

Diseño e implementación de un aditamento para permitir el funcionamiento de una impresora 3D con material reciclado.

Iván Mauricio Castellanos Ramírez, Sebastian Ramiro Moreno Piñeros y Maria Andrea Méndez Jiménez.

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Electrónico.

Director

Jaime Guillermo Barrero Pérez

Magíster en Potencia Eléctrica

Codirector

Carlos Rodrigo Correa Cely

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2026

### **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi mamá, Ana Delina Ramirez por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional durante todo este proceso. Gracias por creer en mí y motivarme a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. A mi familia, por sus palabras de ánimo y por acompañarme en cada etapa de este camino. Asimismo, agradezco a mis docentes, quienes con dedicación y compromiso compartieron sus conocimientos y contribuyeron significativamente a mi formación académica y personal.

Iván Mauricio Castellanos Ramirez.

Agradecer a mis padres, quienes a pesar de todas las dificultades, tropiezos, errores y luchas han sabido mantenernos unidos, recibiendo así su interminable e incondicional apoyo. Agradecer a mi hermana quien me dio consejo, ayuda y guía para navegar distintas situaciones que se me presentaron a lo largo de mi periodo de formación. Finalmente agradecer al profesor Jaime Barrero, quien me otorgó las oportunidades precisas para demostrar mi conocimiento y me abrió las puertas al conocimiento que hoy en día me acompaña y ayuda.

Sebastian Ramiro Moreno Piñeros.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento, en primer lugar, a Dios, por permitirme llegar hasta este momento y brindarme la fortaleza necesaria para continuar en cada etapa de este proceso. A mis padres, a quienes les debo todo, por su amor, apoyo incondicional y por ser mi mayor inspiración. A mis hermanos, por su compañía y respaldo constante. A mi mejor amiga, por estar siempre a mi lado a lo largo de este camino. Asimismo, agradezco a mis docentes y directores de proyecto por su orientación, apoyo y acompañamiento durante todo el desarrollo de este trabajo.

Maria Andrea Méndez Jiménez.

**Tabla De Contenido**

Introducción	10
1. Objetivos	11
1.1. Objetivo general	11
1.2. Objetivos específicos	11
2. Cuerpo del Trabajo	12
2.1 Marco Teórico	12
2.2 Problema a Solucionar	14
2.3 Planteamiento del Diseño	14
3. Montaje	27
4. Observaciones	41
5. Conclusiones	41
6. Recomendaciones	42
Referencias	43
Apéndice	45

**Lista de Figuras**

Figura 1. Boceto digital del prototipo.	15
Figura 2. Forma del transportador de material.	16
Figura 3. Lazo abierto de control.	18
Figura 4. Lazo cerrado de control.	18
Figura 5. Control PID.	20
Figura 6. Representación de máquinas de estado.	21
Figura 7. Control de velocidad por PWM 90W ZS-X4B.	24
Figura 8. Esquemático para conexión de celda de carga.	25
Figura 9. Esquemático para control de temperatura.	26
Figura 10. Esquemático para la etapa de potencia.	28
Figura 11. Esquemático de divisor de tensión para NTC.	29
Figura 12. Conexión de pantalla LCD.	31
Figura 13. Primera mitad del esquemático electrónico del prototipo.	32
Figura 14. Segunda mitad del esquemático electrónico del prototipo.	32
Figura 15. Resultado de la medición de temperatura.	33
Figura 16. Parámetros para la aproximación de la respuesta al escalón.	34
Figura 17. Comparación de los datos tomados y su aproximación.	34
Figura 18. Resultado de la simulación respuesta al escalón.	35
Figura 19. Diseño 3D del prototipo final.	36
Figura 20. Diseño 3D del apartado de la tolva del prototipo final.	36
Figura 21. Diseño 3D del apartado mecánico del prototipo final.	37
Figura 22. Montaje final del prototipo.	38
Figura 23. Resultado a la respuesta al escalón del prototipo.	39
Figura 24. Comparativa de la medición con y sin controlador.	40

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Características de los materiales para impresión 3D.	13
Tabla 2. Diseño 3D de los protótipos.	16
Tabla 3. Microcontroladores usados para pruebas.	22
Tabla 4. Motores usados en las pruebas.	23
Tabla 5. Sensores de temperatura usados en las pruebas.	27

**Lista de Apéndices**

Apendices 1. Repositorio Github	45
---------------------------------	----

## Resumen

**Título:** Diseño e implementación de un aditamento para permitir el funcionamiento de una Impresora 3D con material reciclado.

**Autores:** Ivan Mauricio Castellanos Ramirez, Maria Andrea Méndez Jiménez, Sebastián Ramiro Moreno Piñeros.

**Palabras Claves:** Impresora 3D, Reciclaje, Control, Plásticos.

### Descripción:

El presente proyecto tuvo como objetivo diseñar e implementar un aditamento capaz de producir filamento para impresoras 3D a partir de materiales reciclados, buscando reducir costos y contribuir al aprovechamiento de residuos plásticos. Para ello, se desarrolló un sistema de extrusión basado en tecnologías utilizadas en impresoras 3D tipo FDM, incorporando un mecanismo de control de temperatura que permitiera trabajar con distintos materiales termoplásticos como PLA, ABS y PET, cada uno con diferentes temperaturas de fusión.

El prototipo diseñado incluye un sistema mecánico compuesto por una tolva, un tornillo sin fin, un motor DC, una boquilla de extrusión y un sistema de transporte de material. Además, se implementó un sistema electrónico basado en un microcontrolador Arduino Nano, encargado del control de temperatura mediante un controlador PID, utilizando un termistor NTC como sensor y resistencias térmicas de 40 W como fuente de calor. El sistema también integra una interfaz de usuario con pantalla LCD y encoder rotativo para configurar parámetros de operación.

Durante el desarrollo se construyeron tres prototipos con distintas configuraciones mecánicas y estructurales, evaluando aspectos como estabilidad, consumo energético y facilidad de operación. Finalmente, el tercer prototipo, fabricado en acero galvanizado, presentó los mejores resultados en términos de funcionamiento, estabilidad y resistencia.

Las pruebas realizadas demostraron que el sistema fue capaz de mantener temperaturas estables de hasta 260 °C y generar aproximadamente 4 metros de filamento útil. Asimismo, se concluyó que el control PID permitió una extrusión más precisa y segura, validando la viabilidad del uso de material reciclado para aplicaciones de impresión 3D.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica

Director: Jaime Guillermo Barrero Pérez, Magíster en Potencia Eléctrica. Codirector: Carlos Rodrigo Correa Cely, Doctor en Ingeniería Química.

## Abstract

**Title:** Design and implementation of an attachment to allow the work of a 3D printer with recycled material.

**Authors:** Ivan Mauricio Castellanos Ramirez, Maria Andrea Méndez Jiménez, Sebastián Ramiro Moreno Piñeros.

**Keywords:** 3D printer, Recycling, Control, Plastic materials.

**Description:** The current project had as objective to design and to implement an accessory capable of producing 3D printer filament using recycled materials as a base, looking to lower costs and contribute to the usage of plastic residues. In order to meet the objectives, an extrusion system was developed based on FDM 3D printer's technologies including a temperature control mechanism that allows it to work with different thermoplastic materials, such as PLA, ABS and PET, each one of them with different fusion temperatures.

The designed prototype includes a mechanical system, compound of a hopper, a worm screw, a DC motor, an extrusion nozzle and a transporting system. Furthermore, an electronic system was implemented based on an Arduino Nano microcontroller, in charge of the temperature control using PID control, a NTC thermistor and 40W thermal resistances as the heat source. The system also integrates an user interface using a LCD display and rotational encoder to set operation parameters.

During the development three prototypes with different mechanical and structural configurations, testing different aspects such as stability, energy consumption and ease of operation. Finally the third prototype, fabricated with galvanized steel, showed the best results in terms of functioning, stability and strength.

The tests showed the system was capable of maintaining stable temperatures up to 260 °C and generating approximately 4 meters of usable filament. In addition, it's concluded that the PID control allowed a more precise and smoother extrusion, confirming the viability of recycled plastic materials for 3D printing.

---

\*Degree Work

\*\*Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Director: Jaime Barrero Guillermo Pérez, Master in Electric Power. Co-director: Carlos Rodrigo Correa Cely, PhD in Chemical Engineering.

## Glosario

**3D:** Representación en tres dimensiones del espacio, longitud, anchura y profundidad.

**ABS:** Acrylonitrile Butadiene Styrene o Acrilonitrilo Butadieno Estireno, es un termoplástico amorfo altamente resistente al impacto, usado ampliamente en la industria automotriz.

**FDM:** Modelado por Deposición Fundida, modelo de fabricación a pequeña escala para modelado de prototipos.

**LCD:** Liquid Crystal Display, tipo de pantalla que usa cristal líquido de píxeles únicos colocados en frente de una fuente de luz, usada ampliamente en dispositivos pequeños por su bajo consumo de energía.

**NTC:** Negative Temperature Coefficient, referente a termistores de coeficiente negativo, son termistores que disminuyen su capacidad resistiva en función al aumento de temperatura.

**PCB:** Printed Circuit Board o Placa de Circuito Impreso, es una placa conformada por caminos y planos conductores sobre una superficie no conductora para circuitos eléctricos.

**PET:** Tereftalato de Polietileno, plástico ampliamente usado en la industria para envases y textiles.

**PID:** Proporcional, Integral, Derivativo; es un método consolidado para llevar un sistema a un punto de ajuste determinado.

**PLA:** Ácido Poliláctico es un bioplástico constituido por elementos similares al ácido láctico con propiedades similares a la del plástico PET de uso común en envases.

**PPR:** Pulsos por Revolución, unidad usada para calcular el número de pulsos generados por un sistema electrónico cuando se usa en motores de paso o motores paso a paso.

**PWM:** Pulse Width Modulation o Modulación por Ancho de pulso, es una técnica de modulación de señales digitales, se modifica el ciclo de trabajo con el fin de transmitir información.

## **Introducción**

La evolución de la tecnología y la creciente necesidad de materias primas ha llevado al mundo a refugiarse en el reciclaje; procesos que permiten adecuar y reutilizar desechos u objetos que han terminado su utilidad para extender su vida útil o suplir necesidades que de otra forma no existirían.

