

SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y CONTROL IOT PARA EL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN DEL RECICLAJE PLÁSTICO TIPO PET EN EXTRUSORAS DE FILAMENTO PARA IMPRESIÓN 3D

Realizado por:
Ing. Kevin Acosta / Correo: kevinacosta771@gmail.com
Ing. Paula Castillo / Correo: paulamcp2004@gmail.com
Ing. Juan Ortega / Correo: juanortegaflores900@gmail.com

Tutor Académico:
MSc. Danny Caicedo / Correo: dcaicedo@urbe.edu.ve

Tutor Metodológico:
Dr. Jorge Torrealba / Correo: jorge.torrealba@urbe.edu.ve

La manufactura aditiva y la impresión 3D son campos en auge que han avanzado a grandes pasos en las últimas décadas, revolucionando los procesos de producción y la fabricación de prototipos, lo que ha llevado a nuevas áreas de investigación y desarrollo para tecnologías de próxima generación en la industria. Sin embargo, uno de los desafíos clave que enfrenta esta tecnología es la producción de filamento de calidad para impresoras 3D, que a menudo implica el uso de materiales costosos y no sostenibles. En las generalidades de la impresión 3D

encontramos diversos materiales desarrollados para satisfacer diferentes necesidades. Como era de esperarse, todos estos materiales difieren en cuanto a sus propiedades mecánicas, que incluyen elasticidad, resistencia al calor y capacidad para recibir pigmentación, entre otras propiedades técnicas como su dureza, fragilidad y resistencia a la tracción.

Entre los materiales más utilizados en la actualidad se encuentran el PLA (Ácido poliláctico), ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), Nylon, TPU (Poliuretano termoplástico), PVA (Alcohol polivinílico), PETG (Tereftalato de polietileno glicolizado), entre otros. Teniendo en cuenta esto, es posible aprovechar el alto consumo del plástico PET y darle un segundo uso. Como se mencionó anteriormente, entre los materiales más utilizados está el PETG, que, a pesar de compartir ciertas similitudes con el PET, como su estructura química, se diferencian por la adición de glicol. Esta diferencia en la composición es lo que causa las variaciones en sus propiedades mecánicas.

Sin embargo, el PET todavía presenta propiedades aprovechables en la impresión 3D, como su resistencia, rigidez, transparencia, bajo índice de contracción y reciclabilidad. Teniendo en cuenta esto, es posible aprovechar el uso del PET reciclado para impresión 3D. Además, su facilidad de procesamiento lo hace compatible con diversas impresoras 3D de tecnología FDM. Su resistencia a productos químicos permite su aplicación en entornos exigentes. Por otro lado, el uso de PET reciclado en impresión 3D contribuye a la reducción de desechos plásticos y fomenta la economía circular.

Un sistema de control digital IoT puede ser sumamente beneficioso para una extrusora de filamento PET para impresión 3D. Al integrar este tipo de sistema se logra un control preciso y en tiempo real de las variables del proceso como la temperatura del extrusor, la velocidad de rotación del motor de alimentación y la velocidad de extrusión. Esto permite optimizar la calidad del filamento al mantener una temperatura de extrusión estable y homogénea; además, se evita la degradación del material y se garantiza un diámetro de filamento constante, lo que resulta en impresiones 3D de mayor calidad y repetibilidad.

Al aumentar la eficiencia del proceso mediante la automatización de los parámetros de funcionamiento, se reducen los tiempos de configuración y se minimizan los errores humanos, lo que aumenta la productividad y reduce los costos de producción. Adicionalmente, mejora la seguridad del proceso; al supervisar continuamente las variables del proceso se pueden detectar y corregir posibles anomalías antes de que se produzcan fallas o accidentes, lo que garantiza un entorno de trabajo más seguro.

La integración del IoT añade ventajas clave como el monitoreo remoto del proceso desde cualquier lugar con conexión a internet, la recopilación y análisis de grandes cantidades de datos históricos para optimizar parámetros y predecir fallos, una mayor automatización e interconexión con otros, la generación de alertas y notificaciones inteligentes ante anomalías para una respuesta rápida y la escalabilidad, lo que se traduce en una mejora significativa en la eficiencia, la calidad y la seguridad del proceso de extrusión.

