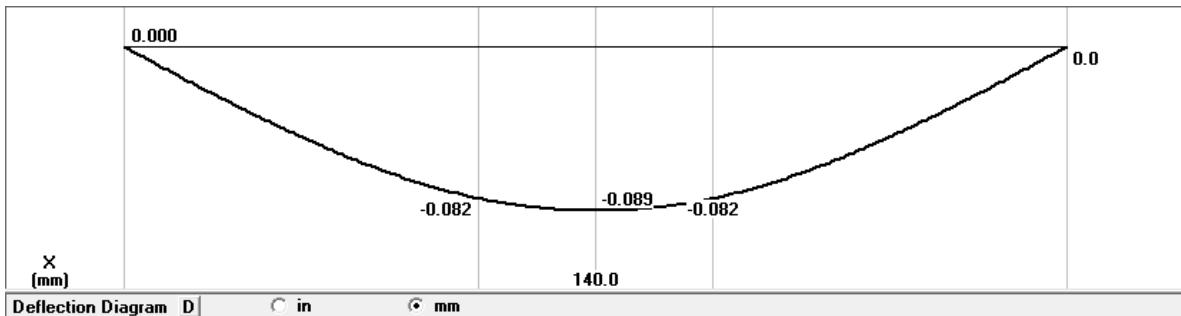


Figura 3.29: Diagrama de deflexión de guías del eje Y

Fuente: El autor

Con lo cual se tiene una deflexión en el rango de máquinas de precisión moderada, ya que:

$$y_{gymax} < y_d$$

$$0.089[mm] < 0.14[mm]$$

Con lo cual el diámetro de 8 milímetros es satisfactorio. El análisis de falla de la viga no se realiza porque la carga que soporta el elemento es baja y el elemento no se ve comprometido a fallar de modo que el factor preponderante en el diseño es la deflexión.

3.3.2 DISEÑO DE CARRO DEL EJE X:

El carro del eje X tiene como función principal soportar el mecanismo extrusor que se mueve a lo largo del eje “X”. La geometría del elemento es similar a la del carro Y, y se muestra en la figura 3.30.



Figura 3.30: Carro eje X

Fuente: El autor

Se calcula de igual manera y se obtiene la relación de soporte que es:

$$BR = \frac{Le}{De} = \frac{35.5 \text{ cm}}{4.5 \text{ cm}} = 7.8$$

La condición para determinar el diámetro de las guías se puede expresar así:

$$\frac{Le}{D_b} = \frac{35.5[\text{cm}]}{0.8[\text{cm}]} = 44.375$$

La carga que soporta el elemento corresponde a la masa total del extrusor con el motor a pasos. Mediante Inventor 2012 se tiene la masa de la base del extrusor:

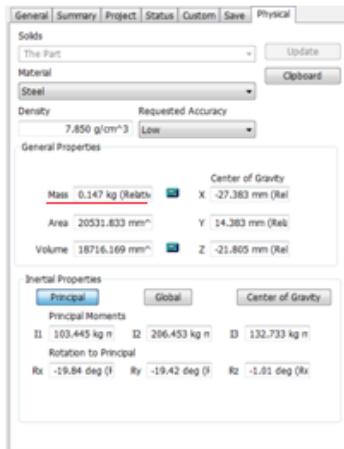


Figura 3.31: Masa de la base del extrusor

Fuente: Inventor 2012

La masa del motor a pasos de acuerdo al anexo 7 es de 0.34 [Kg], de modo que el peso total que soportan las guías es:

Elemento	Peso unitario [N]	No. de elementos	Peso Total [N]
Motor	3.3354	1	3.3354
Base extrusor	1.442	1	1.442
TOTAL			4.77

Tabla 3.11: Peso aproximado de los elementos que soportan las guías del carro X

Fuente: El autor

Con lo cual se elige un peso de 5.5 [N] tomando en cuenta el peso del fundidor, la reductora y el mecanismo de las ruedas motrices. Debido a la geometría del carro Y, el peso se divide para 4 bujes (1.375 [N] por buje). Se realiza el diseño para determinar un diámetro óptimo de guía para que la deflexión máxima esté dentro del rango de máquinas de precisión moderada. Se usan las mismas guías que en el eje Y por lo cual el momento de inercia es el mismo. La deflexión máxima para guías de 8 [mm] es la siguiente:

$$y_{gxmax} = -\frac{1.375[N] * (132.5[mm])^3 * 1000000}{24 * 2.1 * 10^{11} \left[\frac{N}{m^2}\right] * (201.06[mm]^4)} * (3 * (355[mm])^2 - 4 * (132.5[mm])^2) = -0.05[mm]$$

Se comprueba en el software MDSolids la deflexión máxima que se produce en el centro de la viga (177.5 [mm]):

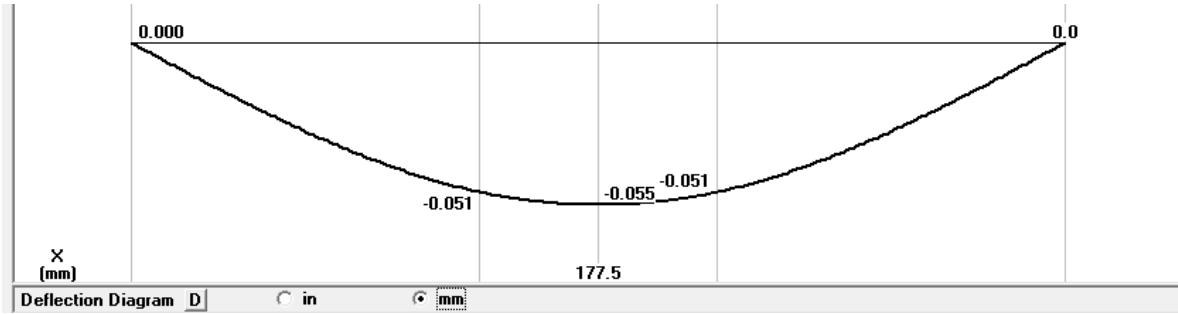


Figura 3.32: Diagrama de deflexión guías del eje X

Fuente: El autor

Con lo cual se tiene una deflexión aceptable para el rango de máquinas de precisión moderada, ya que se cumple:

$$y_{gxmax} < y_d$$

$$0.05 [mm] < 0.14 [mm]$$

El análisis de falla de la viga no se realiza porque la carga que soporta el elemento es baja y el elemento no se ve comprometido a fallar. El diámetro de 8 [mm] para el eje X es satisfactorio.

3.3.3 DISEÑO DEL MECANISMO DE BANDAS DE SINCRONIZACIÓN

Para realizar el desplazamiento lineal en los ejes X y Y se seleccionó implementar el sistema de bandas de sincronización, las fuerzas que intervienen se describen en el sistema siguiente:

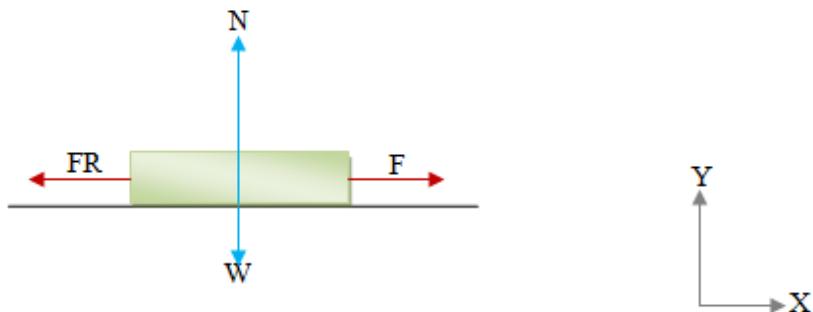


Figura 3.33: Diagrama de cuerpo libre mecanismos X y Y

Fuente: El autor

Ambas mesas tanto de extrusión como deposición (plataforma) están sostenidas en dos guías (ejes) que reposan sobre bujes fabricados. Para seleccionar el material de los bujes se procede a analizar la tabla 3.12.

Materiales en contacto	μ_e	μ_d
Acero - Teflón	0.04	0.04
Acero - Acero	0.15	0.09
Acero - Latón	0.5	0.4

Tabla 3.12: Coeficientes de rozamiento de algunos materiales

Fuente: <http://es.wikipedia.org/wiki/Fricci%C3%B3n>

La selección de los materiales basado en su coeficiente de fricción estático y dinámico será para guías en acero que se asienten en bujes de teflón. Aplicando la segunda ley de Newton al sistema se tiene:

$$\Sigma Fx = m * a \quad (\text{Ec. 3.54})$$

$$F = u * N + (m * a)$$

Debido a que el coeficiente para romper la inercia (estático) y para deslizarlo (dinámico) es el mismo se tiene:

$$F = 0.4 * N + W$$

Para movilizar el carro X se tiene:

$$F = 0.4 * N + (m_x * a) = 0.4 * N + 5.5[N]$$

Mientras que para movilizar el carro Y se tiene:

$$F = 0.4 * N + (m_y * a) = 0.4 * N + 18[N]$$

Del equilibrio de fuerzas en el eje X se tiene:

$$\Sigma Fy = m * a$$

$$N_x = 5.5[N]$$

Reemplazando N_x por N , se tiene:

$$F_x = 0.4 * 5.5[N] + 5.5[N] = 7.7[N]$$

Para el carro Y se tiene:

$$N_y = 18[N]$$

Reemplazando N_y por N , se tiene:

$$F_y = 0.4 * 18[N] + 18[N] = 25.2 [N]$$

Se procede a calcular el par motor requerido donde se tomaron las siguientes consideraciones:

- Inercia mínima de las poleas
- No existe deslizamiento entre la banda y la rueda dentada.
- Peso de la banda despreciable
- El motor a pasos no requiere aceleración para alcanzar su velocidad nominal, inercia constante.

Para el caso del sistema con banda donde r_p es el diámetro de las poleas (figura 3.34) y F representa la carga que se necesita mover se tiene:

$$T_x = F_x * r_p$$

$$T_x = 7.7[N] * 0.010[m] = 0.077[Nm]$$

$$T_y = F_y * r_p$$

$$T_y = 25.2 [N] * 0.010[m] = 0.252[Nm]$$

Con lo cual se garantiza el funcionamiento óptimo del sistema con el motor seleccionado ya que el torque del motor que se usa en el extrusor se puede usar en los sistemas X y Y al tener un torque de 0.37 [Nm]. Entonces la velocidad máxima del motor se toma como referencia a partir el eje Y, ya que requiere más potencia y por esto la velocidad disminuye además que se deberán sincronizar las velocidades de X con Y. Entonces aplicando un voltaje de 12 [VDC] a las bobinas del motor la potencia máxima es 18 vatios como se calculó en el extrusor y la velocidad máxima es de 713 [mm/s] ya que:

$$w = \frac{713 \left[\frac{mm}{s} \right]}{10 [mm]} = 71.3 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

$$P_{me} = 0.252 [Nm] * 71.3 \left[\frac{rad}{s} \right] = 17.97 [W]$$

La velocidad calculada es muy alta, por lo cual al momento de imprimir se debe tomar en cuenta la velocidad de impresión real para a partir de esta determinar las velocidades óptimas de operación. Sin embargo el sistema puede llegar a estas velocidades en los ejes X y Y, por lo cual se diseñará a partir de estos datos.

La potencia en HP se obtiene de la forma siguiente:

$$P_{mx} = P_{my} = 17.97 [W] * \frac{1}{736} \left[\frac{HP}{W} \right] = 0.024 [HP]$$

3.3.3.1 Poleas Dentadas:

Es necesario diseñar las poleas o ruedas dentadas del mecanismo que van acopladas a los motores a pasos de los ejes X y Y respectivamente. Para un paso diametral normalizado de paso fino igual a 20 y un diámetro tentativo de 2.5 cm se tiene una rueda de 17 dientes. Se construyen las poleas de duralón y se debe realizar un diseño tipo acanalado para guiar la banda. El diseño se muestra en la figura siguiente:



Figura 3.34: Poleas dentadas de mecanismos X y Y

Fuente: El autor

3.3.3.2 Poleas libres:

Las poleas libres actúan al otro extremo del recorrido de la banda de sincronización, su movimiento debe ser libre para garantizar el desplazamiento suave y sin mayor fricción. El diseño se muestra en la figura 3.35.



Figura 3.35: Poleas libres de mecanismos X y Y

Fuente: El autor

Las poleas poseen en su interior dos rodamientos alineados en torno a un eje para permitir una rotación eficiente. Su diseño se muestra en el despiece siguiente:

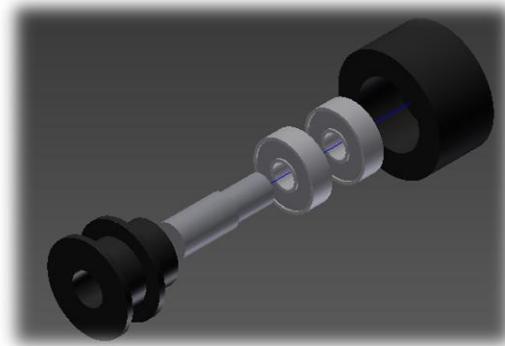


Figura 3.36: Despiece de poleas libres

Fuente: El autor

3.3.3.3 Bandas de sincronización:

La banda de sincronización seleccionada tiene las siguientes características:

Tipo:	Extra-ligero: 390XL037
Número de dientes:	200
Longitud Primitiva:	990 mm
Paso:	5 mm
Ángulo de flanco α:	25°

Ancho de la banda:	10 mm
Material:	Tela impregnada de caucho con alambre de acero

Tabla 3.13: Características de la banda de sincronización seleccionada

Fuente: Hoja de datos de la banda

No se pudo obtener más datos técnicos de la banda, sin embargo los rangos de potencia a los que operan las bandas son elevados con respecto a los usados en los sistemas X y Y por lo cual las bandas están sobredimensionadas.

3.3.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE DESPLAZAMIENTO X,Y

El sistema de control de desplazamiento en el plano (X, Y) es similar en ambos ejes de coordenadas en cuanto al mecanismo de desplazamiento a través de bandas de sincronización por lo que se analizan en conjunto.

3.3.4.1 Selección del motor

Con los datos obtenidos de torque y potencia, y en base a las alternativas seleccionadas para los mecanismos de movimiento en X y Y, se concluye que el motor usado para el extrusor es suficiente para manejar los desplazamientos óptimamente garantizando un factor de servicio alto tomando en cuenta las imprecisiones por fabricación de los elementos del mecanismo de bandas de sincronización.

3.3.4.2 Selección del controlador del motor

Para el control del motor se usa el mismo controlador que permite trabajar hasta un dieciseisavo de paso, el A4988 Stepper Motor Driver Carrier descrito anteriormente.

3.3.4.3 Diseño del circuito de control del actuador del extrusor

El sistema de control es similar al descrito en el control del motor de extrusión.

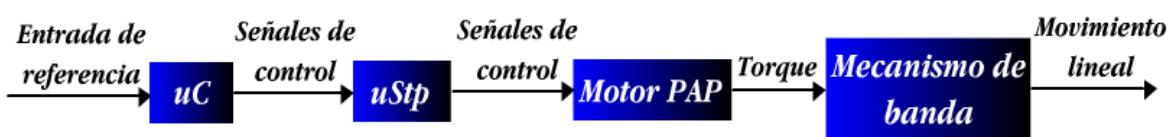


Figura 3.37: Sistema de control del mecanismo de banda de sincronización

Fuente: El autor

El diseño del circuito es el mismo que el diseñado para el control del motor de extrusión. La velocidad de desplazamiento lineal máxima escogida es de 150 [mm/s] (143.3 [rpm] para un radio de poleas de 10 [mm]) en base a datos reportados por usuarios que trabajan con máquinas de prototipado rápido RepRap. Las frecuencias en las que deberá operarse el motor de acuerdo al paso y micropasos se muestran a continuación:

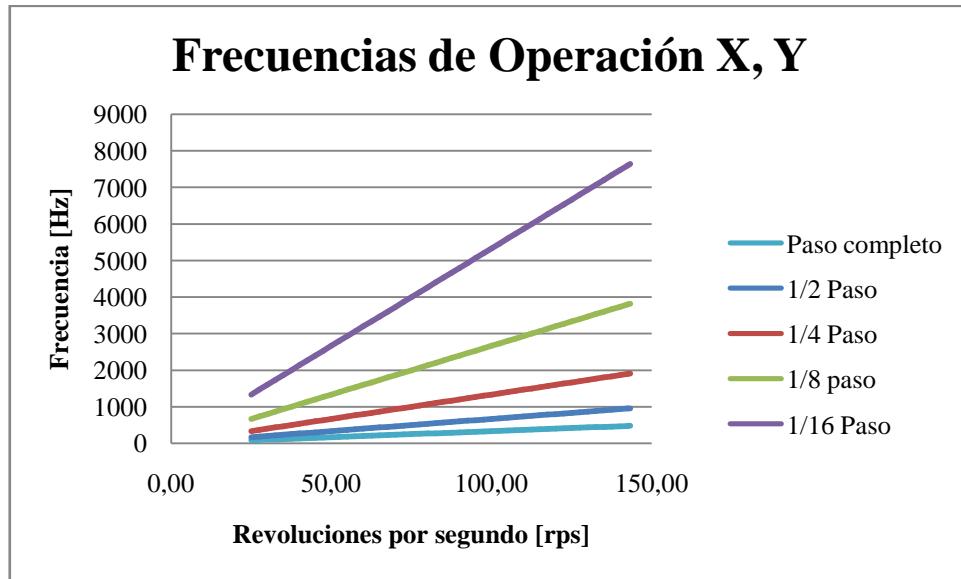


Figura 3.38: Frecuencias de operación para motores X, Y

Fuente: El autor

3.3.4.4 Sensores de posición

Por motivo de seguridad es necesario implementar sensores que limiten el recorrido de los mecanismos en X, Y y Z en sus extremos. Para esto se implementó el uso de 6 finales de carrera electromecánicos (2 por cada eje de coordenadas).

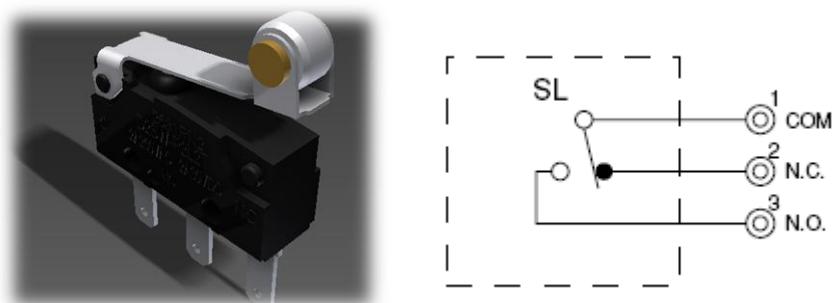


Figura 3.39: Final de carrera y conexión interna

Fuente: El autor

El diseño del circuito se realiza mediante control on/off, enviando pulsos al microcontrolador si el carro de cada eje llegará a su límite de recorrido, el diseño electrónico se muestra a continuación.

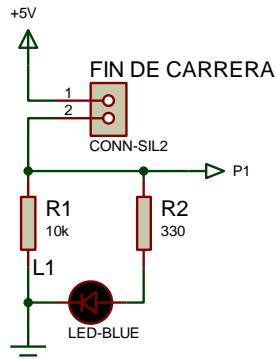


Figura 3.40: Diseño electrónico de final de carrera

Fuente: El autor

3.4 DISEÑO DEL MECANISMO DE MOVIMIENTO EN EL EJE Z

El sistema de movimiento en el eje Z, es el encargado de subir la mesa que lleva el extrusor desde abajo hacia arriba conforme se realiza la pieza 3D. Los componentes a ser diseñados o seleccionados son los siguientes:

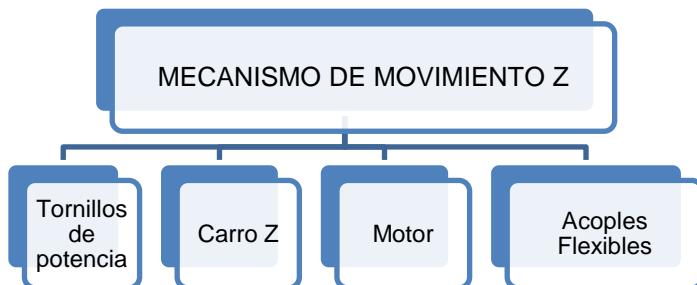


Figura 3.41: Componentes principales del mecanismo del eje Z

Fuente: El autor

3.4.1 CARROS DEL EJE Z:

Los carros del eje Z localizados a los extremos del mecanismo X, tienen como funciones principales soportar las guías horizontales del eje X, el sistema de banda de sincronización con las poleas del eje X y el motor del eje X, y el mecanismo extrusor de filamento. La geometría del elemento se muestra en la figura 3.42.

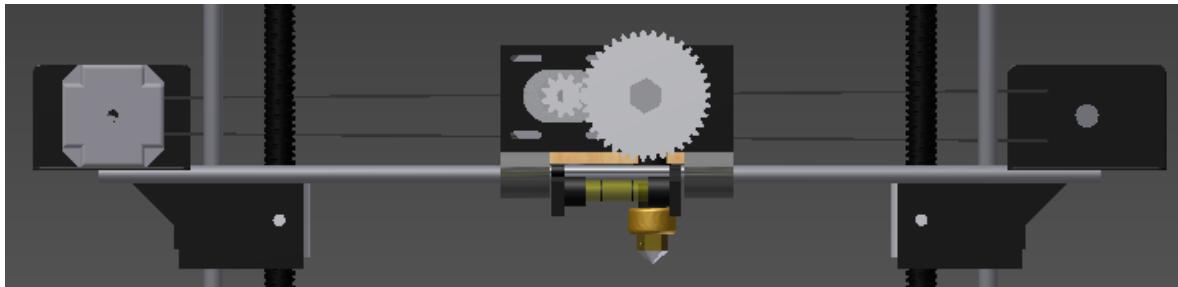


Figura 3.42: Carros del eje Z

Fuente: El autor

Mediante el programa Inventor 2012 se encuentra las masas de los elementos no calculados aún y se detallan en la tabla 3.14.

ELEMENTO	MASA	GRÁFICO
Base motor X	0.065 [Kg]	
Base polea X	0.066 [Kg]	
Guías X	0.151 [Kg]	
Escuadra de unión	0.038 [Kg]	
Soportes de sujeción de tuercas y bujes del mecanismo Z	0.031[Kg]	

Tabla 3.14: Masa de elementos que soporta el mecanismo Z

Fuente: Inventor 2012

Multiplicando las masas por la gravedad y sumando el peso del mecanismo extrusor calculado en el eje X con las guías guías y motor del carro X, se obtienen las cargas que debe movilizar el mecanismo Z:

Elemento	Peso unitario [N]	No. de elementos	Peso Total [N]
Extrusor	5.5	1	5.5
Guías X	1.48	2	2.96
Motor X	3.33	1	3.33
Base motor X	0.637	1	0.637
Base polea X	0.647	1	0.647
Escuadras	0.372	2	0.745
Sujetadores	0.3	2	0.6
TOTAL			14.42

Tabla 3.15: Peso aproximado que debe movilizar el mecanismo Z

Fuente: El autor

Sumando los pesos de la tornillería, se asume un peso total de 16 [N] por seguridad. Para subir y bajar el mecanismo X mediante los carros del eje Z se decide implementar tornillos de potencia (husillos) de acuerdo a la selección de alternativas del capítulo 2. Se selecciona tornillos de rosca cuadrada sacados de entenallas, ya que son elementos comerciales que funcionan bien y tienen un costo aceptable. La tuerca debe ser reemplazada por una que tenga menor juego y menor factor de rozamiento. La geometría del tornillo es la siguiente:

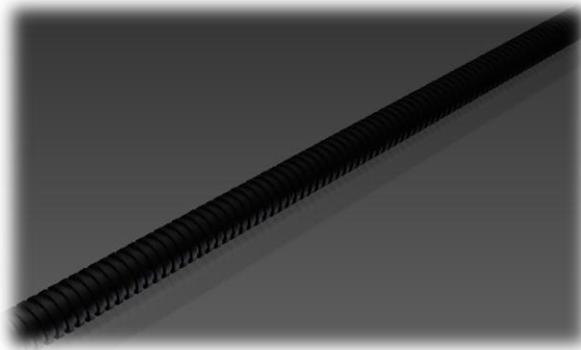


Figura 3.43: Tornillos de potencia del eje Z

Fuente: El autor

3.4.2 DISEÑO DEL MECANISMO TORNILLO-TUERCA

El husillo o tornillo de potencia sacado de la entenalla tiene las siguientes características:

Material	Acero
Color	Negro
Unidades	Sistema Internacional
Diámetro mayor	13 [mm]
Paso	3 [mm]
Rosca	Cuadrada
Entradas	1

Tabla 3.16: Características del tornillo de potencia seleccionado

Fuente: El autor

Para comprobar si su diseño es el óptimo para el mecanismo Z se procede a determinar el par requerido para subir y bajar la mesa de extrusión con el tornillo de potencia. Entonces para elevar la carga la ecuación es la siguiente:

$$\tau_s = \frac{F_{TZ}d_m}{2} * \left(\frac{l_{tu} + \pi f_{tu} d_m}{\pi d_m - f_{tu} l_{tu}} \right) \quad (\text{Ec. 3.55})$$

Donde:

τ_s = Torque para subir la carga, [Nm]

F_{TZ} = Fuerza total actuante sobre el área normal de la rosca, [N]

d_m = Diámetro medio del tornillo de potencia, [m]

f_{tu} = Rozamiento entre el tornillo y la tuerca, [Adimensional].

l_{tu} = Avance de la tuerca, [m]

Se usa dos tornillos de potencia de acuerdo al análisis de mecanismos hecho en el capítulo de selección de alternativas, uno a cada extremo. De este modo se asegura la estabilidad de la máquina y con lo cual la fuerza se divide para los dos tornillos. La carga total F_{TZ} que debe llevar el mecanismo Z corresponde al peso que soportan las guías X (F_Z), repartido en dos de la manera siguiente:

$$F_{TZ} = \frac{F_Z}{2}$$

$$F_{TZ} = \frac{16 \text{ [N]}}{2} = 8[N]$$

Para calcular el diámetro medio d_m se tiene:

$$d_m = d_{mz} - \frac{p_r}{2} \quad (\text{Ec. 3.56})$$

Donde:

d_{mz} = Diámetro mayor del tornillo de potencia, 13 [mm]

p_r Paso de la rosca, 3 [mm]

Entonces:

$$d_m = 13 \text{ [mm]} - \frac{3 \text{ [mm]}}{2} = 11.5 \text{ [mm]}$$

Para calcular el diámetro de raíz d_r se tiene:

$$d_r = d_{mz} - p_r \quad (\text{Ec. 3.57})$$

$$d_r = 13 \text{ [mm]} - 3 \text{ [mm]} = 10 \text{ [mm]}$$

El avance de la tuerca l_{tu} es igual a:

$$l_{tu} = n_{en} * p_r$$

(Ec. 3.58)

$$l_{tu} = 1 * 3 \text{ [mm]} = 3 \text{ [mm]}$$

Donde n_{en} es el número de entradas de la rosca. Con el fin de tener la menor cantidad de rozamiento en el sistema se ha seleccionado hacer la tuerca de teflón, en base a la tabla 3.17.

Material del Tornillo	Material de la Tuerca				Hierro Fundido	Teflón
Acero, seco		0.15-0.25	0.15-0.23	0.15-0.19	0.15-0.25	0.04
Acero, aceite para máquina		0.11-0.17	0.1-0.16	0.10-0.15	0.11-0.17	0.04

Tabla 3.17: Rozamientos de materiales para el mecanismo Tornillo – Tuerca

Fuente: Richard Budynas y Keith Nisbett, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, p.407

De la tabla se tiene que el coeficiente de fricción " f_{tu} " del acero con el teflón es 0.04. Debido al método manual de fabricación de la tuerca, se elige un coeficiente de fricción de 0.1. Entonces se reemplaza y se obtiene el torque de subida:

$$\tau_s = \frac{8 [N] * 11.5 [mm]}{2} * \left(\frac{3 [mm] + (\pi * 0.1 * 11.5 [mm])}{(\pi * 11.5 [mm]) - (0.1 * 3 [mm])} \right) = 8.49 [Nm]$$

El torque requerido para bajar la carga está determinado por la ecuación siguiente:

$$\tau_B = \frac{F_T d_m}{2} * \left(\frac{\pi f d_m - l}{\pi d_m + fl} \right) \quad (\text{Ec. 3.59})$$

Entonces remplazando los valores correspondientes se tiene:

$$\tau_B = \frac{18.25 [N] * 11.5 [mm]}{2} * \left(\frac{(\pi * 0.1 * 11.5 [mm]) - 3 [mm]}{(\pi * 11.5 [mm]) + (0.1 * 3 [mm])} \right) = 0.77 [Nm]$$

Con lo cual se verifica que el par motor que se tiene es el adecuado a pesar de estar sobredimensionado. Como el torque para bajar la carga es positivo, se dice que el tornillo es auto – bloqueante y que necesita de un par motor para mover la tuerca, lo cual es un diseño óptimo para el sistema ya que el mecanismo Z deberá permanecer detenido un tiempo alto mientras se realiza cada capa. El efecto auto-bloqueante eléctricamente se lo realiza mediante el enclavamiento de dos bobinas del motor a pasos, con lo cual se garantiza un alto torque de detención.

La eficiencia de la transmisión de una fuerza por un tornillo de potencia se puede expresar como el par torsional necesario para mover la carga sin fricción entre la correspondiente con fricción. La eficiencia para subir la carga por cada tornillo es:

$$e = \frac{F_T Z l_{tu}}{2 \pi * \tau_s} \quad (\text{Ec. 3.60})$$

$$e = \frac{8 [N] * 3 [mm]}{2 * \pi * 8.49 [Nm]} = 0.45 = 45 \%$$

La velocidad de giro del motor Z se determina en base a su avance $l_{tu} = 3 [\text{mm}]$ y radio de raíz $r_r = \frac{d_r}{2} = 5$. Para una velocidad $V_{mz} = 150 [\text{mm/s}]$ tomada como referencia de las velocidades máximas en los mecanismos X y Y, se tiene:

$$w = \frac{V_{mz} * 3}{r_r} = \frac{150 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] * 3}{5 [\text{mm}]} = 90 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

La potencia por motor para subir la carga con un torque de 0.00849 [Nm] es:

$$P_{mz} = T_z * w_z$$

$$P_{mz} = 0.00849 \text{ [Nm]} * 90 \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] = 0.76[\text{W}]$$

$$P_{mz} < 18[\text{W}]$$

Con lo cual se verifica un diseño óptimo de cada motor a pasos utilizado tanto en torque como en potencia, a pesar de tener una eficiencia baja de transmisión.

3.5 ESTRUCTURA

La estructura tiene como objetivo soportar las cargas y dotar de rigidez y amortiguamiento a la máquina. El objetivo de diseño es determinar el diámetro de los elementos que soportaran esta carga (varillas roscadas) con la carga aplicada a sus extremos como se muestra en la figura 3.44.

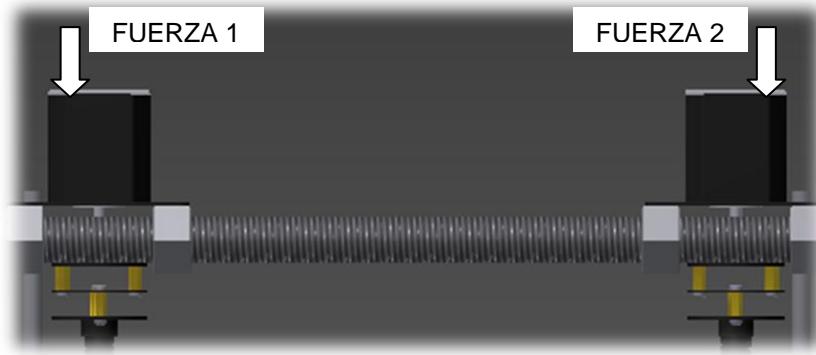


Figura 3.44: Fuerzas actuantes en la estructura

Fuente: El autor

El diámetro de las varillas roscadas usadas es 3/4 [pulg] (debido al sistema roscado seleccionado) está sobredimensionado, por lo cual no es necesario realizar los cálculos correspondientes para determinar el diámetro mínimo de varilla y la deflexión sería despreciable.

Cabe recalcar que las varillas se eligieron en base al tipo de diseño (desarmable, adquirible y económico) por lo cual, la estructura, al igual que toda la máquina, es atornillada y se usan elementos roscados para construir la máquina a partir de varillas y sujetadores. Los sujetadores roscados se muestran en la figura 3.45.



Figura 3.45: Sujetadores roscados usados

Fuente: El autor

El diseño de la estructura se muestra en la figura 3.46.

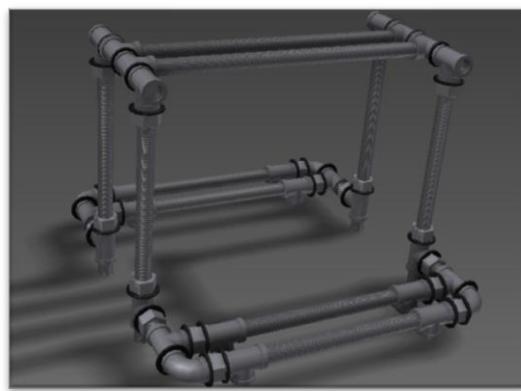


Figura 3.46: Estructura de la máquina

Fuente: El autor

3.6. DISEÑO DE CARCASA

El diseño de la carcasa debe brindar seguridad al usuario para evitar quemaduras, y tener las características siguientes:

- Rígida
- Ergonómica
- Visualmente atractiva
- Portable

Primero se procede a realizar el análisis ergonómico para sacar las conclusiones que nos permitan diseñar una estructura cómoda para el usuario.

3.6.1 ANÁLISIS ERGONÓMICO

Las máquinas que están relacionadas directamente con el hombre deben estar perfectamente adecuadas para el uso y manejo de las mismas, de una forma segura y práctica. Dentro del diseño de la impresora 3D propuesta, es importante

enfocarnos en el trabajo físico que realizaran los estudiantes y profesores para manejar la máquina en el laboratorio, la cual, se ejecutará a través del manejo de una pantalla táctil ubicada en la parte frontal de la impresora; es por esto que se debe tomar en cuenta ciertos aspectos ergonómicos sobre los campos de visión y movimientos del brazo. Primero dentro de las reglas básicas, se debe saber de los tres planos horizontales de trabajo que corresponden al nivel de las articulaciones de cadera, codo y hombro, ya que esto nos puede evitar en lo posible las fatigas más comunes.

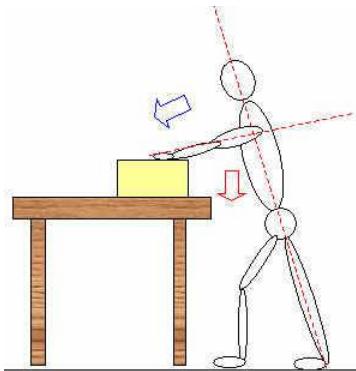


Figura 3.47: Planos de trabajo

Fuente: <http://www.artifexbalear.org/ergonomia.htm>

Para el uso de los brazos, se analiza el movimiento y comportamiento de la muñeca, el codo y el hombro; ya que la tensión y fatiga en los brazos y espalda, es dependiente de sus posiciones y grados adecuados. De esta manera se debe saber que, en posición sentado, cualquier teclado debe estar a una distancia suficiente del cuerpo como mínimo de 10 cm para poder apoyar las manos, también debe estar a la altura de los codos y el ángulo de inclinación debe ser el más bajo para evitar en lo posible doblar las muñecas.

Para el campo de visión adecuado se necesita principalmente la medida de precaución básica para cualquier pantalla, que trata sobre la ubicación mínima de 40 cm de distancia de los ojos, también es recomendable en posición sentado que las pantallas pequeñas, estén situadas a una altura más baja a la de los ojos y tenga un ángulo de inclinación de hasta 60 grados desde el piso, mientras que en posición parado, debe estar en un ángulo de mínimo 15 grados.

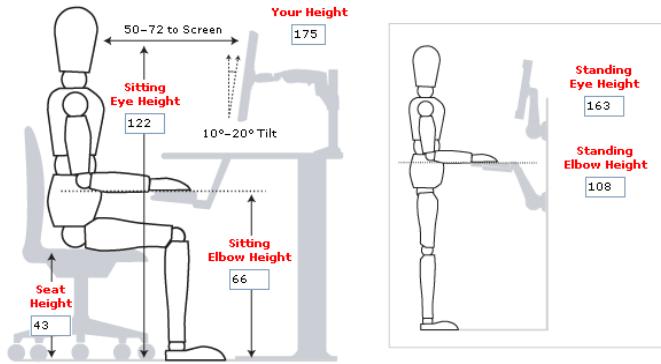


Figura 3.48: Campo de visión óptimo para pantallas

Fuente: <http://www.marketingprofesional.net/ergonomia-en-la-arquitectura-web/>

3.6.2 ANTROPOMETRIA DEL USUARIO

Para poder dar un buen uso del objeto en estudio, se debe estudiar las medidas del usuario, tanto en medidas corporales como en sus movimientos adecuados, solo así, se podrá llegar a un dato específico de la posición y movimientos que debe ejercer la maquina.

Los usuarios primordiales del proyecto serán los estudiantes de la Universidad Internacional del Ecuador, que van desde los 18 años en adelante y sus profesores.