En los últimos años se ha popularizado la impresión 3D, técnica que permite la fabricación de distintos objetos o dispositivos sin necesidad de diseños complejos o plantas de manufactura masivas que, entre otras cosas, producen toneladas de CO<sub>2</sub> al año sin contar los desechos producidos en consecuencia causado por subproductos indeseados o empaques que inmediatamente terminan en enormes campos de basura.

Con este proyecto se busca aportar un grano de arena a la creciente amenaza que representan los desechos plásticos para el ecosistema y la vida silvestre, reciclando plásticos como PET, de uso cotidiano en bolsas o botellas plásticas, o incluso PLA, materia prima de impresiones 3D.

Para desarrollar la visión del reciclaje en un dispositivo compacto se propone un extrusor de bajo consumo con el cual se pueda fabricar filamento plástico usable en impresoras 3D FDM comerciales, extruyendo plásticos con una temperatura máxima de hasta 270 °C y a una velocidad mínima de 20.8mm/s.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Diseñar e implementar un aditamento que permita usar material reciclado para la impresión 3D de prototipos.

### **1.2. Objetivos Específicos**

Diseñar el sistema de control de temperatura para poder usar diversos tipos de materiales reciclados y adecuados a la impresión 3D.

Implementar un módulo el cual permite acoplarse con las impresoras 3D, para generar filamento para realizar impresiones a partir de material reciclado.

Realizar diversos prototipos con diferentes tipos de material para determinar el adecuado para aplicaciones específicas.

## 2. Cuerpo del Trabajo

### 2.1 Marco Teórico

**Extrusión de Plásticos:** La extrusión de plástico es un proceso de fabricación que consiste en la fusión homogénea de un material termoplástico, el cual puede presentarse en forma de pellets, polvo o granos. Una vez fundido, el material es impulsado mediante la aplicación de presión a través del orificio de una boquilla, lo que permite que adopte la forma deseada durante el proceso en este caso forma de filamento.

**Impresión 3D:** Las Impresoras 3D comerciales utilizan un filamento de impresión con un diámetro de 1.75 mm, y su velocidad de trabajo varía dependiendo del modelo de la impresora.

Este prototipo va enfocado a la impresión FDM (Modelado por Deposición Fundida) el cual permite el uso de distintos materiales entre los cuales se requiere seleccionar los materiales adecuados para dicho tipo de impresión, dentro de los cuales se han seleccionado tres, por su facilidad para hacer filamento y son reciclables, los cuales son:

**Materiales de Impresión:** Los materiales usados en impresión 3D dependen del tipo de impresión 3D, existen diversos materiales como lo son el PLA(poliácido láctico), ABS(acrilonitrilo butadieno estireno), nylon, TPE,TPU(elastómeros termoplásticos), PET(polietileno tereftalato ) entre otros.

**PLA (Poliácido Láctico):** Por ser el más común, fácil de usar, económico. El poliácido láctico comúnmente conocido como PLA, es un polímero biodegradable ya que se obtiene de productos ricos en almidón como lo pueden ser el maíz, la yuca, la remolacha, entre otros; es bastante versátil, fácil de trabajar y puede ser comparado con materiales plásticos obtenidos de petróleo compartiendo ciertas características.

**ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno):** Ampliamente usado en la ingeniería debido a sus propiedades mecánicas y un bajo costo debido a su proceso de elaboración, siendo un producto fabricado a base de derivados del petróleo usado ampliamente en diversos ámbitos, se destaca por:

- Rigidez, resistencia a los ataques químicos, estabilidad a la alta temperatura y dureza gracias al acrilonitrilo
- Tenacidad a cualquier temperatura siendo una ventaja en ambientes fríos evitando así que se vuelva quebradizo como los demás plásticos, es por el butadieno.
- La resistencia mecánica y la rigidez es debido al estireno

**PET (Tereftalato de Polietileno):** Es el material reciclable más común. Este es un tipo de termoplástico transparente, brillante y ligero comúnmente usado para fabricar envases plásticos.

Es un polímero que se obtiene mediante el método de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol siendo este un perteneciente al grupo de los polyester.

**Tabla 1.**

*Características de los materiales para impresión 3D.*

Característica	PLA	ABS	PET
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.24	1.02-1.08	1.38
Resistencia a la tracción (MPa)	47-70	32	91
Temperatura de deformación (°C)	55	80-100	81
Temperatura de fusión (°C)	En impresión 3D requiere 200 a 220	En impresión 3D requiere 230 a 260	244

<b>Elongación</b>	3%	5-20%	4-14%
<b>Reciclaje</b>	Se puede reciclar hasta 5 veces	Se puede reciclar hasta 5 veces	Se estima que 10 veces antes de perder sus propiedades
<b>Otras</b>	Muy baja resistencia a la humedad	Es muy resistente a la tensión y es de alto impacto	Es transparente, frecuentemente usado en industria alimenticia y textil

Para el óptimo funcionamiento del sistema se usa un máximo de temperatura de 260 °C para evitar inestabilidades en el sistema de control, así mismo el producto resultante se almacena en carretes para uso posterior en Impresoras 3D.

## 2.2 Problema a Solucionar

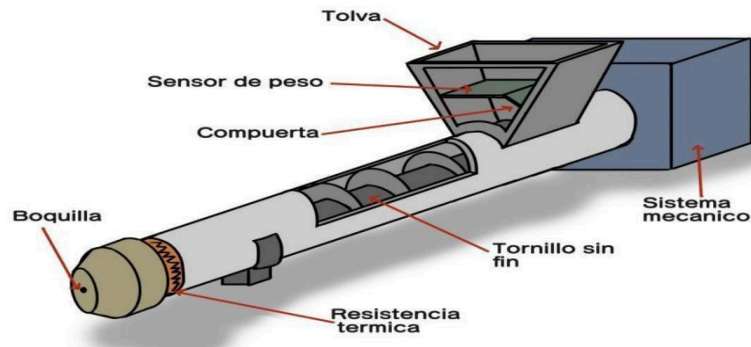
Entre los diversos problemas que pueden surgir al momento de imprimir en 3D el más costoso es la obtención de su materia prima, el filamento, debido a que durante los procesos de impresión numerosos fallos técnicos o mecánicos pueden llevar a la pérdida total del material, el cual en la actualidad no tiene un bajo costo para el uso específico de impresión 3D.

## 2.3 Planteamiento del Diseño

El prototipo está principalmente basado en el tipo de extrusoras de tubería de plástico, puesto que el resultado esperado es un cable o filamento de plástico con un diámetro de 1.75 mm. Al ser pequeña la salida de material el sistema no tiene que tener grandes proporciones y tampoco es para producción masiva de filamento. La estructura estará sobre una superficie lo más rígida posible para evitar que se mueva ya que el motor genera mucha vibración al momento de mover el material.

**Figura 1.**

*Boceto digital del prototipo final.*



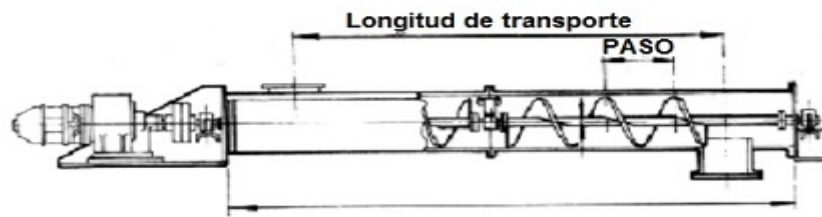
Teniendo en cuenta que la temperatura de operación requerida para pasar los materiales termoplásticos de estado sólido a estado líquido está alrededor de 180 °C para el PLA hasta un máximo de 260 °C para el PET, lo cual requiere una resistencia térmica adecuada para lograr dicha temperatura.

El diámetro del filamento utilizado comúnmente en impresión 3D es de 1.75 mm, por lo tanto la boquilla debe tener un orificio ligeramente inferior, ya que la extrusión plástica puede presentar diversas deformaciones a la salida del material y es preferible que el diámetro sea ligeramente inferior porque de lo contrario presentaría atascos en la impresora 3D.

**Transporte de Material:** El tipo de extrusión de tubería es preferiblemente usado para realización de filamento para impresión 3D y este sistema usa un tornillo sin fin para el desplazamiento de material.

**Figura 2.**

*Forma del transportador de material. Ingemecanica (2024).*



**Tornillos Helicoidales o Tornillos Sin Fin:** Los tornillos helicoidales o tornillos sinfin complementan sistemas de transporte en tubos o canales, se compone de un eje y hélice que al girar transporta material, debido a esto, este sistema puede ser empleado para mezclar material o dosificar material.

**Prototipos:****Tabla 2.**

*Diseño 3D de los prototipos.*

Prototipo #1	Prototipo #2	Prototipo #3

Hecho en acero inoxidable por medio de mecanizado CNC, contó con un tornillo sinfin de diámetro creciente con el fin de triturar material a medida que se desplazaba, sin embargo generó atascos que incrementaron en gran medida el consumo de corriente, haciéndolo inviable para los objetivos de este proyecto.

Para el segundo prototipo se redujo el diámetro del tubo y el tornillo transportador, se usó un tubo galvanizado de  $\frac{3}{4}$  '' la tolva se diseñó e imprimió en 3d y se acopló al tubo.

A diferencia del primer prototipo para este se cambió la orientación de vertical a horizontal.

Para el tercer se realizó la tolva y se soldó el tubo, ambos de acero galvanizado, para dar mejor sujeción y firmeza, consta de una pieza sólida que integra tanto tolva como tubo de transporte, garantizando pérdida mínima de material.