Por la problemática anteriormente mencionada, se propone en el presente trabajo especial de grado el uso e implementación de un sistema de supervisión y control IoT para ser utilizado en el proceso de extrusión de filamento PET para impresiones 3D. Para dicho fin se implementa paralelamente un dispositivo que consta de una tarjeta microcontroladora y sensores de diferente tipo, que permitan detectar e informar en tiempo real sobre los valores y cambios de las distintas variables en el proceso de extrusión de filamento PET, brindando datos precisos para la toma de decisiones y manteniendo los valores de los actuadores en los parámetros establecidos para la producción de un filamento de calidad.

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

El proyecto inicia con la identificación de problemas mediante una revisión documental y entrevistas no estructuradas con los involucrados en el proceso. Esta fase inicial permitió concluir que la implementación de sensores e inteligencia en el sistema mejora significativamente la eficiencia operativa y el control de calidad, permitiendo ajustes en tiempo real de parámetros como temperatura, presión y velocidad. Se identificó además la importancia del mantenimiento predictivo para prolongar la vida útil de los equipos y la necesidad de una arquitectura IoT escalable.

Para cumplir con estos objetivos, se seleccionaron componentes específicos basados en criterios de compatibilidad y costo:

- Microcontrolador ESP32: Actúa como el cerebro del sistema por su conectividad Wi-Fi/Bluetooth y procesador dual-core.
- Motor NEMA 17: Proporciona un control preciso del avance del filamento.
- Módulo MAX6675 y Termocupla Tipo K: Para la medición de temperatura en rangos industriales.
- Sensor de Efecto Hall SS49E: Utilizado tanto para medir la velocidad de rotación como para el sensor de diámetro.

- Driver A4988: Para el control del motor paso a paso con microstepping.

El sistema se diseñó para responder a necesidades operativas de planta y requerimientos gerenciales de supervisión. Se elaboró un flujograma integral que detalla las etapas de extrusión, enfriamiento y bobinado.

La figura 1, muestra el flujograma del proceso, en el que el proceso comienza con la entrada de tiras de PET. El sistema sensa la temperatura en el hot end; si no es la adecuada, un control PID la regula. Tras verificar el motor, se inicia la extrusión. Sensores de diámetro y presencia monitorean la calidad y continuidad, enviando todos los datos a una aplicación en tiempo real.