3.6.3 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS ERGONÓMICO

Después de haber analizado los puntos primordiales de la ergonomía que se aplican al desarrollo de la máquina impresora 3D, se llegó a la conclusión que tanto la parte del campo visual como la de los movimientos del brazo tienen sus diferentes ángulos y posiciones para su mejor desenvolvimiento, así que se buscó ajustar estos datos con las medidas antropométricas de los usuarios y los muebles que se disponen en el laboratorio para el uso de la maquina (mesón y taburetes).

La pantalla táctil que es la parte de interacción de los usuarios será colocada a un ángulo de 60 grados desde el piso, ya que desde la posición de sentado es el mínimo para un buen alcance visual y desde la posición de parado está en una perfecta posición. En cuanto a su manejo con el movimiento de brazos, será colocada en un ángulo que permite una perfecta manipulación tanto en posición sentado como en parado, ya que permite que no se produzca un doblamiento de

muñecas ni una inclinación forzada del antebrazo. También cabe recalcar que la interacción de la maquina con los usuarios requiere de un tiempo corto, lo cual ayuda más a que no se den tensiones ni fatigas en la espalda, brazos y ojos.

Por último la maquina será colocada con un espacio de 15 cm mínimo del filo del mesón; y la pantalla táctil estará colocada desde el pie de la máquina, para que en la posición sentado las manos puedan apoyarse en el mesón, ya que acorde con las medidas de los muebles y de sus usuarios, es muy factible. Las medidas antropométricas fueron enfocadas a la media del grupo (altura 1,60), pero para las personas de más y menos medidas es casi imperceptible los milímetros para su adecuación y manejo de la pantalla.

3.6.4 CARCASA

Se seleccionó tol galvanizado de milímetro y medio para la base donde va la circuitería y el armazón en base al anexo 12, además se seleccionó acrílico para visualizar la pieza que se va a fabricar. El diseño de la base y cubierta de tol con acrílico se muestra en la figura 3.49.



Figura 3.49: Diseño de base y cubierta

Fuente: El autor

En la figura 3.50 se pueden observar dos pares de imanes en su extremo lateral derecho superior e inferior para cerrar la compuerta.



Figura 3.50: Uniones imantadas de la compuerta

Fuente: El autor

La compuerta se mueve a través de 2 bisagras atornilladas con tuercas en su parte posterior que se colocan al extremo lateral izquierdo. La figura 3.51 se muestra la conexión externa e interna de las bisagras:



Figura 3.51 Conexión interna y externa de las bisagras de la compuerta

Fuente: El autor

Además, en el acrílico se aloja un botón de cajón. El cual sirve para abrir y cerrar la compuerta imantada. En la figura 3.52 se muestra el botón y su conexión interna:



Figura 3.52: Botón para sujeción de compuerta

Fuente: El autor

El diseño del elemento que soporta tanto los elementos indicadores como la interfaz de usuario, se realiza en acrílico y se muestra en la figura 3.53.

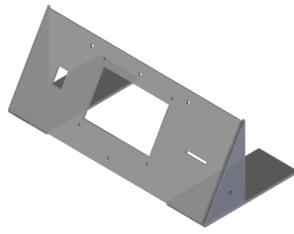


Figura 3.53: Estructura de acrílico para interfaz hombre máquina

Fuente: El autor

Esta estructura aloja la pantalla táctil, el sócalo de la memoria SD-MMC, el botón de encendido, el botón de cajón y tres indicadores luminosos. Así mismo se ha tomado en cuenta que por seguridad de la estructura y sus componentes alojados, esta debe poder guardarse una vez usada. De manera que se debe diseñar un sistema que permita guardar y sacar la estructura de acrílico. Se seleccionan guías lineales comerciales las cuales permiten movilizar el soporte de acrílico manualmente con la ayuda de un botón de cajón y que se colocan como se muestra en la figura 3.54.



Figura 3.54: Sistema móvil para soporte de elementos de la HMI

Fuente: El autor

Para poder mantener ambas posiciones se ubica un imán en la base de total donde va el sistema de guías para que haga contacto con los metales que se muestran a continuación:



Figura 3.55: Metales para sistema imantado (Vista superior y vista inferior de cada metal respectivamente)

Fuente: El autor

La colocación del imán y los metales se muestran en la figura 3.56.

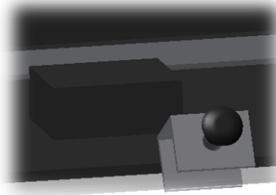


Figura 3.56: Imán y metales del soporte de acrílico

Fuente: El autor

Se diseña un cajón para almacenar los rollos de material en estado sólido y manuales técnicos y de operación de la I3D V1.0. El carrete donde se enrolla el filamento sólido en forma de alambre de polímero y las garruchas sirven para movilizar el filamento de material y alimentar el extrusor. En la figura 3.57 se muestran los elementos:

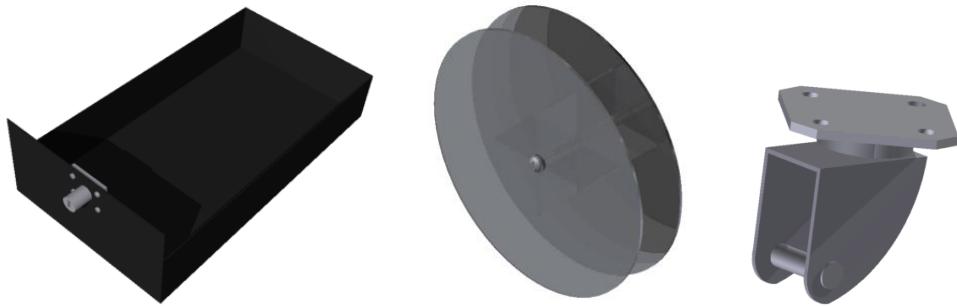


Figura 3.57: Cajón, carrete y garruchas

Fuente: El autor

3.7 DISEÑO DE INTERFACES

3.7.1 ELEMENTOS USADOS PARA LAS INTERFACES

Las interfaces diseñadas para la interacción con la máquina, se describen a continuación:

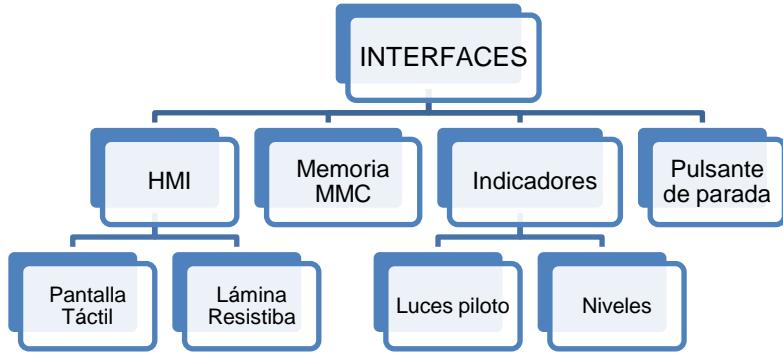


Figura 3.58: Interfaces de la I3D V1.0

Fuente: El autor

3.7.2 INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA

La interfaz hombre máquina propuesta consiste en una pantalla táctil para el uso en el laboratorio colocada en el soporte de acrílico diseñado. La pantalla táctil consta de dos elementos: una pantalla gráfica y una lámina transparente resistiva al contacto.

La pantalla gráfica JHD12864E tiene una resolución de 128*64 pixeles y posee un circuito integrado con dos microcontroladores que manejan una mitad de la pantalla cada uno. La descripción de los pines del circuito de la pantalla se muestra en la tabla 3.18.

PIN	PUERTO	DESCRIPCIÓN
1	VSS	Conexión a tierra.
2	VDD	Alimentación para lógica del circuito.
3	VO	Ajuste de contraste de la pantalla
4	RS	Registro de Instrucciones (0) / Registro de datos (1).
5	R/W	Selección modo escritura (0) y modo lectura (1).
6	E	Habilitar el circuito.
7	DB0	Pin de entrada / salida de datos.
8	DB1	Pin de entrada / salida de datos.
9	DB2	Pin de entrada / salida de datos.
10	DB3	Pin de entrada / salida de datos.
11	DB4	Pin de entrada / salida de datos.
12	DB5	Pin de entrada / salida de datos.
13	DB6	Pin de entrada / salida de datos.
14	DB7	Pin de entrada / salida de datos.

15	CS1	Selección del controlador 1.
16	CS2	Selección del controlador 2.
17	RST	Señal de reset.
18	VEE	Voltaje negativo para manejo de la pantalla -10V.
19	LED +	Fuente de voltaje para iluminación 5V.
20	LED -	Fuente de voltaje para iluminación 0V.

Tabla 3.18: Descripción de pines pantalla gráfica JHD12864E

Fuente: Hoja de datos JHD12864E

La lámina resistiva utilizada tiene 4 salidas, las cuales se deben enviar a las entradas analógicas del microcontrolador a través de resistencias de protección de 100 ohmios. El potenciómetro implementado permite variar el contraste de la pantalla. El diseño del circuito de interfaz con el microcontrolador es el siguiente:

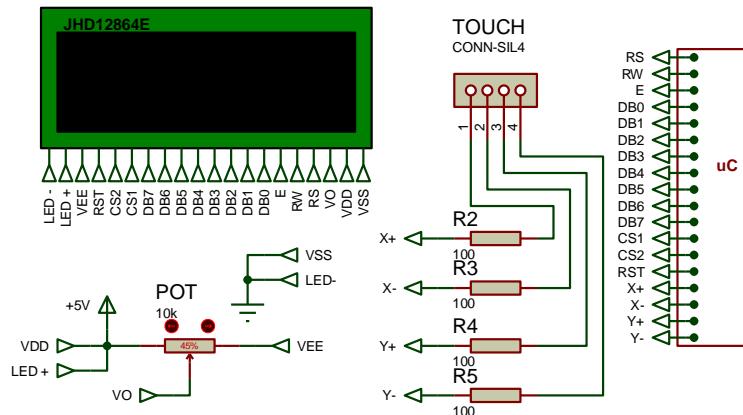


Figura 3.59: Diseño de la pantalla gráfica con lámina táctil

Fuente: El autor

3.7.3 MEMORIA SD-MMC

En la memoria SD-MMC se alojarán las instrucciones correspondientes a la pieza que se va a imprimir de acuerdo al código “g” generado en el programa Replicator G por el usuario. Para comunicar la memoria externa al microcontrolador, se utiliza comunicación serial a través del bus SPI del microcontrolador, en el cual se envía un flujo de bits regulado por reloj.

La descripción de cada pin usado de la memoria SD - MMC se muestra en la tabla 3.19.

Pin MMC	Descripción	Función	Pin AVR
2	MOSI (Master Out Slave IN)	A través de este pin, el master (microcontrolador) genera la señal de reloj hacia el esclavo (memoria SD-MMC).	MOSI
7	MISO (Master IN Slave Out)	Pin por el cual pasan los datos desde la memoria SD-MMC al microcontrolador.	MISO
5	CLK	Pin de reloj serial	SCK
1	CS	Cuando está en bajo la señal, la memoria SD-MMC coge los datos a través del puerto SPI. Cuando la señal está en alto la memoria SD-MMC ignora los datos en el bus.	SS
3,6	GND	Conexión a tierra.	
4	+ 3.3 [V]	Voltaje de alimentación de la memoria.	

Tabla 3.19: Descripción de pines de memorias SD - MMC

Fuente: El autor

En la figura 3.60 se muestra la disposición de los pines:

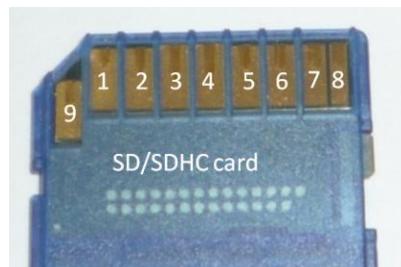


Figura 3.60: Disposición de pines en memoria SD-MMC

Fuente: http://avrhelp.mcselec.com/index.html?avr_dos_file_system.htm

Los pines 8 y 9 son reservados por la memoria y no se los utiliza. También se puede utilizar memorias microSD con un adaptador. Los pines en la memoria microSD se muestran a continuación:

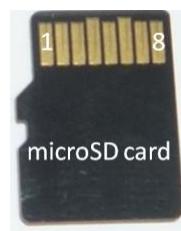


Figura 3.61: Pines en memoria microSD

Fuente: http://avrhelp.mcselec.com/index.html?avr_dos_file_system.htm

Pin MMC	1	2	3	4	5	6	7	8
Descripción	Reservado	CS	MOSI	3.3 [V]	CLK	GND	MISO	Reservado

Tabla 3.20: Descripción de pines de memorias microSD

Fuente: El autor

El diseño del circuito se muestra a continuación:

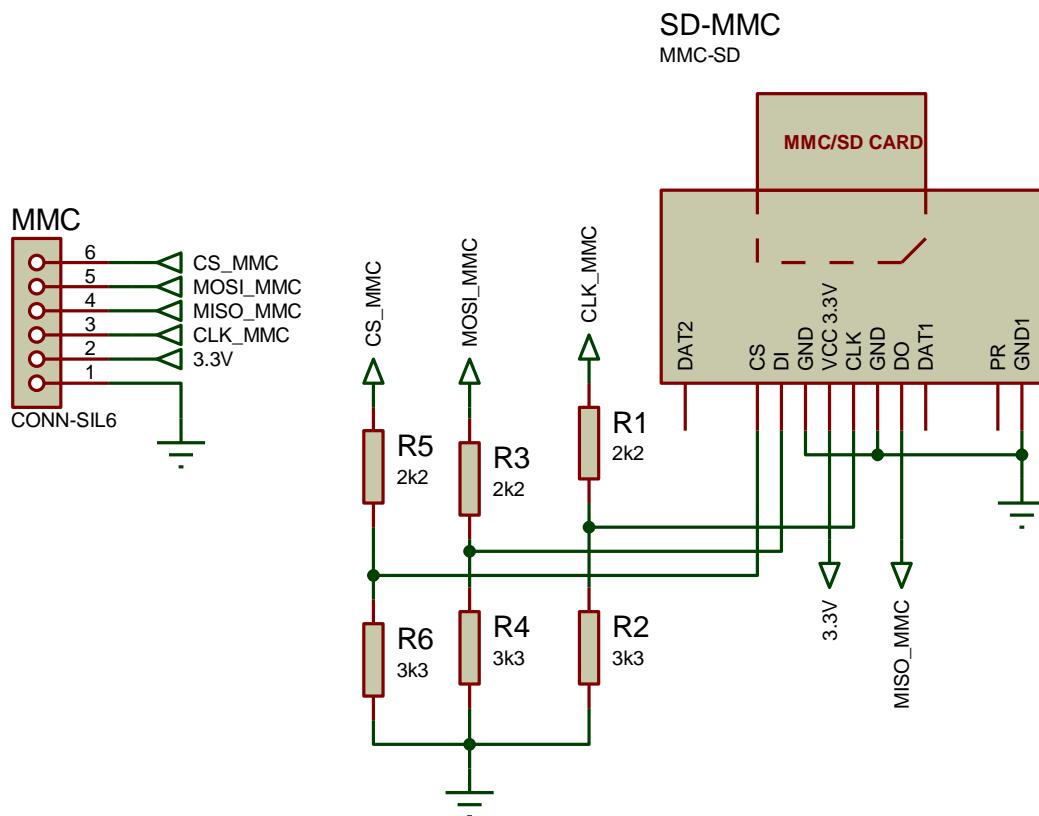


Figura 3.62: Diseño electrónico para memorias SD-MMC

Fuente: El autor

3.7.4 PULSANTE DE PARO

En toda máquina por motivos de seguridad, es importante siempre colocar pulsantes de parada que sean de fácil acceso para los operadores, los cuales ayudarán a prevenir daños o funcionamientos no deseados. El pulsante de parada seleccionado posee enclavamiento.

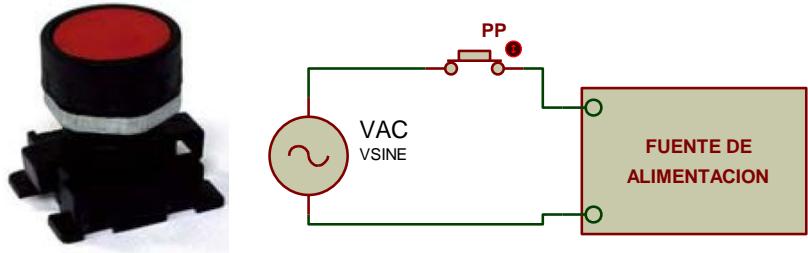


Figura 3.63: Pulsante de parada y conexión

Fuente: El autor

En la figura 3.63 VAC corresponde a la entrada de voltaje alterno (110 VAC) a la fuente de poder, mientras que PP es el pulsante de parada. Usando la conexión NC (Normalmente Cerrada) del pulsante de parada se logra que el circuito esté conectado hasta que el usuario presione el pulsante de parada y se convierta en un circuito abierto desconectando la alimentación a la fuente de poder y quedando enclavado en esa posición.

3.7.5 INDICADORES

Se implementa indicadores visuales de seguridad y una alerta sonora para un uso e iteración óptima con la máquina, la tabla 3.21 describe los indicadores:

Descripción	Tipo	Ubicación
Encendido	Luz piloto azul	Soporte de acrílico
Temperatura extrusor	Luz piloto roja	Soporte de acrílico
Temperatura base de deposición	Luz piloto roja	Soporte de acrílico
Nivel mesa de deposición	Nivel de burbuja	Mesa de deposición
Nivel extrusor	Nivel de burbuja	Extrusor
Pieza fabricada	Luz piloto azul Alarma sonora	Dentro de la carcasa

Tabla 3.21: Descripción de los indicadores de la I3D V1.0

Fuente: El autor

El diseño de los circuitos aplicados se muestra a continuación:

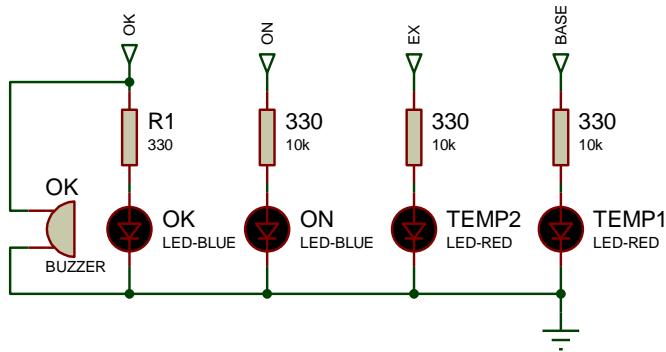


Figura 3.64: Circuito de indicadores de seguridad y alertas

Fuente: El autor

La entrada OK proviene del microcontrolador y es usada para indicar el final de impresión. La entrada ON se conecta a la salida de 5VDC de la fuente para indicar el encendido de la máquina y las entradas EX y BASE provienen de la salida de los amplificadores AD620 y sirven para indicar las temperaturas del extrusor y la base. El diseño mecánico final se muestra en la figura 3.65.



Figura 3.65: Diseño mecánico final de la I3D V1.0

Fuente: Galo Maldonado

3.8 DIMENSIONAMIENTO FUENTE DE PODER

Para el dimensionamiento de la fuente de poder se suman las potencias eléctricas consumidas en cada diseño tanto en 5 voltios como en 12 voltios. Si bien la memoria MMC consume corriente a 3.3 VDC y el amplificador de instrumentación AD620 a -12 VDC, serán despreciados al ser consumos muy bajos.

3.8.1 CONSUMOS DE CORRIENTE DEL SISTEMA

La potencia eléctrica y la corriente que consumen los elementos más relevantes a 5 VDC es la siguiente:

Elementos a 5 VDC	Cantidad	Potencia [W]	Consumo [mA]
Atmega 644P	2	0.004	0.8
A4988	5	0.3	60
JHD12864E	1	0.0035	0.7
TOTAL		0.3075	61.5

Tabla 3.22: Consumo y potencia de elementos a 5 VDC

Fuente: El autor

La potencia eléctrica y la corriente que consumen los elementos más relevantes a 12 VDC es la siguiente:

Elementos a 12 VDC	Potencia [W]	Consumo [mA]
Calentador fundidor	24	2000
Calentador base	93.6	7800
Enfriador	1.92	160
Motor extrusora	18	1500
Motor eje X	18	1500
Motor eje Y	18	1500
Motor eje Z	18	1500
TOTAL	191.52	15960

Tabla 3.23: Consumo y potencia de elementos a 12 VDC

Fuente: El autor

De manera que la potencia total aproximada de la fuente debe ser la siguiente:

$$P_{ft} = P_{@5VDC} + P_{@12VDC} = 0.3075 + 191.52 = 191.8275[W]$$

Además la fuente debe proveer aproximadamente 61.5 miliamperios a 5 voltios y 15.96 amperios a 12 voltios. Los voltajes de alimentación necesarios para los diferentes diseños electrónicos son los siguientes:

Voltaje	Elemento
+3.3 VDC	Memoria MMC

+5VDC	Microcontroladores, A4988, Pantalla Táctil
+12VDC	Motores, calentadores, enfriador y AD620
-12VDC	AD620

Tabla 3.24: Voltajes de alimentación requeridos

Fuente: El autor

3.8.2 SELECCIÓN DE LA FUENTE DE PODER

Se selecciona una fuente conmutada usada en computadoras con las siguientes características:

Característica	Valor
Potencia	584 [W]
Corriente a 5VDC	43[A]
Corriente a 12VDC	36 [A]
Voltajes de salida	+3.3VDC, +5VDC, +12VDC, -12 VDC

Tabla 3.25: Características de la fuente seleccionada

Fuente: El autor

3.9 DISEÑO DE PLACAS ELECTRÓNICAS

Se muestra el diseño final de las tarjetas de control de la máquina, a excepción de la tarjeta de la memoria MMC que ya se realizó por completo. El ruteado y modelo 3D correspondiente se encuentran en el Anexo 8. El diseño electrónico se realiza en el programa Proteus (Isis) y el ruteado con su modelo 3D en Proteus (Ares).

3.9.1 DISEÑO PLACA DEL CONTROLADOR PRINCIPAL

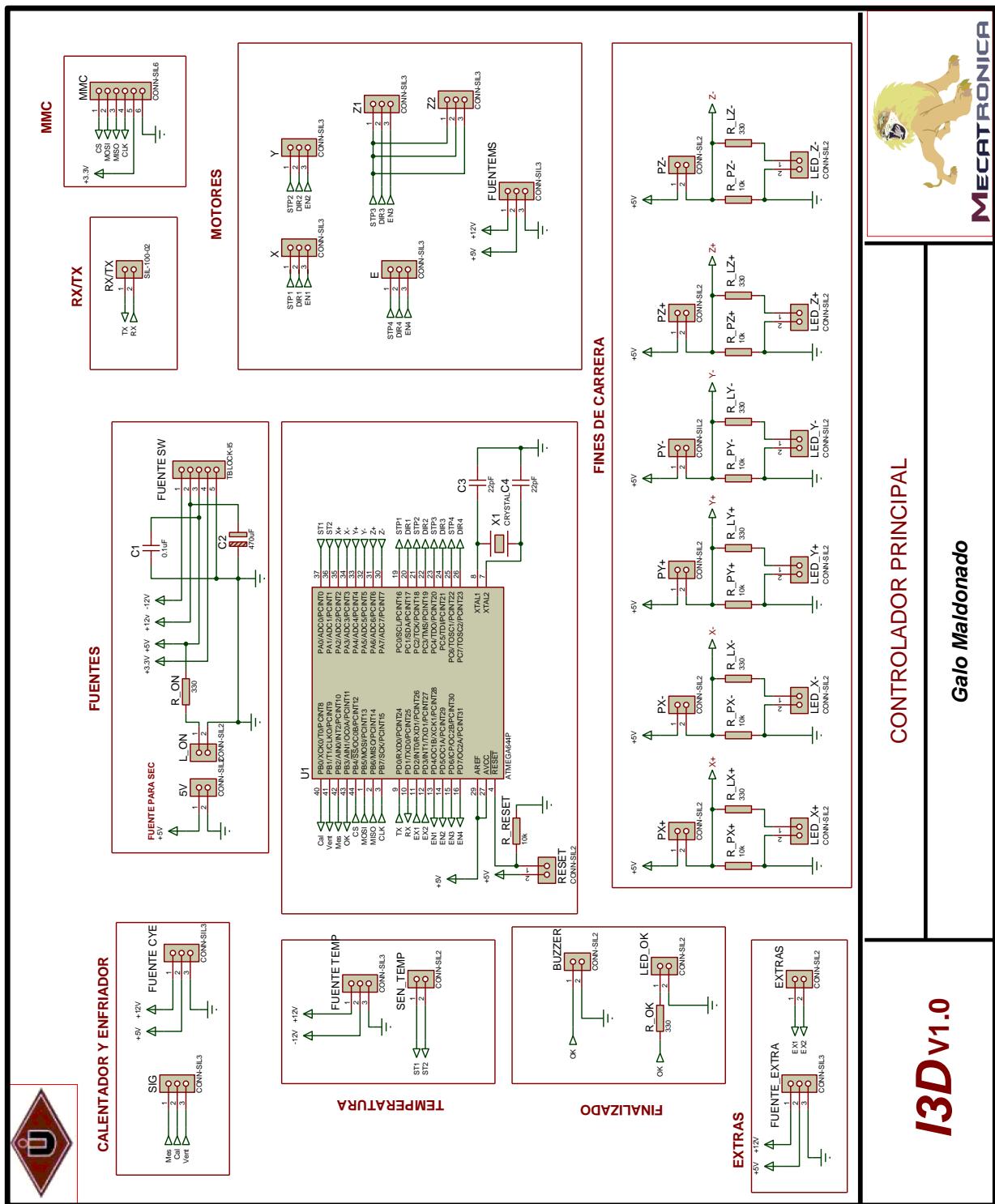


Figura 3.66: Diseño electrónico del controlador principal

Fuente: El autor

3.9.2 DISEÑO PLACA DEL CONTROLADOR SECUNDARIO

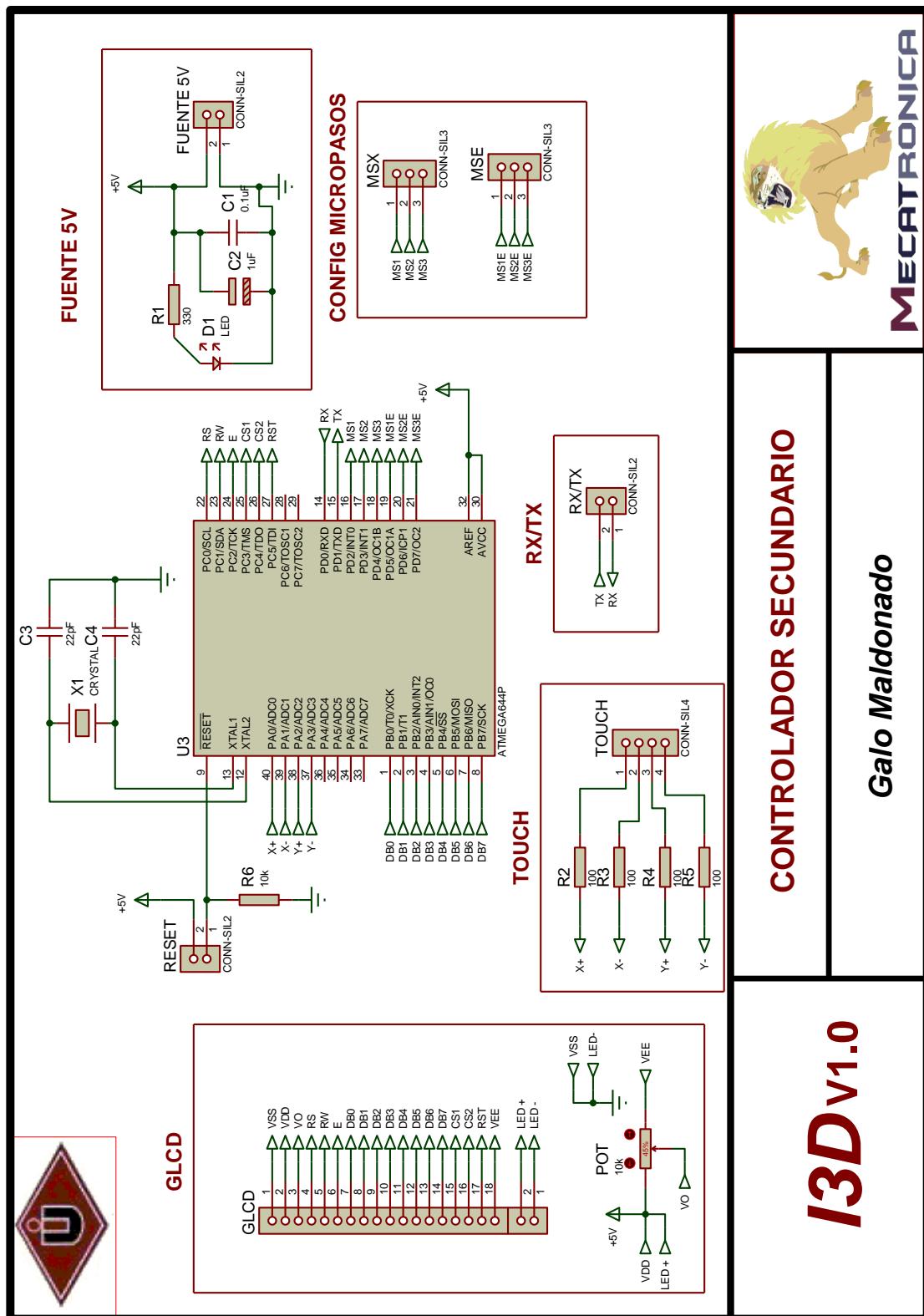


Figura 3.67: Diseño electrónico del controlador secundario

Fuente: El autor

3.9.3 DISEÑO PLACA CONTROLADORA DE MICROPASOS

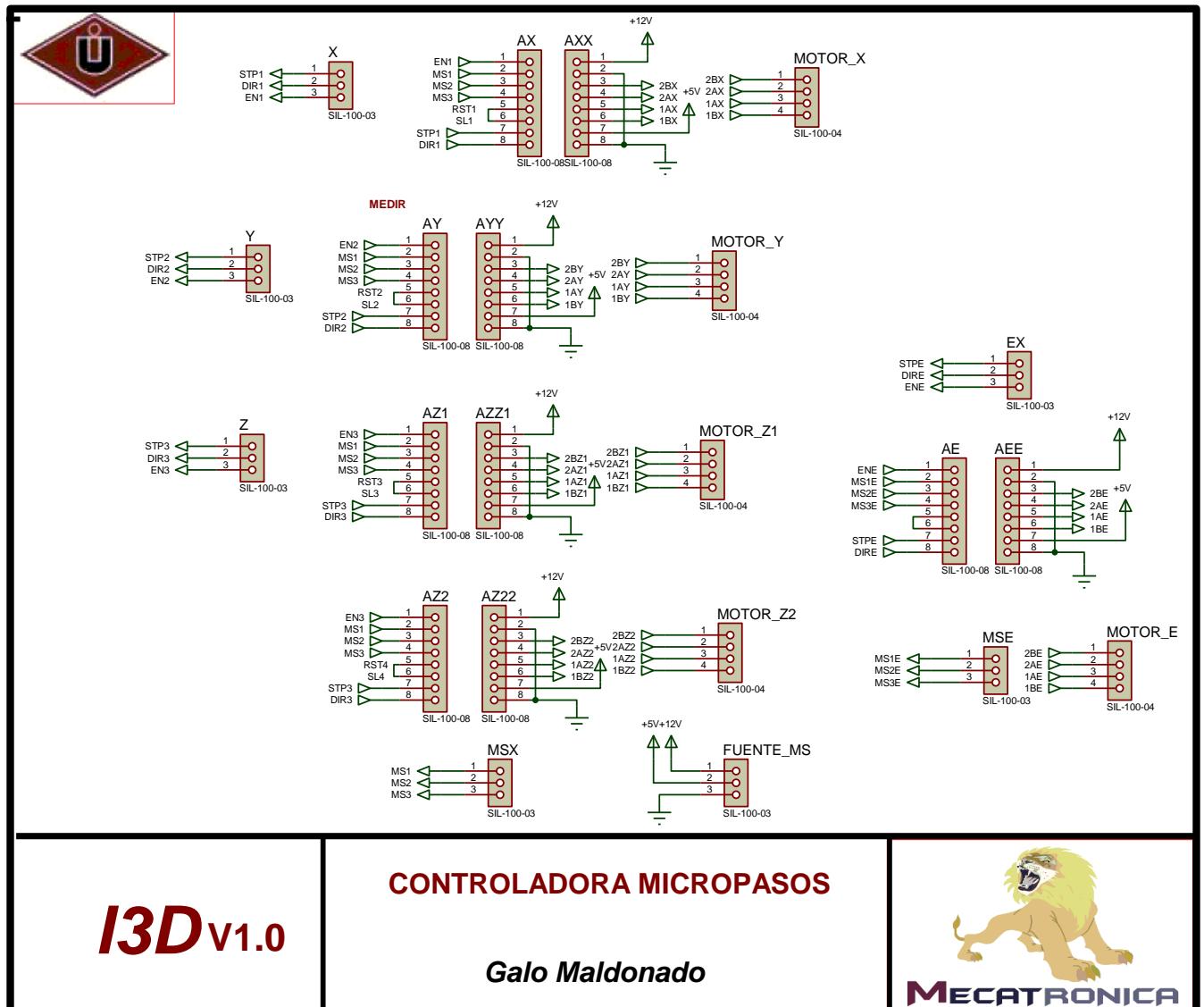


Figura 3.68: Diseño electrónico de la controladora de micropasos

Fuente: El autor

3.9.4 DISEÑO PLACA DE SENSORES DE TEMPERATURA

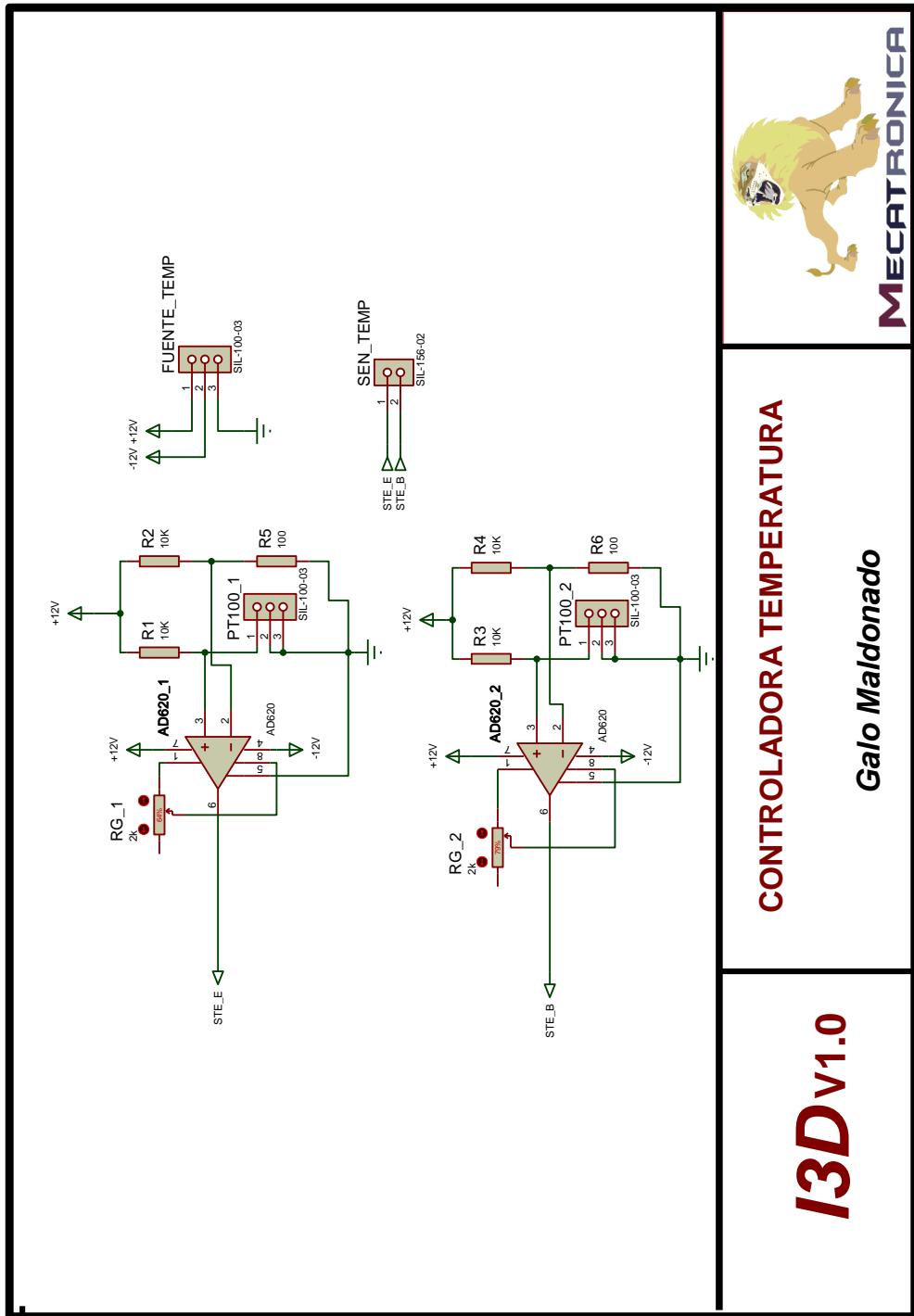


Figura 3.69: Diseño electrónico de la controladora de temperatura

Fuente: El autor

3.9.5 DISEÑO PLACA DE CALENTADORES Y ENFRIADOR

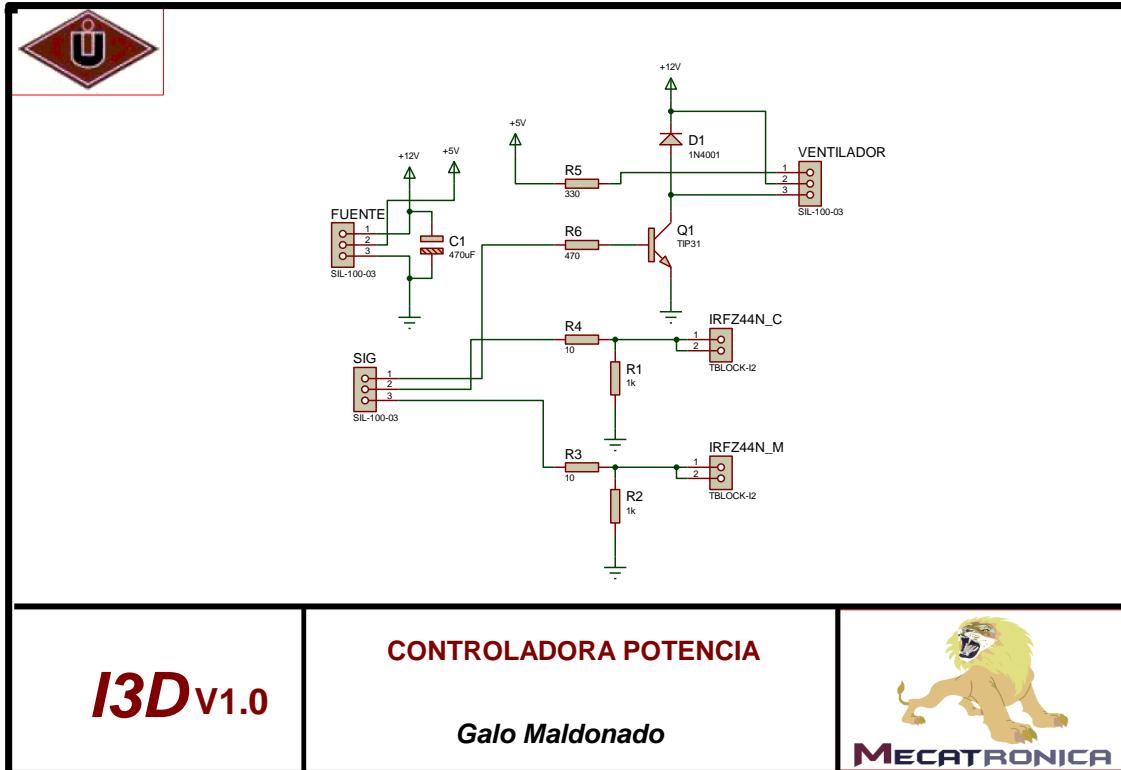


Figura 3.70: Diseño electrónico de la controladora de potencia

Los mosfets de potencia se colocan en una placa perforada para alejarlos de los circuitos de control y tener el espacio necesario para colocar disipadores de calor por motivos de seguridad.