**Prototipos Desarrollados:**

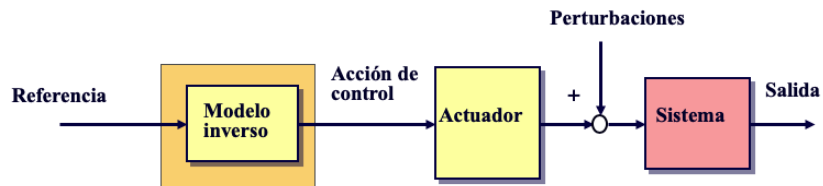
- **Prototipo 1:** Se diseñó en forma vertical para favorecer el flujo del material. Sin embargo, resultó incómodo al momento de cargar la tolva, ocupaba demasiado espacio y la estructura de soporte era complicada. Además, al estar construido completamente en acero, era muy pesado, lo que exigía un motor con alto torque y generaba un consumo energético elevado.
- **Prototipo 2:** Se cambió la orientación a horizontal y se rediseñó la estructura con materiales más livianos y compactos. Se utilizó un tubo de acero galvanizado de menor diámetro y un tornillo sin fin más pequeño. La tolva se fabricó en impresión 3D y se reemplazó el motor. El inconveniente fue que la tolva impresa se desprendía debido a las vibraciones y al movimiento del motor.
- **Prototipo 3:** Similar al segundo, pero con mejoras clave: la tolva se fabricó en acero galvanizado y se soldó directamente al ducto, lo que soluciona el problema de desprendimiento. También se cambió nuevamente el motor para optimizar el funcionamiento.

**Apartado de Control:** Este apartado permite la manipulación o control de las salidas acorde a una entrada tal que nos permita obtener una salida deseada. Existen dos tipos de sistemas de control y dependiendo de la aplicación que se necesite se pueden usar uno u otro.

**Sistema de Control Abierto (Open Loop Control System):** Se caracteriza porque no obtenemos información del proceso realizado, solo lo realiza, por ejemplo, una lavadora común realiza los ciclos de lavado, pero no se asegura si la ropa está limpia, solo realiza las acciones por tiempo.

**Figura 3.**

*Lazo abierto de control. Bookdown (2009).*

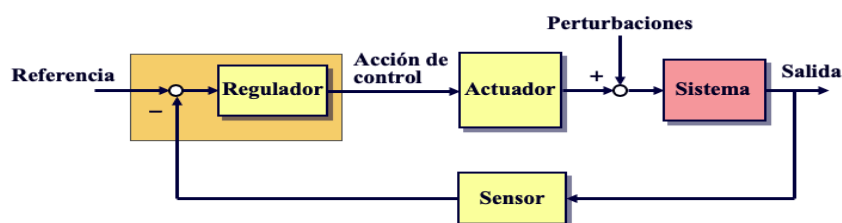


Este sistema es sencillo de implementar, de fácil mantenimiento, es propenso a las perturbaciones y depende estrictamente de la calibración del sistema.

**Sistema de Control Cerrado:** (Close loop control system) este sistema de control recibe una retroalimentación de la salida del proceso con lo cual se le conoce como feedback control system permitiendo así un control automático, por ejemplo un sistema de llenado de un depósito, este está constantemente preguntando o censando la salida para determinar si el depósito ya está lleno mientras no lo esté seguirá suministrando líquido, pero si el depósito se llena se corta el suministro.

**Figura 4.**

*Lazo cerrado de control. Bookdown (2009).*



Estos sistemas suelen llegar a ser bastante complejos pero se pueden lograr controles automáticos y bastante eficientes ante posibles perturbaciones.

**Control de Temperatura:** La etapa más importante la cual es fundir el material, en esta etapa realizamos un control el cual permite mantener una temperatura estable para fundir el material, se requiere de un sensor de temperatura, las resistencias térmicas y los

componentes para controlar dicha temperatura mediante la conexión eléctrica de las resistencias.

**Sensado de Material:** Esta etapa consta de la regulación de la cantidad de material entrante, el material se deposita en una tolva la cual cuenta con una celda de carga y de una compuerta la cual abre paso al material que fue censado.

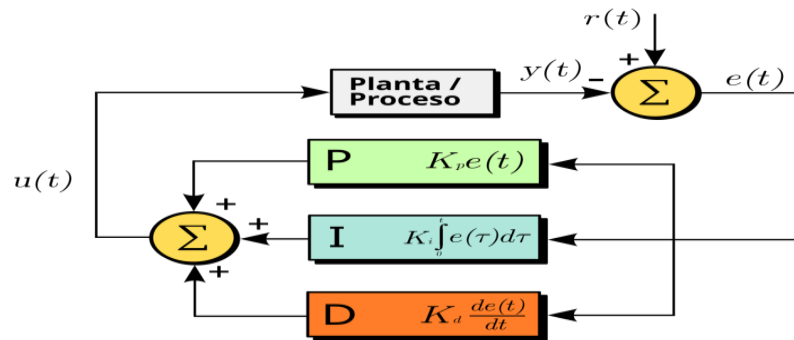
**Celda de Carga:** La celda de carga es un transductor o sensor electromecánico capaz de convertir la tensión o fuerza en una señal eléctrica, su diseño permite que el material presente una leve deformación generando así una señal eléctrica acorde a dicha deformación. Dicha celda se encarga de calcular el peso del material que se quiere extruir en el proceso.

**La Compuerta:** La compuerta es un mecanismo que controla la cantidad de material que entra por la tolva, y está compuesta por sistemas mecánicos para moverla de manera automática, suelen ser controlados por motores y demás mecanismos, para esta etapa puntualmente se requerirá del uso de un servomotor ya que ofrece el torque necesario y un giro controlado para una pequeña compuerta.

**Control PID Digital:** Para asegurar un correcto control de temperatura y mantener estabilidad durante la extrusión del material plástico, se utiliza un control PID (Proporcional, Integral y Derivativo), el cual emplea información pasada y predicciones para sostener la estabilidad en el tiempo. Este se aplica en sistemas de realimentación para corregir errores entre el estado actual y el deseado. Los parámetros P, I y D se obtuvieron de forma empírica mediante la herramienta MATLAB.

**Figura 5.**

*Control PID. controlautomaticoeducacion (2015, February 28).*



Este tipo de controladores afecta la señal o estado del sistema con ganancias  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$ , siendo estos ganancia proporcional, derivativa e integral respectivamente, dando como

resultado el siguiente algoritmo:  $y(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^y e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}$ , en donde la

función  $e(t)$  hace referencia al error entre el punto de estabilidad y la señal real sensada en el sistema.

Sin embargo, como se puede concluir de la función de transferencia de este sistema que se introducen tanto ceros como polos que afectan a la respuesta transitoria del sistema, y específicamente a efectos de un control de temperatura, la respuesta escalón.

**Apartado de UI (Interfaz de Usuario):** Como su nombre lo indica la interfaz de usuario es el apartado donde podremos monitorear y establecer parámetros para el correcto funcionamiento o lo que queremos que haga la máquina en sí.

Esta interfaz consta de un monitor o pantalla, un módulo de direccionamiento o accionamiento.

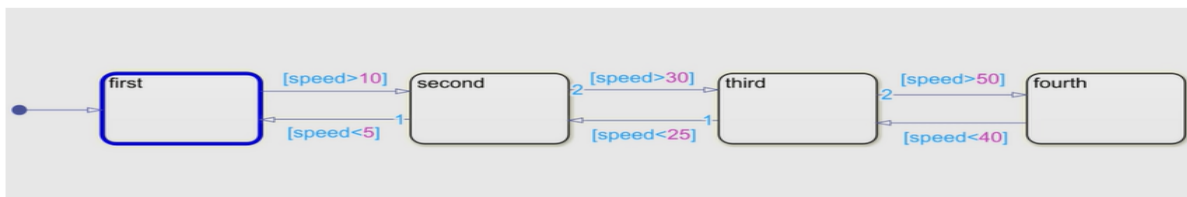
**Mando de Control:** Para poder manipular los parámetros y las opciones que ofrece el equipo se requiere de un sistema para poder seleccionarla dentro de los más comunes están los botones, las matrices de botones y los encoder rotativos.

**Encoder Rotativos:** Los encoder son unos sensores de detección de movimiento generando una señal eléctrica por el desplazamiento ya sea lineal o rotacional. Son usados generalmente para la detección de velocidad movimiento lineal o para sensar una posición específica. Dependiendo de la salida se pueden categorizar dos tipos de encoders, incrementales o rotativos, para la realización de este proyecto se usó el encoder absoluto.

**Máquina de Estados:** La máquina de estados es una representación gráfica de un sistema donde se muestran los estados y las condiciones requeridas para que se presente un cambio. Son comúnmente usados en informática para modelar complejos sistemas dinámicos como robótica, aeroespaciales, automóviles y teléfonos móviles. Un ejemplo puede ser la representación de la caja de cambios de un vehículo.

**Figura 6.**

*Representación de máquinas de estado. Mathworks (2026).*

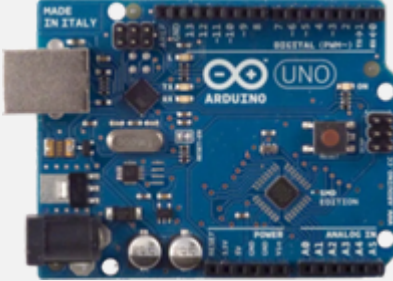

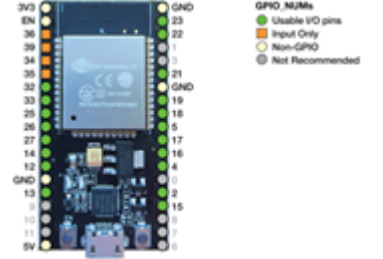


Inicialmente está en reposo, para salir de ese estado se ponen los cambios y acelera, luego pasamos al estado en primera y no sale de este estado hasta alcanzar una velocidad para cambiar de estado y así se va cambiando entre estados.