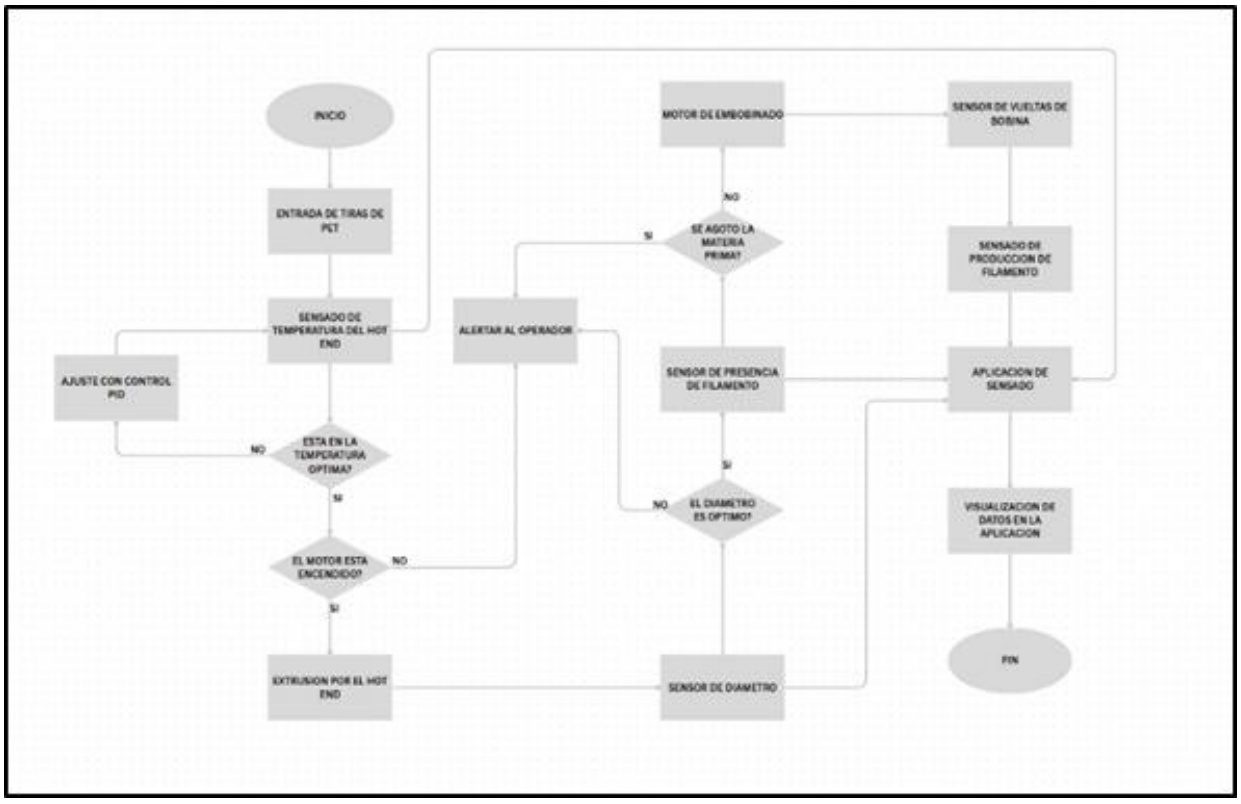


FIGURA 1. FLUJOGRAMA
Fuente: Acosta, Castillo, Ortega (2025)

El control térmico es el corazón del sistema. Se diseñó un circuito alrededor del ESP32 que utiliza un algoritmo PID para mantener la temperatura deseada (setpoint de 200°C). Circuito: Utiliza un módulo MAX6675 para leer la termocupla vía SPI. Para manejar la potencia del calentador de 12V, se emplea un MOSFET de canal N activado por un transistor BJT NPN que recibe una señal PWM desde el ESP32. Estructura Física: Se compone de una base de montaje,

un bloque de interfaz térmica de latón (por su alta conductividad), un disipador de aluminio anodizado y la boquilla de extrusión.

En la figura 2 se muestra el diagrama del circuito del calentador, donde el diagrama ilustra la conexión SPI entre el ESP32 y el MAX6675, así como la etapa de potencia con el BJT y el MOSFET para regular la resistencia calefactora de 12V.