3.10 DISEÑO DE LOS PROGRAMAS DE CONTROL

El programa de control de la máquina impresora 3D se realiza en dos microcontroladores de la familia ATMEL (Atmega 644P) de acuerdo a la selección de alternativas realizada en el capítulo 2. El microcontrolador 1 contiene el programa principal y el microcontrolador 2 contiene el programa secundario y cada uno tiene un rol específico.

3.10.1 PROGRAMA PRINCIPAL

El programa principal es el encargado de ejecutar las instrucciones de operación de la máquina impresora y es el encargado de monitorear los sensores para aplicar acciones de control en los actuadores e indicadores. El microcontrolador 1 se encarga de recibir y enviar información a los siguientes elementos:

ELEMENTO	ACCIÓN
Microcontrolador secundario	Envío y recepción de datos
Sensor de temperatura del extrusor	Recepción de datos
Sensor de temperatura de la base de deposición de material fundido	Recepción de datos
Calentador del fundidor	Envío de datos
Calentador de la base de deposición de material fundido	Envío de datos
Enfriador del modelo 3D	Envío de datos
Motores eje X, eje Y, eje Z y extrusor	Envío de datos
Indicador sonoro	Envío de datos
Indicadores luminosos	Envío de datos
Memoria externa SD – MMC.	Envío y recepción de datos

Tabla 3.26: Elementos del programa principal

Fuente: El autor

3.10.2 PROGRAMA SECUNDARIO

El programa secundario es el encargado de manejar la interfaz hombre máquina y comunicar las acciones al controlador primario. El microcontrolador 2 se encarga de recibir y enviar información a los siguientes elementos:

ELEMENTO	ACCIÓN
Microcontrolador primario	Envío y recepción de datos
Lámina resistiva táctil	Recepción de datos
Pantalla gráfica	Recepción de datos

Tabla 3.27: Elementos del programa secundario

Fuente: El autor

3.10.3 PROGRAMAS DE COMUNICACIÓN

3.10.3.1 Comunicación entre microcontroladores principal y secundario

El programa de control primario se comunica mediante protocolo realizado (no estándar) con el programa secundario. El protocolo consiste en enviar 5 bits de inicio “<<<<”, el dato a ser enviado y 5 bits de finalización “>>>>”. La comunicación se la realiza serialmente con los puertos RX y TX de cada microcontrolador.

3.10.3.2 Comunicación entre microcontrolador principal y memoria SD-MMC

Para comunicar la memoria externa al microcontrolador, se utiliza comunicación serial a través del bus SPI del microcontrolador. Se leen los archivos con extensión “*.txt” en memoria y al seleccionar uno de ellos el usuario, se lo abre para leer línea por línea cada instrucción de código de impresión.

3.10.4 CONTROL DE ACTUADORES:

3.10.4.1 Control de motores a pasos

Para controlar el desplazamiento y velocidad de los motores se envían pulsos (desplazamiento) a diferentes frecuencias (velocidad) a la tarjeta de micropasos. Los pulsos se envían mediante señales PWM con ciclo de trabajo del 50 % a frecuencias que varían dependiendo de la velocidad requerida. Para generar las señales PWM de los ejes X, Y y Z se utilizan el Timer 0 y el Timer 2. Para cargar los timers con el valor correspondiente de frecuencia se usa la relación siguiente:

$$\text{Valor Timer 0} = \text{Timer 0} - \left(\frac{\text{Freq. osc.} * \text{Td}}{\text{preescalador}} \right) \quad (\text{Ec. 3.61})$$

Donde:

Valor Timer = valor requerido para cargar el timer 0 o timer 2.

Timer 0 = valor del timer. Para el timer 0 o timer 2 del microcontrolador Atmega 644P de se tiene 8 bits, 256 [Adimensional].

Freq. osc. = frecuencia de oscilación del microcontrolador usada, 16000000 [Hz].

Td = tiempo en el cual desborda el timer 0.

preescalador = valor del prescalador usado en la configuración del timer0, (se usa 64 para el timer 0 y 256 para el timer 2), [adimensional]

Para determinar el tiempo en el que desborda el timer 1 se divide el período *Tt* para dos, debido a que se tiene un ciclo de trabajo del 50%, entonces:

$$\text{Td} = \frac{\text{Tt}}{2}$$

El período se calcular a partir de las frecuencias a las que se requiera operar el motor a pasos. Para determinar las frecuencias de operación del motor de acuerdo a su velocidad, se realiza la operación siguiente:

$$Freq. motor = velocidad angular * pasos por revolución \quad (Ec. 3.62)$$

Donde:

velocidad angular = velocidad angular a la que se desea operar el motor, [rps].

pasos por revolución = número de pasos que necesita el motor para dar una vuelta, [pasos/rev].

Los pasos por revolución se determinan mediante la resolución del motor, aplicando:

$$pasos por revolución = \frac{360^\circ}{Resolución}$$

Como el motor tiene una resolución de 1.8 grados, se tiene:

$$pasos por revolución = \frac{360^\circ}{1.8^\circ} = 200^\circ$$

Entonces el motor opera a 200° a paso completo. De igual forma se determinan los micropasos:

$$pasos por revolución_{\frac{1}{2}paso} = \frac{360^\circ}{\frac{1.8^\circ}{2}} = 200$$

$$pasos por revolución_{\frac{1}{4}paso} = \frac{360^\circ}{\frac{1.8^\circ}{4}} = 800$$

$$pasos por revolución_{\frac{1}{8}paso} = \frac{360^\circ}{\frac{1.8^\circ}{8}} = 1600$$

$$pasos por revolución_{\frac{1}{16}paso} = \frac{360^\circ}{\frac{1.8^\circ}{16}} = 3200$$

Para controlar los ejes X y Y se realiza interpolación lineal de movimientos mediante control proporcional para que manteniendo un tiempo constante los mecanismos tengan distinta velocidad dado un desplazamiento. El desplazamiento menor (velocidad mayor) sirve de referencia para saber cuánto disminuir la velocidad acorde a los desplazamientos predefinidos y no sobrepasar el límite de velocidad propuesto. El cambio de velocidad es proporcional al cambio de desplazamiento, por lo cual se puede resolver análogamente cualquier sistema. Para aplicar el control proporcional se aplica:

$$y_p = K_p e_p \quad (\text{Ec. 3.63})$$

Donde:

y_p = salida del controlador de desplazamiento menor

K_p = ganancia proporcional

e_p = error proporcional

Entonces el dato que se requiere determinar en la ecuación 3.63 es K_p . La ganancia proporcional se calcula encontrando la pendiente del error con el valor de referencia. Para desplazarse desde el punto (0,0) al punto (2,5) se tiene:

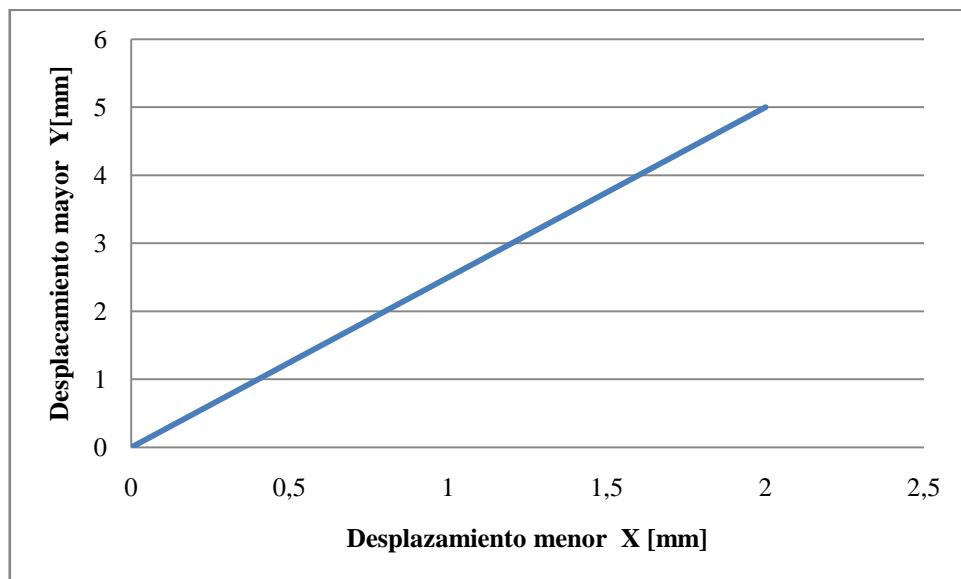


Figura 3.71: Ejemplo de desplazamiento (X, Y) con 2 motores a pasos

Fuente: El autor

Entonces se tiene:

$$K_p = \frac{\text{referencia}}{\text{error}} = \frac{x_f - x_i}{y_f - y_i} = \frac{2 - 0}{5 - 0} = 0.4$$

Por ejemplo, para una velocidad dada de 30 mm/s, aplicando la ecuación 3.63 para determinar la velocidad de salida del controlador, se tiene:

$$y_p = K_p e_p$$

$$y_p = 0.4 * 30 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right] = 12 \left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$$

Entonces la velocidad del mecanismo con desplazamiento menor disminuye a 12 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$ y la velocidad del mecanismo de desplazamiento mayor es 30 $\left[\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right]$.

El eje Z se mueve por separado al finalizar cada capa mediante el timer0. Para generar las señales PWM del motor ubicado en el mecanismo extrusor se utiliza el Timer 1 y se procede igual que para el timer 0 y timer 2, tomando en cuenta que es un timer de 16 bits. Los movimientos en X, Y y el extrusor se mueven al mismo tiempo a velocidades que varían de acuerdo a las instrucciones de código numérico, con esto se obtiene un movimiento de contorneado.

3.10.4.2 Control de calentadores y enfriador

Para controlar los calentadores y el enfriador se emplea control con histéresis y se envían señales PWM mediante el timer2. Las frecuencias de operación para el caso del calentador del extrusor varía hasta 10 [Khz] y para el calentador de la base la frecuencia máxima es de 20 [Hz], esto para evitar sobrecalentar los mosfets de potencia.

3.10.4.3 Control de indicadores

En los indicadores se aplica control todo o nada (on – off). En el indicador de encendido se envía la señal de uno lógico para encenderlo y una señal PWM a la chicharra para indicar operaciones que se realicen en el proceso de impresión. Para el caso de los indicadores de temperatura, se envía la salida de los dos amplificadores operacionales que varían de 0 a 5 voltios a los leds indicadores de color rojo.

3.10.5 MANEJO DE SENSORES:

3.10.5.1 Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura se monitorean mediante el timer0 en modo de operación automático, realizando la toma de datos cada que este se desborde. Se aplica un filtro digital para obtener una señal más estable. Para el filtro digital se aplica la ecuación 3.44, donde:

$$T_m = \left(\frac{\sum_{i=1}^n T_{med}}{n} \right) [{}^\circ\text{C}]$$

El número de datos tomados “n” es 100 y el muestreo se lo realiza después de la ejecución de cada línea de código.

3.10.5.2 Sensores de posición

Los sensores de posición indican el final de recorrido en cada eje. Las entradas obtenidos son señales de cero lógico (sensor desactivado) y uno lógico (sensor activado). El proceso se efectúa al tiempo que se realiza la lectura de los sensores de temperatura cuando se opera en modo automático. En modo manual el proceso se efectúa después de cada instrucción.

3.10.5.3 Sensores de lámina táctil

Los sensores de la lámina táctil indican la posición presionada. Para determinar estos valores se aplica la ecuación de la recta y se determinan las resistencias pulsadas en X y Y, con lo cual se determina la posición en pantalla. Para descartar errores se aplica un filtro digital al igual que el empleado en los sensores de temperatura. Se realiza un programa de calibración de pantalla táctil en caso de ser movida o cambiada la lámina resistiva.

En el diagrama de bloques de la figura 3.72 se muestra el esquema de control de la I3D V1.0.

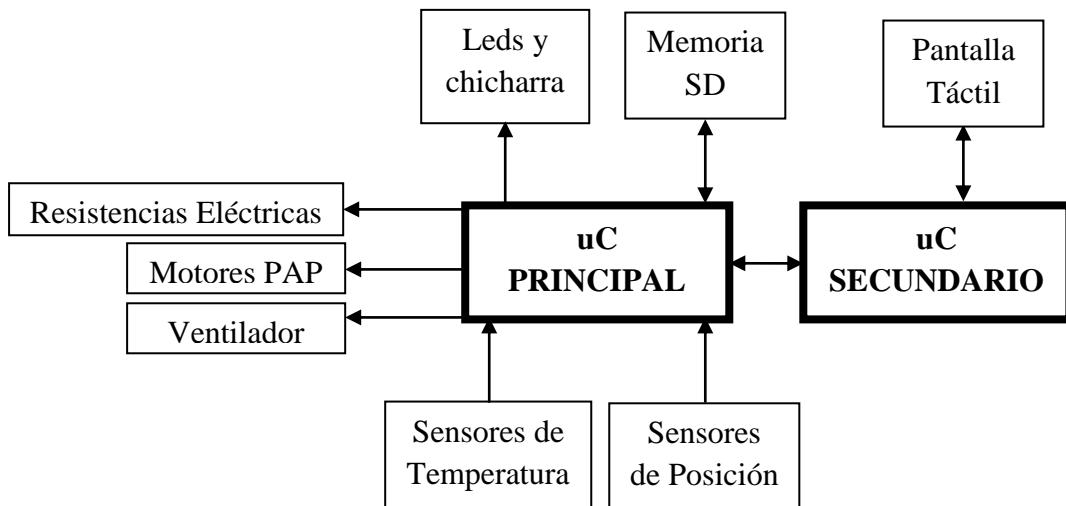


Figura 3.72: Diagrama de bloques del esquema de control

Fuente: El autor

3.10.6 DIAGRAMAS DE FLUJO DE LOS PROGRAMAS DE CONTROL:

Se presentan los diagramas de flujo generales de los programas de control de la máquina del programa principal, programa secundario y las diferentes subrutinas.