**Selección de Microcontroladores:**

**Tabla 3.**

*Microcontroladores usados para pruebas.*

Arduino UNO	Arduino NANO	ESP32
		
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Microcontrolador: ATmega328P.</li> <li>● Velocidad de reloj: 16 MHz.</li> <li>● Voltaje de trabajo: 5V.</li> <li>● Voltaje de entrada: 7,5 a 12 voltios.</li> <li>● Pinout: 14 pines digitales (6 PWM) y 6 pines analógicos.</li> <li>● 1 puerto serie por hardware.</li> <li>● Memoria: 32 KB Flash (0,5 para bootloader), 2KB RAM y 1KB Eeprom</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Microcontrolador: ATmega328P.</li> <li>● Velocidad de reloj: 16 MHz.</li> <li>● Voltaje de trabajo: 5V.</li> <li>● Voltaje de entrada: 7,5 a 12 voltios.</li> <li>● Pinout: 14 pines digitales (6 PWM) y 8 pines analógicos.</li> <li>● 1 puerto serie por hardware.</li> <li>● Memoria: 32 KB Flash (2KB para bootloader), 2KB RAM y 1KB Eeprom</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Microprocesador Xtensa dual-core 32-bit LX6 hasta 240 MHz</li> <li>● Memoria ROM 448 KB</li> <li>● Memoria SRAM 520 KB</li> <li>● Memoria SRAM en RTC 16KB</li> <li>● Pines Digitales GPIO: 24 (algunos pines solo como entrada)</li> <li>● Pines PWM: 16</li> <li>● Pines Analógicos ADC: 18 (3.3V, 12bit: 4095, tipo SAR,)</li> <li>● Conversor Digital a Analógico DAC: 2 (8bit)</li> <li>● Voltaje de Alimentación (USB-C): 5V DC</li> <li>● Voltaje de Alimentación (Vin): 4V-12V DC (5V-9V recomendado)</li> <li>● Voltaje de Entradas/Salidas: 3.3V DC</li> </ul>

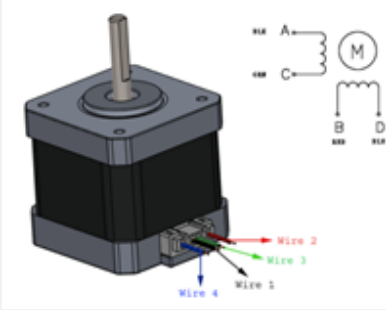


De los microcontroladores opcionales para la elaboración del prototipo y después de realizar pruebas de control optamos por usar el arduino nano, por ser fácil de usar, ser pequeño, su bajo costo y su capacidad de memoria que nos permitió cargar la programación al completo.

**Arduino Nano CH340G:** Placa de tamaño compacto con conexión USB Mini-B. Tiene veinte pines digitales de los cuales seis pueden generar PWM, ocho entradas analógicas, y puede programarse con el IDE de Arduino. El Arduino Nano CH340G opera en rangos de 3.3 V a 5 V. Es de bajo costo y fácil acceso.

**Selección del Motor:** El sistema está compuesto por dos motores diferentes, un motor en dc de 7 V y un servomotor.

#### Tabla 4.

*Motores usados en las pruebas.*

Motor paso a paso nema 23	7.2 brushed micro PMDC	Motor RS550 12v
 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltage Rating: 3.2 V</li> <li>• Current Rating: 2.8 A</li> <li>• Holding Torque: 270 oz. in</li> <li>• Step Angle: 1.8 °.</li> <li>• Steps Per Revolution: 200</li> <li>• requiere driver T6600 motor nema 4A</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltage Rating: 7.2 V</li> <li>• velocidad 3000-8000 RPM</li> <li>• Potencia 50-300 W</li> <li>• Torque 336 mN.m</li> <li>• requiere de regulador de tensión de 12V a 7.2V</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad nominal de 15 669 RPM,</li> <li>• Corriente de 8,4</li> <li>• Un torque de 441 mN·m.</li> </ul>

De las diversas pruebas para el transporte de material, usamos el motor RS550 12 V ya que tiene la fuerza necesaria para el transporte de material, ya que su tensión de alimentación es de 12V no se requiere de un regulador de tensión ya que usamos una fuente DC de 12 V.

**Motor RS-550:** Se empleó un motor de corriente directa (DC) de 12 V, con una velocidad nominal de 15 669 RPM, una corriente de 8,4 A y un torque de 441 mN·m. Este motor proporciona el movimiento de rotación necesario para accionar el sistema de tornillo sinfín, cuya función es extruir el material fundido hacia la tolva de salida.

### Control de Velocidad del Motor DC

#### Figura 7.

*Control de velocidad por PWM 90W Zs- X4B. Mercadolibre (2026)*



Es un controlador de velocidad que funciona con un voltaje de 3 V a 35 V, tiene una POTENCIA de 90 W y una corriente en reposo de 0.015 A, su frecuencia es de 10 kHz, el cual se puede controlar de forma digital, sin embargo se decidió el control manual de velocidad usando el potenciómetro acoplado para esta aplicación.

**Servomotor MG90s 2.5 Kg, control de la compuerta dosificadora:** Servomotor de tamaño compacto usado para aplicación en bajo torque del sistema tornillo sinfín. Rota 180 ° (90 ° en cada dirección). Puede trabajar con diversas plataformas de desarrollo como Arduino, PICs, Raspberry Pi, etc. Su función consistió en habilitar la apertura de la compuerta del compartimento de pesaje y garantizar el vertido del material en la tolva.

**Celda de Carga para sensado de peso del material:** Para el prototipo se usó la celda de carga de 1 kg, ya que está pensada para pocas cantidades de material y esa celda es la más fácil de conseguir. La celda de carga requiere del módulo HX711, el cual es un conversor

analógico a digital de 24 bits con el fin de amplificar la señal de entrada para su uso en el ambiente de programación Arduino IDE.

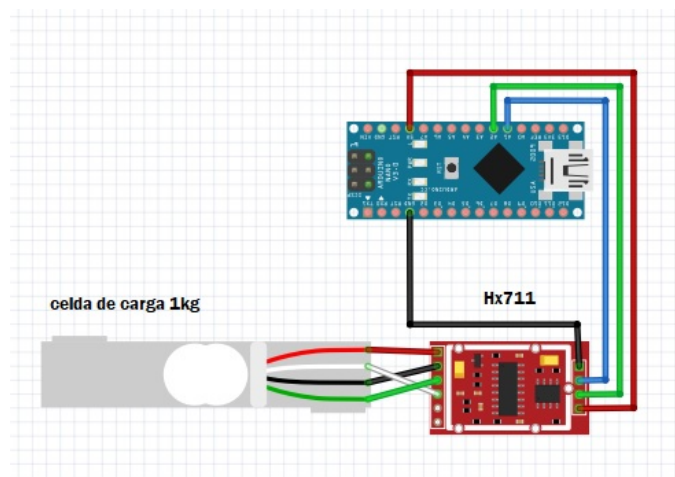
Este módulo requiere de calibración tal que se necesita estimar el peso del recipiente donde se va a depositar el material que se va a pesar, entonces se conecta el sistema y se deja establecer el valor de la lectura, luego se deposita un peso conocido como referencia y mediante una regla de 3 se calcula la escala o la constante.

$$Escala = \frac{\text{valor de lectura}}{\text{peso real}}$$

Esta constante se incluye en el ambiente de programación para que el valor de la salida sea el peso real a partir de una referencia conocida, la cual se tomó a partir de una muestra de 100 g de material medidos con una báscula digital con precisión de 1g.

### Figura 8.

*Esquemático para conexión de Celda de Carga.*



Para el funcionamiento de la celda de carga se requiere la instalación de librerías en el entorno de programación. Un script se encarga de la calibración mediante un peso conocido, obteniendo una constante que, junto con dicho peso, permite establecer un valor de escala. Este valor se utiliza en un segundo script para realizar las mediciones. En ambos casos es necesario el uso de la librería HX711.h para Arduino.

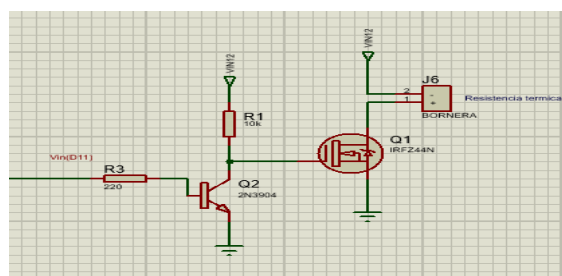
**Control de Temperatura:** Para establecer el control de temperatura nos basamos en la temperatura necesaria para fundir los materiales y seleccionamos los componentes con base en elementos usados en impresión 3D de tal manera que se alcance la temperatura adecuada, lo cual permite un fácil control y con base en pruebas previas se logró que el sistema tenga un máximo de 295° C usando dos resistencias térmicas de 40W.

**Resistencia Térmica 12 V/40 W:** La resistencia de calentamiento se usa para construir impresoras 3D. Consta de un tubo cilíndrico de acero inoxidable, se usaron un total de 2 resistencias. (Evan RoboticS, 2025).

**Resistencia Térmica:** Se usaron 2 resistencias térmicas de 12 V a 40 W y para el control de temperatura PID requerimos activarlas y desactivarlas de manera controlada a partir de una salida PWM del Arduino Nano, la cual es de 5V, para ello se requiere de un circuito que pueda activarse rápido, con el fin de implementar un control más veloz se usó el par MOSFET - BJT.

**Figura 9.**

*Esquemático para control de temperatura.*





El circuito cuenta con una combinación de un transistor NPN y Mosfet de alta capacidad, se conecta la salida de PWM a la base del transistor y este a su vez a la base del terminal gate del mosfet, permitiendo el paso de la corriente de manera controlada a la resistencia térmica.

La resistencia conectada a la base del transistor NPN cumple la función proteger al microcontrolador de posibles sobrecorrientes que podrían generarse por un mal funcionamiento del transistor, Además, esta resistencia garantiza un adecuado control del estado de conmutación del transistor, evitando daños en los componentes electrónicos y asegurando un funcionamiento más estable y confiable del circuito.

### Sensado de Temperatura:

**Tabla 5.**

*Sensores de temperatura usados en las pruebas.*

Termocupla Tipo K con modulo SPI.	Termistor NTC 3950 100K
	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de operación: -454 °C a 1260 °C.</li> <li>• Precisión: +/- 2.2 °C</li> <li>• Requiere interfaz SPI para operación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura de operación: -40 °C a 300 °C</li> <li>• Resistencia 100KΩ</li> <li>• Tensión de operación 5V DC</li> </ul>

Nota: Tomado de Makeralot, 2025. & Amazon, 2025.

Usamos el termistor NTC por que es fácil de usar, no requiere de un driver para la interpretación de la información y es muy utilizado en el ámbito de la impresión 3D, por el contrario la termocupla tiene un punto de operación muy extenso el cual no se va a aprovechar para la aplicación específica.