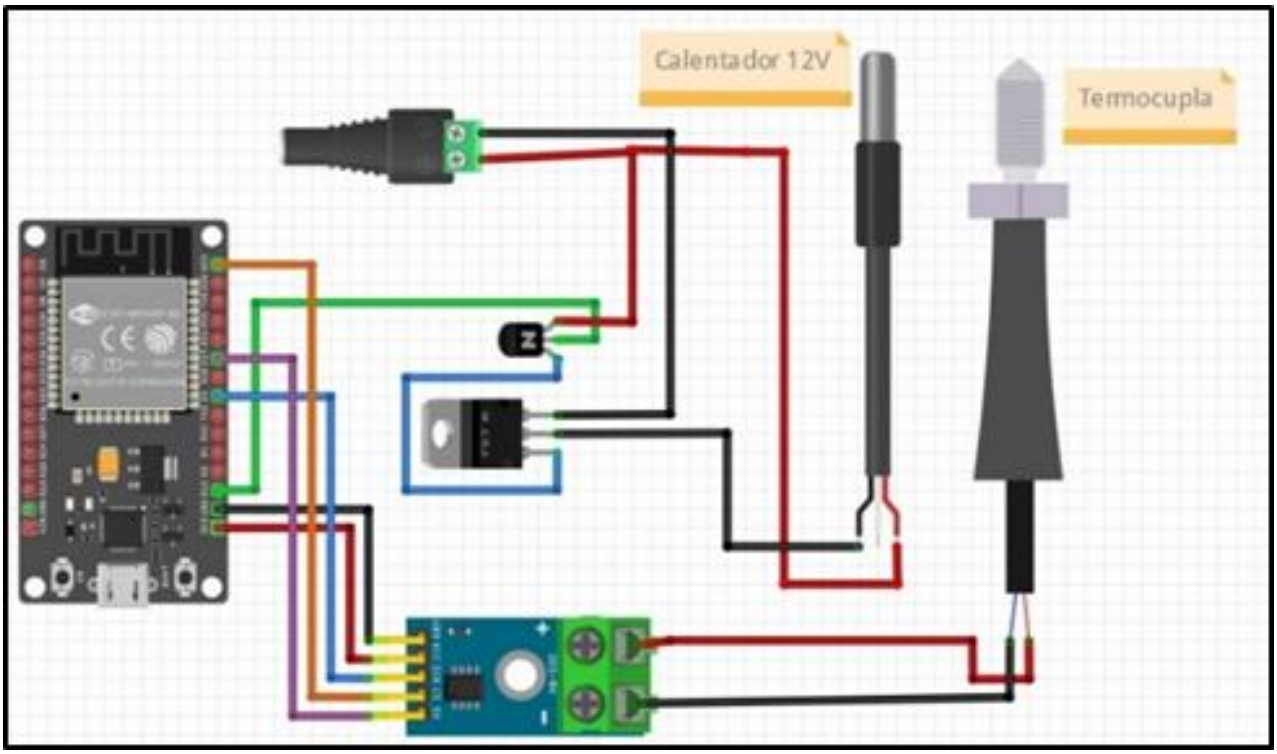


FIGURA 12. DIAGRAMA DE CIRCUITO CALENTADOR
Fuente: Acosta, Castillo, Ortega (2025)

Para transformar el movimiento del motor NEMA 17 en la fuerza necesaria para la extrusión, se diseñó un sistema de transmisión de potencia. Electrónica: El driver A4988 gestiona los pasos (STEP) y la dirección (DIR) comandados por el ESP32. Se incluyó un capacitor de 100uF para estabilizar el voltaje de 12V y proteger el driver. Mecánica: Se implementó un tren de engranajes de reducción que convierte la alta velocidad del motor en alto torque, permitiendo mover cargas pesadas con precisión.

La figura 3presenta la estructura física del sistema motor que muestra el motor NEMA 17 acoplado a un piñón pequeño que interactúa con engranajes más grandes para aumentar el torque durante la extrusión.

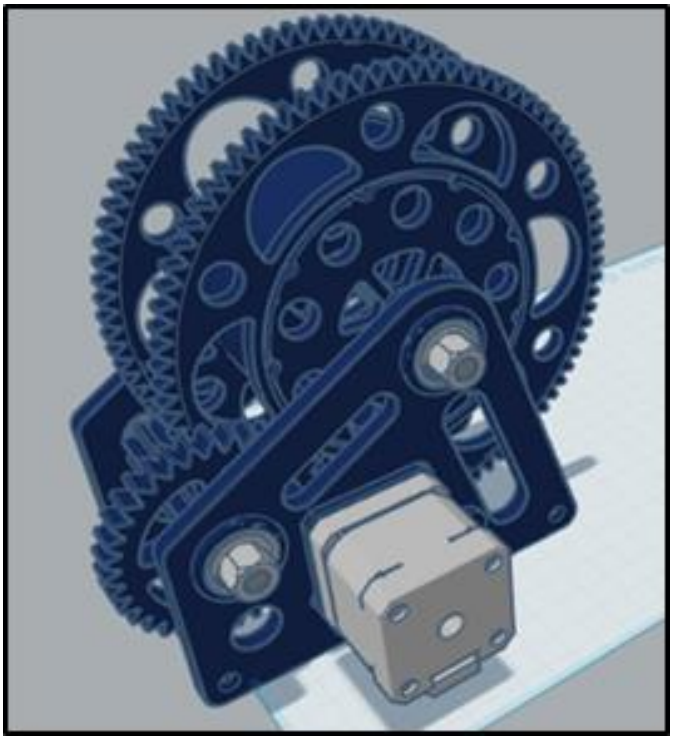


FIGURA 15. ESTRUCTURA FISICA DEL SISTEMA MOTOR
Fuente: Acosta, Castillo, Ortega (2025)