3.10.6.1 Diagrama de flujo programa principal

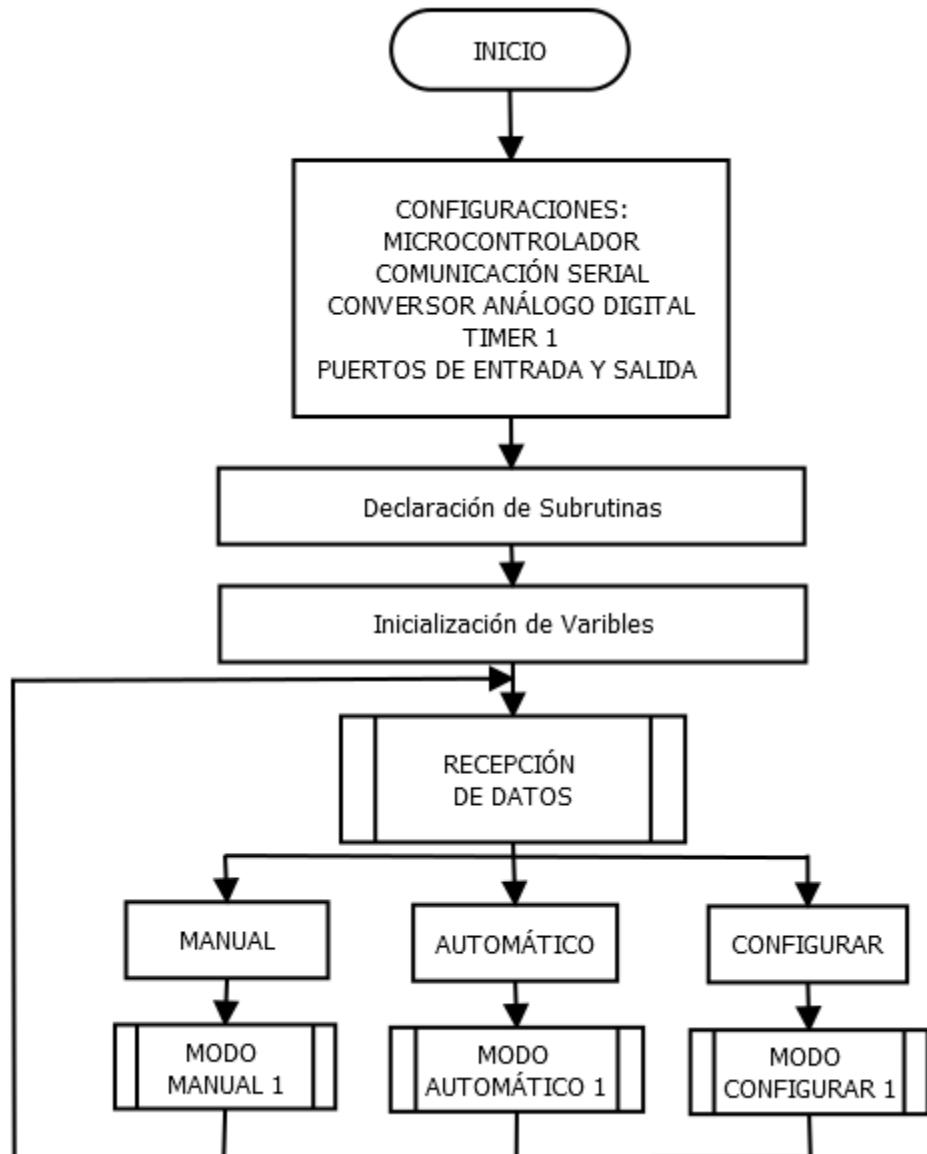


Figura 3.73: Diagrama de flujo del programa principal

Fuente: El autor

3.10.6.2 Diagrama de flujo programa secundario

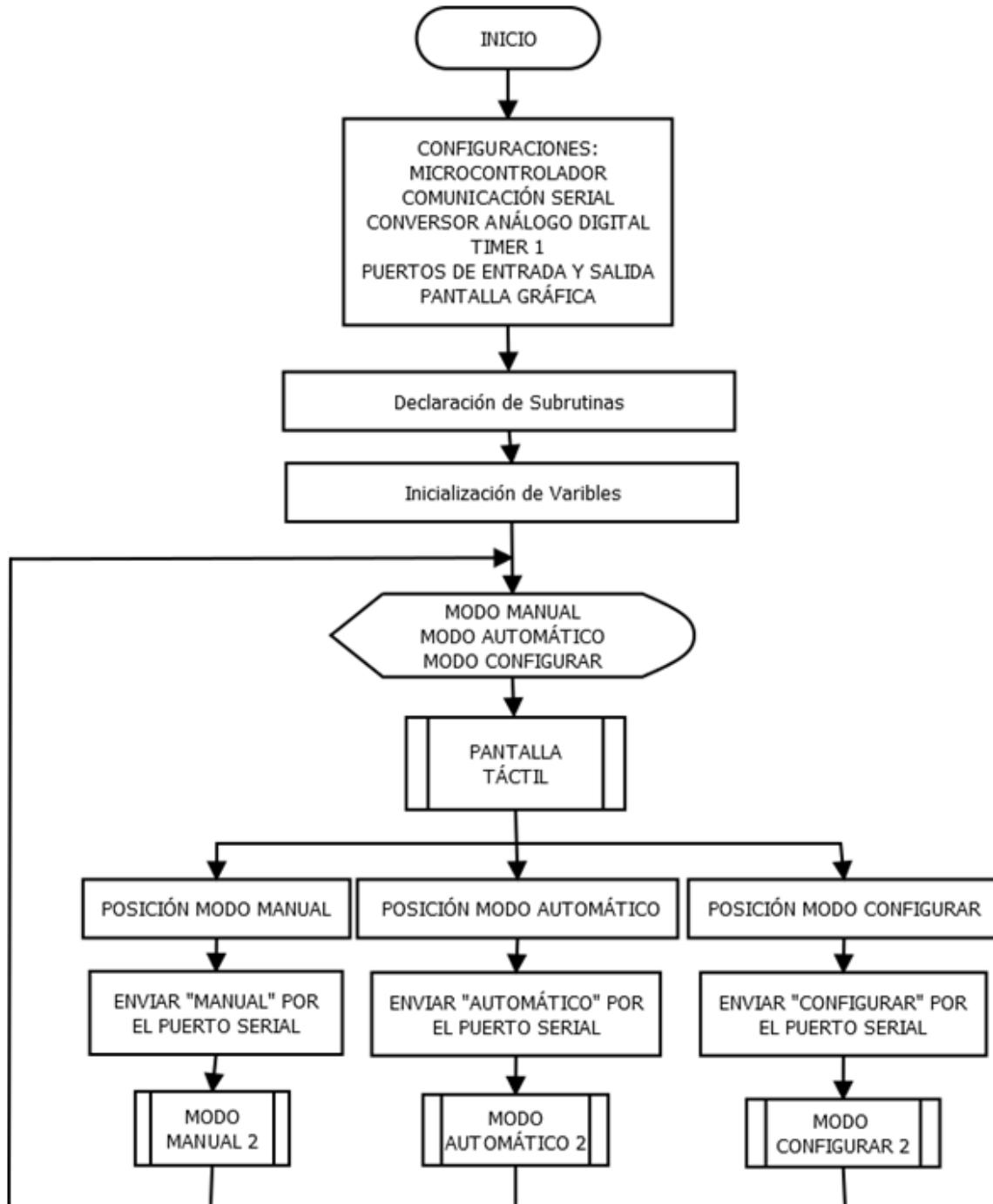


Figura 3.74: Diagrama de flujo del programa secundario

Fuente: El autor

3.10.6.3 Diagramas de flujo subrutinas modo manual

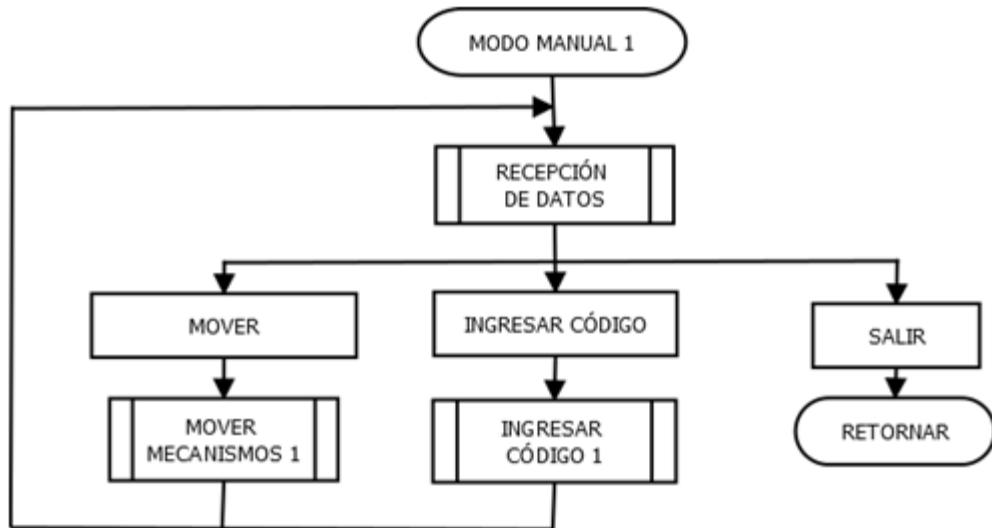


Figura 3.75: Diagrama de flujo de la subrutina del modo manual 1

Fuente: El autor

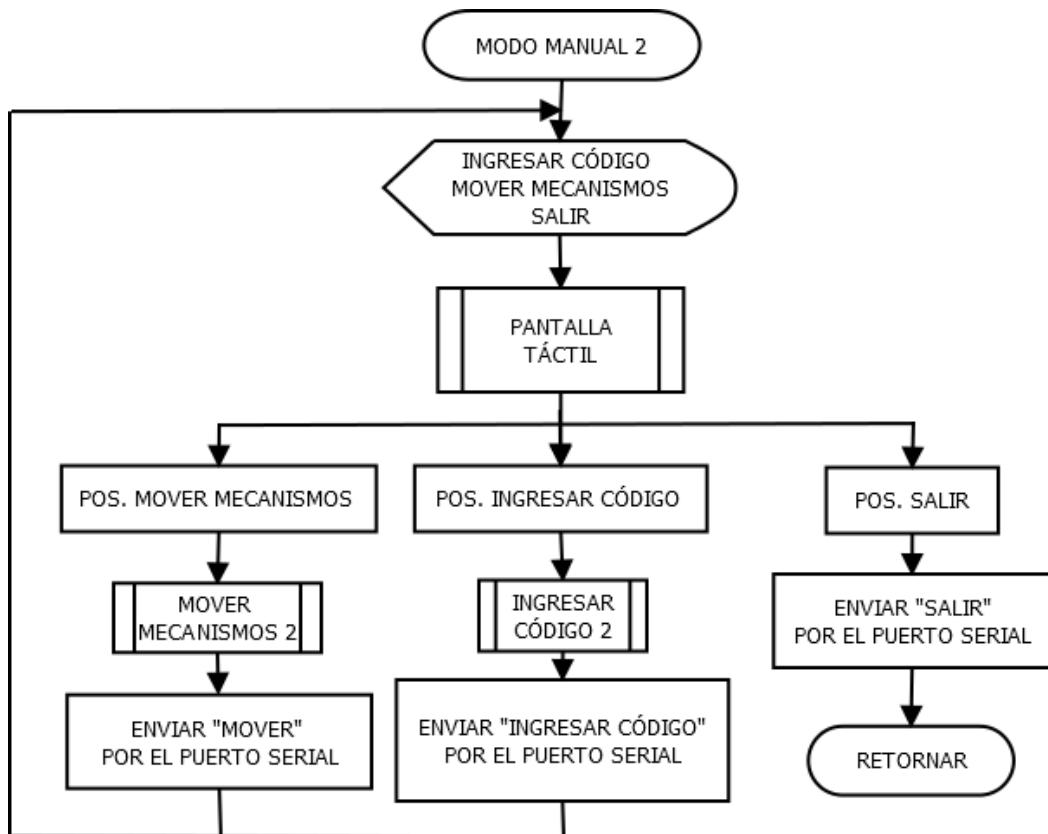


Figura 3.76: Diagrama de flujo subrutina del modo manual 2

Fuente: El autor

3.10.6.4 Diagramas de flujo subrutinas mover mecanismos en modo manual

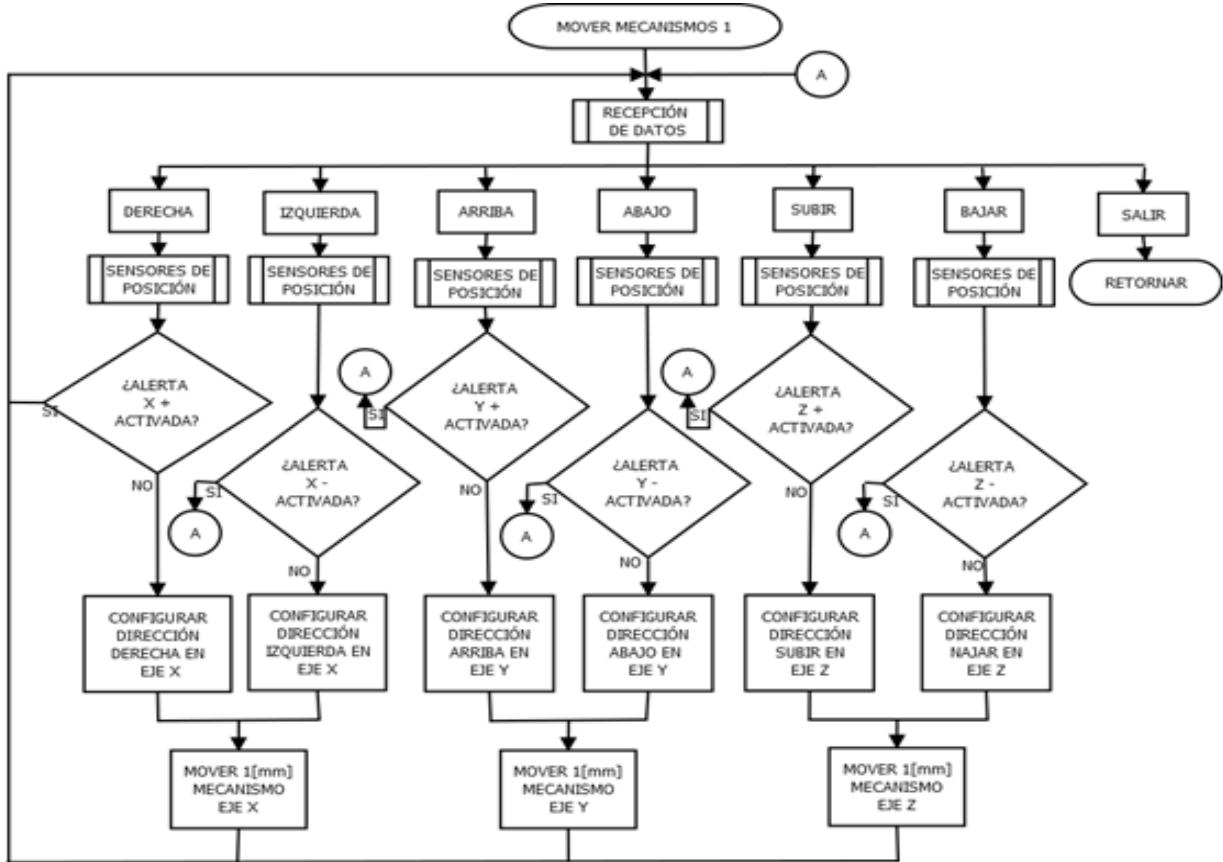


Figura 3.77: Diagrama de flujo de la subrutina mover mecanismos 1

Fuente: El autor

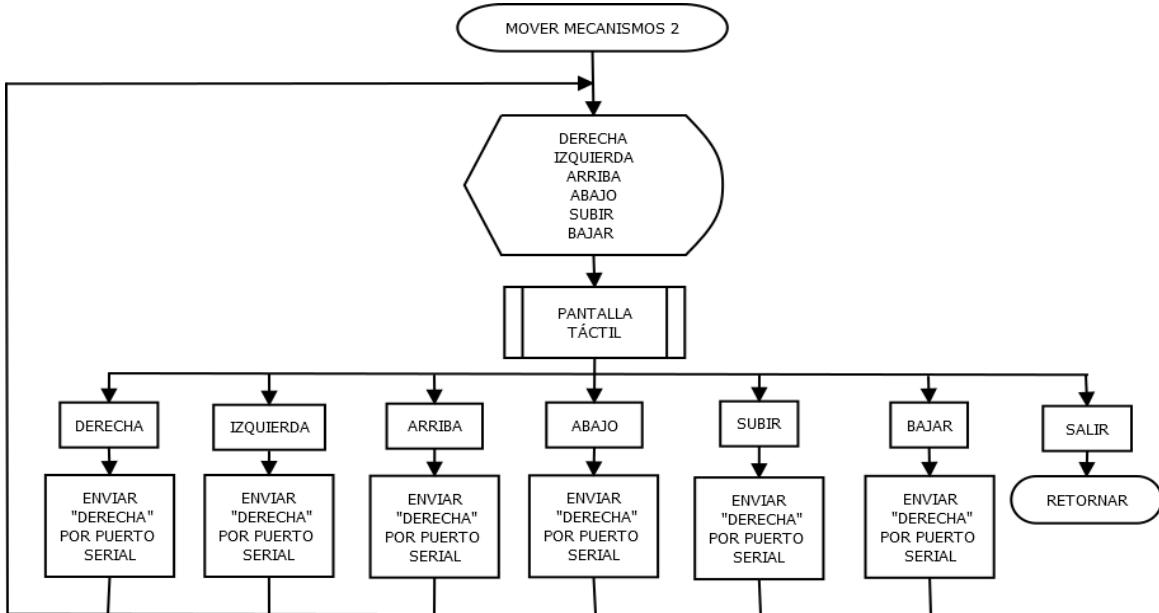


Figura 3.78: Diagrama de flujo subrutina mover mecanismos 2

Fuente: El autor

3.10.6.5 Diagramas de flujo subrutinas ingresar código en modo manual

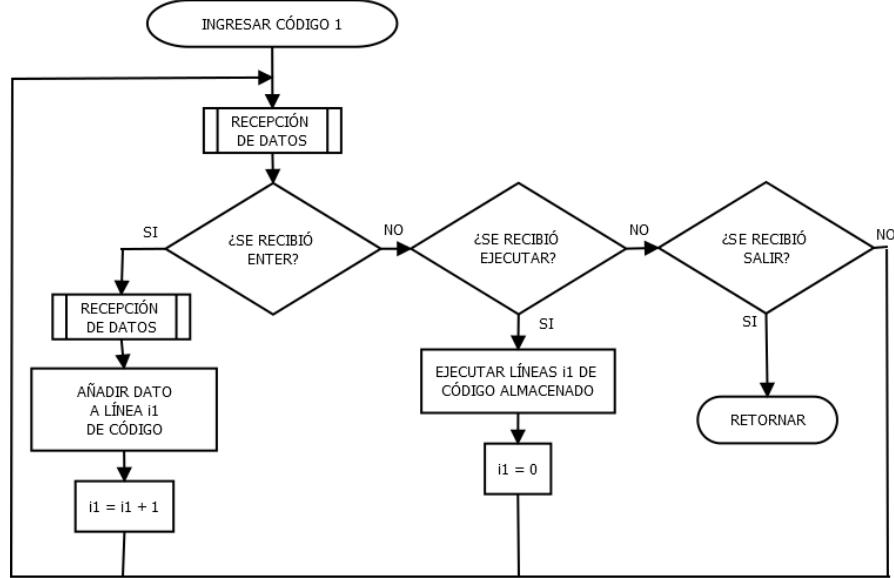


Figura 3.79: Diagrama de flujo de la subrutina ingresar código 1

Fuente: El autor

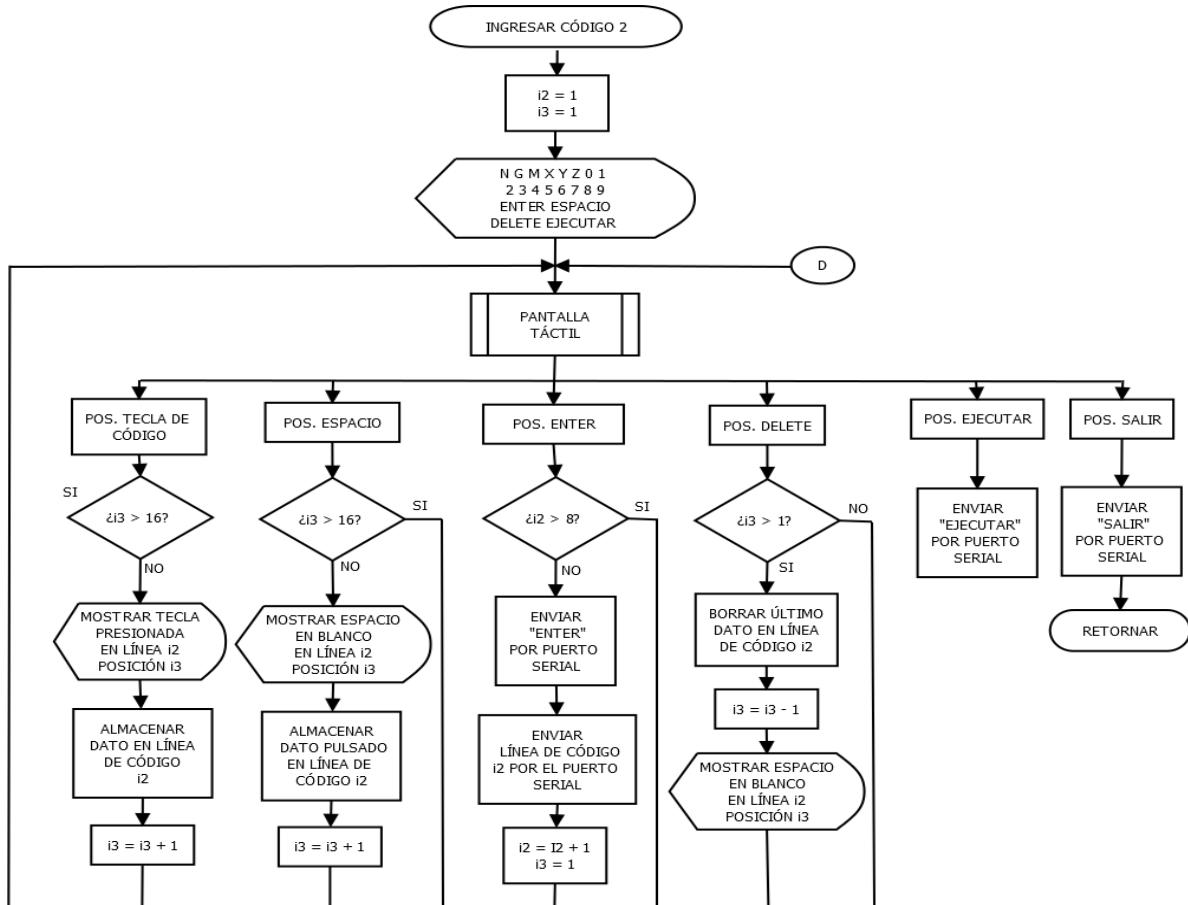


Figura 3.80: Diagrama de flujo subrutina ingresar código 2

Fuente: El autor

3.10.6.6 Diagramas de flujo subrutinas modo automático

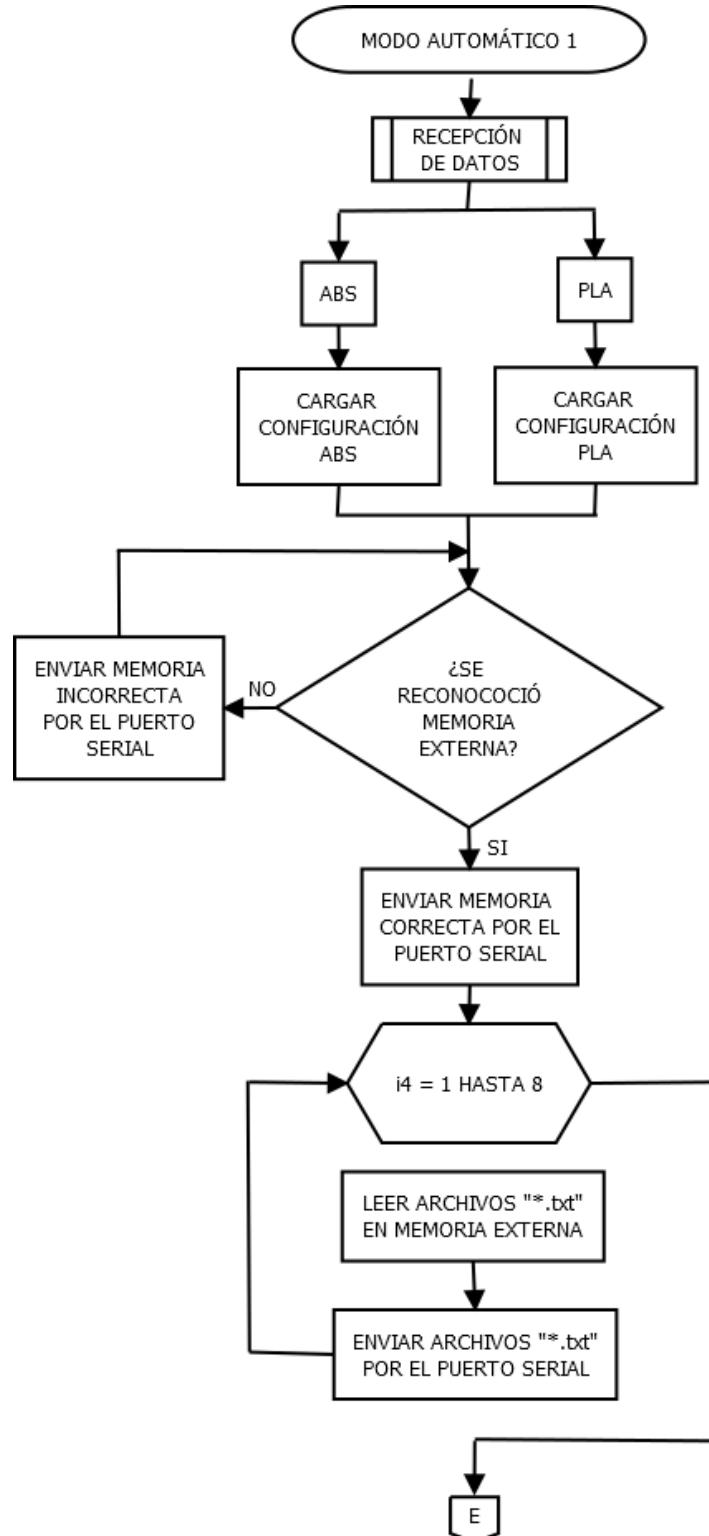


Figura 3.81: Diagrama de flujo 1 de la subrutina del modo automático 1

Fuente: El autor

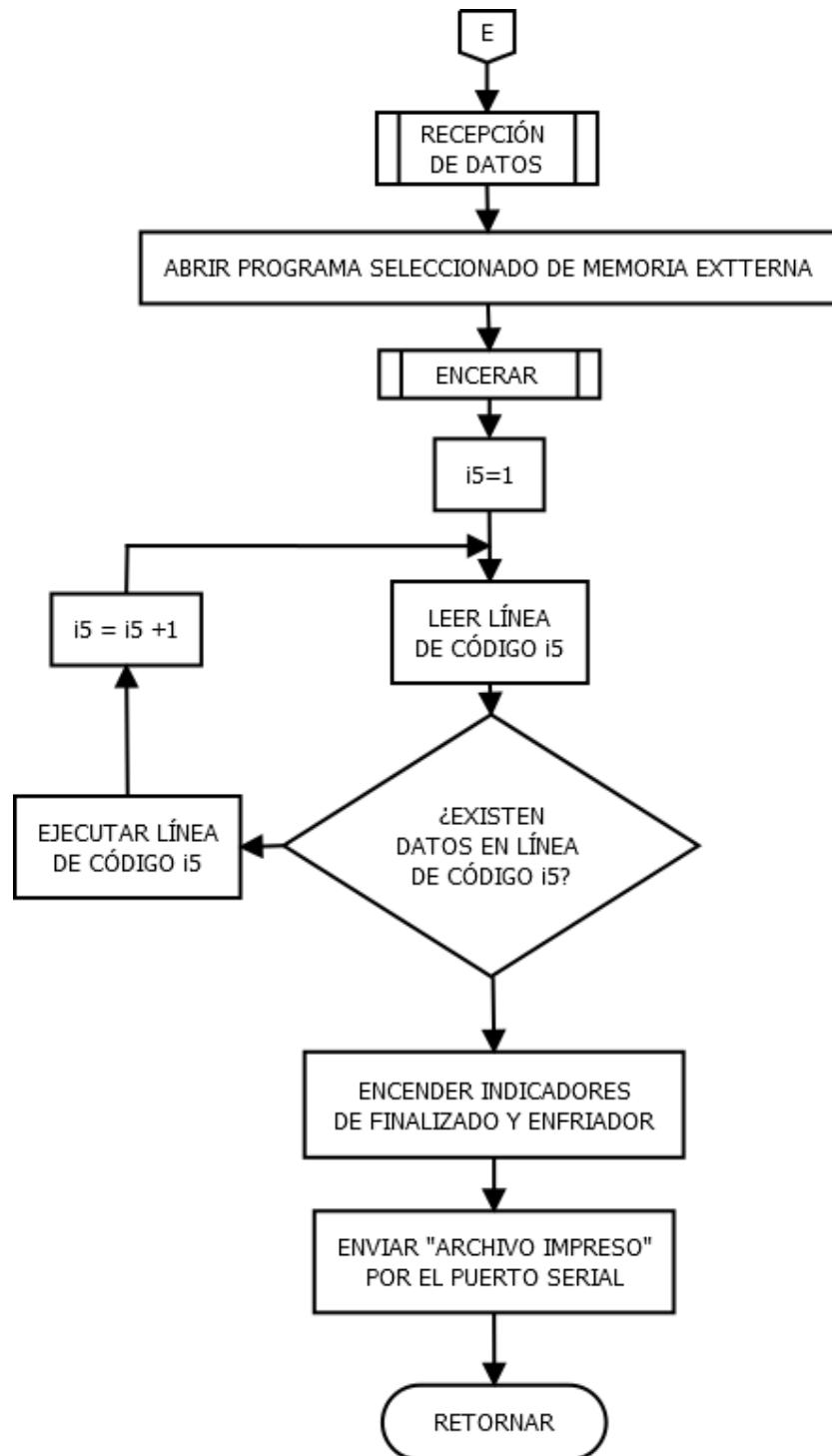


Figura 3.82: Diagrama de flujo 2 de la subrutina del modo automático 1

Fuente: El autor

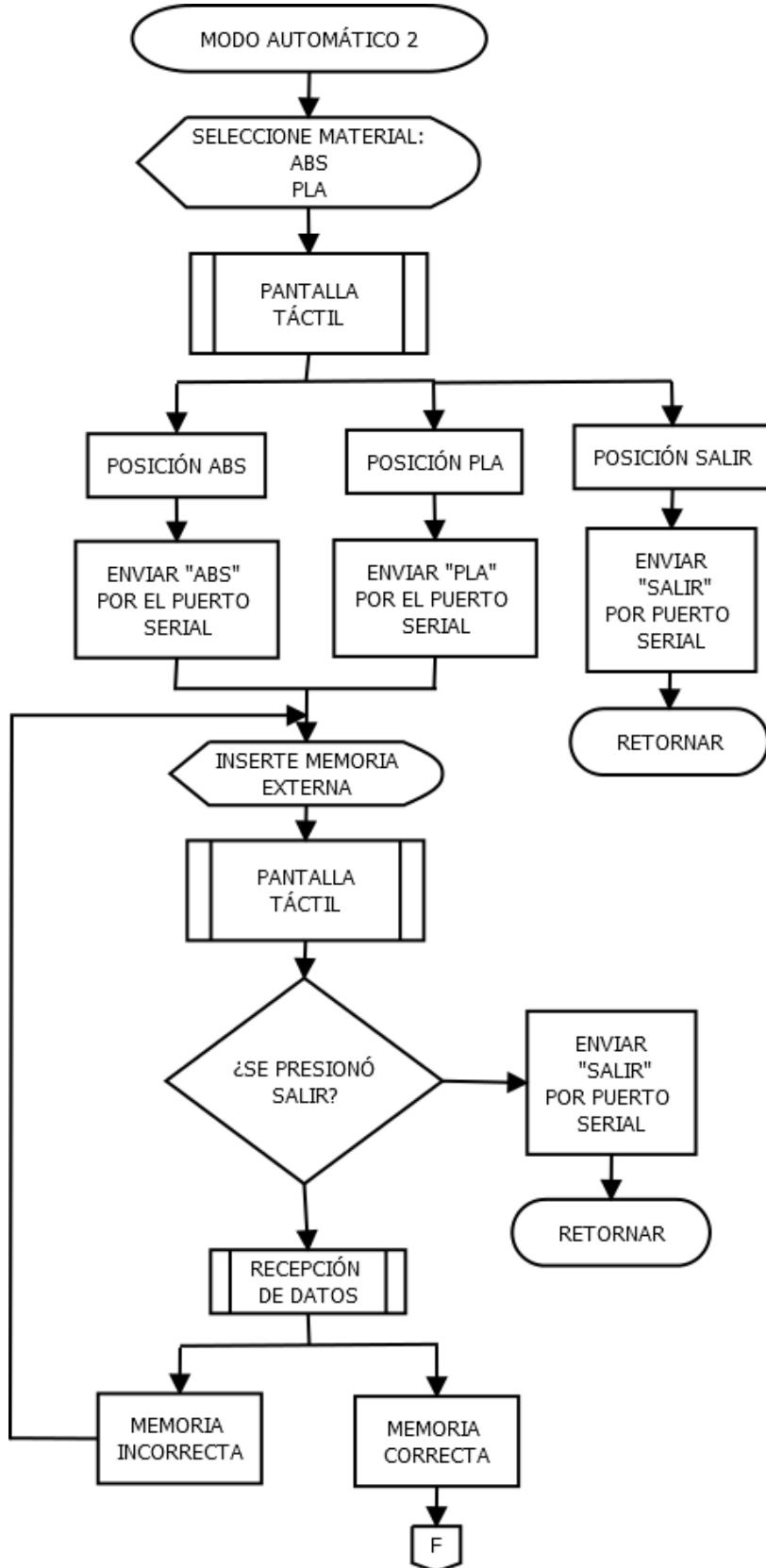


Figura 3.83: Diagrama de flujo 1 subrutina del modo automático 2

Fuente: El autor

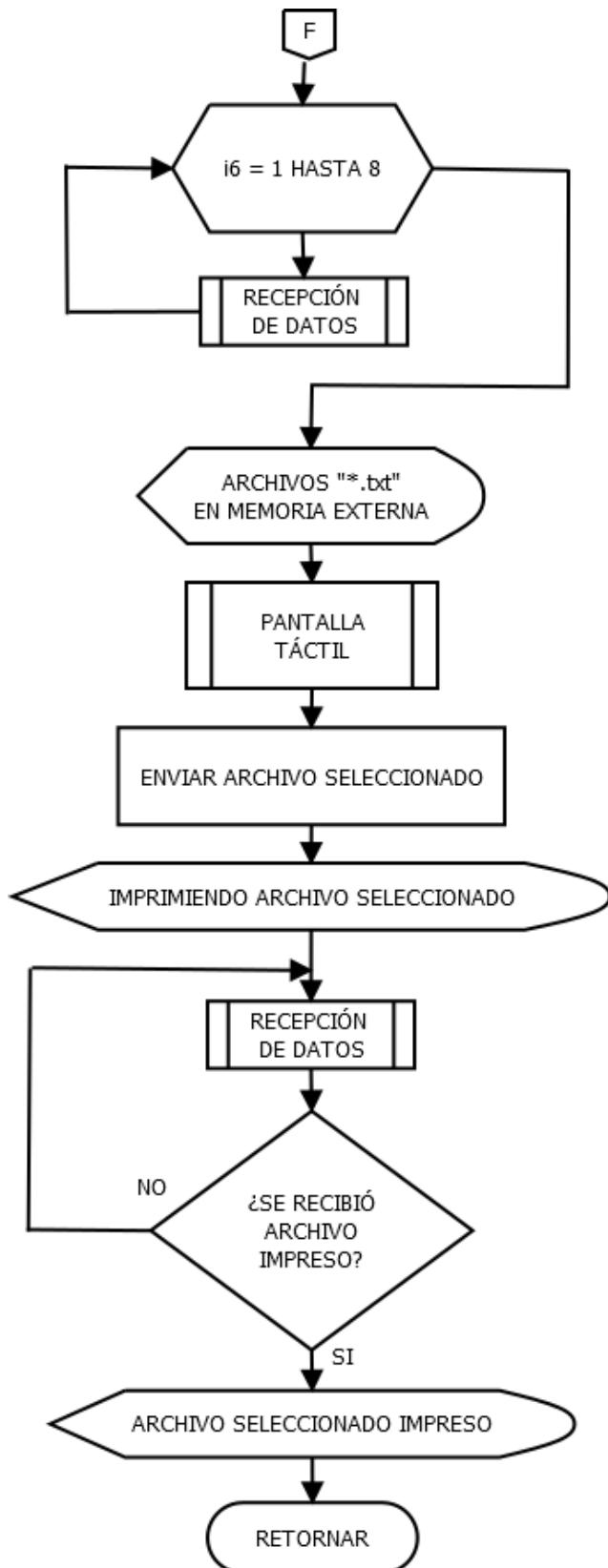


Figura 3.84: Diagrama de flujo 2 subrutina del modo automático 2

Fuente: El autor

3.10.6.7 Diagramas de flujo subrutinas modo configurar

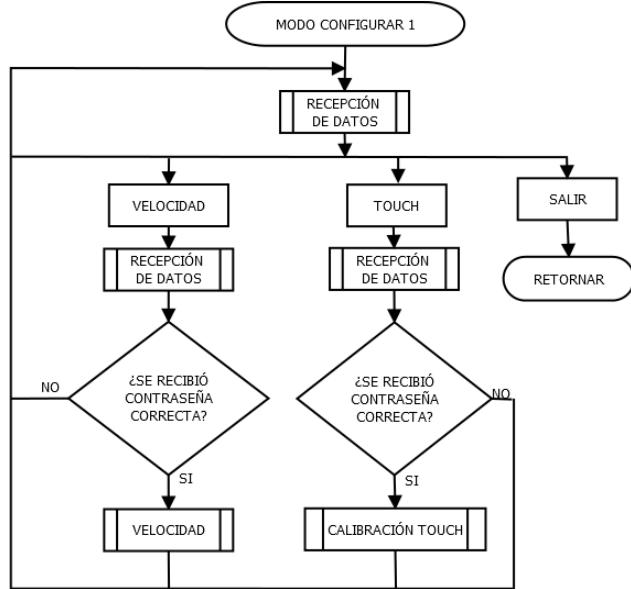


Figura 3.85: Diagrama de flujo subrutina del modo configurar 1

Fuente: El autor

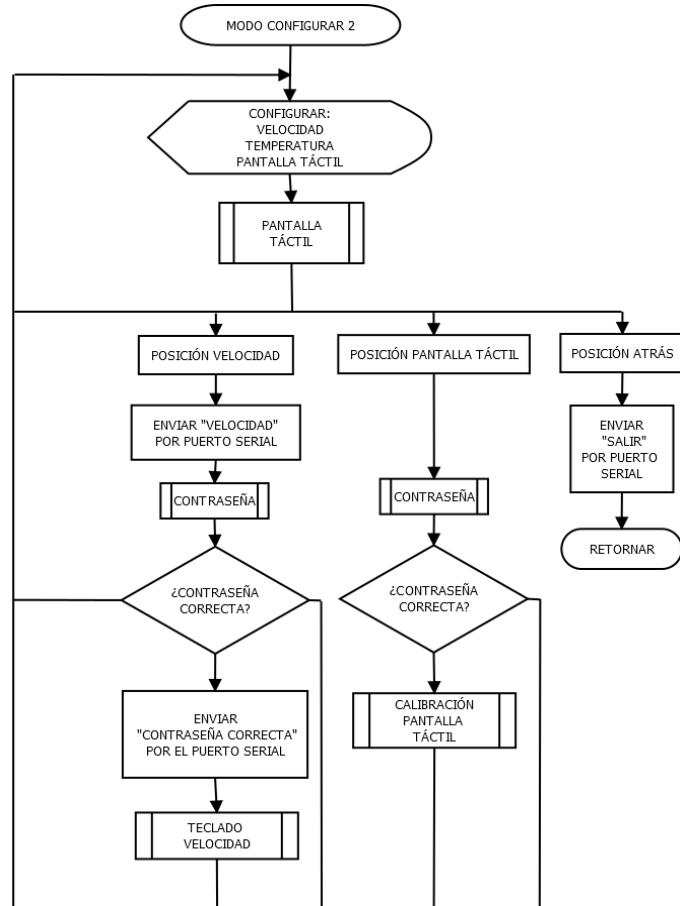


Figura 3.86: Diagrama de flujo de la subrutina del modo configurar 2

Fuente: El autor

3.10.6.8 Diagrama de flujo subrutina calibración pantalla táctil

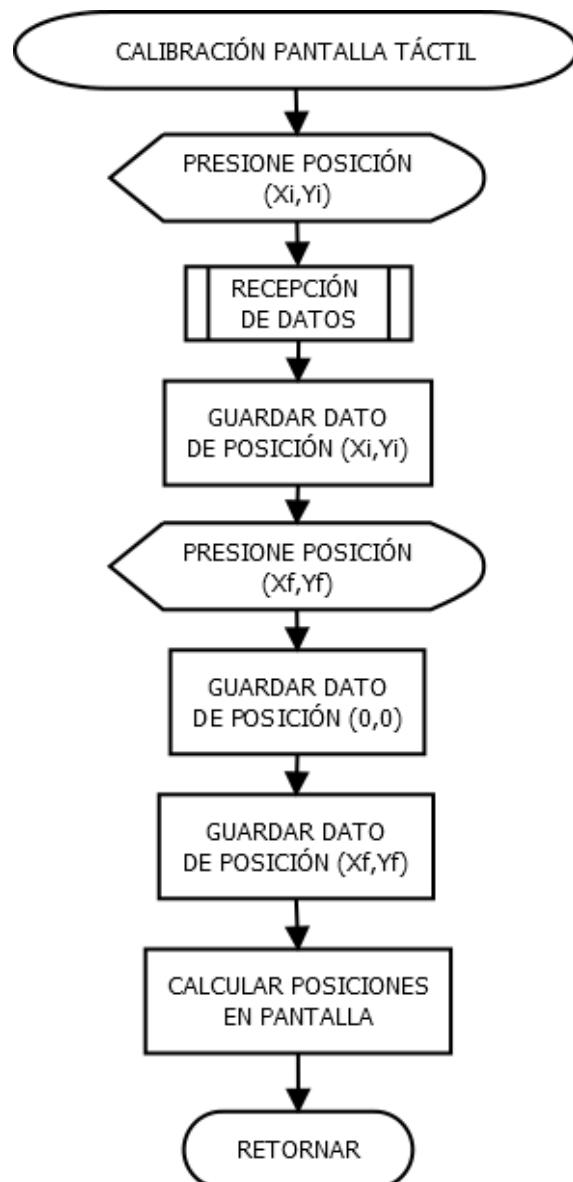


Figura 3.87: Diagrama de flujo de la subrutina de calibración de pantalla táctil

Fuente: El autor

3.10.6.9 Diagramas de flujo subrutinas calibración de velocidad

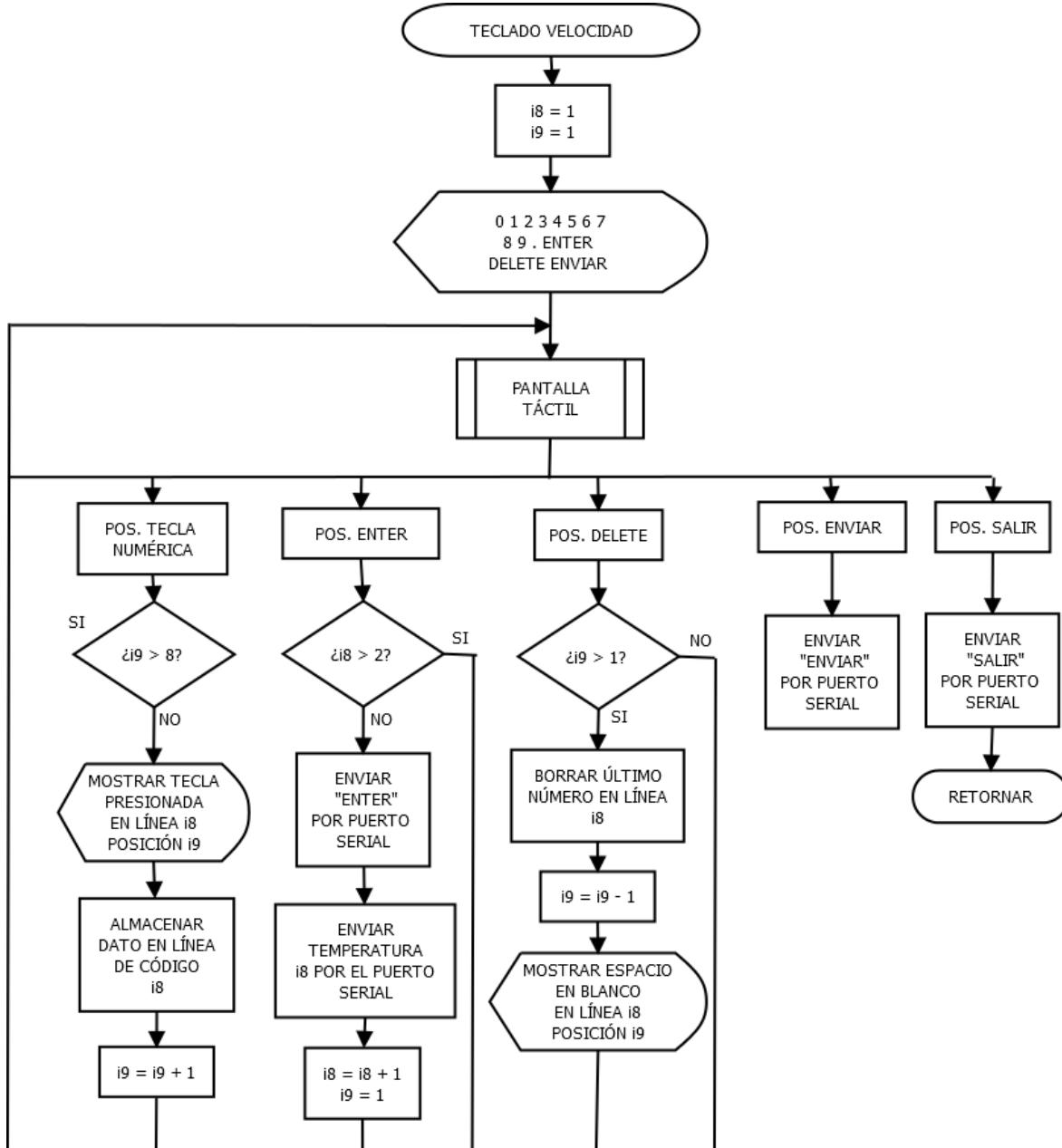


Figura 3.88: Diagrama de flujo de la subrutina de calibración velocidad 1

Fuente: El autor

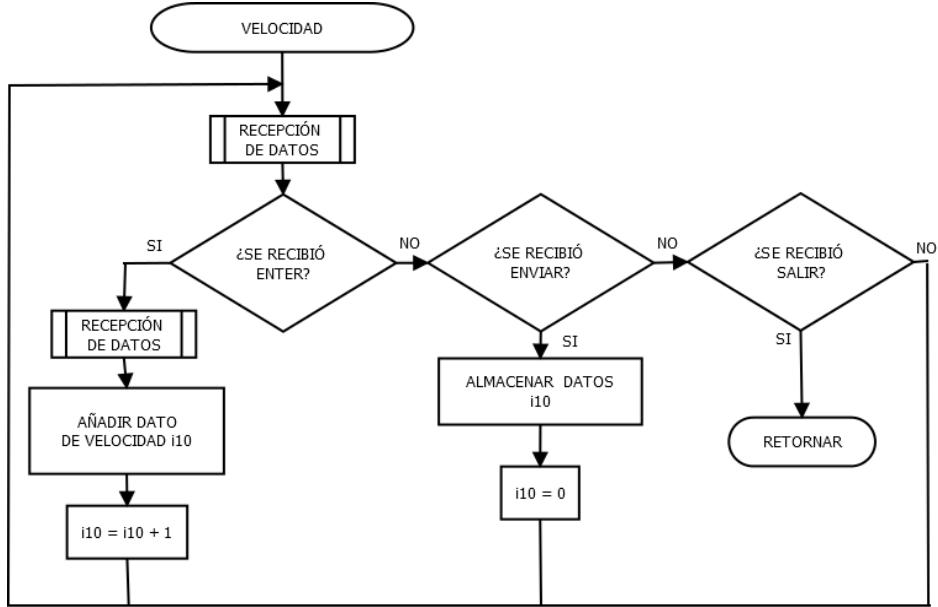


Figura 3.89: Diagrama de flujo subrutina de calibración velocidad 2

Fuente: El autor

La calibración de temperatura no se la realiza para evitar daños en accionamientos de modo manual. El usuario puede acceder a configurar datos de temperatura de la base de deposición y el extrusor mediante el programa de soporte ReplicatorG. Para mayor información, revisar en la siguiente sección de programa de soporte acerca de cómo crear perfiles de extrusión de la máquina y/o consulte el manual técnico de la máquina.

3.10.6.10 Diagrama de flujo subrutina sensores de posición

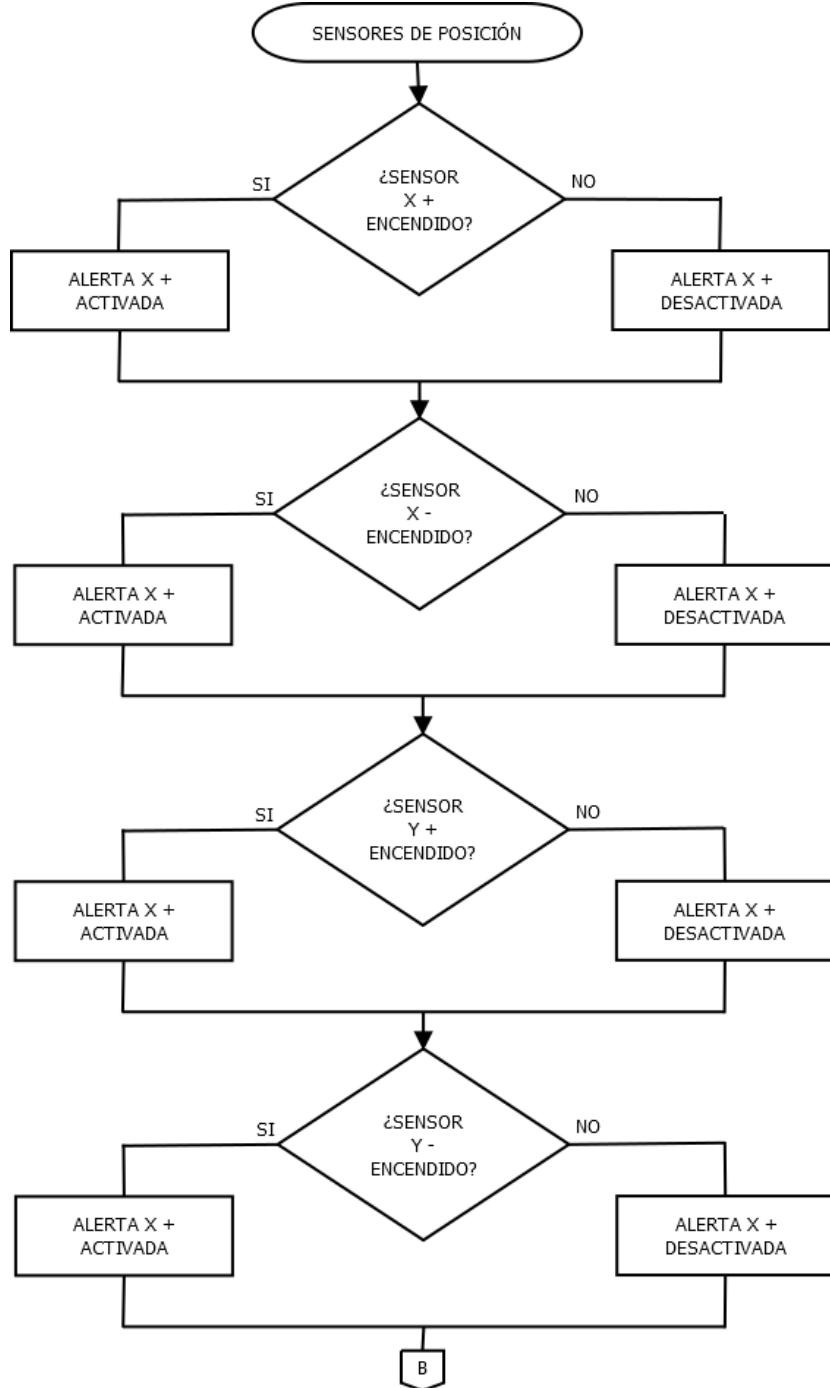


Figura 3.90: Diagrama de flujo de la subrutina sensores de posición 1

Fuente: El autor

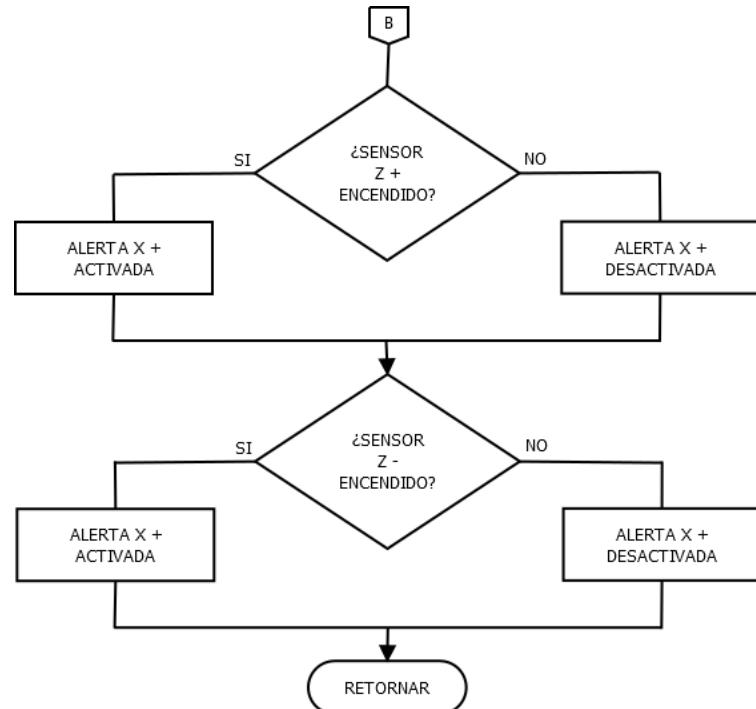


Figura 3.91: Diagrama de flujo subrutina sensores de posición 2

Fuente: El autor

3.10.6.11 Diagrama de flujo subrutina de comunicación

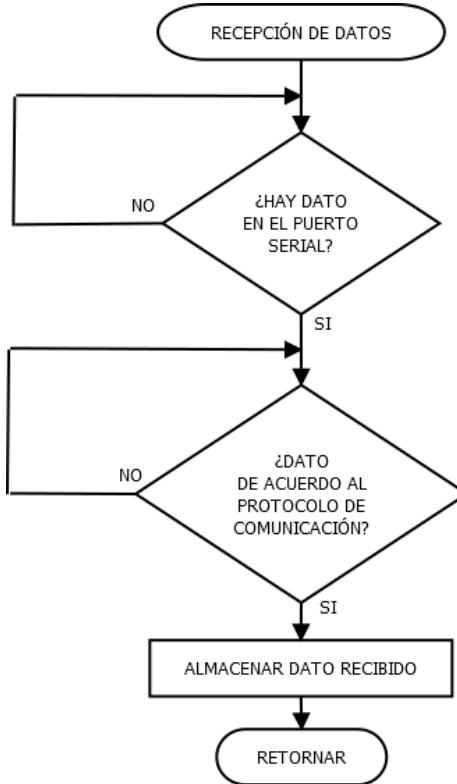


Figura 3.92: Diagrama de flujo de la subrutina de comunicación

Fuente: El autor

3.10.6.12 Diagrama de flujo subrutina contraseña

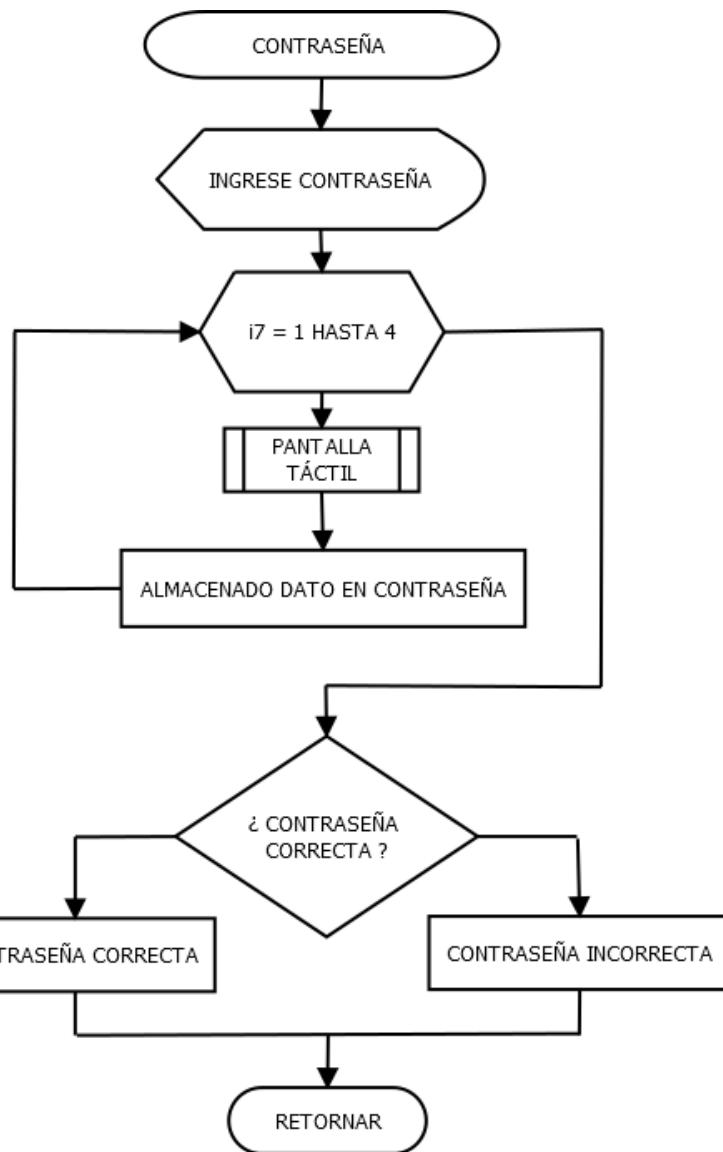


Figura 3.93: Diagrama de flujo de la subrutina contraseña

Fuente: El autor

3.10.6.13 Diagrama de flujo subrutina encerar

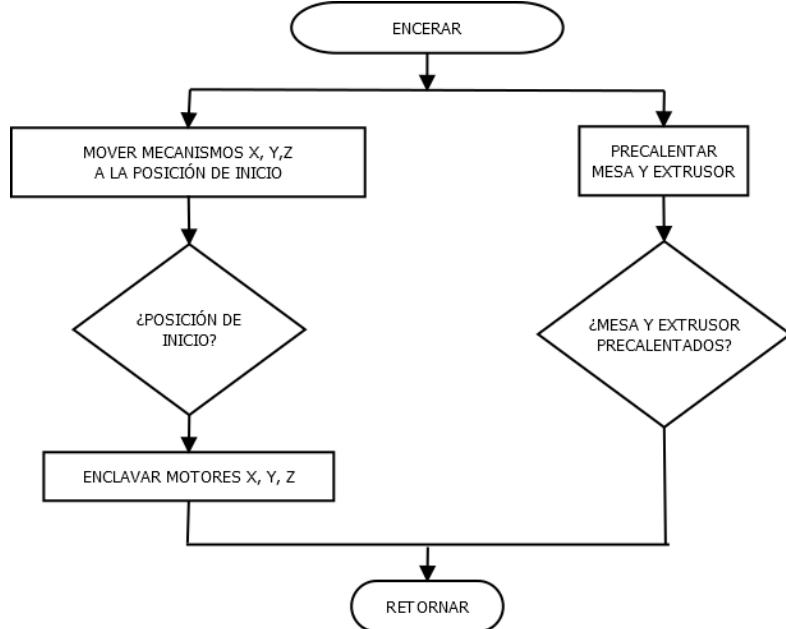


Figura 3.94: Diagrama de flujo subrutina encerar

Fuente: El autor

3.10.6.14 Diagrama de flujo subrutina pantalla táctil

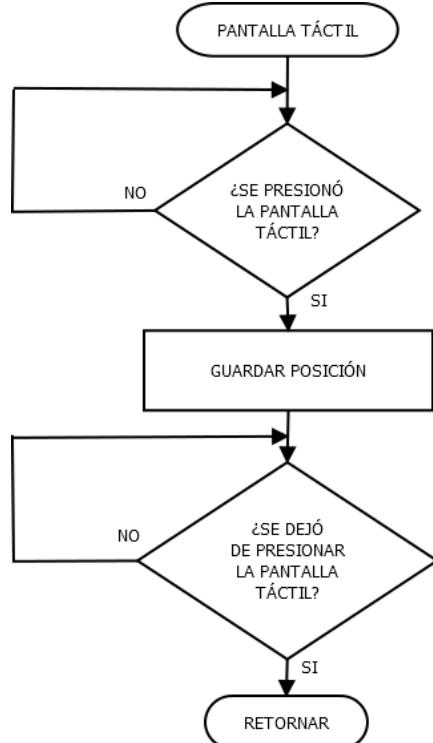


Figura 3.95: Diagrama de flujo de la subrutina pantalla táctil

Fuente: El autor

3.11 PROGRAMA DE SOPORTE

El programa de soporte ReplicatorG es la interfaz donde se realiza la conversión de código STL a código G para impresión en tres dimensiones, el cual se almacena en la memoria SD en formato TXT. El proceso que se lleva a cabo es el siguiente:



Figura 3.96: Proceso general para impresión 3D

Fuente: El autor

Para generar el modelo 3D se tiene varias opciones de programas comerciales y abiertos. Para convertir a código de impresión, ReplicatorG maneja internamente el programa Skeinforge, el cual es una cadena de herramientas compuesto de secuencias de comandos de lenguaje de programación Python.