### 3. Montaje

**Circuito para el Control de Temperatura:** Para la fabricación del prototipo se tomó como referencia el sistema de boquillas de impresoras 3D tipo FDM, el cual emplea

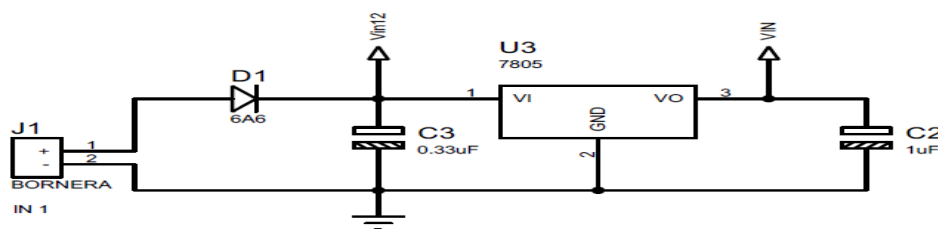
resistencias térmicas de 12 V y 40 W para la extrusión del material termoplástico. Debido a que el sistema de control genera una señal de 5 V, se implementó una etapa de conmutación basada en un BJT y un MOSFET, funcionando como un relé de estado sólido para accionar el elemento calefactor de forma segura y eficiente.

**Diseño del Circuito:** Para el diseño del sistema, se requirió de una fuente térmica para fundir el material plástico, para controlar la temperatura se requiere obtener la medida en tiempo real, para lo cual se usó un termistor. El sistema cuenta con un apartado para controlar la cantidad de material a trabajar, se usó una celda de carga y una compuerta controlada por un servomotor, todo esto para el apartado de control. Para el apartado visual o de interfaz de usuario se usó la combinación de una pantalla y un encoder rotativo. Siendo éstos los periféricos principales que se usaron para el funcionamiento de la extrusora:

**Etapa de Potencia:** Esta etapa es la encargada de la regulación y la distribución de la tensión para cada sensor y actuador. Como alimentación se tiene una fuente de 12 V a 10 A, muy común en impresoras 3D, y adecuada para las resistencias térmicas que se usaron.

**Figura 10.**

*Esquemático para la etapa de potencia, con diodo de protección a polaridad inversa.*



**Etapa de Control:** El prototipo consta de sensor de temperatura NTC, celda de carga, servomotor, pantalla LCD, encoder rotativo para la interfaz de usuario y el cerebro que permite el control es el Arduino nano, cada uno de éstos periféricos están alimentados por 5 V. El esquemático está separado en dos partes debido a la facilidad para el diseño del circuito impreso o PCB. Ciertos periféricos requieren de una conexión específica con el tipo de

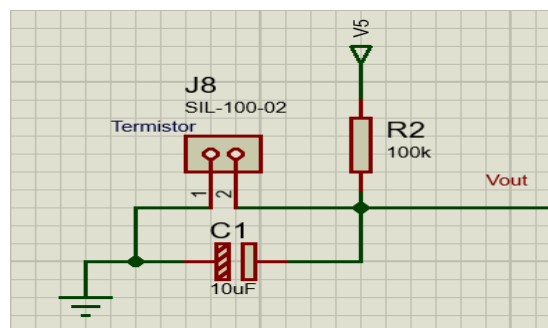
microcontrolador, es decir solo se puede conectar a pines específicos para su correcto funcionamiento.

Para el control de la resistencia térmica se requiere un encendido y apagado controlado que permita mantener la temperatura deseada, lo cual se logra mediante una señal PWM variando el ciclo de trabajo. Debido a que el sistema es térmico y presenta un calentamiento lento, se utiliza una frecuencia de 980 Hz.

**Sensor NTC:** El sensor NTC, se puede tomar como una resistencia variable por temperatura, este se conecta junto con una resistencia con el mismo valor resistivo del NTC para poder hacer un circuito divisor de tensión y mediante el uso de un pin de lectura analógico del microcontrolador se puede estimar la temperatura sensada.

### Figura 11.

*Esquemático de divisor de tensión de para sensor NTC.*



Del circuito divisor de tensión se obtiene la ecuación:

$$V_{out} = \frac{NTC}{R+NTC} * V_{in}$$

Arduino nano posee una resolución de 10 bits (1024 valores posibles), por consiguiente la entrada analógica máxima de 5 V equivale a 1024.

Se despeja el valor de NTC de la anterior ecuación

$$NCT = \frac{V_{out} * R}{V_{in} - V_{out}}$$

$$NCT = \frac{V_{out} * 100k}{1024 - V_{out}}$$

Por último, se calcula la temperatura mediante la ecuación del termistor (ecuación de Steinhart-Hart)

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} * \ln \frac{R_1}{R_0}$$

dónde:

T= temperatura que necesitamos en K.

T0= temperatura nominal del NTC (25 °C).

B= constante del NTC (3950).

R1=resistencia del NTC(100 kΩ).

R0=resistencia calculada previamente (NTC)

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{25} + \frac{1}{3950} * \ln \frac{100k}{NTC}$$

y para finalizar le restamos 273,15 al valor T para convertir de Kelvin a Celsius.

**Termistor NTC 3950 100 K:** Ideal para mediar un amplio rango de temperaturas. Su resistencia disminuye a medida que aumenta la temperatura. Se utiliza para medir la temperatura de cabezales de impresión 3D. Trae un cable forrado en teflón resistente a altas temperaturas y un cabezal de vidrio, se usó un solo termistor para la lectura. (Movil Tronics, 2025).

**Pantalla LCD 20x4:** Display de cristal líquido (LCD) de tipo alfanumérico de 4 filas por 20 columnas. Con Backlight tipo led de color azul. Esta pantalla utiliza el controlador SPLC780D. Se incorpora una interfaz I2C para manejar el dispositivo solo con cuatro líneas. El voltaje de alimentación es de 5 V, carácter de 5x8 puntos, tamaño del carácter 5.2 mm X 3

mm, sus dimensiones son de 98 mm X 60 mm X 1.6 mm, corriente de consumo máxima es de 25 mA.

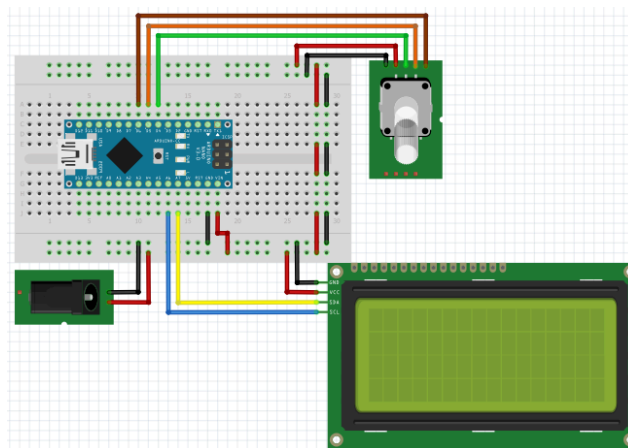
**Encoder Rotativo KY-040:** Tiene un eje de rotación de 360 °, convierte posiciones angulares y movimientos de un eje a código digital. Es un componente electromecánico incremental. Este dispositivo se usó con el fin de controlar un menú en pantalla para seleccionar el material a extruir.

**Regulador de Tensión L7805CV:** Regulador con protección térmica y de corto circuito, corriente de operación de 1 A y voltaje desde 7 V hasta 35 V con salida de 5 V.

**Diodo 6A6:** Diodo de protección de 6 A en conexión directa y máximo 100 V, voltaje pico máximo en conexión inversa de 600 V para protección de la entrada de alimentación del circuito.

**Figura 12.**

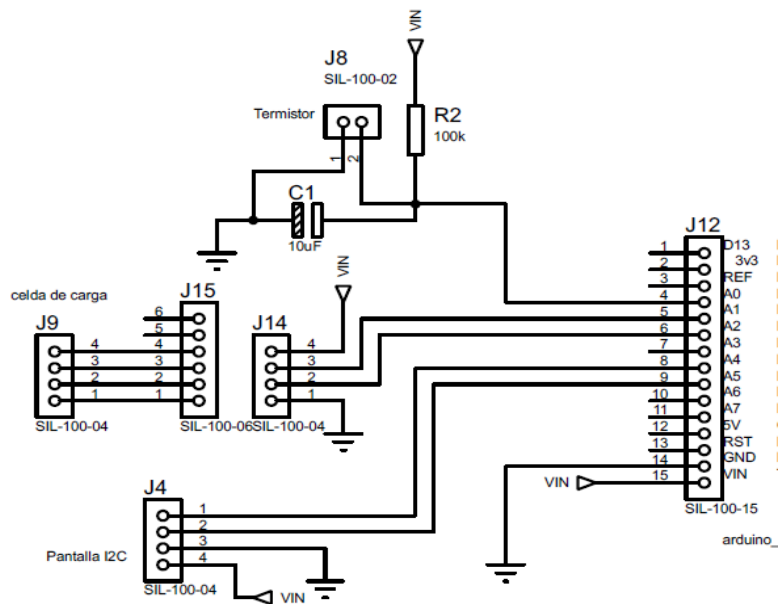
*Conexión de pantalla LCD.*



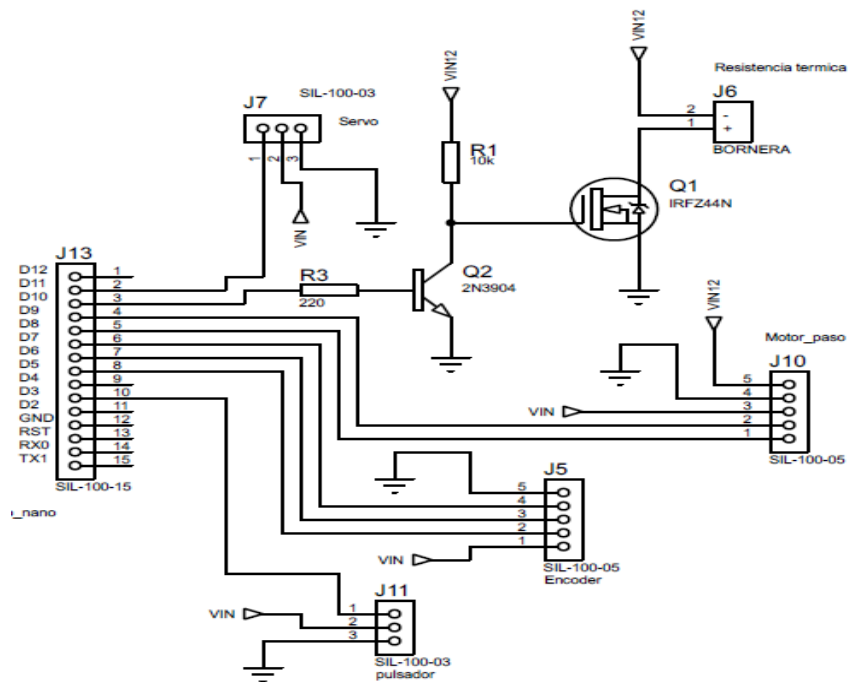
**Esquema de la Etapa de Control:** El esquema está separado en dos partes de tal manera que facilite el diseño del circuito impreso o PCB.