El prototipo integra tres sistemas de sensado fundamentales:

- Encoder Magnético (Vueltas y Producción): Utiliza un imán de neodimio en la bobina y un sensor SS49E. El ESP32 cuenta los picos de voltaje para calcular vueltas, velocidad y metros de filamento producidos.
- Sensor de Presencia: Un micro interruptor de palanca con resistencia pull-down. Si el filamento se agota, el interruptor se abre y el sistema detiene automáticamente el motor.
- Sensor de Diámetro: Es el componente más crítico para la calidad. Un brazo móvil con un imán se desplaza según el grosor del filamento que pasa entre rodamientos. El SS49E detecta este cambio de distancia, y el ESP32 traduce el voltaje a milímetros mediante interpolación lineal con una tabla de calibración.

La figura 4, destaca el diseño del sensor de diámetro, en la que se ilustra la carcasa con el brazo móvil, el resorte de tensión y el sensor SS49E encargado de captar las variaciones mecánicas producidas por el filamento.

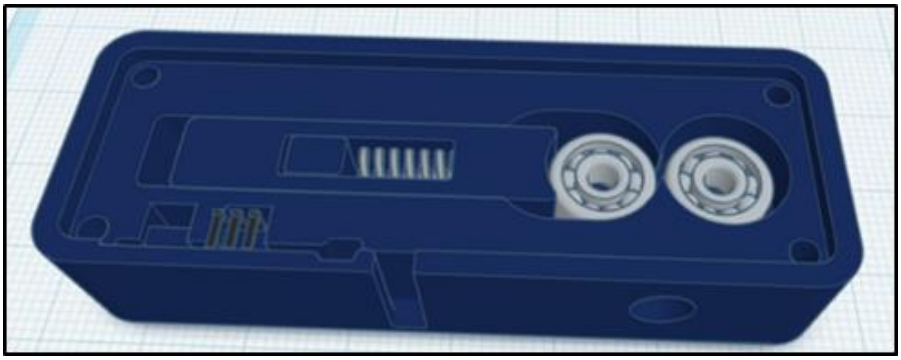


IMAGEN 4. DISEÑO FISICO DEL SENSOR DE DIAMETRO
Fuente: Acosta, Castillo, Ortega (2025)

El sistema requiere una gestión energética dual:

- Alimentación: Una fuente conmutada de 12V 10A alimenta los actuadores de potencia. Un módulo buck-converter LM2596 reduce este voltaje a 5V constantes para el ESP32 y los sensores.
- Refrigeración: Un ventilador 4010 de 12V, controlado por un módulo relé de 1 canal, enfría el filamento recién extruido para estabilizar su diámetro y propiedades mecánicas.

La plataforma Blynk permite la supervisión remota en tiempo real. El dashboard incluye widgets de calibre para la temperatura, controles deslizantes para la velocidad del motor, pantallas de valor para el diámetro y contadores de producción. Esta comunicación bidireccional permite realizar ajustes instantáneos desde cualquier ubicación vía Wi-Fi.



FIGURA 5. CONSTRUCCION DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN
Fuente: Acosta, Castillo, Ortega (2025)

La figura 5 muestra el dashboard de supervisión IoT con la interfaz gráfica que muestra de manera centralizada la temperatura del calentador, el estado del filamento y los controles de operación del prototipo.

La fase de pruebas validó el cumplimiento de los requerimientos bajo condiciones reales.