3.11.1 CREACIÓN DEL PERFIL DE LA MÁQUINA

Antes de convertir a código G, se debe crear el perfil de la máquina y el perfil de extrusión de cada polímero (ABS y PLA) para que el programa ReplicatorG tome en cuenta los parámetros funcionales de la I3D V1.0 el momento de convertir a código G para impresión.

Para crear el perfil de la máquina se crea un archivo con el nombre de la máquina y la extensión XML “I3DV1.0.xml” donde se especifica lo siguiente:

- Carreras máximas de cada eje cartesiano.
- Velocidades máximas de cada eje cartesiano
- Extrusor basado en motor a pasos.
- Materiales de impresión ABS y PLA.
- Calentamiento de la mesa de deposición.

El archivo creado se almacena dentro de la carpeta “machines” que se encuentra en la carpeta donde se instaló el programa ReplicatorG. Una vez creado el perfil de la máquina, se puede seleccionar la I3D V1.0 desde la interfaz de usuario de ReplicatorG.

3.11.2 CREACIÓN DEL PERFIL DE EXTRUSIÓN

El perfil de extrusión debe ser creado para determinar los parámetros de extrusión de los materiales que imprime la I3D V1.0 así como definir el inicio y terminación del programa generado. Los perfiles de extrusión que contiene el programa para ABS y PLA pueden ser usados por la I3D V1.0.

Los programas de inicio y final para cada polímero se crean en un archivo “*.txt” y se almacenan en la carpeta de alteraciones siguiendo la ruta siguiente para el caso del ABS:

Replicatorg\skein_engines\skeinforge\skeinforge_application\prefs\I3D
ABS\alterations

El programa de inicio comprende lo siguiente:

- Identificador de código I3D V1.0.
- Precalentamiento de la base de deposición.
- Precalentamiento del mecanismo extrusor.

El programa de finalización contiene:

- Movimiento a posición de enfriamiento del modelo fabricado.
- Mover el extrusor en reversa un tiempo.
- Desactivar calentamiento de extrusor y base.
- Emitir señal de impresión finalizada.
- Enfriar el modelo fabricado.
- Emitir señal de modelo listo para ser retirado.

En el anexo 11 se indican los pasos completos a seguir para realizar una pieza siguiendo el proceso desde generar un sólido en el programa CAD 3D hasta su impresión.

CAPÍTULO 4.

CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

4.1 DESCOMPOSICIÓN DE ELEMENTOS DE LA MÁQUINA

Una vez realizados los cálculos de diseño y selección de materiales, se procede a la fabricación de los elementos de la máquina. A continuación se muestra una descomposición de los elementos principales que deben ser fabricados:

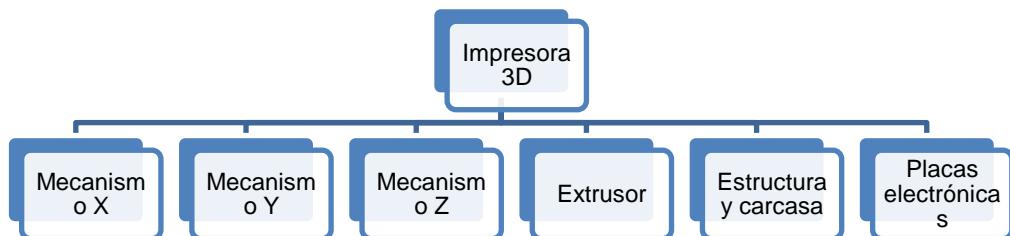


Figura 4.1: Descomposición de elementos a fabricar de la I3D V1.0

Fuente: El autor

El siguiente diagrama de flujo es una guía general que se implementa para la elaboración de todos los elementos de la máquina impresora 3D:



Figura 4.2: Diagrama de flujo para la construcción de la máquina

Fuente: El autor

4.2 CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS DEL MECANISMO DE MOVIMIENTO PARA EL EJE X

La figura 4.3 muestra los elementos del mecanismo X a construir:

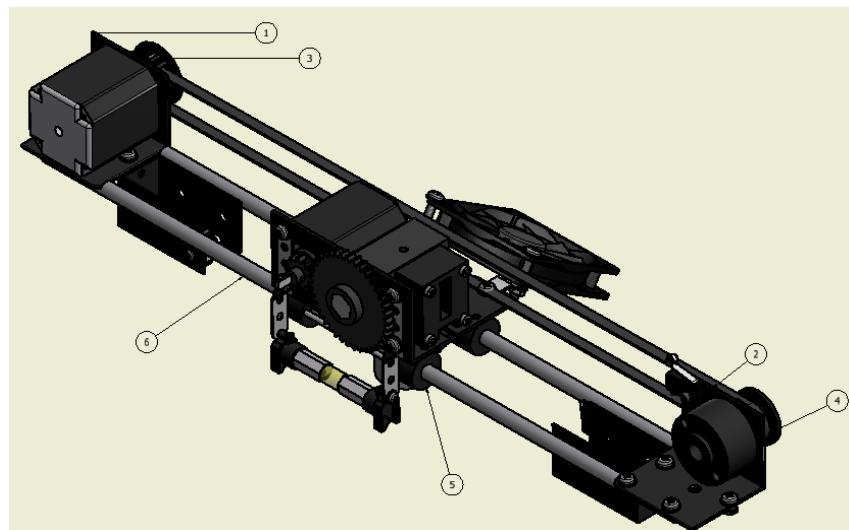


Figura 4.3: Elementos a construir en el mecanismo X

Fuente: El autor

Los elementos señalados por su número de pieza o número de norma se describen a continuación:

No. Norma	1	2	3	4	5	6
Elemento	Base para motor	Base polea libre	Polea dentada	Polea libre	Bujes x 4	Guías x 2

Tabla 4.1: Nombre de elementos del mecanismo X de acuerdo al número de norma

Fuente: El autor

Para llevar a cabo la construcción se utiliza:

Elementos	Máquinas	Herramientas	Medición	Material
Base para motor	Fresadora y plegadora	Broca, cuchilla, sierra de mano, lima, dobladora, marcador y granete	Flexómetro Calibrador	A-36
Base polea libre	Fresadora y plegadora	Broca, cuchilla, sierra de mano, lima, rayador, marcador y granete	Flexómetro Calibrador	A-36
Polea dentada	Torno y fresadora	Broca, cuchilla, machuelo y plato divisor	Calibrador	Duralón
Polea libre	Torno y fresadora	Broca, machuelo, cuchilla	Flexómetro	Duralón

		y sierra de mano	Calibrador	AISI 1040
Bujes	Torno, fresadora y taladro	Broca y machuelo	Flexómetro Calibrador	Teflón
Guías	Taladro	Sierra de arco, lima	Flexómetro	AISI 1040

Tabla 4.2: Máquinas, herramientas y materia prima para construcción de elementos del mecanismo X

Fuente: El autor

Para cada proceso de fabricación y montaje se asigna un código. Los procesos que se emplearon son los siguientes:

Proceso	Código
Fresar	FR
Tornear	TO
Machuelear	MAC
Cortar con sierra de mano	CS
Limar	LM
Taladrar con pedestal	TP
Medir	ME
Calibrar	CA
Trazar	TR
Marcar	MA
Doblar	DB
Pintar	PI

Tabla 4.3: Procesos para la elaboración del mecanismo X

Fuente: El autor

Para la contrucción de la polea libre, la secuencia de procesos es la siguiente:



Figura 4.4: Secuencia de procesos para fabricación de polea libre

Fuente: El autor

Para la contrucción de los bujes, se tiene:



Figura 4.5: Secuencia de procesos para fabricación de bujes

Fuente: El autor

La base que soporta la polea libre tiene la siguiente secuencia de fabricación:



Figura 4.6: Secuencia de procesos para fabricación de base soporte de polea libre

Fuente: El autor

La base que soporta los motores sigue la misma secuencia de procesos que la base de polea. Para fabricar la polea dentada se tiene:



Figura 4.7: Secuencia de procesos para fabricación de polea dentada

Fuente: El autor

Las guías siguen el proceso siguiente:



Figura 4.8: Secuencia de procesos para fabricación de guías

Fuente: El autor

4.3 CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS DEL MECANISMO DE MOVIMIENTO PARA EL EJE Y

Se elaboran bujes y se cortan las guías al igual que en el mecanismo X, además se tiene la plataforma de movimiento, el aislante térmico y la base de deposición de polímero como se muestra:

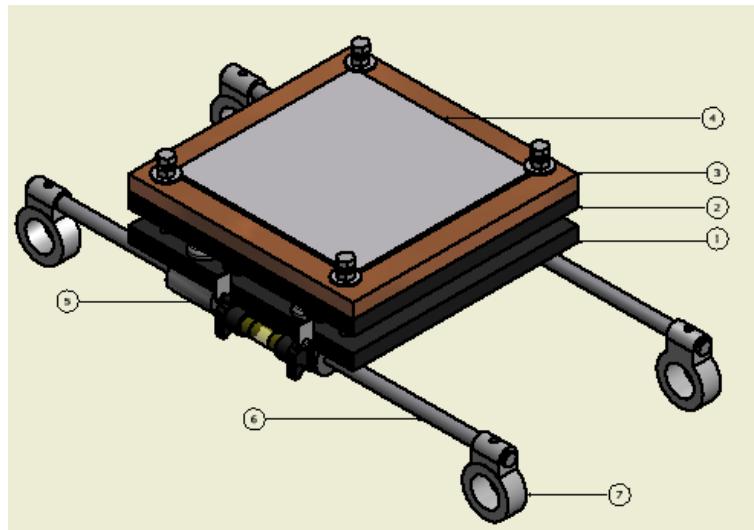


Figura 4.9: Elementos a construir en el mecanismo Y

Fuente: El autor

No. Norma	1	2	3	4	5	6	7
Elemento	Plataforma de movimiento	Caja de calentamiento	Aislante térmico	Base de deposición	Buje x 4	Guía x 2	Soportes para guías x 2

Tabla 4.4: Nombre de elementos del mecanismo Y de acuerdo al número de norma

Fuente: El autor

En la tabla 4.5 se indican sólo los elementos que no han sido descritos anteriormente.

Elementos	Máquinas	Herramientas	Medición	Material
Plataforma de movimiento	Taladro de pedestal	Sierra de mano, lija de agua, escuadra, marcador y broca	Flexómetro	MDF
Caja de calentamiento	Taladro de pedestal	Sierra de mano, lija de agua, escuadra, marcador y broca	Flexómetro	Fibra de vidrio
Aislante térmico	Taladro de pedestal	Sierra de mano, lija de agua, escuadra, marcador y broca	Flexómetro	MDF
Base de deposición	Taladro de pedestal	Tijeras de Tol	Flexómetro	Aluminio
Soportes para guías				

Tabla 4.54: Máquinas, herramientas y materia prima para construcción de elementos del mecanismo Y

Fuente: El autor

Los procesos que se emplean son los siguientes:

Proceso	Código
Cortar con sierra	CS
Lijar	LJ
Limar	LI
Escuadrar	ESC
Medir	ME
Marcar	MA
Pintar	PI
Taladrar	TP

Tabla 4.65: Procesos para la elaboración del mecanismo Y

Fuente: El autor

La elaboración de la plataforma, el aislante y la base de deposición siguen el proceso siguiente:



Figura 4.10: Secuencia de procesos para fabricación de elementos móviles eje Y

Fuente: El autor

Los soportes para guías siguen el proceso descrito a continuación:



Figura 4.11: Secuencia de procesos fabricación de soportes para guías del eje Y

Fuente: El autor

4.4 CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS DEL MECANISMO DE MOVIMIENTO PARA EL EJE Z

Para el mecanismo Z se fabrican 4 bujes similares a los del eje X y Y. En la figura 4.12 se muestran los elementos del componente a Z que se van a fabricar:

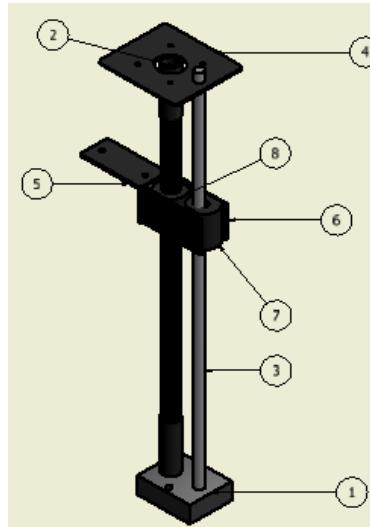


Figura 4.12: Elementos a construir en el mecanismo Z

Fuente: El autor

No. Norma	Elemento
1	Soportes para guías Z x 2
2	Acople de motor y tornillo x 2
3	Guía eje Z x 2
4	Base para motor Z x 2
5	Escuadra de unión x 2
6	Soporte para tuerca y buje x 2
7	Buje Z x 2

8

Tuerca Z x 2

Tabla 4.7: Nombre de elementos del mecanismo Z de acuerdo al número de norma

Fuente: El autor

Los elementos a fabricar no mencionados anteriormente se muestran en la tabla 4.8:

Elementos	Máquinas	Herramientas	Medición	Material
Soporte de guías y tornillos	Fresadora y torno	Broca Rayador Machuelo	Calibrador	Duralón
Acople de motor - tornillo	Torno y fresadora	Broca Machuelo Cuchilla	Calibrador	Duralón
Base para motor	Fresadora	Escuadra, broca, cuchilla, lima, sierra, rayador, marcador, granete	Calibrador	Tol negro (ST37)
Escuadra de unión	Fresadora y plegadora	Dobladora, broca, arco de sierra, machuelo, lima, rayador y marcador	Calibrador	Tol negro (ST37)
Soporte para tuerca y buje	Fresadora y plegadora	Arco de sierra, broca, machuelo, lima, rayador y marcador	Calibrador	Tol negro (ST37)
Tuerca para tornillo	Torno y fresadora	Broca, cuchilla, machuelo, rayador	Calibrador	Teflón

Tabla 4.8: Máquinas, herramientas y materia prima para construcción de elementos del mecanismo Z

Fuente: El autor

Los procesos que se emplean son los siguientes:

Proceso	Código
Fresar	FR
Tornear	TO
Cortar con sierra	CS
Cortar con arco de sierra	CAS
Doblar	DB
Limar	LI
Trazar	TR
Marcar	MA

Medir	ME
Calibrar	CA
Machuelear	MAC
Pintar	PI

Tabla 4.96: Procesos para la elaboración del mecanismo Z

Fuente: El autor

Las bases para los motores se fabrican de la siguiente manera:



Figura 4.13: Secuencia de procesos para fabricación de bases de motores eje Z

Fuente: El autor

Las tuercas de movimiento para los tornillos de potencia, los acoplos para unir el motor con el tornillo de potencia y los soportes para las guías y tornillos siguen la siguiente secuencia de procesos:



Figura 4.14: Secuencia de procesos para fabricación de elementos seleccionados eje Z

Fuente: El autor

La secuencia para fabricar los elementos que sostienen los bujes y tuercas (uno por cada tornillo) y que unen (escuadras de unión) el sistema con el carro X es:



Figura 4.15: Secuencia de procesos para fabricación de elementos de sujeción y unión del eje Z.

Fuente: El autor

4.5 CONSTRUCCIÓN ELEMENTOS DEL MECANISMO EXTRUSOR

Los elementos que se fabrican en el mecanismo extrusor son los siguientes:

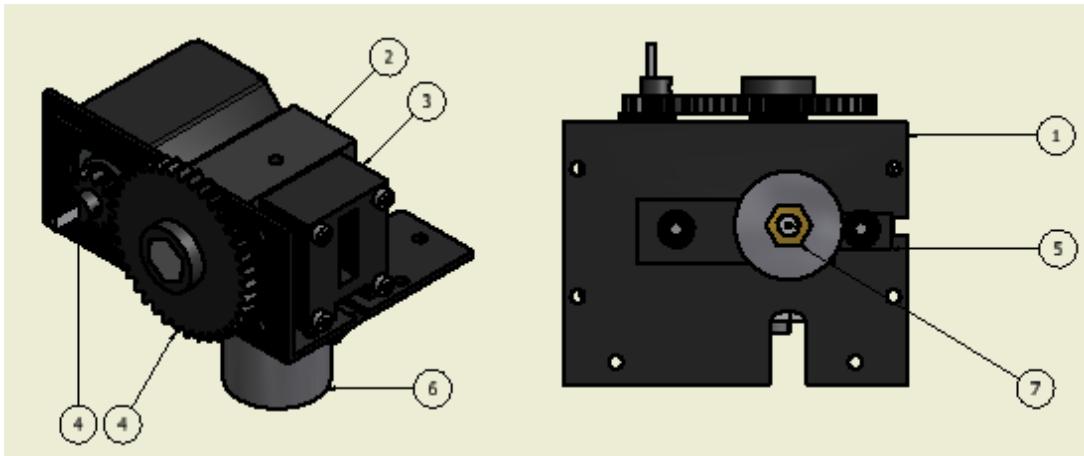


Figura 4.16: Elementos a construir del mecanismo extrusor

Fuente: El autor

No. Norma	Elemento
1	Soporte para extrusora
2	Estructura para rueda motriz 1
3	Estructura para rueda motriz 2
4	Reductora de engranes rectos
5	Sujetador de fundidor con extrusora
6	Cámara de aislamiento extrusora
7	Boquilla extrusora

Tabla 4.107: Nombre de elementos del extrusor de acuerdo al número de norma

Fuente: El autor

Elementos	Máquinas	Herramientas	Medición	Materia prima
Reductora	Torno y fresadora	Broca, cuchilla, machuelo y plato divisor	Calibrador	Nylon
Soporte extrusora	Fresadora Plegadora	Broca, machuelo, sierra de mano, lima, rayador, marcador, escuadra	Calibrador	Tol negro (ST37)
Estructura rueda motriz 1	Fresadora	Broca, machuelo, cuchilla y rayador	Calibrador	Duralón
Estructura rueda motriz 2	Fresadora	Broca, machuelo, cuchilla y rayador	Calibrador	Duralón
Sujetador fundidor-extrusor	Fresadora	Sierra de mano, lija de agua y broca	Calibrador	MDF

Tabla 4.11: Máquinas, herramientas y materia prima para construcción de elementos del extrusor

Fuente: El autor

Los procesos que se emplean son los siguientes:

Proceso	Código
Fresar	FR
Tornear	TO
Machuelear	MAC
Doblar	DB
Corte con Sierra	CS
Limar	LI
Trazar	TR
Marcar	MA
Calibrar	CA
Pintar	PI

Tabla 4.12: Procesos para la elaboración del mecanismo extrusor

Fuente: El autor

Para construir el mecanismo extrusor (estructuras de ruedas motrices), el sujetador, el piñón y el engrane se sigue la misma secuencia:



Figura 4.17: Secuencia de procesos para fabricación de elementos del extrusor

Fuente: El autor

Para fabricar el soporte del mecanismo extrusor se realiza:



Figura 4.18: Secuencia de procesos para fabricación de soporte del mecanismo extrusor

Fuente: El autor

4.6 CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA Y CARCASA

Como se mencionó antes, la máquina no requiere un esfuerzo mayor en la construcción, la estructura no debe construirse sino solo montarse a partir de varillas roscadas y sujetadores. Solo las varillas roscadas de la estructura serán requeridas ser cortadas y se sigue el procedimiento descrito para cortar las guías. Los demás elementos a fabricarse se muestran en la figura 4.19.

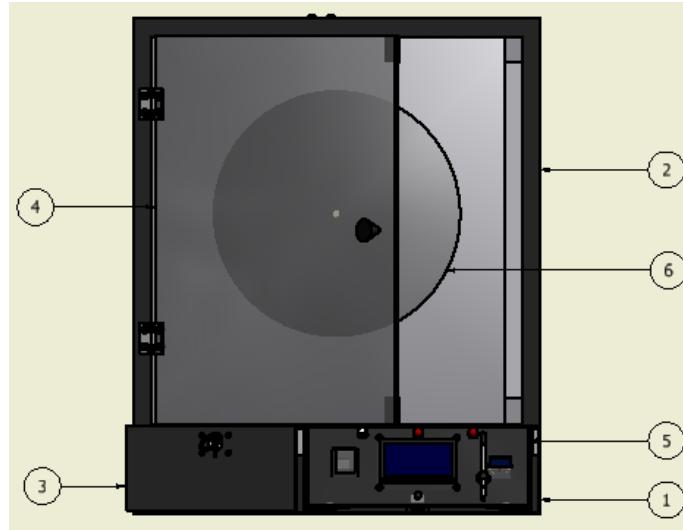


Figura 4.19: Elementos a construir de la carcasa

Fuente: El autor

No. Norma	1	2	3	4	5	6
Elemento	Base	Carcasa	Cajón	Compuerta	Interfaz HMI	Carrete

Tabla 4.13: Nombre de elementos de la carcasa de acuerdo al número de norma

Fuente: El autor

Elementos	Máquinas	Herramientas	Medición	Materia prima
Base	Fresadora Mototool Plegadora	Broca, cizalla, disco de corte, marcador y lima	Flexómetro	Tol galvanizado
Carcasa	Mototool Plegadora	Broca, cizalla ,marcador y lima		Tol negro alvanizado
Cajón	Soldadora	Cizalla, dobladora y marcador	Flexómetro	Tol negro galvanizado
Compuerta	Cortadora Láser			Acrílico
Interfaz HMI	Cortadora Láser			Acrílico
Carrete	Cortadora Láser			Acrílico

Tabla 4.14: Máquinas, herramientas y materia prima para construcción de elementos de la carcasa

Fuente: El autor

Los procesos que se emplean son los siguientes:

Proceso	Código
Fresar	FR
Cortar con mototool	CS
Cizallar	CZ

Soldar	SD
Doblar	DB
Cortar con laser	CL
Medir	ME
Marcar	MA
Macillar	MC
Calibrar	CA
Limar	LI
Pintar	PI

Tabla 4.15: Procesos para la elaboración de la carcasa

Fuente: El autor

La secuencia de procesos para realizar la base y carcasa se indica a continuación:



Figura 4.20: Secuencia de procesos para fabricación de base y carcasa

Fuente: El autor

Para el cajón se tiene:



Figura 4.21: Secuencia de procesos para fabricación del cajón

Fuente: El autor

Para realizar el elemento que soporta la interfaz HMI, el carrete y la compuerta, se cortan los elementos diseñados mediante una cortadora láser computarizada y se une los elementos con brujita para el caso de la interfaz y el carrete.

4.7 CONTRUCCIÓN DE PLACAS ELECTRÓNICAS

Para la fabricación de las placas electrónicas se siguió el esquema siguiente:

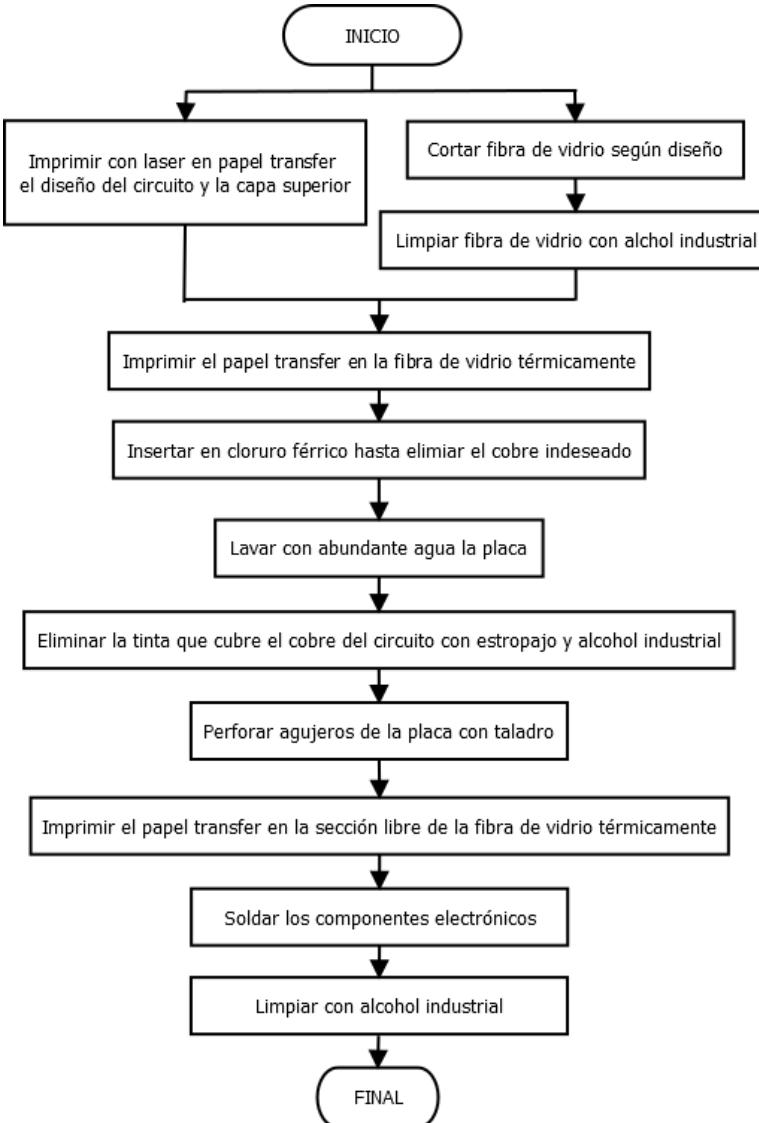


Figura 4.22: Diagrama de flujo para fabricación de placas electrónicas

Fuente: El autor

Las placas se elaboran en fibra de vidrio debido a su calidad y economía. Las máquinas y herramientas necesarias para cada etapa se señalan a continuación:

Proceso	Herramientas	Máquinas
Imprimir en papel transfer		Impresora láser
Cortar fibra de vidrio	Sierra de mano y lima plana	
Limpiar fibra de vidrio	Cepillo pequeño y alcohol industrial	
Imprimir en fibra de vidrio		Plancha
Eliminar cobre	Cloruro férrico, agua	

	hirviendo y caja de plástico	
Eliminar tinta de las pistas	Estropajo de metal y alcohol industrial	
Perforar huecos	Brocas	Motool
Soldar componentes electrónicos	Estaño, pasta para soldar Y tenazas	Cautín 40 W

Tabla 4.16: Máquinas y herramientas para elaborar las placas electrónicas

Fuente: El autor

Las placas electrónicas fabricadas se muestran en el anexo 9.

4.8 MONTAJE

Una vez construidos y seleccionados los elementos de la I3D V1.0, se montan los elementos atornillando, ajustando y nivelando. En la tabla 4.17 se asigna un código a cada actividad requerida:

Código	Actividad	Herramientas e instrumentos
A1	Preparación de herramientas	
A2	Preparación de elementos	
A3	Ensamblaje de estructura	Llave de 3/4, nivelador
A4	Instalación de interfaz HMI en la base	Destornillador estrella
A5	Instalación de estructura en la base	Llave de 3/4, nivelador
A6	Instalación de elementos electrónicos en la base	Destornillador estrella
A7	Ensamblaje mecanismo X	Llaves allen, destornilladores
A8	Instalación mecanismo X en el mecanismo Z	Destornilladores
A9	Ensamblaje mecanismo Y	Llaves allen, destornilladores
A10	Instalación mecanismo Y en la estructura	Destornilladores
A11	Ensamblaje mecanismo Z	Llaves allen, destornilladores
A12	Instalación mecanismo Z en la estructura	Llaves allen, destornilladores
A13	Ensamblaje extrusor	Llaves allen, destornilladores
A14	Instalación del extrusor en el mecanismo X	
A15	Conexión de cableado dentro de la máquina	
A16	Nivelación base con extrusor	Nivelador, llaves allen
A17	Ensamblaje de carcasa	Destornilladores
A18	Colocación de rollo de polímero	
A19	Instalación de carcasa en máquina	Destornilladores
A20	Coger fallas de pintura	Pintura en lata, pincel

A21	Aceitar	Aceite 3 en 1
A22	Engrasar	Grasa multipropósito
A23	Limpieza	Wiphes
A24	Conexión eléctrica	
A25	Puesta en marcha	

Tabla 4.17: Actividades y herramientas para el montaje mecánico

Fuente: El autor

Para llevar a cabo el ensamblado y puesta en marcha se sigue el proceso señalado en base a la simbología siguiente:

Actividad	Símbolo
Inicio	▽
Operación	○
Verificación	□
Fin	△

Tabla 4.18: Simbología de montaje

Fuente: El autor

El proceso se describe a continuación:

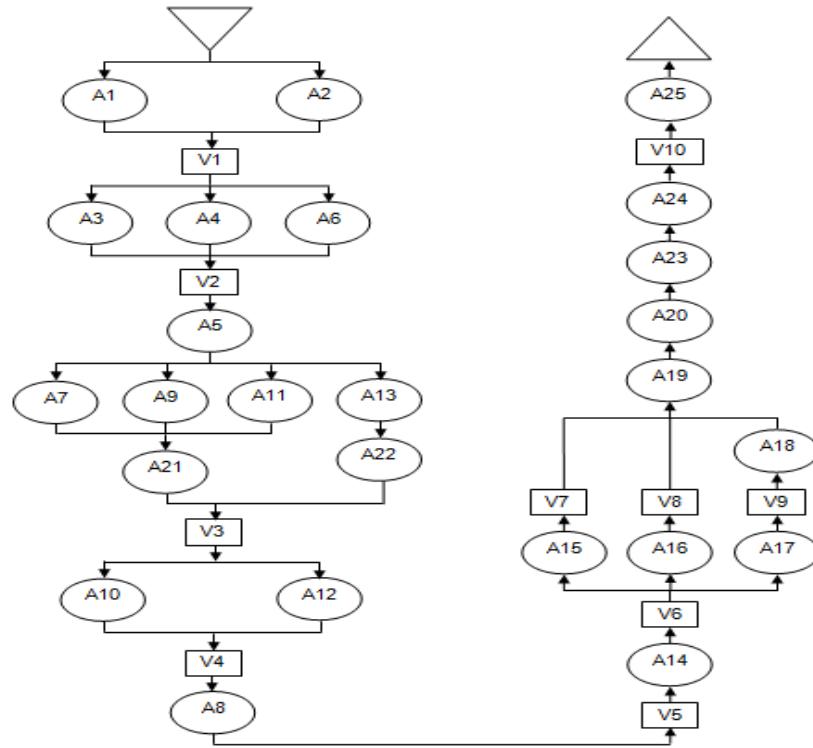


Figura 4.23: Diagrama de flujo de montaje de la I3D V1.0

Fuente: El autor

En el anexo 10 se muestran los elementos construidos y se indica su procedimiento de montaje con fotos. La impresora 3D fabricada y ensamblada se muestra en la figura 4.24:

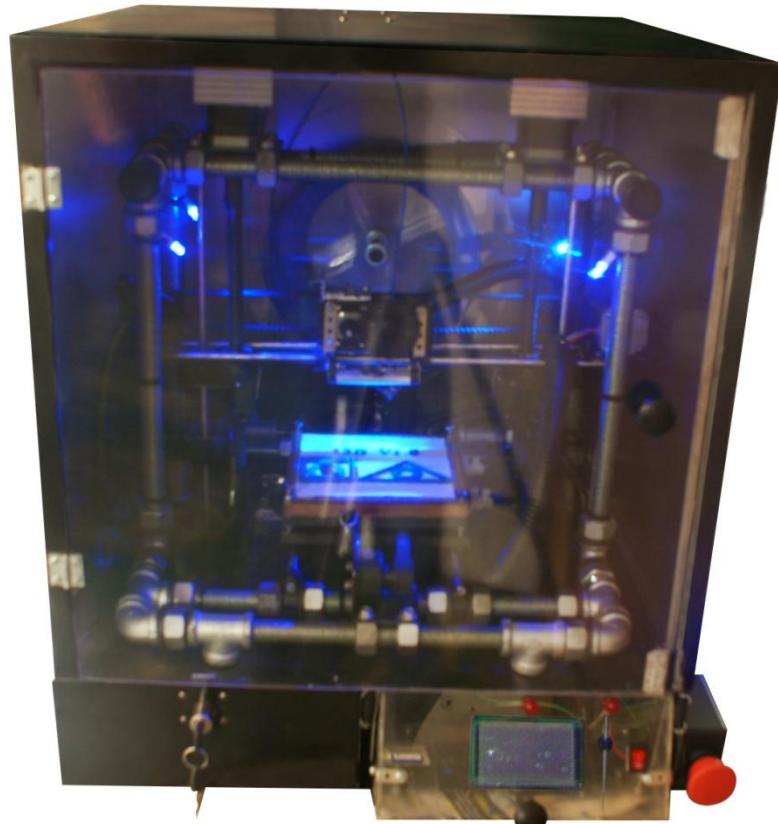


Figura 4.24: Montaje final de la I3D V1.0

Fuente: El autor

La impresión de piezas se puede apreciar a continuación:



Figura 4.25: Impresión de modelos de la I3D V1.0

Fuente: El autor

En la figura 4.26 se muestran algunas piezas fabricadas por la I3D V1.0

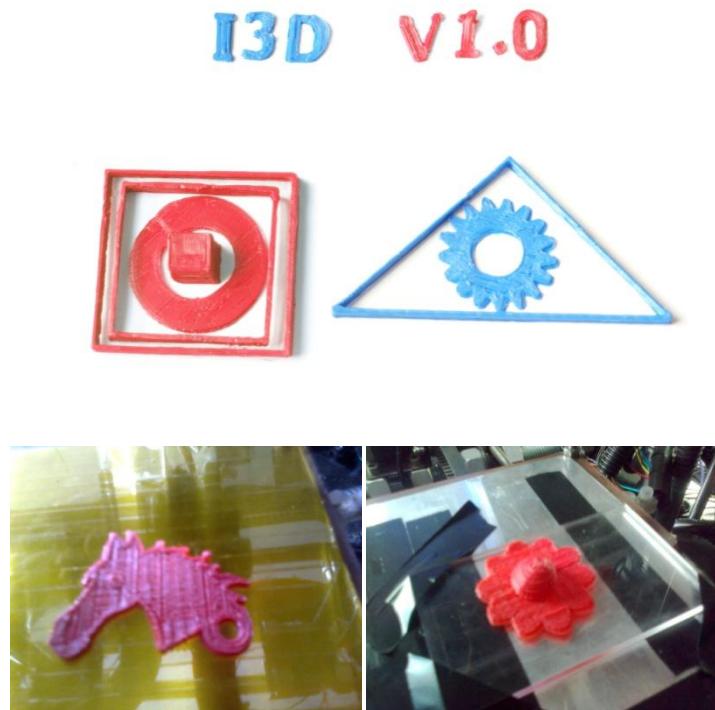


Figura 4.26: Modelos impresos por la I3DV1.0

Fuente: El autor

CAPÍTULO 5.