**Figura 13.**

Primera mitad del esquemático electrónico del prototipo.

**Figura 14.**

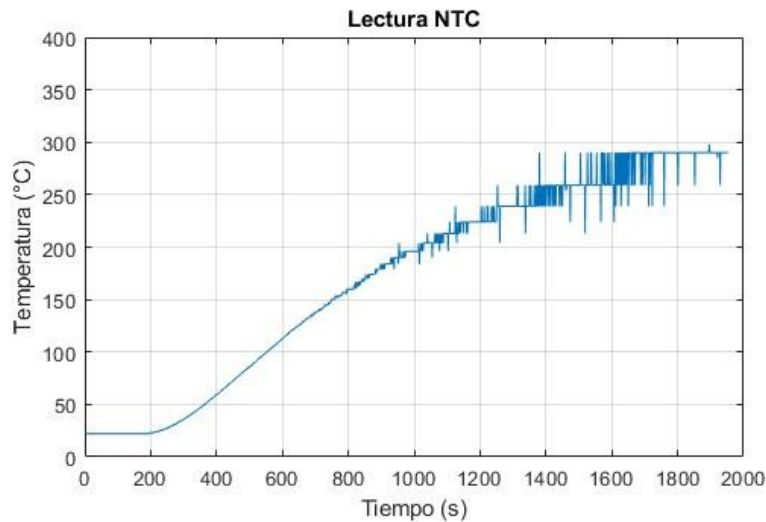
Segunda mitad del esquemático electrónico del prototipo.



**Programación y Pruebas:** En el esquema también tiene un apartado para dos periféricos extra por si se requiere hacer una mejora, actualización o una directa vinculación con otro equipo.

**Figura 15.**

*Resultado de la medición de temperatura.*



Para estimar el controlador es necesario obtener la función de transferencia a partir de los datos obtenidos por el sensor NTC, el comportamiento de los sistemas de temperatura se asemeja a los sistemas de primer orden , con lo cual se ajustan los datos a la siguiente función.

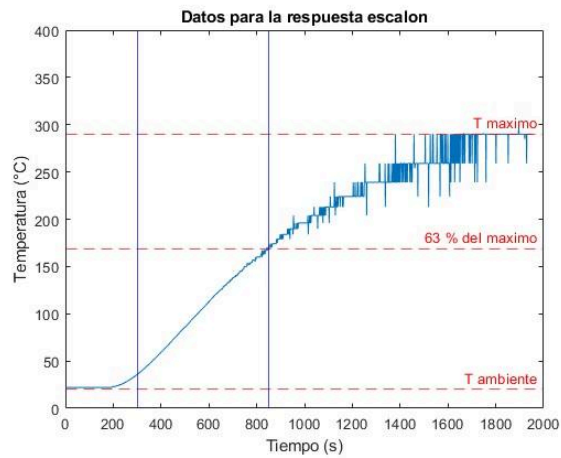
$$p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1}$$

Donde k corresponde a la constante en continua,  $\tau$  corresponde a la constante de tiempo del sistema.

Para estimar las constantes se toma el comportamiento de encendido como ciclo de trabajo en alto T máxima y la temperatura ambiente T- ambiente, de tal manera que se pueda estimar la desviación de la temperatura  $\Delta T$ , la temperatura ambiente tomada del sensor es de 22 °C y la temperatura máxima es de 290 °C , por lo tanto desviación de temperatura es de 268, entonces se puede decir que la constante es continua.

**Figura 16.**

*Parámetros para la aproximación de la respuesta al escalón.*



Debido a que el comportamiento no es lineal, es requerido estimar la constante de tiempo  $\tau$ , la cual corresponde al tiempo que tarda el sistema en llegar al 63% del valor máximo, en este caso es 168,84 ( $268 \cdot 0.63$ ), de tal manera que funcione, la respuesta en el tiempo está dada por

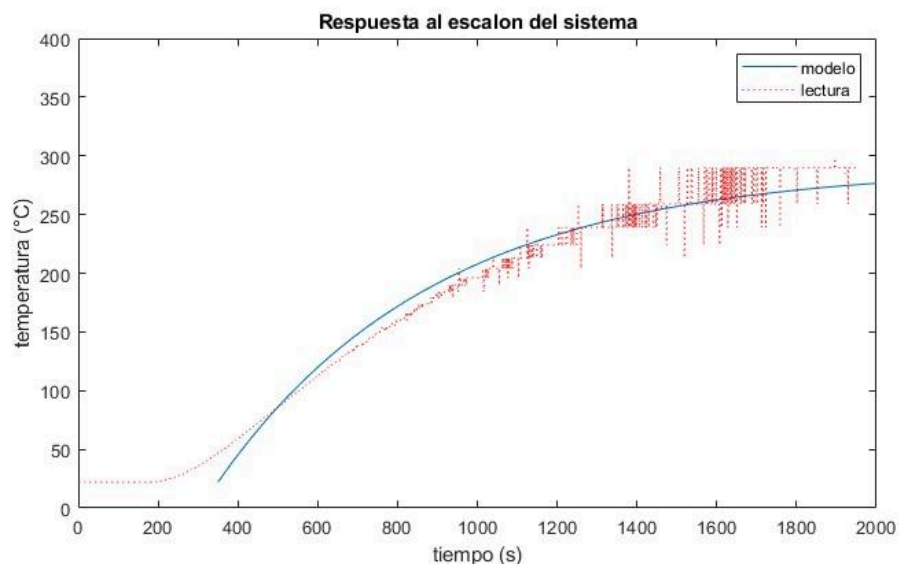
$$p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{268}{168,86s+1}$$

mediante el uso del software matlab se estimó la función para poder visualizarla.

Las siguientes mediciones para la aproximación del sistema de control se realizaron siguiendo el método de lazo abierto.

**Figura 17.**

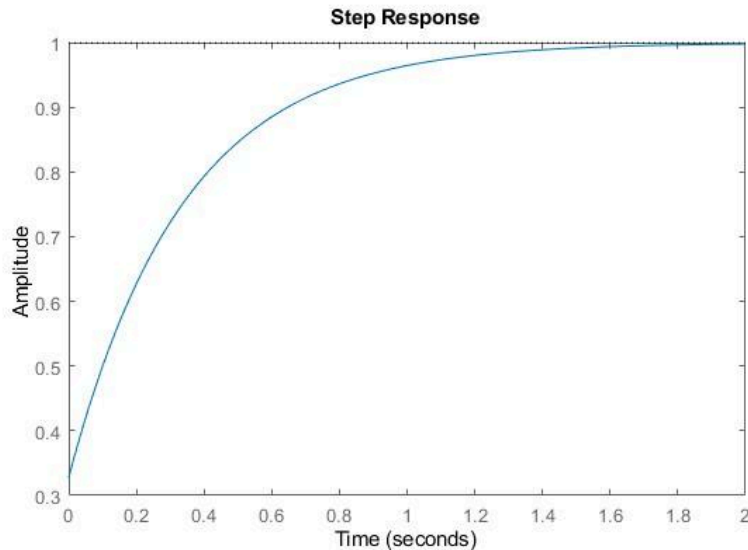
*Comparación de los datos tomados y su aproximación.*



Los valores PID que se establecieron en el software matlab son  $P=9.1$   $I=0.3$  y  $D=1.8$  para obtener los resultados de la gráfica.