- Prueba de PID: Con un setpoint de 200°C, el sistema mostró una correlación precisa entre los cálculos y la realidad. Al acercarse al objetivo, la acción integral tomó el control para minimizar el error residual.
- Estabilidad Térmica: El sistema se estabilizó en 201°C, mostrando un sobreimpulso de solo 2°C y manteniendo una linealidad constante, lo que confirma una gestión térmica precisa.
- Estabilidad Energética: El voltaje de 5V se mantuvo entre 5.13V (carga mínima) y 4.95V (pico de corriente por arranque de motor), dentro del rango de aceptación del ±5%.
- Precisión del Diámetro: Se probaron muestras de 1.5mm, 2mm y 1.75mm comercial, obteniendo lecturas exactas y repetitivas sin ruido eléctrico.
- Conteo de Vueltas: El encoder registró una producción constante de 0.30 metros por vuelta con un desempeño estable del sensor Hall.

En la figura 6 se detallan el prototipo final consolidó todos los módulos en una disposición compacta y segura, con cableado organizado para reducir el ruido eléctrico, con los resultados de estabilidad térmica en la gráfica de tendencia que muestra cómo la temperatura alcanza el setpoint y se mantiene estable con oscilaciones mínimas gracias al control PID.

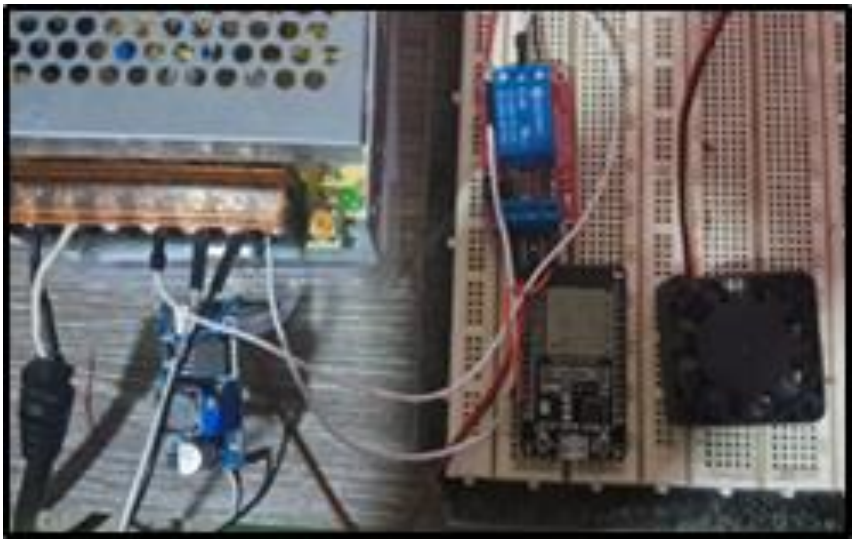
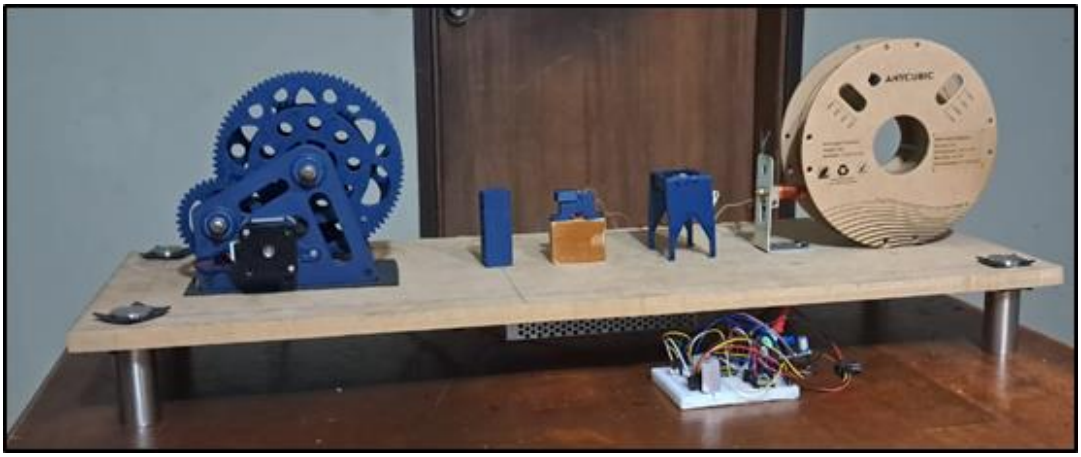


FIGURA 6. CONSTRUCCION DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN
Fuente: Acosta, Castillo, Ortega (2025)

La figura 7 muestra el prototipo final finalizado con una vista general del sistema integrado que muestra la electrónica (ESP32, drivers), el sistema de extrusión mecánica, los sensores de calidad y la interfaz de usuario funcional.