COSTOS, PRUEBAS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 COSTOS

El objetivo es determinar el costo total de realización de la máquina tomando en cuenta sus costos directos y costos indirectos.

5.1.1 COSTOS DIRECTOS

Para determinar el costo total directo se considera:

- Costo de materia prima para la construcción de la máquina
- Costo de elementos adquiridos.
- Costo de maquinado

El costo de montaje se lo considera indirecto ya que no se requiere mano de obra externa y no se realiza en taller por lo cual se incluye en el costo de ingeniería.

5.1.1.1 Costos de materia prima

Los costos de materia prima se reflejan en la tabla 5.1:

MATERIAL	COSTO [USD]
Eje de duralón $\phi = 42$ [mm], L = 140 [mm]	5.80
Eje de duralón $\phi = 21$ [mm], L = 136 [mm]	1.46
Eje de duralón $\phi = 26$ [mm], L = 180 [mm]	2.90
Eje de duralón $\phi = 16$ [mm], L = 100 [mm]	0.63
Eje de teflón $\phi = 25$ [mm], L = 15 [mm]	1.32
Eje de teflón $\phi = 57$ [mm], L = 15 [mm]	6.56
Plancha duralón e = 27 [mm], 48X35 [mm]	1.61
Plancha duralón e = 22 [mm], 31X35 [mm]	0.85
Plancha de acero e= 1.6 [mm], 800X500 [mm]	7.40
Plancha de tol galvanizado e = 2[mm], 1220X2440[mm]	54.87
Eje AISI 1018 $\phi = 5/16$ [mm], L = 2500 [mm]	18.57
Plancha MDF e = 10 [mm], 50X50 [mm]	3.00
Plancha aluminio e = 2 [mm], 150X150 [mm]	7.50
Plancha acrílico e = 3 [mm], 900X280 [mm]	15.27
Plancha acrílico e = 3 [mm], 415 X 440 [mm]	11.00
Plancha fibra de vidrio laminada lado simple	25.00
TOTAL	163.74

Tabla 5.18: Costos de materia prima

Fuente: Proveedores varios.

5.1.1.2 Costos de elementos seleccionados

En la tabla 5.2 se presentan los costos de elementos adquiridos.

ELEMENTO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO [USD]	VALOR TOTAL [USD]
Nivel de burbuja plástico	1	1.43	1.43
Nivel de burbuja aluminio	1	3.92	3.92
Entenalla con tornillos de potencia	2	10.98	21.96
Garrucha 1.5 pulg., 15 Kg	2	0.82	1.64
Bisagra 1.5 pulg. galvanizada	2	0.67	1.34
Riel de puerta	1	7.10	7.10
Tope magnético interior	2	1.46	2.92
Varilla Roscada ¾ x 36 pulg	4	7.29	29.16
Codo H.G. ½ pulg X 90	4	0.24	0.96
Tee H.G ½ pulg	16	0.34	5.44
Tuerca de acero SAE UNC 3/4	44	0.40	17.60
Rodela plana acero SAE UNC 3/16	14	0.02	0.28
Rodela de presión acero SAE UNC 3/16	4	0.02	0.08
Banda de sincronización 390XL037	2	6.57	13.14
Aditivo compuesto cerámico	1	3.58	3.58
Rollo de alambre de nicromo 30 AWG	1	3.50	3.50
Alambre de nicromo 24 AWG	1	8.25	8.25
Tornillería varios	1	10.00	10.00
Motor a pasos Nema 17	5	25.00	125.00
Pantalla gráfica 128X64	1	28.00	28.00
Malla táctil 128X64	1	15.27	15.27
Lapiz de pantalla táctil	1	4.25	4.25
Memoria SD - MMC	1	17.90	17.90
Zócalo memoria SD - MMC	1	3.00	3.00
Pulsante de parada	1	2.69	2.69
Atmega644P	2	12.50	25.00
Resistencia ½ W	32	0.03	0.96
Capacitores cerámicos	6	0.10	0.60
Capacitor electrolítico 470 uF	7	0.25	1.75
Controlador de micropasos Pololu A4988	5	20.00	100.00
Cristal de cuarzo 16 MHz	2	0.10	0.20
Potenciómetro trimmer 2K	2	0.25	0.50
Sensores de final de carrera	6	2.15	12.90
Amplificador de instrumentación AD620	2	9.80	19.60
Sensor de temperatura resistivo PT100	2	10.50	21.00
Diodo 1N4001	1	0.10	0.10
Mosfet IRFZ44N	2	1.15	2.30
Transistor TIP 31C	1	0.75	0.75
Ventilador 12VDC 80x80 iluminación led	1	15.10	15.10
Ventilador 12VDC 100x100	1	8.00	8.00
Led azul 5 alto brillo	6	0.12	0.72
Led 10 alto brillo rojo	2	0.15	0.30
Led 10 alto brillo balnco	1	0.25	0.25
Chicharra	1	0.65	0.65
Pulsador	2	0.25	0.50
Interruptor manual	1	0.30	0.30

Fuente conmutada ATX 750	1	19.64	19.64
Zócalo 16 pines	2	0.14	0.28
Zócalo 40 pines	2	0.20	0.40
Bornera 2 pines	3	0.85	2.55
Bornera 3 pines	2	1.00	2.00
Bornera para cable (12 unidades)	3	1.39	4.17
Conector molex 2 pines	26	0.20	5.20
Conector molex 3 pines	22	0.25	5.50
Conector molex 4 pines	2	0.40	0.80
Conector molex 6 pines	1	0.50	0.50
Baquelita perforada 7X5	1	0.75	0.75
Juego de 24 espaldines	2	0.50	1.00
Cable UTP flexible metro	4	0.80	3.20
Tubo anillado flexible ½ pulg	4	0.20	0.80
Organizador de cable ½ pulg	1	5.54	5.54
Rollo ABS 1.75mm 1 lb	1	45.00	45.00
Rollo PLA 1.75mm 1 lb	1	45.00	45.00
Otros	1	10.00	10.00
		TOTAL	692.22

Tabla 5.2: Costos de elementos seleccionados

Fuente: Proveedores varios

5.1.1.3 Costos de maquinado

Se considera el costo de uso de maquinaria en el taller:

MÁQUINA	COSTO [USD/h]	TIEMPO [h]	COSTO TOTAL [USD]
Torno	6.00	12	72.00
Fresa	8.00	16	128.00
Cizalla	4.00	0.33	1.33
Taladro de pedestal	4.00	1.5	6.00
Dobladora	3.00	0.5	1.50
Soldadora	3.00	0.16	0.50
Cortadora láser	60.00	0.06	4.00
		TOTAL	213.33

Tabla 5.3: Costos de maquinado

Fuente: Mecánica Industrial Abel

5.1.1.4 Costo total directo

TIPO	COSTO [USD]
Materia prima	163.74
Elementos seleccionados	692.22
Maquinado	213.33
TOTAL	1069.29

Tabla 5.4: Costo total directo

Fuente: El autor

5.1.2 COSTOS INDIRECTOS

Para determinar el costo total indirecto se considera:

- Costo de materiales consumibles
- Costo ingeniería.
- Costo de imprevistos.

5.1.2.1 Costos de materiales consumibles

TIPO	CANTIDAD	COSTO UNITARIO [USD]	COSTO TOTAL [USD]
Electrodo E6011 1/8 pulg	1	4.23	4.23
Lija para metal	2	0.62	1.24
Lija de agua	2	0.49	0.98
Aceite 3 en 1 30 ml	1	0.97	0.97
Pintura en lata	4	2.74	10.96
Loctite super bonder	1	3.72	3.72
Grasa Marfak Multipurpose 13 oz	1	3.48	3.48
Papel contact, metro	1	1.40	1.40
Aceite jhonson 50ml	1	0.20	0.20
Whipe de hilo	8	0.32	2.56
Taipe eléctrico 9M	2	0.57	1.14
Pasta para soldar	1	3.10	3.10
Cloruro férrico funda	8	0.28	2.24
Papel transfer	3	0.75	2.25
Alcohol industrial 1l	1	1.25	1.25
Rollo de estaño	1	5.60	5.60
Thiñer	1	1.50	1.50
TOTAL			46.82

Tabla 5.5: Costo materiales consumibles.

Fuente: Proveedores varios

5.1.2.2 Costos de ingeniería

Los costos de ingeniería corresponden al tiempo empleado en el diseño, selección y montaje de los componentes de la máquina impresora 3D. Para un costo por hora de 20 USD y un tiempo de realización del diseño de la máquina de 120 horas y de montaje de 10 horas se tiene un costo de 2600 USD.

5.1.2.3 Costos de imprevistos

Los costos imprevistos corresponden a la movilización de personas, transporte de materiales, impresión de planos y papelería en general. Se estima un costo de 30 [USD].

5.1.2.4 Costos total indirecto

El costo total indirecto de la máquina es:

TIPO	COSTO [USD]
Materiales consumibles	46.82
Ingeniería	2600.00
Imprevistos	30.00
Total	2676.82

Tabla 5.6: Costo total indirecto

Fuente: El autor

5.1.3 COSTO TOTAL DEL PROYECTO

El costo total del proyecto corresponde a la suma de los costos directos con los indirectos.

COSTOS	COSTO [USD]
DIRECTOS	1069.29
INDIRECTOS	2676.82
Total	3746.11

Tabla 5.79: Costo total del proyecto

Fuente: El autor

5.2 PRUEBAS Y RESULTADOS

De acuerdo al protocolo de pruebas diseñado se procese a realizar la toma de datos para sacar las conclusiones respectivas.

5.2.1 TOLERANCIAS DE PIEZAS REGULARES

Primero se crea el modelo CAD con el cual se va a comparar las medidas físicas tomadas de la pieza fabricada. Se diseña un cubo con aristas de 10 milímetros como se muestra en la figura 5.1.

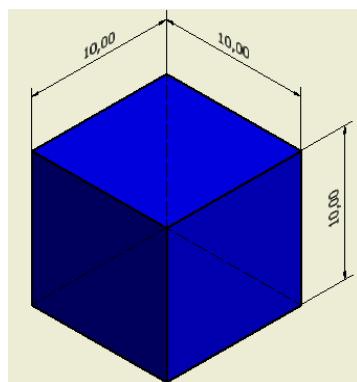


Figura 5.1: Modelo CAD del cubo de prueba

Fuente: El autor

Se exporta el archivo en formato “*.stl” y se lo abre con el programa ReplicatorG donde se genera el código G 3D que se descarga a la memoria externa. (Leer el manual de uso o consultar el anexo 11 para información más detallada). Insertamos la memoria y fabricamos una muestra de 10 piezas. Los valores seleccionados en la ventana “Generar código G” del programa replicatorG para el PLA y ABS fueron los siguientes:

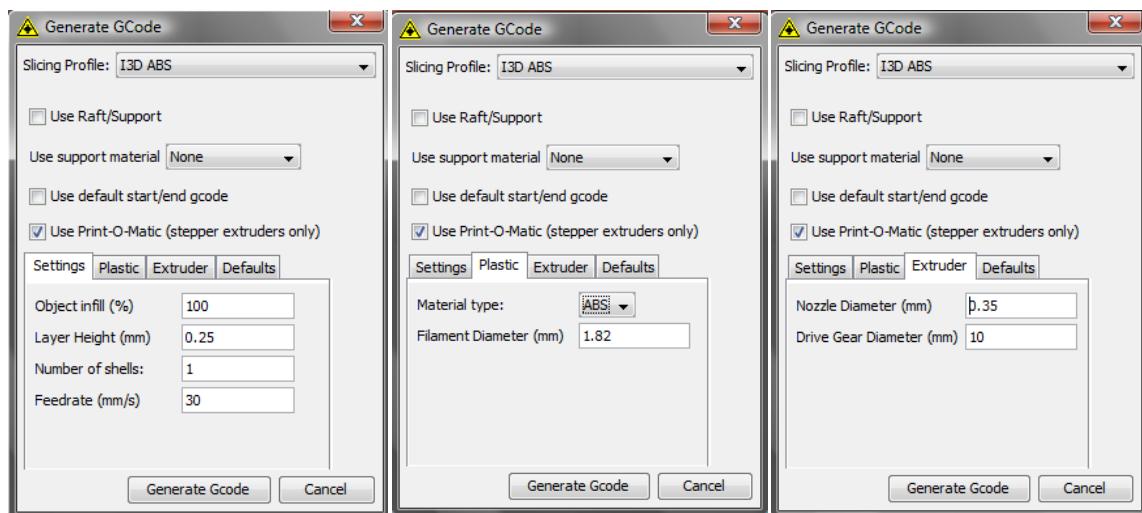


Figura 5.2: Características seleccionadas para fabricar el cubo de prueba

Fuente: El autor

En el manual de usuario se explican los significados de cada pestaña. Mediante un calibrador o pie de rey se procede a medir la muestra para obtener las tolerancias.



Figura 5.3: Medición con calibrador del cubo de prueba

Fuente: El autor

En la tabla 5.8 se muestran los valores obtenidos:

No. Prueba	ABS			PLA		
	Longitud X	Longitud Y	Longitud Z	Longitud X	Longitud Y	Longitud Z
Prueba 1	10.38	10.15	9.87	10.48	9.9	9.8
Prueba 2	10.36	10.32	9.9	10.75	10.21	10.4
Prueba 3	9.88	10.63	10.27	10.32	10.63	10.35
Prueba 4	10.63	9.84	10.38	10.87	9.89	10.47
Prueba 5	10.48	9.98	10.23	10.46	10.36	10.33
Prueba 6	9.9	10.12	10.69	10.32	10.65	10.43
Prueba 7	10.8	10.63	10.33	10.93	10.2	10.53
Prueba 8	10.67	9.9	10.62	10.32	10.23	10.43
Prueba 9	10.32	9.85	9.98	10.54	9.74	10.31
Prueba 10	10.29	10.28	10.24	10.33	10.12	10.87
Total	103.71	101.7	102.51	105.32	101.93	103.92
Promedio	10.371	10.17	10.251	10.532	10.193	10.392
Tolerancia	0.371	0.17	0.251	0.532	0.193	0.392

Tabla 5.810: Pruebas y tolerancias en pieza regular

Fuente: El autor

Entonces, la I3D opera con tolerancias mayores a 0.17 milímetros aproximadamente en cada eje. Esto se debe principalmente al error por acumulación que posen los motores paso a paso cuando se realiza control en lazo abierto.

En caso de no obtenerse los resultados deseados se procede a medir la perpendicularidad de la boquilla con la mesa de deposición, así como a verificar los niveles de burbujas y se vuelve a realizar la prueba.

5.3 CONCLUSIONES

- Se cumplieron los objetivos planteados en el inicio del proyecto obteniendo resultados satisfactorios.
- A excepción del polímero en estado de alambre sólido y la punta del extrusor, se logró adquirir los demás elementos en el mercado nacional con lo cual se abarataron costos.
- La información recopilada en proyectos que operan bajo código abierto fue de gran utilidad para desarrollar el proyecto.

- El análisis y la selección de las alternativas más adecuadas para el proyecto planteado fueron de gran utilidad, ya que permitieron realizar un diseño viable y técnicamente fundamentado.
- El desarrollo de maquinaria CNC de bajo costo en el Ecuador es factible y la empresa privada debería invertir en su implementación.
- Muchas empresas de la pequeña y mediana industria se pueden beneficiar de su uso para automatizar procesos, reducir el costo y mejorar la calidad de fabricación.
- Para la implementación de la I3D V1.0 en el mercado nacional, en la construcción de futuras versiones se debe mejorar los niveles de tolerancias en construcción y la tecnología electrónica usada.
- El uso de una interfaz amigable para el usuario es beneficioso para la implementación de la I3D V1.0 porque permite interactuar de una manera fácil e intuitiva al usuario.
- Usar memorias externas para almacenar los códigos de los elementos a fabricar evita la necesidad de poseer una computadora para cada máquina, con lo cual se optimiza espacio y dinero.
- Por medio de programas de código abierto se pueden implementar sistemas más económicos que permitan trabajar libremente sin estar restringidos a licencias de programas costosos.
- Con el fin de imprimir geometrías más complejas se debería aumentar un segundo extrusor para que coloque material de soporte.
- Para mejorar la calidad de impresión de la máquina, se debe usar servomotores de giro completo AC o DC, dependiendo de la potencia a transmitir, los cuales son más precisos y presentan menos vibraciones.

5.4 RECOMENDACIONES

- Para un manejo óptimo de la máquina se recomienda revisar el manual de usuario y operaciones.
- El almacenamiento de la máquina debe realizarse en ambientes secos, libres de polvo y a temperatura ambiente, evitando los rayos ultravioletas provenientes del sol.

- Para operar la máquina se debe cerrar la compuerta por motivos de seguridad.
- No topar con dedos grasos la base de deposición de material. En caso de hacerlo, limpiar la superficie antes de imprimir para permitir una correcta adherencia del polímero en la primera capa.
- No topar la base de deposición ni el mecanismo extrusor cuando los indicadores de temperatura se encuentren encendidos.
- En caso de emergencia usar el pulsante de parada ubicado al extremo derecho de la máquina.
- Realizar el mantenimiento preventivo de la máquina.
- Almacenar el polímero en forma de alambre sólido en caso de no usarlo por tiempos prolongados y mantenerlo en óptimas condiciones.
- Usar los niveladores de burbuja para mantener siempre la perpendicularidad del extrusor con la mesa de deposición de material.
- Se recomienda que la Universidad Internacional de Ecuador desarrolle tecnología de código abierto, la cual aportará a bajar costos de maquinaria en el mercado nacional y apoyará a la implementación de tecnologías no accesibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Frank W. Liou, Rapid Prototyping and Engineering Applications (USA: Taylor & Francis Group).
2. Andreas Gebhardt, Rapid Prototyping (USA y Canadá: Hanser Gardner Publications, Inc.).
3. Carles Riba Romeva, Diseño Concurrente (Barcelona, Ediciones UPC)
4. Walter Micheli, Extrusion Dies for Plastics and Rubber (Munich: Hanser Publishers).
5. Anna Bellini: Fused Deposition of Ceramics, Tesis de doctorado.
6. Robert L. Mott, Diseño de elementos de máquinas (Mexico: Pearson Education).
7. Vallenberger, Norman Weston, Natural Fibers, Plastics and Composites (USA: Kluwer Academic Publishers).
8. Kotiba Hamad, Mosab Kaseem, Fawaz Deri, Melt Rheology of Poly(Lactic Acid)/Low Density Polyethylene Polymer Blends. Faculty of Science, Department of Chemistry, Laboratory of Materials Rheology (LMR), University of Damascus, Damascus, Syria.
9. Donald Q. Kern, Procesos de Transferencia de calor (Méjico: Compañía Editorial Continental).
10. S. Kalpakjian, Manufactura, Ingeniería y Tecnología (Méjico: Pearson Education).
11. Antonio Creus Sole, Instrumentación Industrial (Mexico: Alfaomega Grupo Editor).
12. Robert L. Mott, Mecánica de fluidos (Mexico: Pearson Education).
13. Curtis Waquespack, Mastering Autodesk Inventor 2012 and Autodesk Inventor LT 2012 (Indiana: Wiley Publishing).

14. Neil Gershenfeld, FAB, The coming revolution on your desktop-from personal computers to personal fabrication (USA: Basic Books).
15. Eugene A. Avallone and Theodore Baumeister, Marks' Standar Handbook for Mechanical Engineers (New York: McGraw-Hill).
16. Thomas H. Brown, Marks' Calculation for Machine Design (New York: McGraw-Hill).
17. Francisco Cruz Teruel, Control numérico y programación (Mexico: Alfaomega Grupo Editor)
18. McCauley C. Machinery's Handbook (Industrial Press).
19. Robert Norton, An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines, Design (USA: McGraw-Hill).
20. Richard Budynas y Keith Nisbett, Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley [México: McGraw-Hill Interamericana], p.407

ANEXOS

ANEXO 1

DATOS PARA DISEÑO DE ENGRANES PLÁSTICOS

1. Factor de forma de diente de Lewis Y

Número de dientes	Forma del diente		
	14½°, profundidad completa	20°, profundidad completa	20° corto
14	-	-	0.540
15	-	-	0.566
16	-	-	0.578
17	-	<u>0.512</u>	0.587
18	-	<u>0.521</u>	0.603
19	-	<u>0.534</u>	0.616
20	-	<u>0.544</u>	0.628
22	-	<u>0.559</u>	0.648
24	0.509	<u>0.572</u>	0.664
26	0.522	<u>0.588</u>	0.678
28	0.535	<u>0.597</u>	0.688
30	0.540	<u>0.606</u>	0.698
34	0.553	<u>0.628</u>	0.714
38	0.566	<u>0.651</u>	0.729
43	0.575	<u>0.672</u>	0.739
50	0.588	<u>0.694</u>	0.758
60	0.604	<u>0.713</u>	0.774
75	0.613	<u>0.735</u>	0.792
100	0.622	<u>0.757</u>	0.808
150	0.635	<u>0.779</u>	0.830
300	0.650	<u>0.801</u>	0.855
Rack	0.660	<u>0.823</u>	0.881

Fuente: DuPont Polymers, Wilmington, DE

Fuente: Robert L. Mott, Diseño de elementos de máquinas, p.439

2. Factores de sobrecarga sugeridos

Fuente de potencia	Máquina impulsada			
	Uniforme	Choque ligero	Choque moderado	Choque pesado
Uniforme	<u>1.00</u>	1.25	1.50	1.75
Choque ligero	1.20	1.40	1.75	2.25
Choque moderado	1.30	1.70	2.00	2.75

Fuente: Mott, Diseño de elementos de máquinas, p.389

3. Esfuerzo flexionante admisible en engranajes de plástico

Material	Esfuerzo aproximado admisible de flexión, ksi (MPa)	
	Sin carga	Carga de vidrio
ABS	3000 (21)	6000 (41)
Acetal	5000 (34)	7000 (48)
Nylon	<u>6000 (41)</u>	12 000 (83)
Policarbonato	6000 (41)	9000 (62)
Poliéster	3500 (24)	8000 (55)
Poliuretano	2500 (17)	

Fuente: Plastics Gearing, Manchester, CT: ABA/PGT Publishing, 1994.

Fuente: Mott, Diseño de elementos de máquinas, p.436

ANEXO 2

PROPIEDADES FÍSICAS DEL COMPUESTO CERÁMICO RESBOND 920

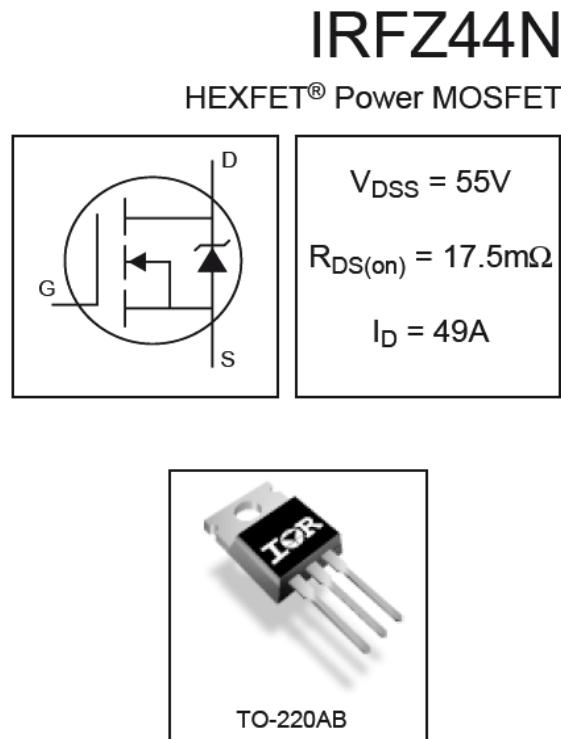
Physical Properties	
Max. Use Temp.	3000°F
Base	Al₂O₃
Compressive Strength	4,500 psi
Flexural Strength	450 psi
Dielectric Strength	270 volts/mil
Volume Resistance	10¹¹ ohm·cm
Thermal	
Conductivity	15 BTU in/hr. °F ft.²
Expansion	4.5 × 10⁻⁶/°F
Components	2
Mix Ratio	100 / 14 (by weight)
Color	White
Consistency	Paste

Fuente: Hoja de datos del compuesto

ANEXO 3

HOJA DE DATOS MOSFET IRFZ44N

1. Características principales



2. Rangos de operación

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	49	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	35	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	160	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	94	W
V_{GS}	Linear Derating Factor	0.63	W/ $^\circ C$
	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AR}	Avalanche Current ②	25	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ③	9.4	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ④	5.0	V/ns
T_J T_{STG}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 175	$^\circ C$
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf-in (1.1N·m)	

3. Características eléctricas

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	—	—	V	$V_{GS} = 0V, I_D = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.058	—	V/ $^{\circ}C$	Reference to $25^{\circ}C, I_D = 1mA$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	17.5	m Ω	$V_{GS} = 10V, I_D = 25A$ ④
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS} = V_{GS}, I_D = 250\mu A$
g_{fs}	Forward Transconductance	19	—	—	S	$V_{DS} = 25V, I_D = 25A$ ④
I_{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS} = 55V, V_{GS} = 0V$
		—	—	250		$V_{DS} = 44V, V_{GS} = 0V, T_J = 150^{\circ}C$
I_{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS} = 20V$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS} = -20V$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	63	nC	$I_D = 25A$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	14		$V_{DS} = 44V$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	23		$V_{GS} = 10V$, See Fig. 6 and 13
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	12	—	ns	$V_{DD} = 28V$
t_r	Rise Time	—	60	—		$I_D = 25A$
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	44	—		$R_G = 12\Omega$
t_f	Fall Time	—	45	—		$V_{GS} = 10V$, See Fig. 10 ④
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	1470	—	pF	$V_{GS} = 0V$
C_{oss}	Output Capacitance	—	360	—		$V_{DS} = 25V$
C_{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	88	—		$f = 1.0MHz$, See Fig. 5
E_{AS}	Single Pulse Avalanche Energy ②	—	530 ③	150 ⑥	mJ	$I_{AS} = 25A, L = 0.47mH$

Resistencias térmicas

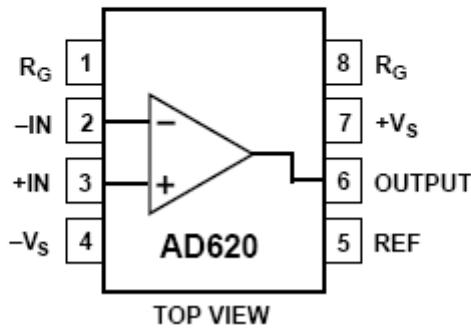
	Parameter	Typ.	Max.	Units
R_{eJC}	Junction-to-Case	—	1.5	°C/W
R_{eCS}	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
R_{eJA}	Junction-to-Ambient	—	62	

ANEXO 4

HOJA DE DATOS AMPLIFICADOR AD620

CONNECTION DIAGRAM

**8-Lead Plastic Mini-DIP (N), Cerdip (Q)
and SOIC (R) Packages**



1. Rangos de operación

Supply Voltage	$\pm 18\text{ V}$
Internal Power Dissipation ²	650 mW
Input Voltage (Common Mode)	$\pm V_s$
Differential Input Voltage	$\pm 25\text{ V}$
Output Short Circuit Duration	Indefinite
Storage Temperature Range (Q)	-65°C to +150°C
Storage Temperature Range (N, R)	-65°C to +125°C
Operating Temperature Range	
AD620 (A, B)	-40°C to +85°C
AD620 (S)	-55°C to +125°C
Lead Temperature Range (Soldering 10 seconds)	+300°C

2. Especificaciones técnicas

AD620-SPECIFICATIONS

(Typical @ +25°C, $V_S = \pm 15$ V, and $R_L = 2$ kΩ, unless otherwise noted)

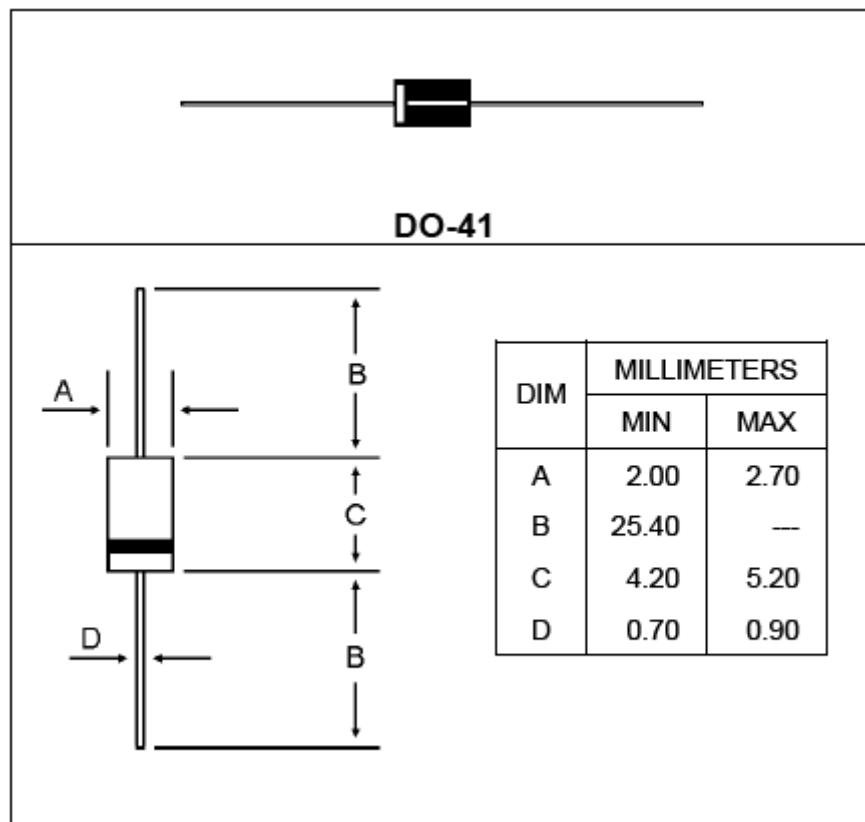
Model	Conditions	AD620A			AD620B			AD620S ¹			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
GAIN											
Gain Range	$G = 1 + (49.4 k\Omega/R_o)$	1		10,000	1		10,000	1		10,000	
Gain Error ²	$V_{OUT} = \pm 10$ V				0.03	0.10		0.01	0.02		%
G = 1					0.15	0.30		0.10	0.15		%
G = 10					0.15	0.30		0.10	0.15		%
G = 100					0.40	0.70		0.35	0.50		%
G = 1000								0.40	0.70		%
Nonlinearity,	$V_{OUT} = -10$ V to +10 V,							10	40		
G = 1–1000	$R_L = 10$ kΩ		10	40				10	40	ppm	
G = 1–100	$R_L = 2$ kΩ		10	95				10	95	ppm	
Gain vs. Temperature	$G = 1$				10						
	$Gain > 1^2$				-50						
								10			ppm/°C
								-50			ppm/°C
VOLTAGE OFFSET	(Total RTI Error = $V_{Ost} + V_{oso}/G$)										
Input Offset, V_{ost}	$V_S = \pm 5$ V to ± 15 V	30	125		15	50		30	125		µV
Over Temperature	$V_S = \pm 5$ V to ± 15 V				85			225			µV
Average TC	$V_S = \pm 5$ V to ± 15 V	0.3	1.0		0.1	0.6		0.3	1.0		µV/°C
Output Offset, V_{oso}	$V_S = \pm 15$ V	400	1000		200	500		400	1000		µV
Over Temperature	$V_S = \pm 5$ V				1500			750			µV
Average TC	$V_S = \pm 5$ V to ± 15 V				2000			1000			µV
Offset Referred to the Input vs.	$V_S = \pm 5$ V to ± 15 V	5.0	15		2.5	7.0		5.0	15		µV/°C
Supply (PSR)	$V_S = \pm 2.3$ V to ± 18 V	80	100		80	100		80	100		dB
G = 1		95	120		100	120		95	120		dB
G = 10		110	140		120	140		110	140		dB
G = 100		110	140		120	140		110	140		dB
G = 1000											
INPUT CURRENT					0.5	2.0		0.5	1.0		nA
Input Bias Current					2.5			4			nA
Over Temperature					3.0			8.0			pA/°C
Average TC					0.3	1.0		0.3	1.0		nA
Input Offset Current					1.5			0.75			nA
Over Temperature								8.0			pA/°C
Average TC											
INPUT											
Input Impedance					10 2			10 2			GΩ pF
Differential					10 2			10 2			GΩ pF
Common-Mode											
Input Voltage Range ³	$V_S = \pm 2.3$ V to ± 5 V	$-V_S + 1.9$	$+V_S - 1.2$		$-V_S + 1.9$	$+V_S - 1.2$		$-V_S + 1.9$	$+V_S - 1.2$		V
Over Temperature		$-V_S + 2.1$	$+V_S - 1.3$		$-V_S + 2.1$	$+V_S - 1.3$		$-V_S + 2.1$	$+V_S - 1.3$		V
Over Temperature	$V_S = \pm 5$ V to ± 18 V	$-V_S + 1.9$	$+V_S - 1.4$		$-V_S + 1.9$	$+V_S - 1.4$		$-V_S + 1.9$	$+V_S - 1.4$		V
Common-Mode Rejection Ratio DC to 60 Hz with 1kΩ Source Imbalance		$-V_S + 2.1$	$+V_S - 1.4$		$-V_S + 2.1$	$+V_S - 1.4$		$-V_S + 2.3$	$+V_S - 1.4$		V
G = 1	$V_{CM} = 0$ V to ± 10 V	73	90		80	90		73	90		dB
G = 10		93	110		100	110		93	110		dB
G = 100		110	130		120	130		110	130		dB
G = 1000		110	130		120	130		110	130		dB
OUTPUT											
Output Swing	$R_L = 10$ kΩ, $V_S = \pm 2.3$ V to ± 5 V	$-V_S + 1.1$	$+V_S - 1.2$		$-V_S + 1.1$	$+V_S - 1.2$		$-V_S + 1.1$	$+V_S - 1.2$		V
Over Temperature		$-V_S + 1.4$	$+V_S - 1.3$		$-V_S + 1.4$	$+V_S - 1.3$		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.3$		V
Over Temperature	$V_S = \pm 5$ V to ± 18 V	$-V_S + 1.2$	$+V_S - 1.4$		$-V_S + 1.2$	$+V_S - 1.4$		$-V_S + 1.2$	$+V_S - 1.4$		V
Short Current Circuit		$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.5$	± 18	$-V_S + 1.6$	$+V_S - 1.5$	± 18	$-V_S + 2.3$	$+V_S - 1.5$	± 18	mA