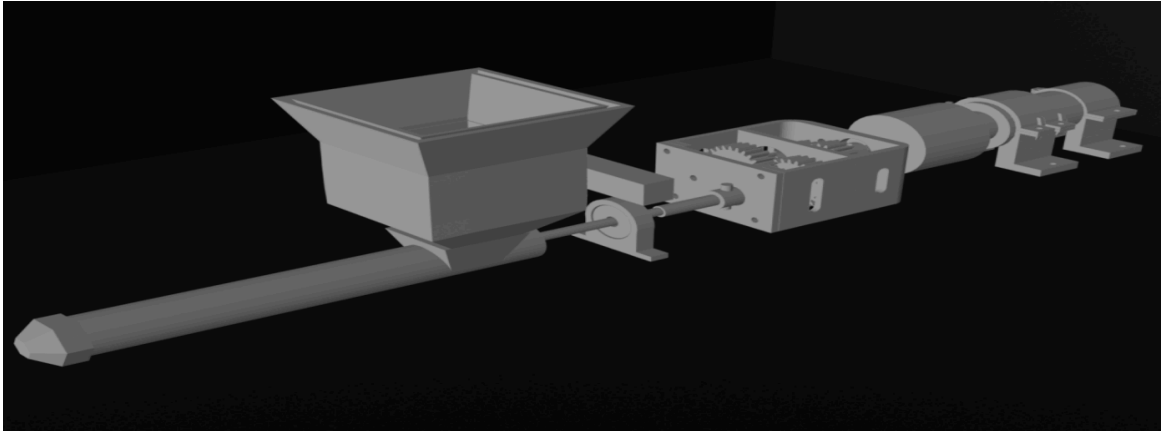
**Figura 18.**

*Resultado de la simulación a la respuesta de escalón.*

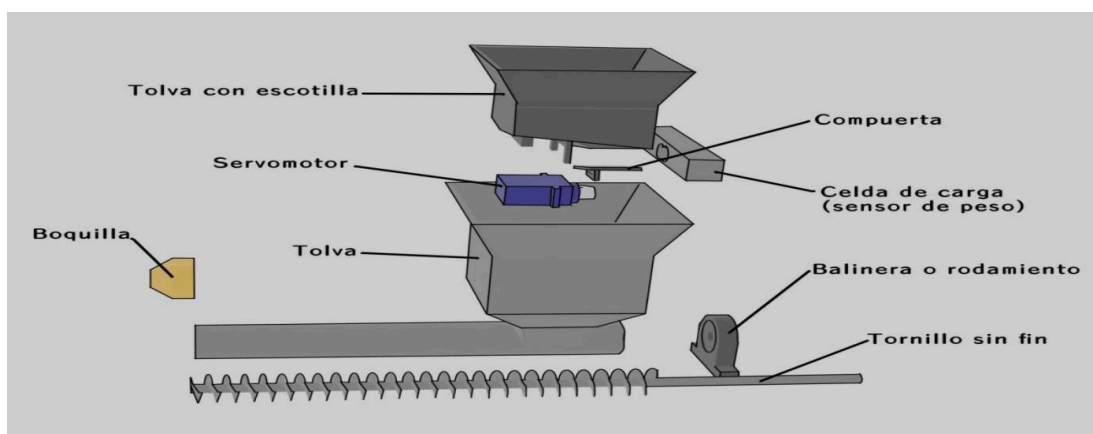


El diseño de la estructura fue basado en los extrusores de plástico más común, pero las dimensiones y la forma reducida fue acorde al uso personal para extrusión de filamento. El prototipo cuenta con un motor, un reductor, un tornillo sin fin, una boquilla y una estructura tubular con una tolva para la deposición de material procesado.

La forma tubular está hecha de hierro, así como el tornillo sin fin, la boquilla está hecha de bronce donde las resistencias térmicas están sujetas a este con una abrazadera de aluminio, la elección de estos materiales es debido a su fácil conductividad térmica.

**Figura 19.***Diseño 3D del prototipo final.*

La tolva en su interior cuenta con una forma similar con una escotilla, bajo esta estructura se acopló un servomotor, cuyo eje fue asegurado a una pequeña compuerta, al costado está asegurado con una celda de carga, haciendo que esta configuración permite el control del material que entra a la etapa de transporte, es decir, se puede agregar una cantidad de material determinada para procesar a partir de su peso.

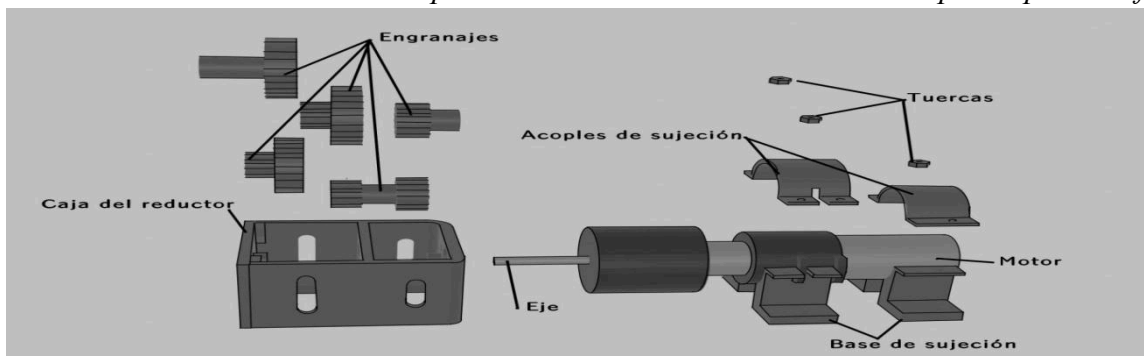
**Figura 20.***Diseño 3D del apartado de la tolva del prototipo final.*

El tornillo encargado del transporte de material se acopla a uno de los piñones del reductor mecánico y pasa por una balinera o rodamiento para un libre movimiento y ayuda de la sujeción.

El sistema de piñones o reductor de velocidad de engranajes paralelos con una configuración 20:1, la entrada se ajusta al eje del motor y la salida al tornillo sin fin. El motor encargado del accionamiento del tornillo sin fin está sujeto a la base donde va posicionado todo el prototipo, este debe estar fuertemente sujeto para evitar que se desplace.

**Figura 21.**

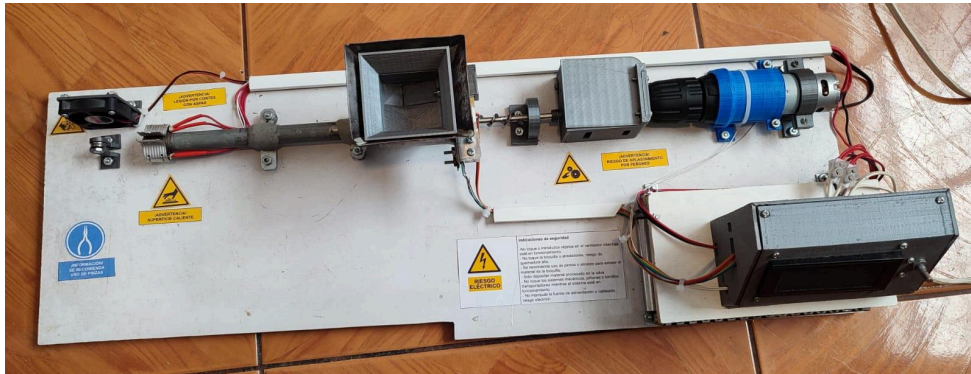
*Diseño 3D del apartado mecánico del prototipo final.*



Con base al circuito planteado y con el uso del software PROTEUS, se realizó el diseño de la pcb del circuito que controla todos los periféricos del prototipo.

Para una versión preliminar del montaje final, se aseguran las piezas tales como Tolva, Tubo de transporte, caja reductora y motor, manteniendo conexión con la placa PCB de control y la galga extensiométrica ajustada a la tolva para hacer pesaje de material en el mismo espacio.

Este montaje asegura que únicamente el tornillo sin fin se mueva con respecto a su eje longitudinal, asegurando un transporte suave a través del tubo y evitando situaciones indeseadas de desconexión u otros.

**Figura 22.***Montaje final del prototipo.*

Una vez completo el circuito, y estando en funcionamiento, se procede a medir la temperatura en la salida del sistema para verificar el funcionamiento del controlador, para ello se establece la temperatura que se requiere para ver si el sistema la mantiene, en este caso se establece una temperatura de 190°C, la cual es la más común utilizada para fundir PLA y se dejan los mismos valores de PID usados en matlab para establecer la gráfica de la respuesta a escalón de primer orden.

**Operación y Manejo del prototipo:** El sistema se enciende mediante un pulsador, mostrando en la pantalla LCD dos modos de operación:

- **Manejo continuo:** trabaja con valores de temperatura preestablecidos.
- **Manejo controlado:** permite ajustar la temperatura y definir la cantidad de material a procesar.

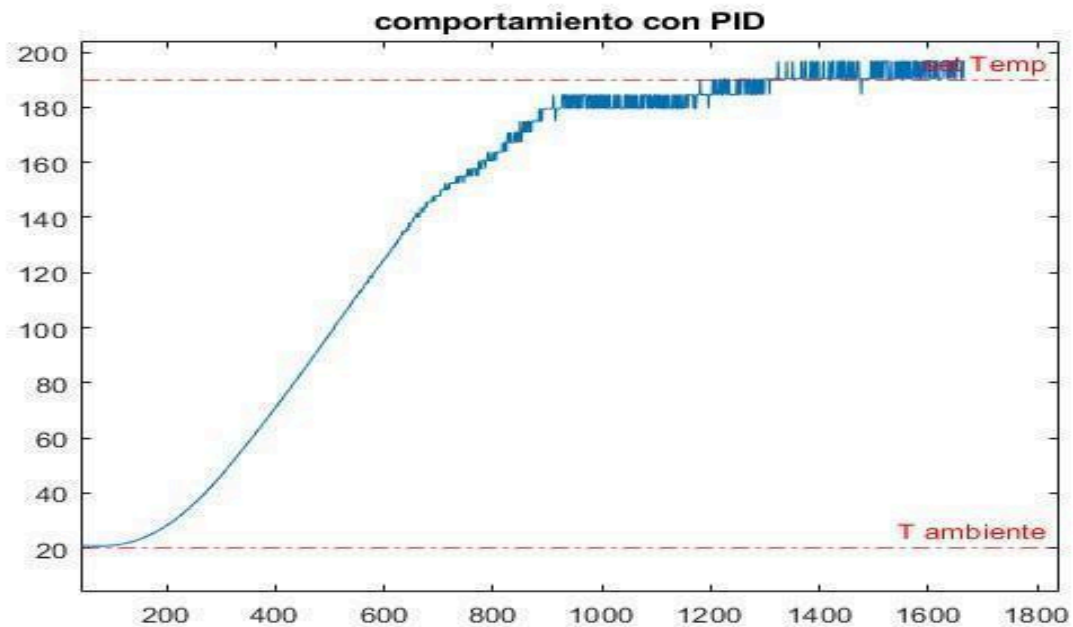
Una vez configurada la temperatura, la boquilla comienza a calentarse. El proceso puede ser cancelado desde la pantalla si es necesario. Al alcanzar la temperatura deseada, se activa el motor mediante una perilla lateral, que además regula su velocidad para controlar la salida del material fundido.

El material se extrae por la boquilla y, con ayuda de pinzas, se guía a través de un sistema que le da forma de filamento. Este proceso puede hacerse manualmente, pero para obtener un acabado más uniforme y cómodo se recomienda usar una **bobinadora**, que consiste en un motor que hace girar un rodillo para enrollar el filamento.

Finalmente, al terminar la operación, se cancela el proceso y el sistema regresa al menú principal.