FINALIZACIÓN DEL PROTOTIPO
Fuente: Acosta, Castillo, Ortega (2025)

La integración exitosa de hardware, software y comunicación IoT demuestra la viabilidad técnica para automatizar el reciclaje de PET, logrando un filamento uniforme y supervisado remotamente para su uso en impresión 3D

CONCLUSIONES

El análisis integral y la validación de los resultados obtenidos en esta investigación permiten establecer las siguientes conclusiones.

El análisis de los sistemas de supervisión y control existentes facilitó la identificación de sensores, actuadores y módulos apropiados para la aplicación en extrusoras de filamento, información que fue clave para el diseño del sistema. Posteriormente, se establecieron los requerimientos técnicos y se seleccionaron los componentes adecuados, garantizando compatibilidad, estabilidad y precisión en la adquisición de datos y el control del proceso.

Se desarrolló una arquitectura física y lógica eficiente que permitió el registro continuo de variables críticas como temperatura, presencia y producción. A través de la implementación de algoritmos PID y señales PWM, el sistema logró ajustar automáticamente los parámetros del proceso, mejorando la calidad del filamento reciclado.

El prototipo construido integró todos los módulos de forma funcional y segura, consolidando en el firmware la sincronización de las rutinas de control, sensado y comunicación. Las pruebas

de verificación demostraron un desempeño estable del sistema térmico, del motor y de los sensores, así como una comunicación confiable con la plataforma IoT Blynk.

El sistema desarrollado cumple con el objetivo general del estudio, evidenciando la eficacia del uso de tecnologías IoT en procesos de reciclaje. La investigación confirma que la automatización inteligente puede optimizar la producción de filamento reciclado tipo PET, contribuyendo a la sostenibilidad y al aprovechamiento responsable de materiales plásticos.

Finalmente, desde el punto de vista educativo, se propone emplear el prototipo como una herramienta pedagógica dentro de los laboratorios de ingeniería electrónica, industrial y de materiales, fomentando el aprendizaje práctico de conceptos relacionados con la automatización, el control de procesos y el Internet de las Cosas. Además, el sistema desarrollado puede servir como base para nuevas líneas de investigación aplicadas a la manufactura aditiva, inteligencia artificial y reciclaje automatizado.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Bouvier, J. M., & Campanella, O. (2014). **Extrusion of plastics and rubbers**. John Wiley & Sons.

Carranza, D. (2024). **Dominando el ESP32: Guía de proyectos y aplicaciones**. Ediciones Paraninfo, S.A.

Castillo, J. (2024). **Microcontroladores: Fundamentos y aplicaciones con PIC**. Marcombo.

Chua, C. K., Leong, K. F., y Lim, C. S. (2017). **3D printing and additive manufacturing: Principles and applications** (4th ed.). World Scientific.

Gibson, I., Rosen, D. W., y Stucker, B. (2015). **Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing** (2nd ed.). Springer.

Giles, H. F., Wagner, J. R., y Mount, E. M. (2013). **Extrusion: The polymer-processing handbook**. John Wiley & Sons.

Maza, J., Mosqueira, J., y Veira, J. A. (2005). **Física del estado sólido.** Universidad de Santiago de Compostela.

Sears, F., Zemansky, M., Young, H., y Freedman, R. (2009). **Física universitaria** (Vol. 2, cap. 42). Pearson – Addison Wesley.

Serway, R., y Jewett, J. (2009). **Física para ciencias e ingeniería** (Vol. 2, cap. 21). Cengage Learning.

Valdivia, A. (2020). **Impresoras 3D: El futuro del modelado.** Revista Digital de ACTA 2020.