AD620

Model	Conditions	Min	AD620A Typ Max	Min	AD620B Typ Max	Min	AD620S ¹ Typ Max	Units
DYNAMIC RESPONSE								
Small Signal –3 dB Bandwidth			1000		1000		1000	kHz
G = 1			800		800		800	kHz
G = 10			120		120		120	kHz
G = 100			12		12		12	kHz
G = 1000								V/μs
Slew Rate		0.75	1.2	0.75	1.2	0.75	1.2	
Settling Time to 0.01%	10 V Step							
G = 1–100			15		15		15	μs
G = 1000			150		150		150	μs
NOISE								
Voltage Noise, 1 kHz		<i>Total RTI Noise = $\sqrt{(e_{ni}^2 + (e_{no}/G)^2)}$</i>						
Input, Voltage Noise, e _{ni}		9	13	9	13	9	13	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Output, Voltage Noise, e _{no}		72	100	72	100	72	100	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
RTI, 0.1 Hz to 10 Hz								
G = 1		3.0		3.0	6.0	3.0	6.0	μV p-p
G = 10		0.55		0.55	0.8	0.55	0.8	μV p-p
G = 100–1000		0.28		0.28	0.4	0.28	0.4	μV p-p
Current Noise	f = 1 kHz	100		100		100		FA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
0.1 Hz to 10 Hz		10		10		10		pA p-p
REFERENCE INPUT								
R _{IN}	V _{IN+} , V _{REF} = 0	20		20		20		kΩ
I _{IN}		+50	+60	+50	+60	+50	+60	μA
Voltage Range		–V _S + 1.6	+V _S – 1.6	–V _S + 1.6	+V _S – 1.6	–V _S + 1.6	+V _S – 1.6	V
Gain to Output		1 ± 0.0001		1 ± 0.0001		1 ± 0.0001		
POWER SUPPLY								
Operating Range ⁴	V _S = ±2.3 V to ±18 V	±2.3	±18	±2.3	±18	±2.3	±18	V
Quiescent Current		0.9	1.3	0.9	1.3	0.9	1.3	mA
Over Temperature		1.1	1.6	1.1	1.6	1.1	1.6	mA
TEMPERATURE RANGE								
For Specified Performance		–40 to +85		–40 to +85		–55 to +125		°C

ANEXO 5

HOJA DE DATOS TRANSISTOR 1N4001



Límites de operación y características eléctricas

Characteristic	Symbol	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage	V_{RRM}								
Working Peak Reverse Voltage	V_{RWM}	50	100	200	400	600	800	1000	V
DC Blocking Voltage	V_R								
RMS Reverse Voltage	$V_{R(RMS)}$	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectified Output Current (Note 1) @ $T_A = 75^\circ\text{C}$	I_0				1.0				A
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms single half sine-wave superimposed on rated load	I_{FSM}				30				A
Forward Voltage @ $I_F = 1.0\text{A}$	V_{FM}				1.0				V
Peak Reverse Current @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ at Rated DC Blocking Voltage @ $T_A = 100^\circ\text{C}$	I_{RM}				5.0				μA
Typical Junction Capacitance (Note 2)	C_j			15		8			pF
Typical Thermal Resistance Junction to Ambient	R_{JJA}			100					K/W
Maximum DC Blocking Voltage Temperature	T_A			+150					$^\circ\text{C}$
Operating and Storage Temperature Range	T_J, T_{STG}			-65 to +150					$^\circ\text{C}$

ANEXO 6

PROPIEDADES TÍPICAS PLA

Typical Material & Application Properties ^(1,2,3)			
Film Properties		Value	ASTM Method
Density		<u>1.24 g/cc</u>	D1505
Tensile Strength	MD	16 kpsi	D882
	TD	21 kpsi	D882
Tensile Modulus	MD	480 kpsi	D882
	TD	560 kpsi	D882
Elongation at Break	MD	160%	D882
	TD	100%	D882
Elmendorf Tear	MD	15 g/mil	D1922
	TD	13 g/mil	D1922
Spencer Impact		2.5 joules	
Transmission Rates	Oxygen	550 cc-mil/m ² /24 hr atm	D1434
	Carbon Dioxide	3,000 cc-mil/m ² /24 hr atm	D1434
	Water Vapor	325 a-mil/m ² /24 hr atm	E96
Optical Characteristics	Haze	2.1%	D1003
	Gloss, 20°	90	D1003
Thermal Characteristics	Melting Point	<u>275°F (135°C)</u>	D1003

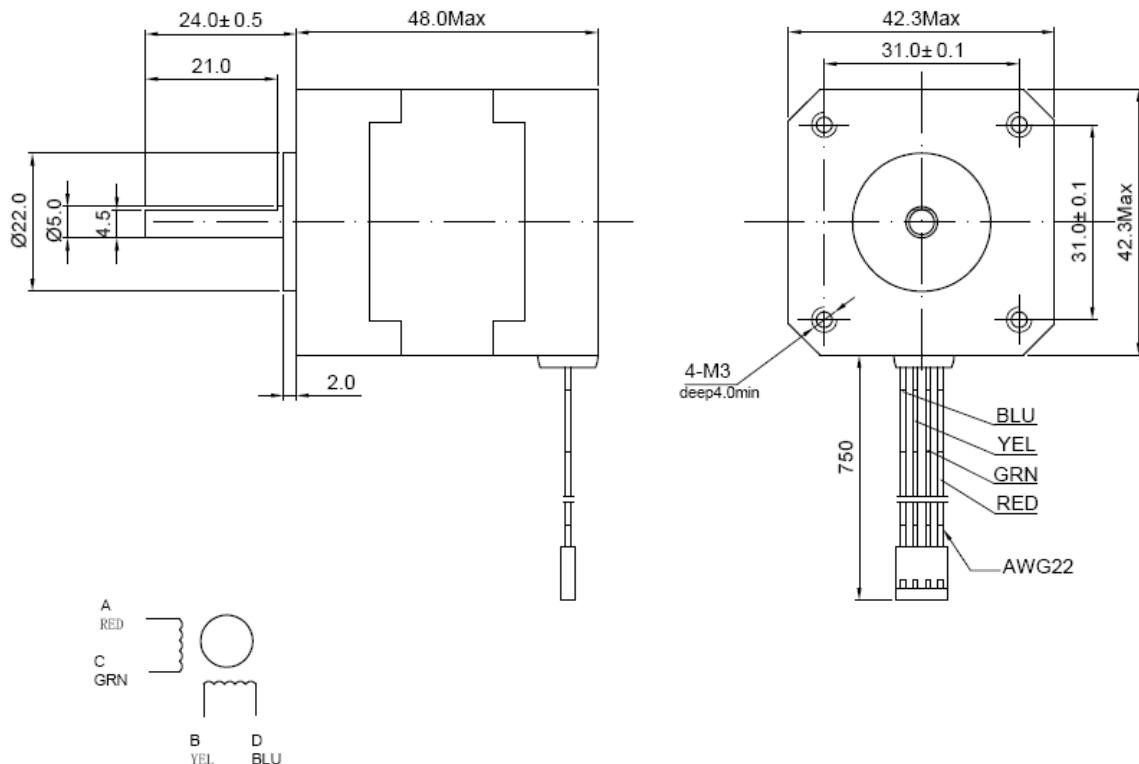
⁽¹⁾ Typical properties; not to be construed as specifications.

⁽²⁾ All properties measured on 1.0 mil film.

⁽³⁾ Typical values for a film oriented 3.5x in MD and 5x in TD.

ANEXO 7

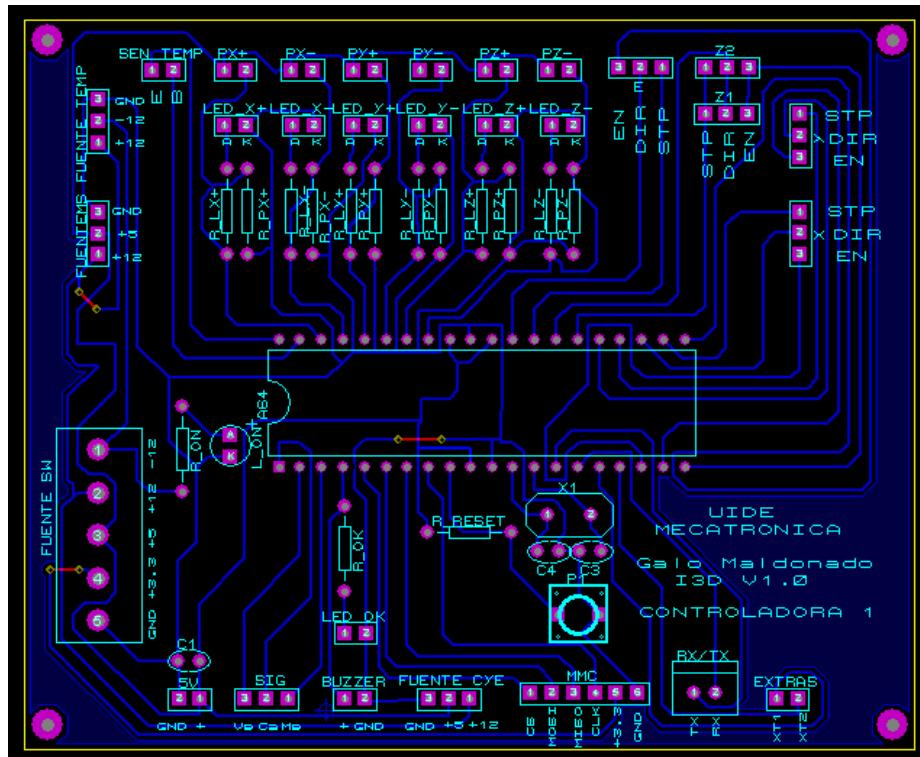
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS MOTOR NEMA 17



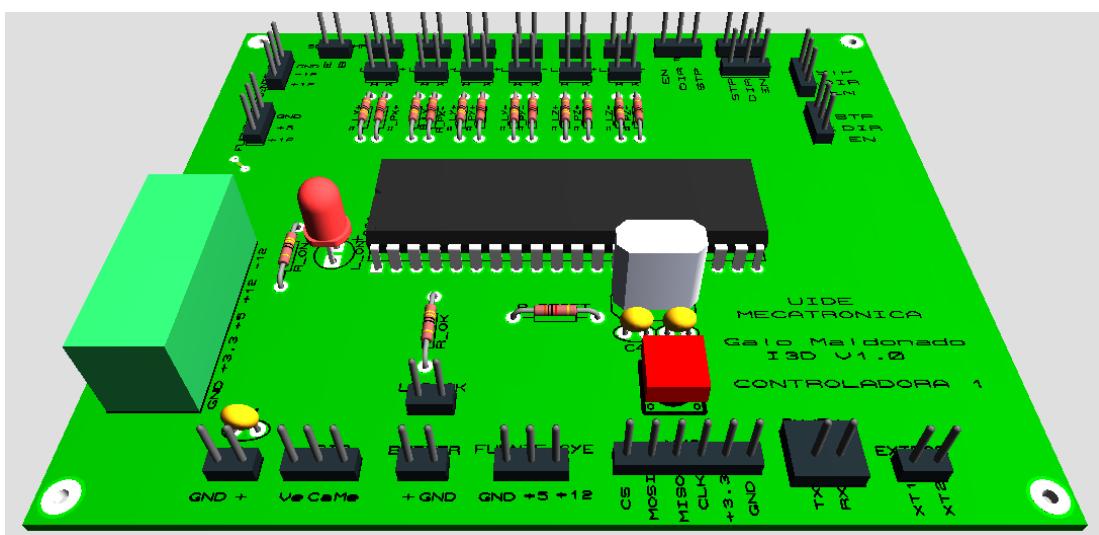
NO.	ITEM	SPECIFICATION	CONDITION
1	Rated Voltage	4.2V	
2	NO. of Phase	2	
3	Step Angle	1.8° ± 5%	
4	No. of Step per Revolution		
5	Resistance Per Phase	2.8Ω± 10%	
6	Inductance Per Phase	4.8mH± 20%	
7	Current Per Phase	1.5A	
8	Holding Torque	5.5Kg.cm	
9	Pull-in Rate		
10	Insulation Class	Class B	
11	Dielectric Strength	100Mohm	500VDC
12	Insulation Resistance		
13	Operation Temp Range	-20 ~ +40° C	
14	Storage Temp Range		
15	Detent Torque		
16	Rotor Inertia		
17	Stepping Accuracy		
18	Life		
19	Lead Wire	AWG22	
20	MFG of Terminal	N/A	
21	Weight	0.34Kg(Max)	

ANEXO 8

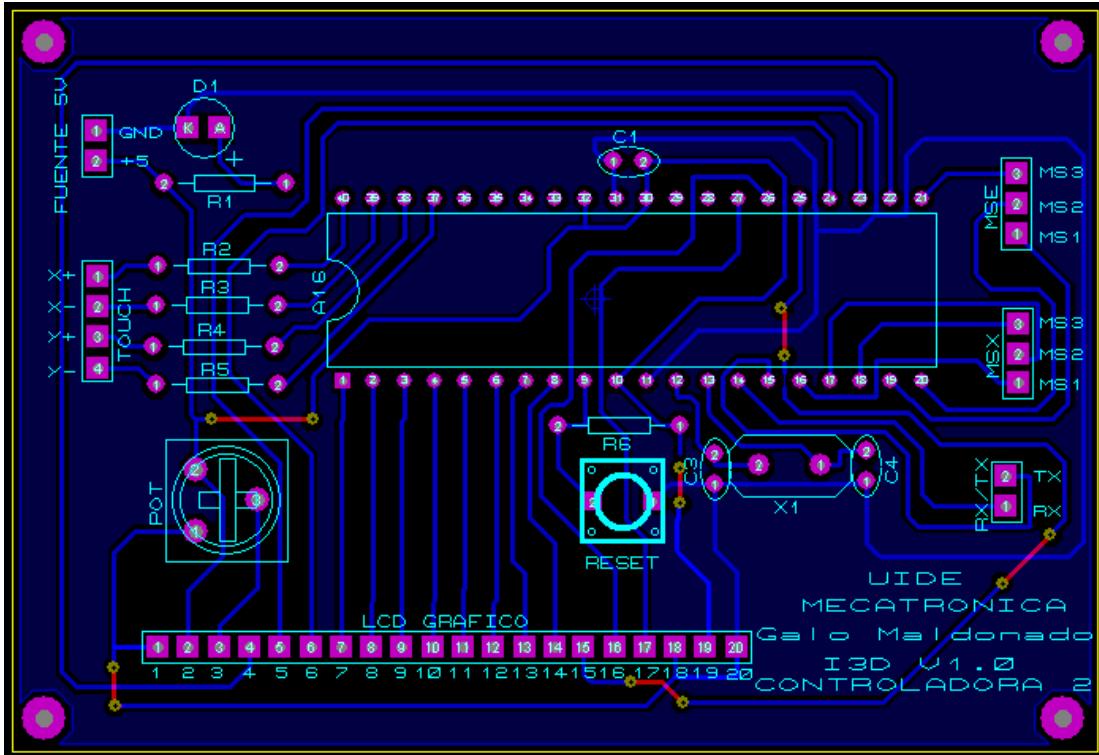
RUTEADO ELECTRÓNICO Y SUS MODELOS 3D



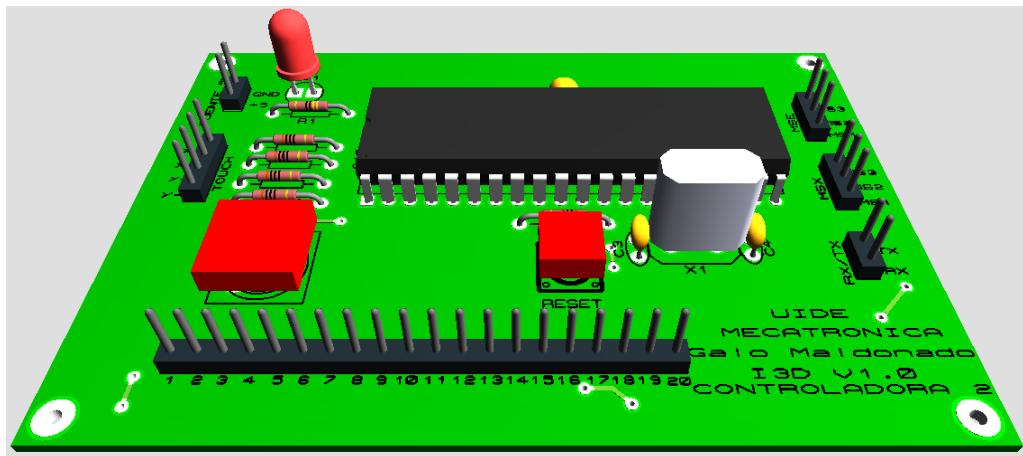
Ruteado del controlador principal



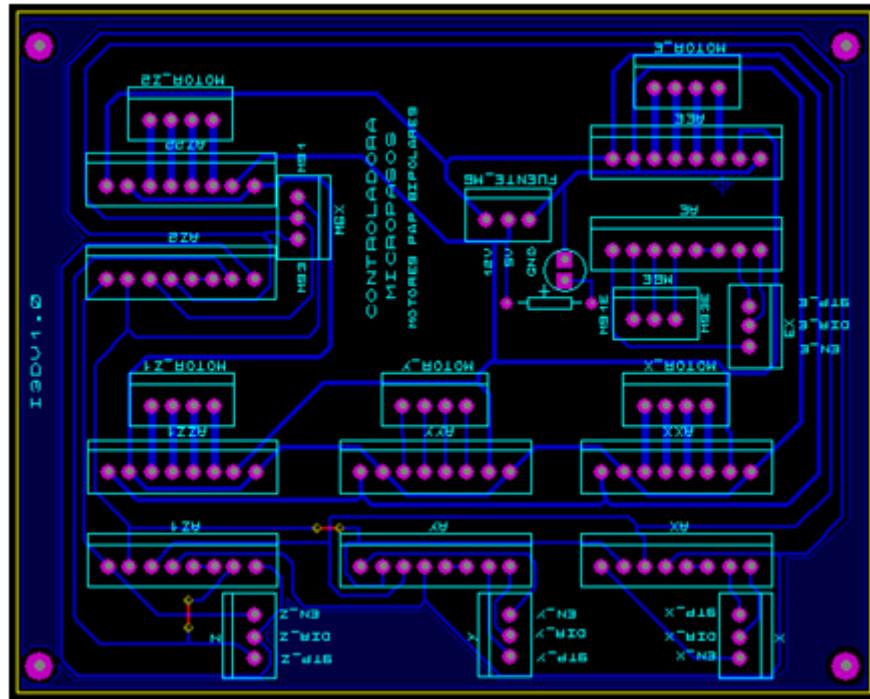
Modelo 3D del controlador principal



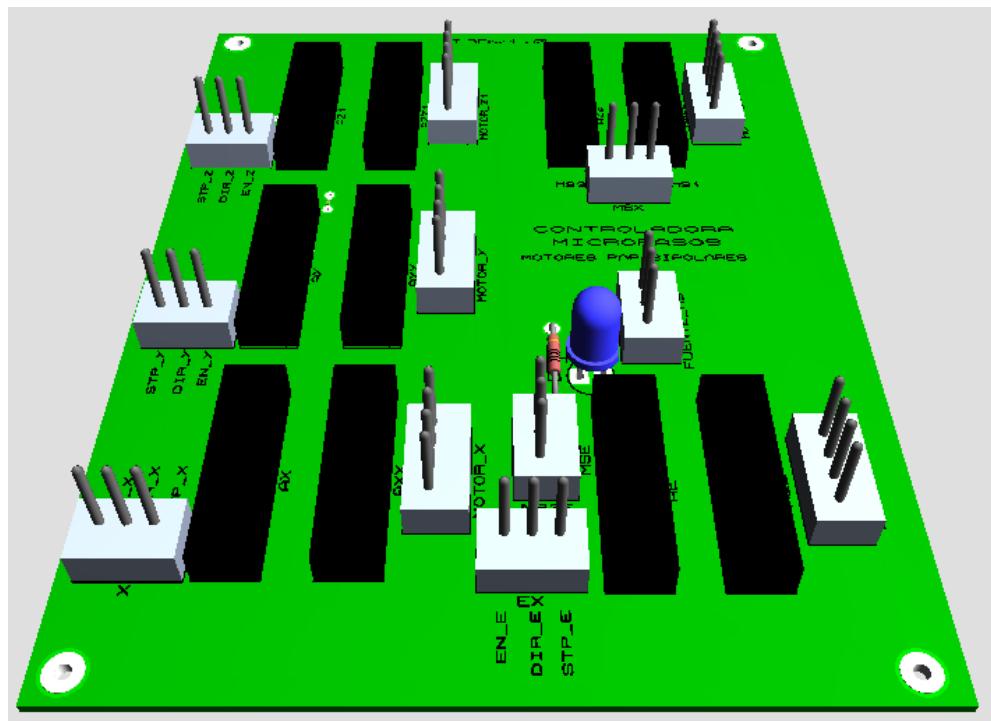
Ruteado del controlador secundario



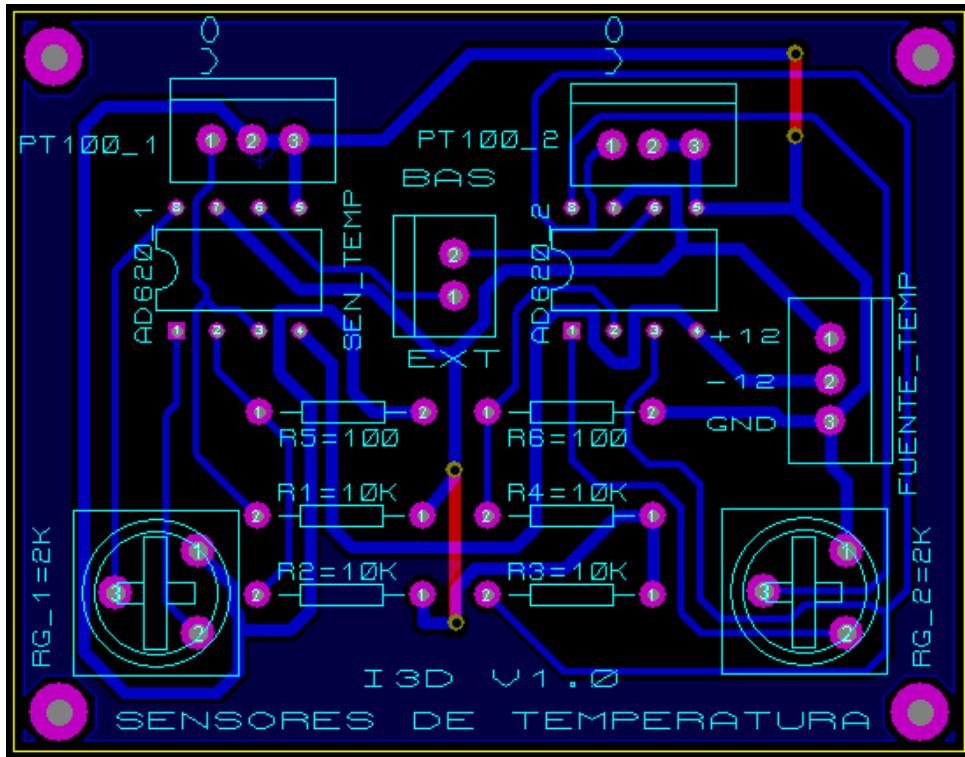
Modelo 3D del controlador secundario



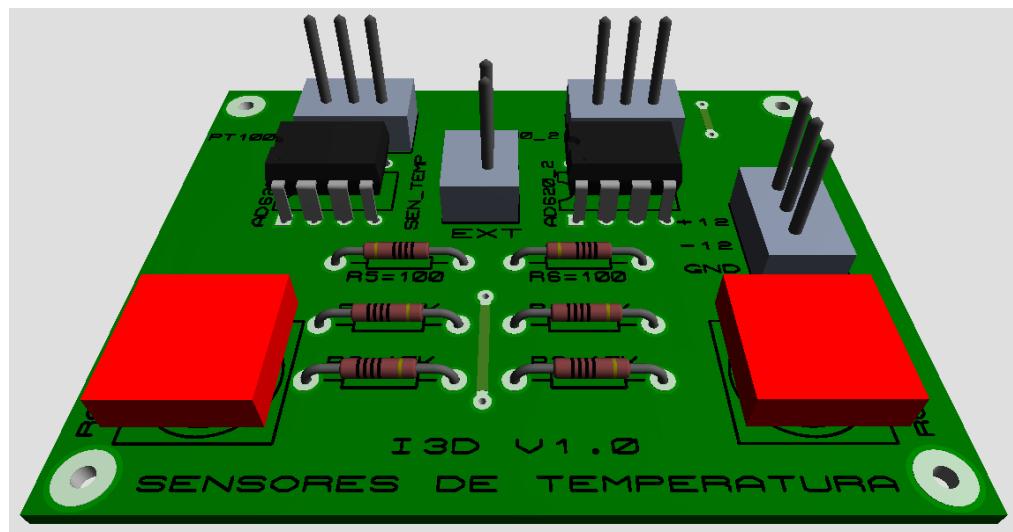
Ruteado de la controladora de micropasos



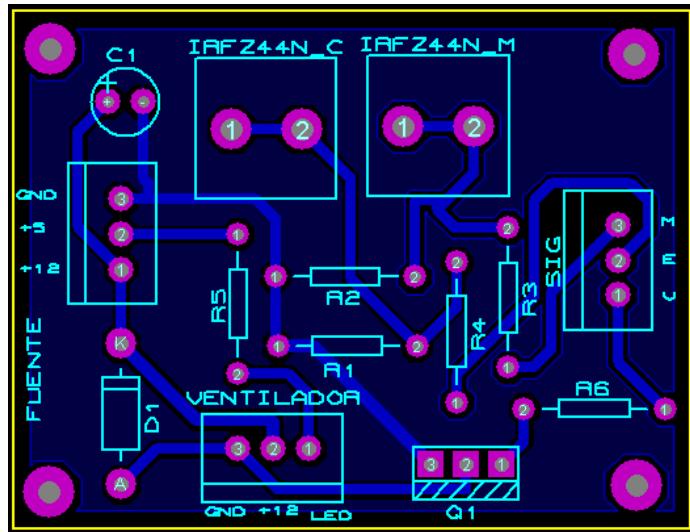
Modelo 3D de la controladora de micropasos



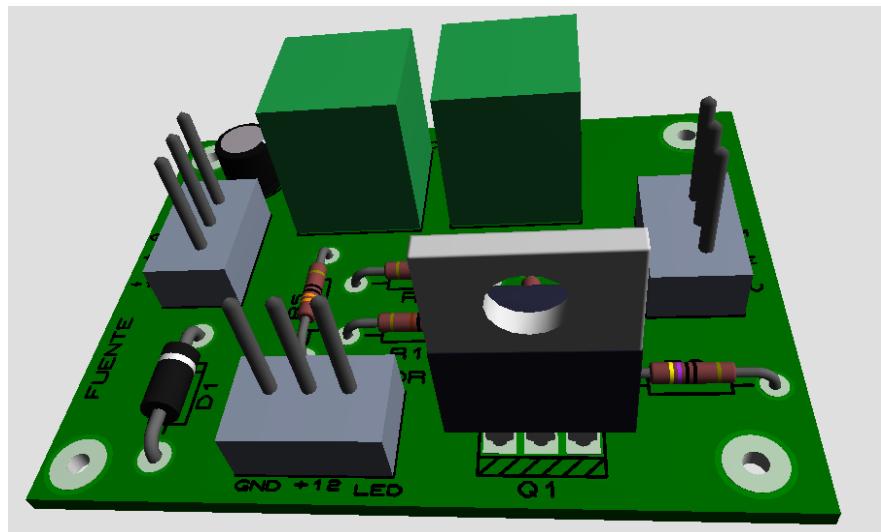
Ruteado de la controladora de temperatura



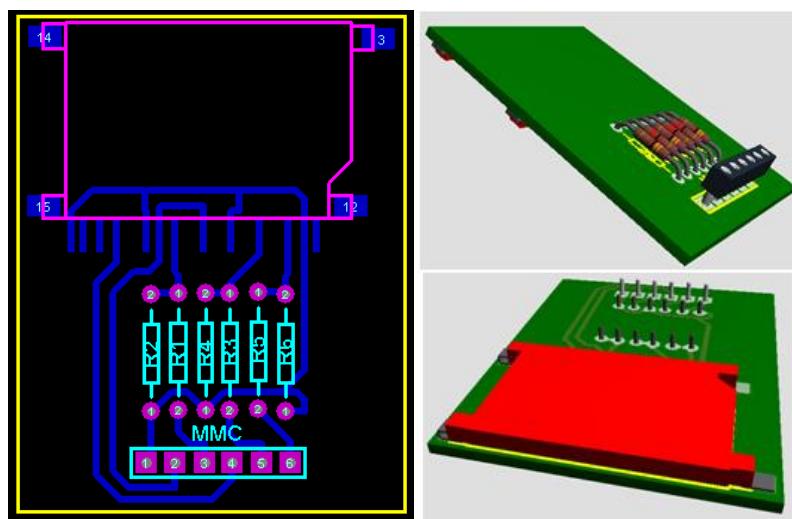
Modelo 3D de la controladora de temperatura



Ruteado de la controladora de potencia



Modelo 3D de la controladora de potencia



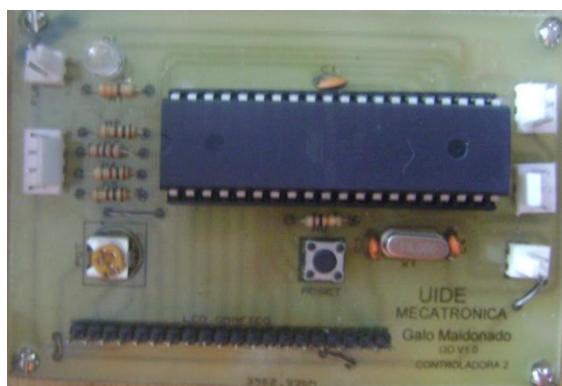
Ruteado y Modelo 3D de la tarjeta para la memoria SD-MMC

ANEXO 9

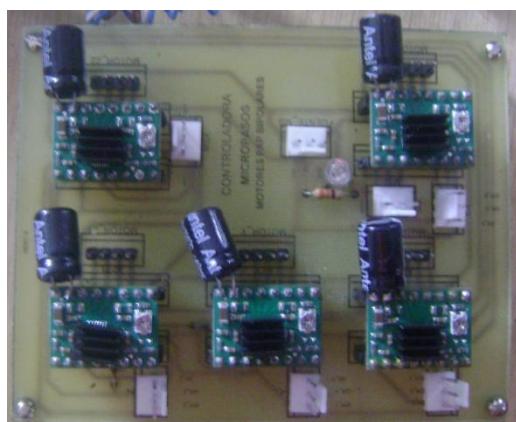
FOTOS DE PLACAS ELECTRÓNICAS FABRICADAS



Placa controladora principal



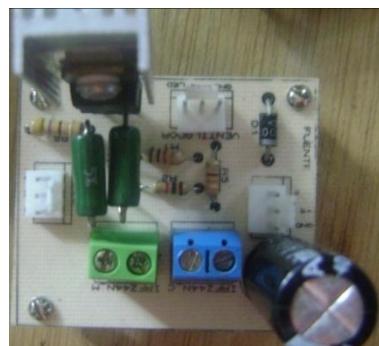
Placa controladora secundaria



Placa controladora de micropasos



Placa controladora de temperatura



Placa controladora de potencia



Placa controladora de tarjeta de memoria MMC.

Los mosfets de la placa controladora de potencia se ubican separadamente en una placa perforada para poder disipar el calor con mayor facilidad ubicándolos cerca de la salida ventilada del sistema. Se conectan también 4 conectores para leds de iluminación de la máquina y ventilador para circuitos.



Placa perforada controladora de potencia.

ANEXO 10

FOTOS DE ELEMENTOS FABRICADOS Y MONTAJE



Sujetadores roscados (Tuercas y Tes)



Montaje de sujetadores roscados con varillas roscadas y colocación de las bases para los motores del eje Z



Montaje de sujetadores roscados con varillas roscadas



Colocación de bocinas para guías del eje Z y estructura roscada ensamblada



Montaje base para polea libre del eje Y y montaje de guías para el eje Y



Montaje de polea libre y rueda acanalada dentada ensamblada



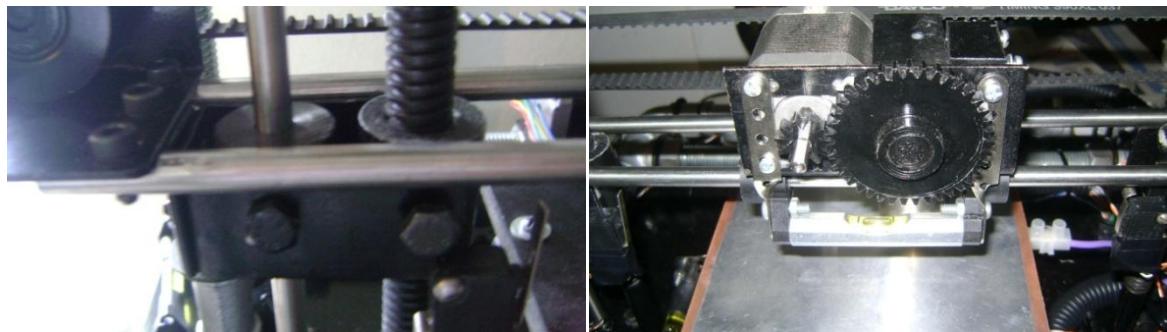
Tornillo de potencia seleccionado y colocación de la guía para el eje Z



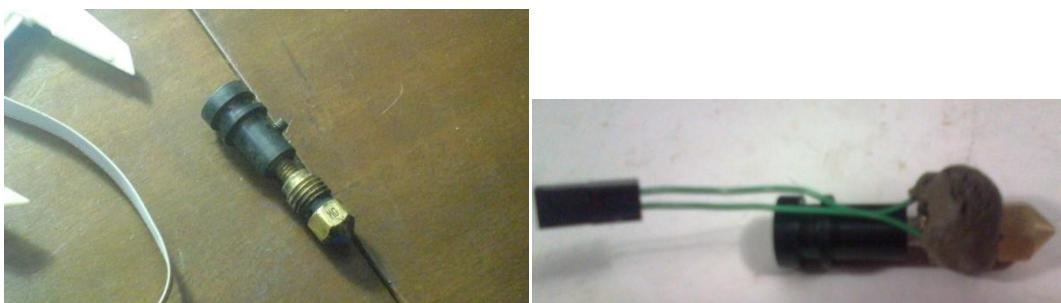
Base de la máquina y colocación de la estructura en la base



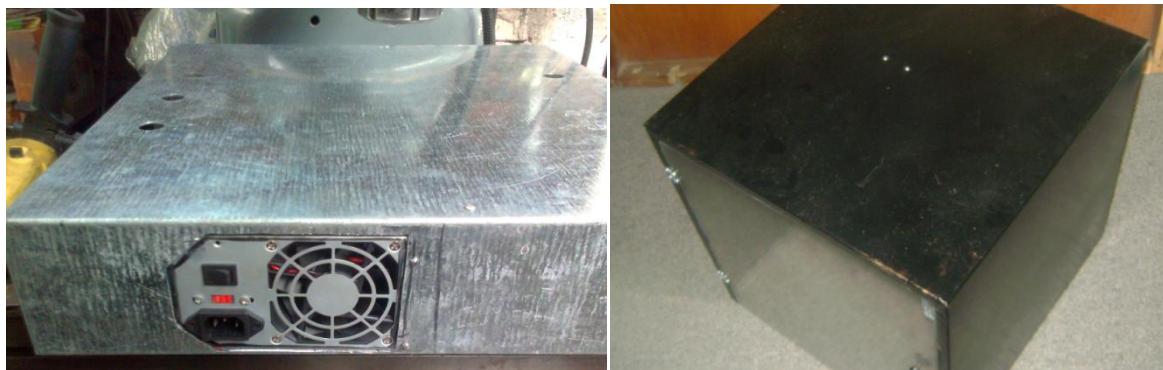
Colocación del calentador resistivo de la base y colocación del engrane en estructura de rueda motriz



Colocación elementos de sujeción eje X y montaje de sistema extrusor con nivelador de burbuja



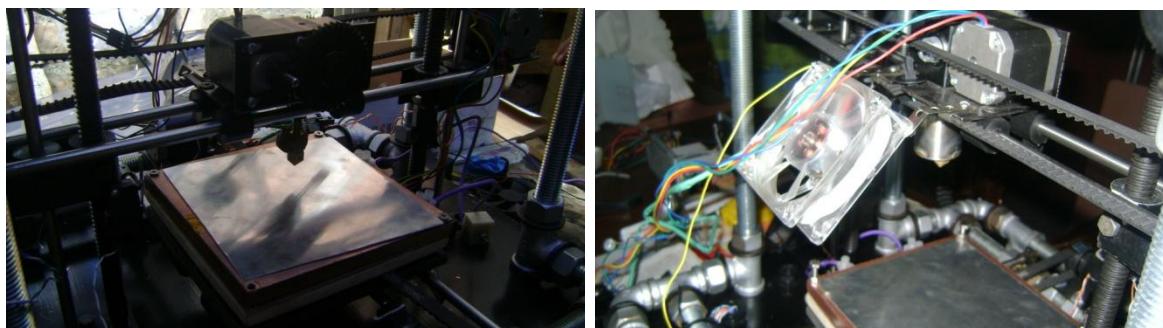
Montaje del fundidor



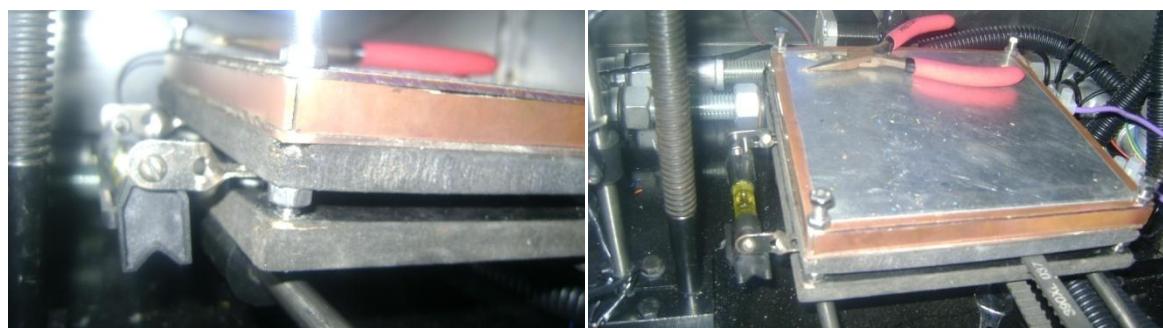
Colación fuente de poder y carcasa de la máquina