**Figura 23.**

*Resultado a la respuesta al escalón del prototipo.*



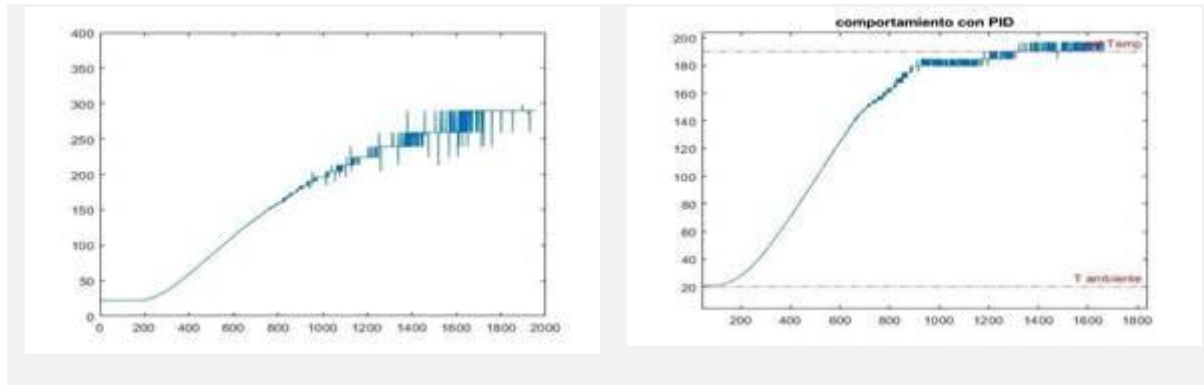
Al verificar el comportamiento obtenido del sistema, se observa que el comportamiento sigue la tendencia que se estimó en el controlador, y la temperatura final se establece en 190 °C el valor que se necesitaba, a diferencia del sistema sin el controlador la cual supera 290 °C.

**Figura 24.**

*Comparativa de la medición con y sin controlador.*

**Medida de temperatura sin controlador**

**Resultado obtenido con el PID**



El sistema mantiene la temperatura que se estableció, comprobando que el control PID se seleccionó correctamente para alcanzar la temperatura que se requiere acorde al material seleccionado. Se analizaron los resultados obtenidos durante el desarrollo del dispositivo extrusor, presentando las etapas de programación, diseño mecánico y pruebas de placas PCB. Usando el montaje anteriormente mencionado en pruebas de control iniciales se puede evidenciar la correcta extrusión de material.

Se evidenció extrusión líquida debido a la alta temperatura en boquilla, se ajustó el control para corregir y asegurar una correcta extrusión y obtención de filamento útil.

Para mejorar el proceso de extracción y formación del filamento, se instaló un ventilador junto a la boquilla con el objetivo de enfriar de manera más eficiente el material termoplástico al momento de su salida, como evidencia se obtuvieron aproximadamente 4 m de filamento, dado que se trata de una prueba se esperan mejoras o actualizaciones al producto final. Este enfriamiento controlado permite que el filamento conserve su forma cilíndrica de manera más uniforme, evitando deformaciones indeseadas durante el proceso. Además, se incorporó una polea con un diámetro interno de 1.75 mm, correspondiente al de la garganta, lo que garantiza una guía precisa del filamento y contribuye a mantener un diámetro constante a lo largo de toda su longitud.

#### **4. Observaciones**

Para llevar a cabo las pruebas de funcionamiento, se utilizaron materiales como PLA y ABS, debido a su fácil disponibilidad y amplia utilización en la industria de la impresión 3D, especialmente para aplicaciones de uso cotidiano. Sin embargo, se presentaron diversas dificultades al intentar realizar pruebas con PET reciclado, ya que son pocas las personas o empresas que se dedican al procesamiento de este material. Además, para su uso en el equipo, se requería que el PET estuviera finamente triturado o preferiblemente en forma de pellets, lo cual implica un proceso industrial que no siempre está al alcance en entornos no especializados.

Durante la realización del prototipo, se verificó el correcto funcionamiento de todos los periféricos conectados al microcontrolador, enfocándose principalmente en el sensor de temperatura, el activador de las resistencias térmicas y el controlador PID. Además, el prototipo cuenta con pines disponibles para la conexión de periféricos adicionales, y el microcontrolador dispone de memoria libre suficiente para futuras ampliaciones o mejoras del script de control.

#### **5. Conclusiones**

El sistema de control de temperatura alcanzó el punto necesario, cumpliendo las expectativas de robustez, precisión y estabilidad que permitió la correcta extrusión de material. El diseño del prototipo final permite la extrusión de material, el cual con distintos procesos y dado que naturalmente se implementó un control de velocidad para la extrusión, se podría conectar directamente a las impresoras 3D comerciales o por el contrario adquirir carretes de material para almacenamiento y uso posterior. Para este proyecto se realizaron tres prototipos en distintos materiales y configuraciones, determinando el más adecuado, teniendo

en cuenta una combinación de bajo costo, durabilidad y funcionamiento. Determinando así que el Prototipo #3, hecho de acero galvanizado, es el que mejor se ajusta a las propiedades antes mencionadas y de las cuales se puede observar su correcto funcionamiento en las evidencias de este documento.

## **6. Recomendaciones**

Se recomienda deshumidificar el material antes de la extrusión, preferiblemente con gel de sílice, para evitar fragilidad en el filamento. En el caso del PET, es importante utilizar material debidamente procesado o en forma de pellets para garantizar estabilidad en el proceso.

Asimismo, se sugiere optimizar el diseño mecánico mediante apoyo especializado, ya que las principales limitaciones del proyecto fueron estructurales. Una mejora en este aspecto podría permitir incluso la automatización de la extrusión, aprovechando las capacidades electrónicas ya implementadas.

Finalmente, mezclar material reciclado con pellets procesados puede mejorar la calidad y resistencia del filamento obtenido.

## Referencias

Brunette, A. (s. f.). *Sistemas de control*.  
[https://bookdown.org/alberto\\_brunete/intro\\_automatica/sistemas-de-control.html](https://bookdown.org/alberto_brunete/intro_automatica/sistemas-de-control.html)

Components101. (s. f.). *NEMA 23 stepper motor datasheet & specs*.  
<https://components101.com/motors/nema-23-stepper-motor-datasheet-specs>

Control Automático Educación. (s. f.). *Enmascarar control RST en control PID*.  
<https://controlautomaticoeducacion.com/control-de-procesos/3-enmascarar-control-rst-en-control-pid/>

ElectroNoobs. (s. f.). *PID control with Arduino*.  
[https://electronoobs.com/eng\\_arduino\\_tut24\\_parts1.php](https://electronoobs.com/eng_arduino_tut24_parts1.php)

Electronica PLUG AND PLAY. (2025). *Simplemente genial. Catálogo. Display LCD 20X4 Interfaz I2C TWI 2004*.  
<https://www.electronicaplugandplay.com/optoelectronica/product/654-display-lcd-20x4-interfaz-i2c-twi-2004>

Electronica Plug and Play. (2025). *Display LCD 20x4 interfaz I2C TWI 2004*.  
<https://www.electronicaplugandplay.com/optoelectronica/product/654-display-lcd-20x4-interfaz-i2c-twi-2004?search=LCD>

ESP32IO. (s. f.). *ESP32 rotary encoder tutorial*.  
<https://esp32io.com/tutorials/esp32-rotary-encoder>

Evan Robotics. (2025). *Resistencia térmica 12V 40W*. Ideal para construir y reparar impresoras 3D o como resistencias de calentamiento de uso general. El calentador de cartucho consta de un tubo cilíndrico de acero inoxidable y, por lo tanto, ofrece una alta prevención de la corrosión.

FluidNC Wiki. (s. f.). *ESP32 pin reference*.  
[http://wiki.fluidnc.com/en/hardware/esp32\\_pin\\_reference](http://wiki.fluidnc.com/en/hardware/esp32_pin_reference)

Gobierno de Canarias. (s. f.). *Arduino*.  
<https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/rsuagued/arduino/>

Ingemecanica.com. (2024, julio 25). *Cálculo de transportadores de tornillo sin fin*.  
<https://www.ingemecanica.com/tutoriales/calculo-de-transportadores-de-tornillo-sin-fin.html>

Mactronica. (2025). *Controlador de velocidad PWM 90W ZS-X4B*.  
[https://www.mactronica.com.co/controlador-de-velocidad-pwm-90w-zs-x4b?srsltid=AfmBOopkVVrV6Itj8MwLRjxH361h4gV\\_p3VumSfNXfKB10uFLxq66qBz](https://www.mactronica.com.co/controlador-de-velocidad-pwm-90w-zs-x4b?srsltid=AfmBOopkVVrV6Itj8MwLRjxH361h4gV_p3VumSfNXfKB10uFLxq66qBz)

Mactronica. (2025). *Energía y tecnología desde 2014. Controlador de velocidad PWM 90W ZS-X4B*.  
<https://www.mactronica.com.co/controlador-de-velocidad-pwm-90w-zs-x4b>

Made-in-China. (s. f.). *7.2V brushed micro PMDC motor*.  
<https://cjcmotor.en.made-in-china.com/product/WayUZhTCHxcJ/China-7-2V-Brushed-Micro-PMDC-Motor-DC-Motor-Electric-Motor-for-Power-Tools.html>

MathWorks. (2026). *Finite state machine*. Recuperado el 12 de mayo de 2026 de  
<https://la.mathworks.com/help/stateflow/ug/finite-state-machine.html>

MercadoLibre. (2026). *Controlador de velocidad PWM 90W ZS-X4B*.  
<https://www.mercadolibre.com.co/controlador-de-velocidad-pwm-90w-zsx4b/up/MCOU2427369169#&gid=1&pid=1>

Movil Tronics. (s. f.). *Resistencia térmica NTC 100K 3950*.  
<https://moviltronics.shop/moviltronics.com/producto/ntc-3950/>

Naylamp Mechatronics. (2019). *Tutorial transmisor de celda de carga HX711, balanza digital*.

Naylamp Mechatronics. (2023). *ESP32*.  
<https://naylampmechatronics.com/espressif-esp/1250-esp32-devkit-v1-nodemcu-32-30-pin-es-p32->

Naylamp Mechatronics. (2023). *Micro Servo MG90S 2.5Kg*.  
<https://naylampmechatronics.com/servomotores/246-micro-servo-mg90s.html>

Sigma Electrónica. (2025). *KY-040*.  
<https://www.sigmaelectronica.net/producto/ky-040/>

## Apéndice

### *Apéndice 1. Repositorio Github*

[Sebastianrmp/Dragonfly-Ver.-207: Project development for the SIA Extruder.](#)