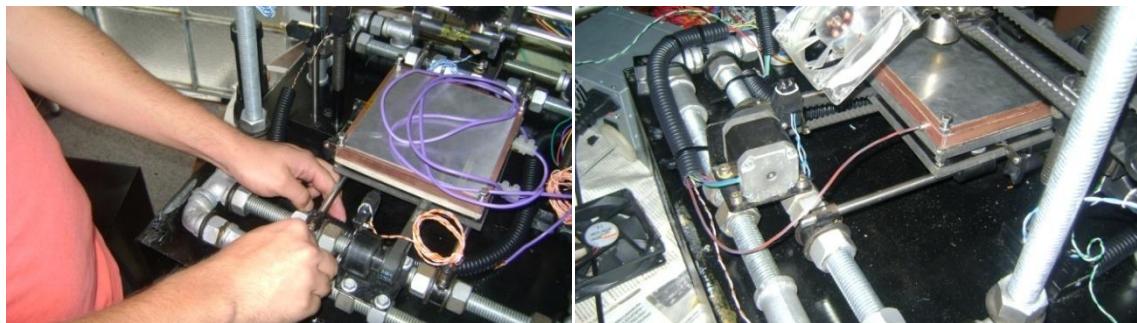
Cajón y colocación del cajón en la base de la máquina



Colocación de la base de deposición y montaje del ventilador en el mecanismo X



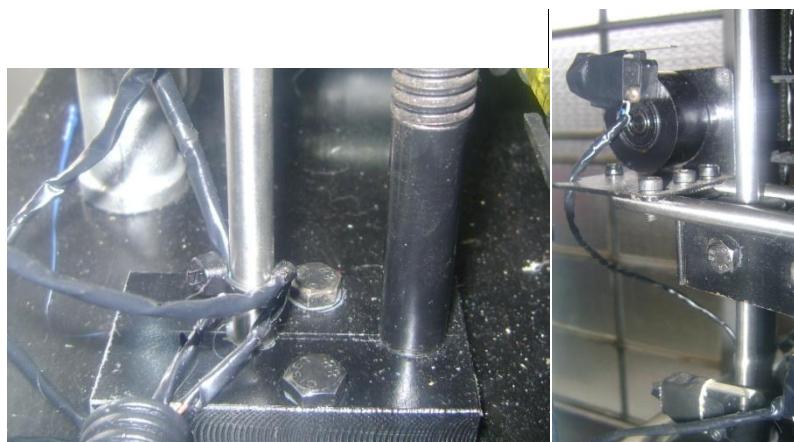
Niveladores de burbuja y sistema de nivelación eje Y



Colocación de finales de carrera en el eje Y con su cableado y montaje del sensor de temperatura en la caja de calentamiento



Montaje pulsante de parada del sistema y colocación del final de carrera eje X



Montaje soporte de guías y tornillos de potencia eje Z y colocación de pulsantes de parada eje Z



Cableado y leds de iluminación de la máquina



Piezas de la interfaz cortadas y estructura de acrílico de la interfaz montada en el mecanismo guía



Carrete con material cargado y sistema guía de material mediante garruchas adaptadas

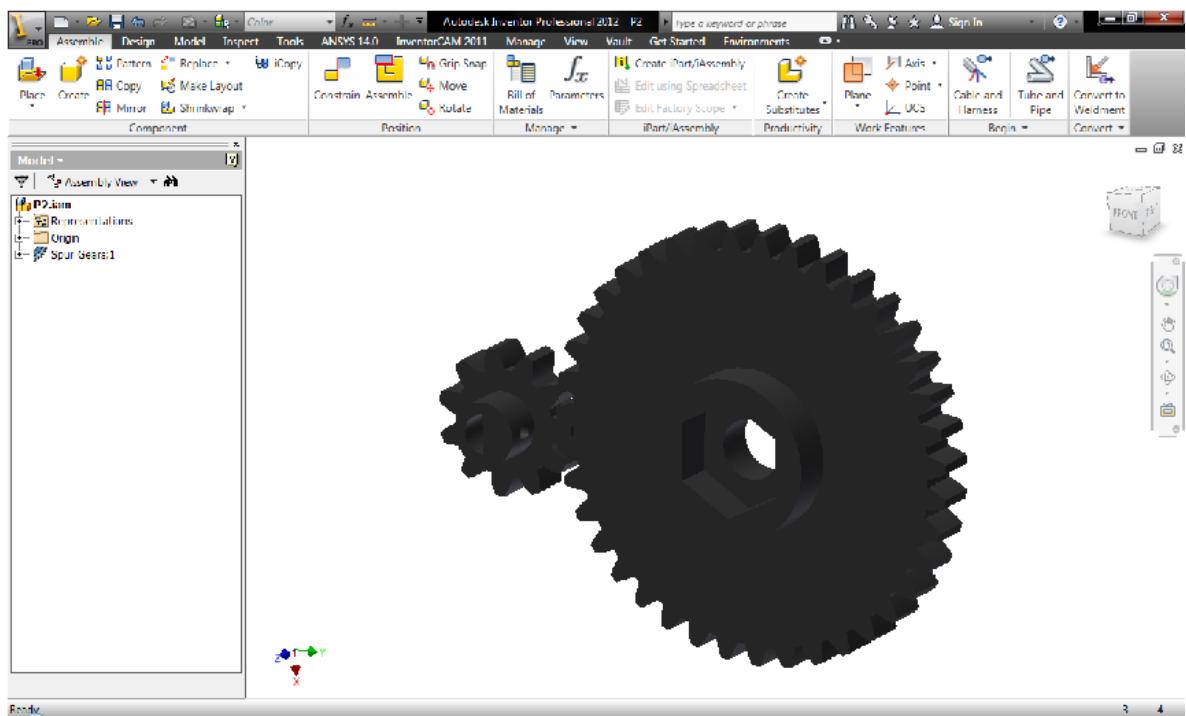


Colocación del juego de imanes inferiores para la compuerta de acrílico

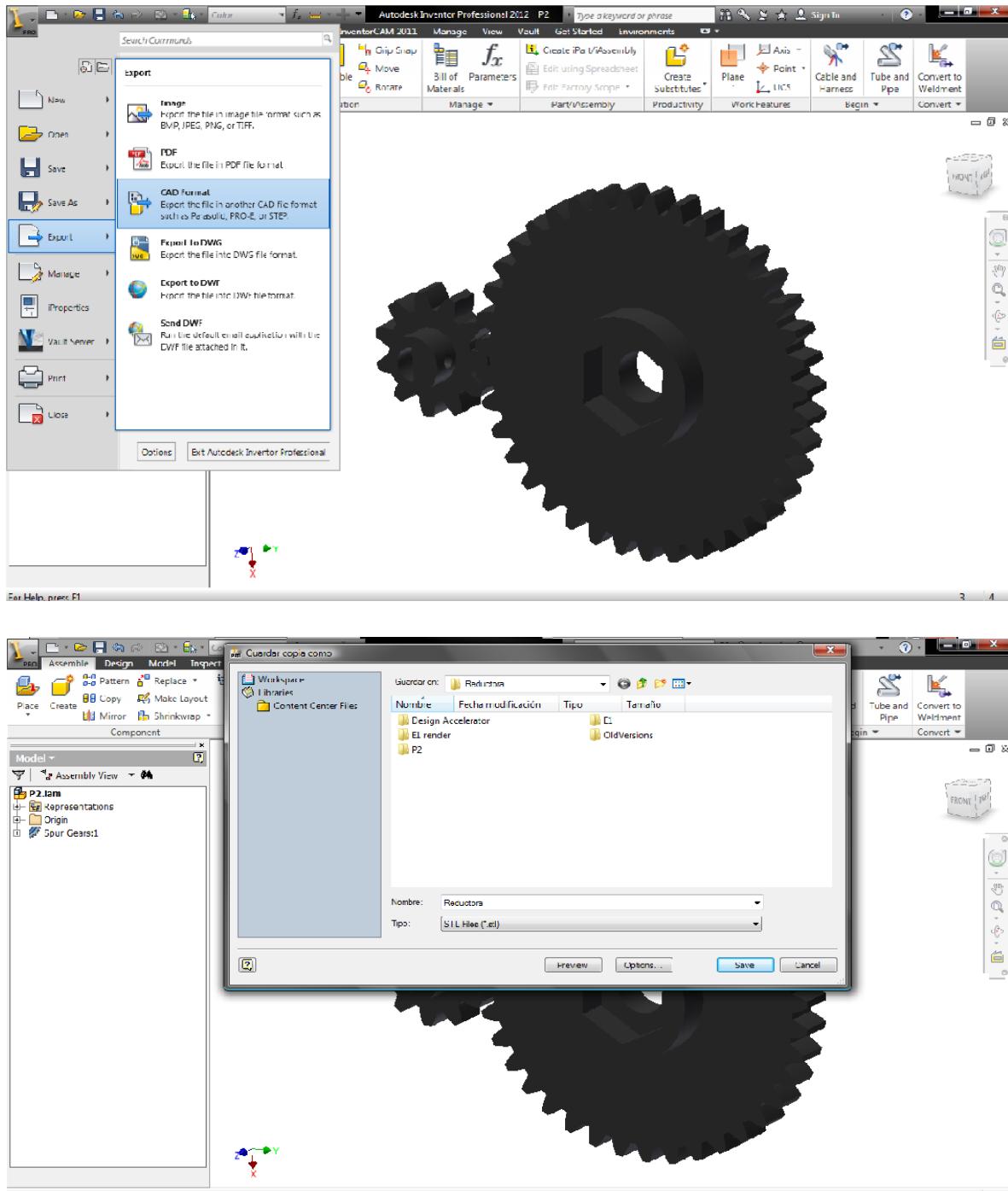
ANEXO 11

PROCESO DE IMPRESIÓN

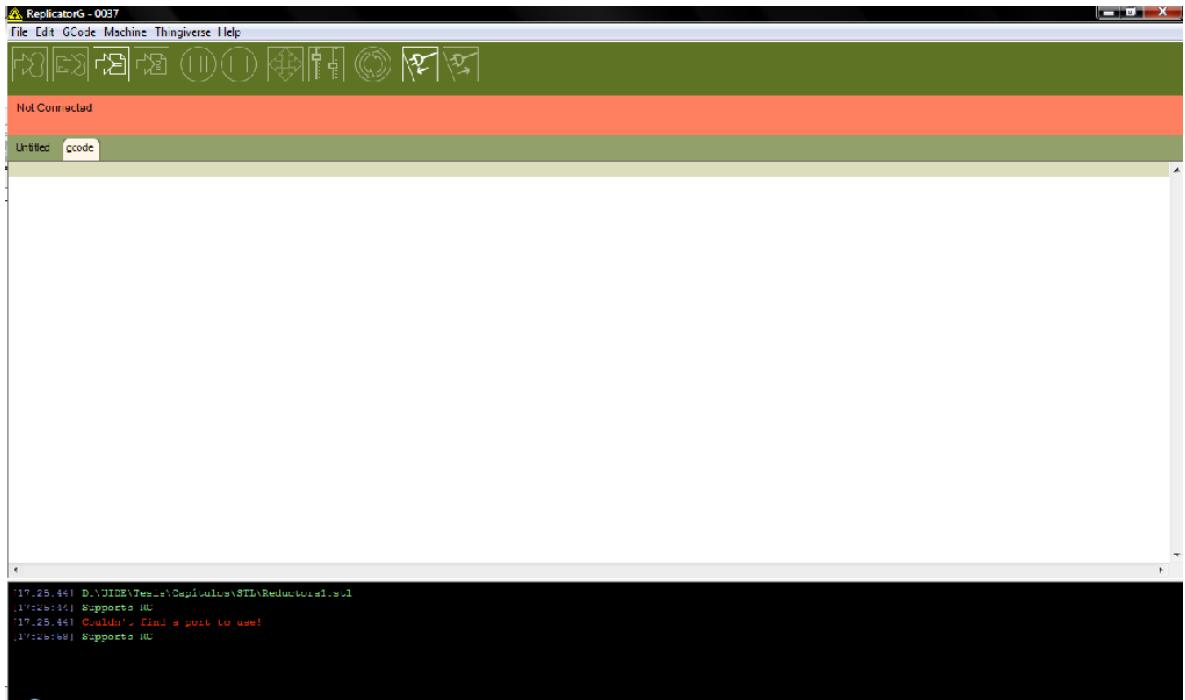
Para empezar se realiza la pieza en un programa CAD 3D. El programa utilizado en el presente proyecto es Inventor 2012. Los modelos 3D pueden ser generados en este programa y exportados en formato “*.stl”. Por ejemplo, se realiza el modelo 3D de la reductora usada en el mecanismo extrusor mediante el programa Inventor como se muestra:



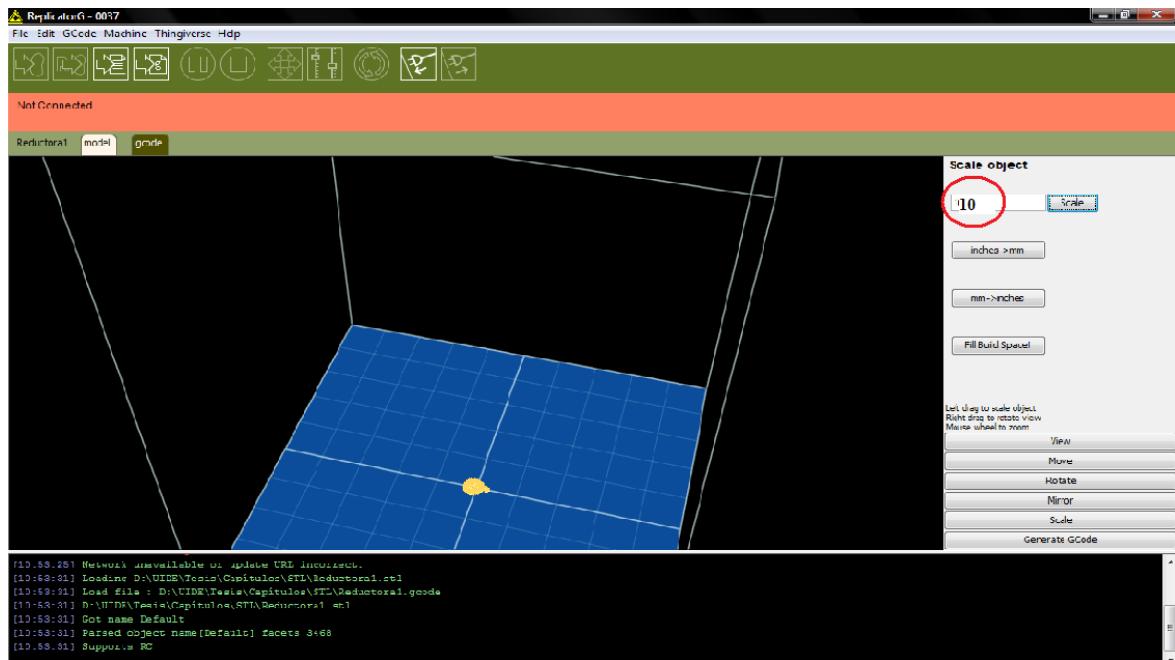
Con el modelo 3D generado se procede a exportar en formato “*.stl” como se muestra a continuación:



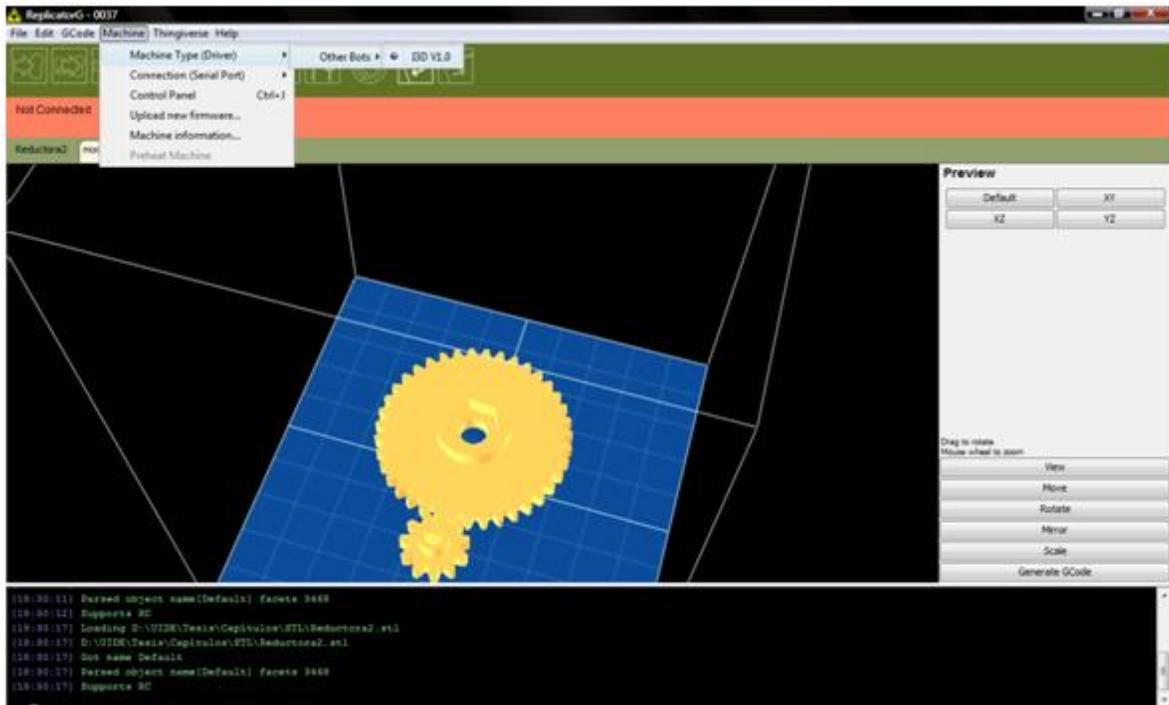
Ahora se abre el programa de soporte seleccionado, Replicator G y aparece la pantalla siguiente:



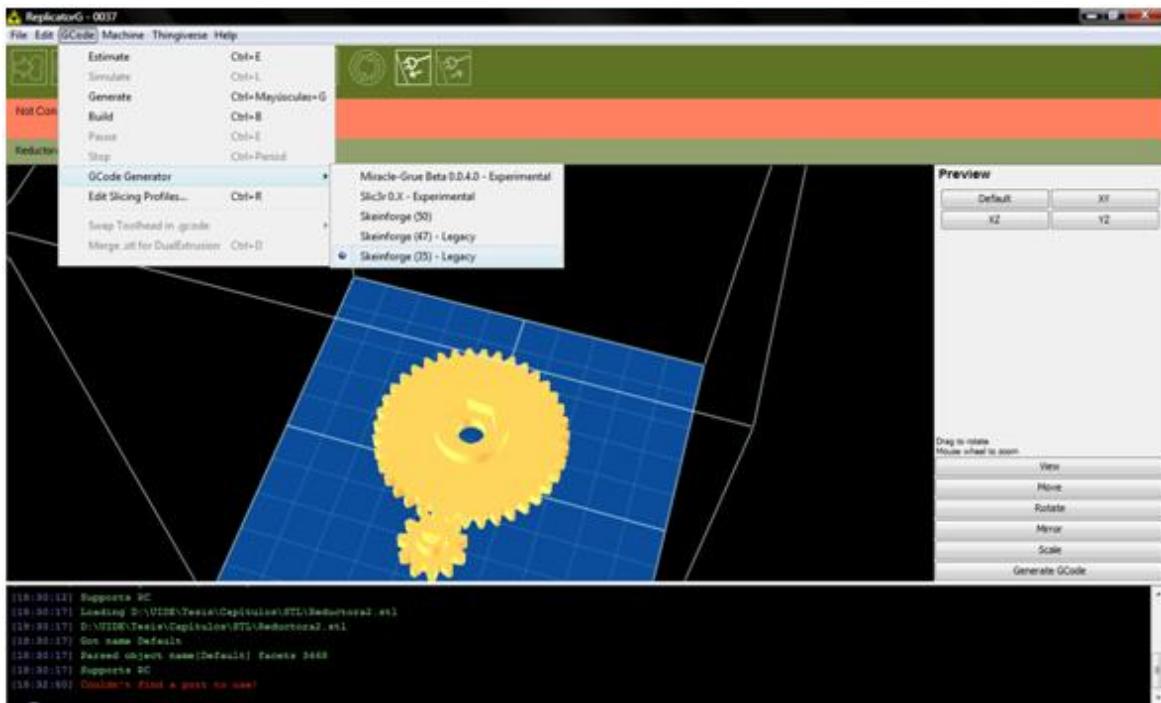
Abrir el archivo con extensión “*.stl” previamente generado y escalarlo 10 veces para obtener medidas reales:



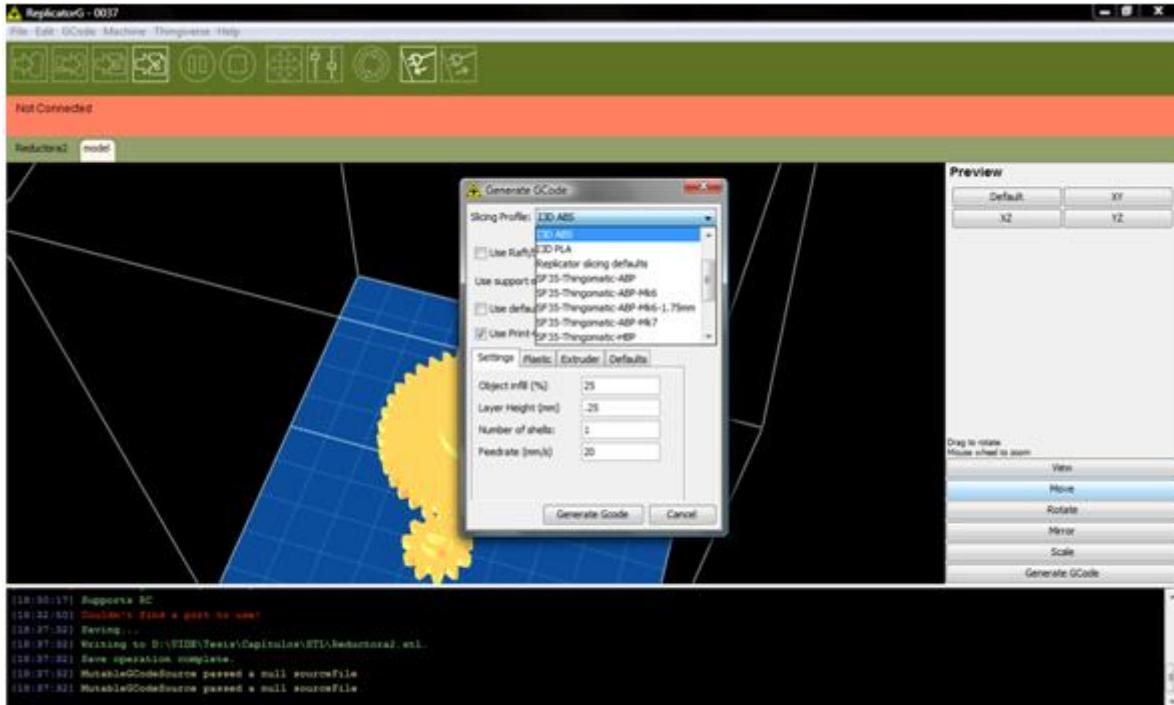
Escoger el perfil de máquina creado para la I3D V1.0:



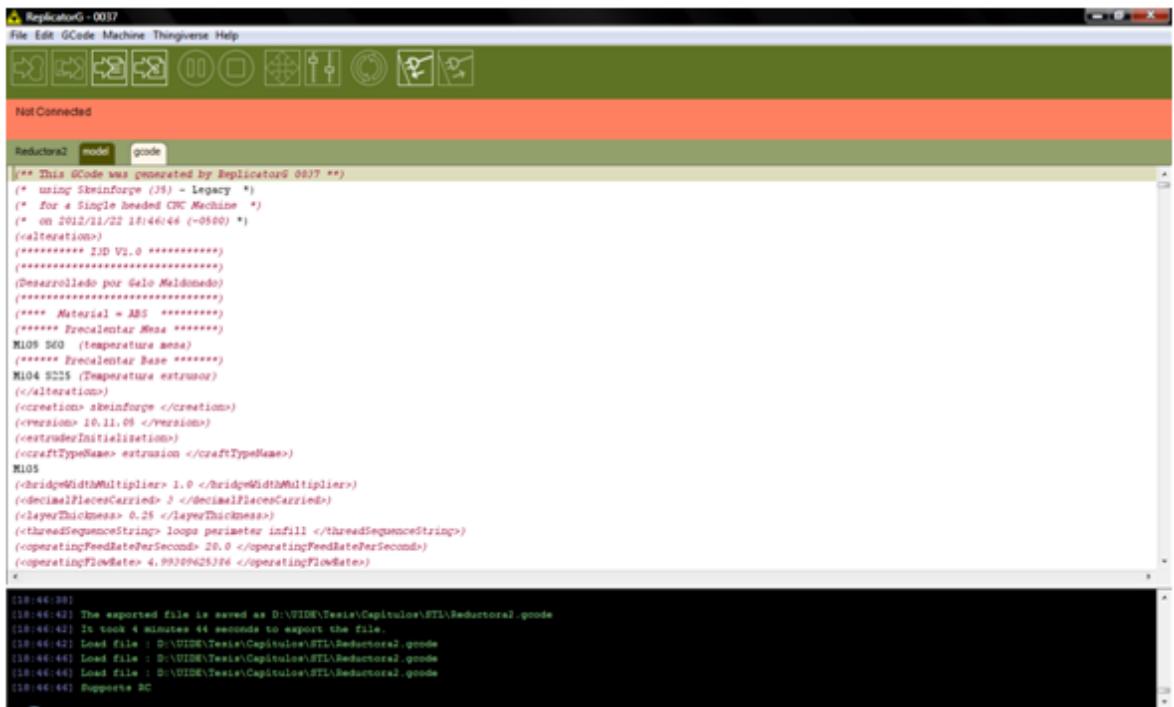
Escojer Skeinforge 35 para generar el código G de impresión:



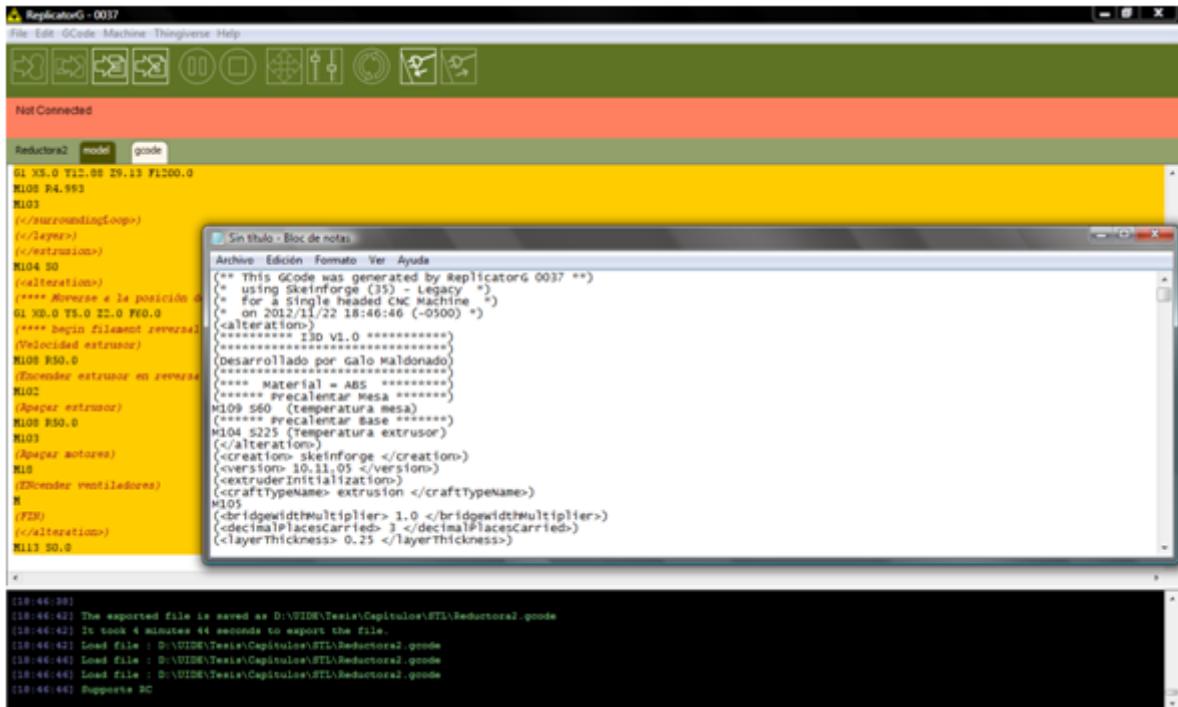
Presionar el botón de generar código G y se selecciona el perfil de impresión creado (consultar manual de usuario), para el caso del ABS se tiene:



Presionar el botón de generar código G del recuadro y se genera el código:



Copiar el código y almacenar en un archivo “.txt”:



Almacenar el archivo “*.txt” en una memoria SD o micro SD y se introduce en la I3D V1.0.

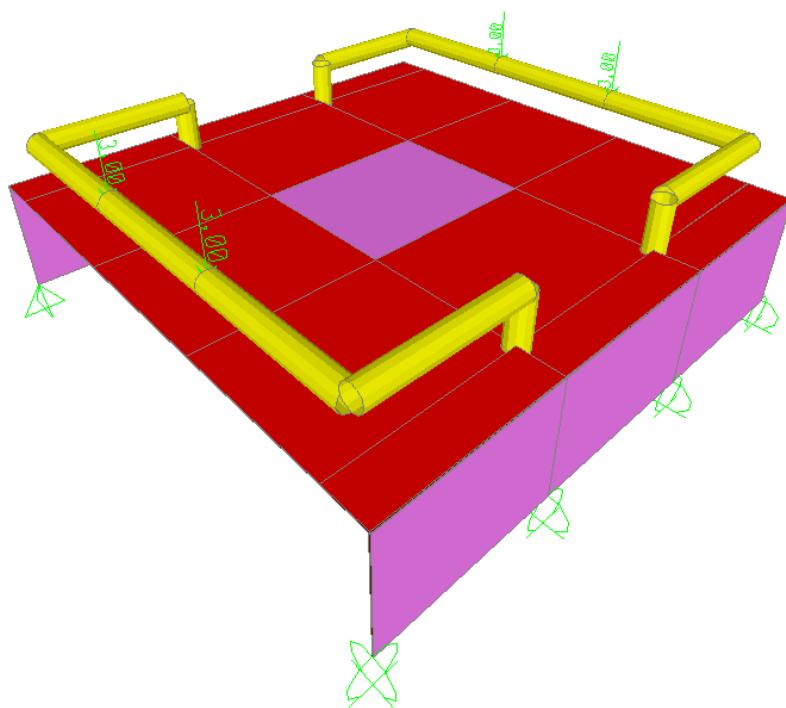
ANEXO 12

ANÁLISIS ESTRUCTURA

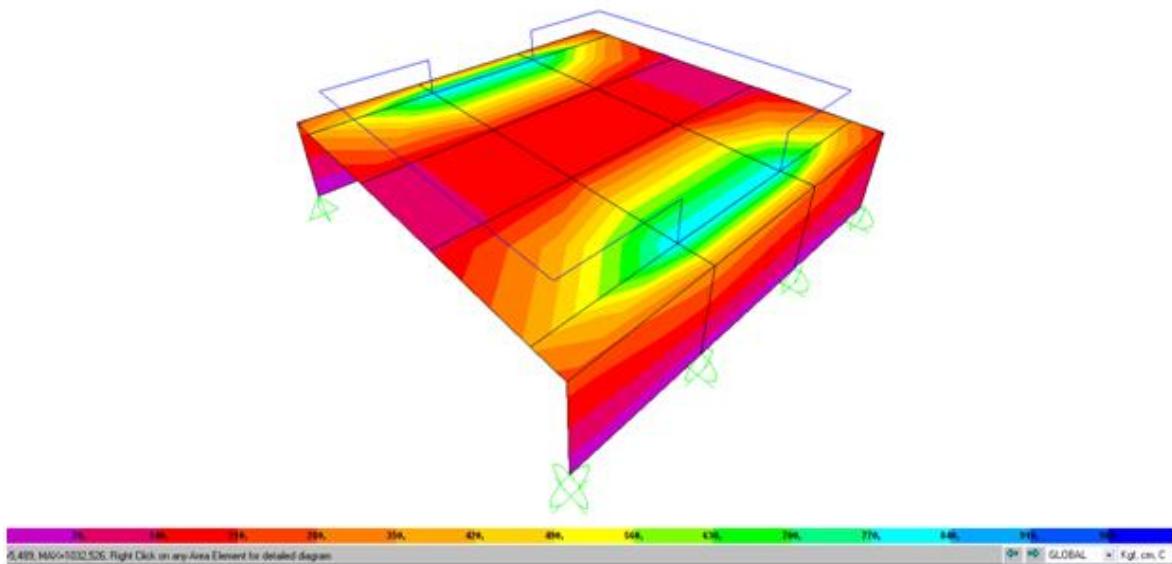
El análisis estructural se lo realizó utilizando las facilidades computacionales para resolver mediante el método de los elementos finitos, el modelo matemático representativo de la estructura real, para lo cual se utilizo el programa SAP 2000. El modelo estructural es tridimensional y considera la ubicación en el espacio de todos y cada una de los elementos que lo componen, por lo que, se toman en cuenta en estos todas las acciones de un elemento espacial, como son: los momentos flectores en los dos ejes principales de la sección transversal, su fuerza axial, las fuerzas de corte en dirección de los dos ejes principales, y el momento torsor.

Las cargas actuantes se las localiza puntualmente en la tubería. El peso propio de los elementos se computa automáticamente por el software utilizado en el análisis estructural.

CARGA DE TRABAJO = 3 kgf

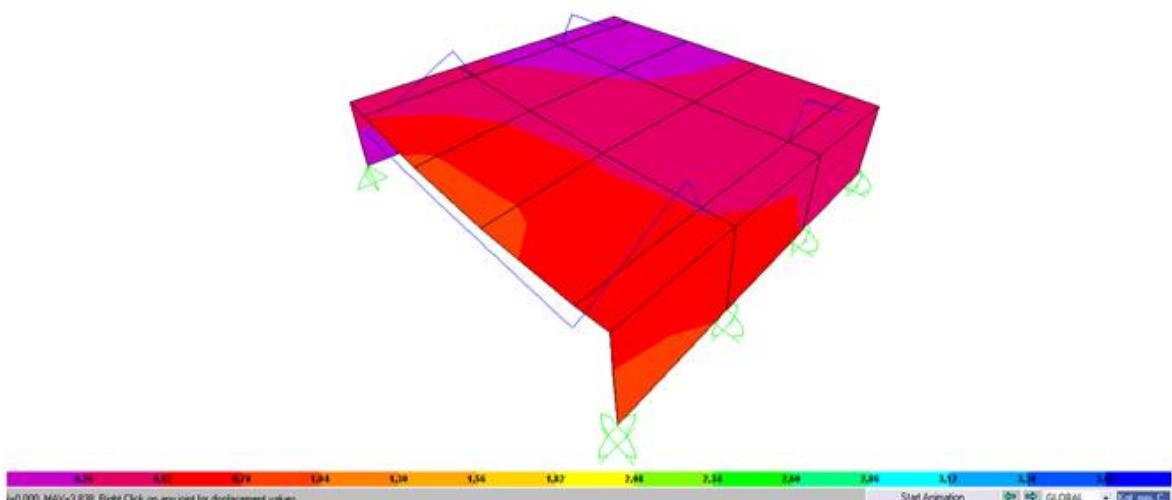


ESFUERZOS EN LA PLANCHA



La plancha tiene esfuerzos máximos en la zona del anclaje con la carcasa, con un valor de 1032 kgf/cm², que si se lo compara con el esfuerzo admisible del acero que es de 1537 kgf/cm² (f_y/f_s =esfuerzo admisible; f_y =límite de fluencia; $f_s=1.65$ factor de seguridad); cumple con el criterio de diseño por esfuerzo admisible, ya que el resultado es menor al valor indicado.

DEFLEXIÓN EN LA PLANCHA



La mayor deflexión se suscita en la aplicación de la carga y tiene un valor de 3.8mm

ANEXO 13

PLANOS MECÁNICOS

ANEXO 14

MANUAL DE USO Y OPERACIÓN Y MANUAL TÉCNICO