

Enchapadora 4.0: Automatización y modernización con electrónica de bajo costo

William Alexander Garzón Ramírez

Asesor

Ing. Jairo Luis Gutiérrez

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería – ECBTI

Ingeniería Electrónica

2026

Resumen

La competitividad de las PYMES fabricantes de muebles en Colombia se ve afectada por el uso de enchapadoras antiguas con sistemas de control obsoletos, lo cual genera riesgos operativos y limita el desarrollo productivo. Este proyecto desarrolla un sistema de control integral para la modernización de dicha maquinaria utilizando hardware de bajo costo. Metodológicamente, se aplica una investigación aplicada con enfoque mixto, empleando la arquitectura Raspberry Pi y lenguaje Python para ejecutar la lógica secuencial y un algoritmo de control térmico PID. La solución integra un conversor MCP3008, aislamiento galvánico mediante optoacopladores y una interfaz HMI web para el monitoreo remoto en tiempo real bajo conceptos de IoT. La validación experimental del prototipo físico demuestra el correcto funcionamiento del control PID y la sincronización bidireccional de la interfaz sin latencias críticas. Los resultados confirman la viabilidad técnica y financiera de la propuesta al ofrecer una alternativa eficiente frente a sistemas industriales cerrados, facilitando el acceso de las pequeñas y medianas empresas a tecnologías de la Industria 4.0.

Palabras Clave: Industria 4.0, Raspberry Pi, Control PID, Interfaz HMI, Internet de las Cosas (IoT), Automatización Industrial, MCP3008, Aislamiento Galvánico.

Abstract

The competitiveness of furniture manufacturing SMEs in Colombia is affected by the use of old edgebanders with obsolete control systems, which generates operational risks and limits productive development. This project develops an integrated control system for the modernization of such machinery using low-cost hardware. Methodologically, an applied research with a mixed approach is implemented, employing the Raspberry Pi architecture and Python language to execute sequential logic and a PID thermal control algorithm. The solution integrates an MCP3008 converter, galvanic isolation through optocouplers, and a web-based HMI interface for real-time remote monitoring under IoT concepts. The experimental validation of the physical prototype demonstrates the correct operation of the PID control and the bidirectional synchronization of the interface without critical latencies. The results confirm the technical and financial feasibility of the proposal by offering an efficient alternative to closed industrial systems, facilitating the transition of SMEs towards Industry 4.0.

Keywords: Industry 4.0, Raspberry Pi, PID Control, HMI Interface, Internet of Things (IoT), Industrial Automation, MCP3008, Galvanic Isolation.

Tabla de Contenido

Introducción	11
Planteamiento del Problema	13
Pregunta de Investigación	17
Justificación	18
Objetivos.....	20
Objetivo General.....	20
Objetivos Específicos.....	20
Marco Conceptual y Teórico	21
Marco Conceptual.....	21
Automatización Industrial.....	21
Control PID.....	21
PWM (Pulse Width Modulation).....	22
Obsolescencia Tecnológica.....	22
Interfaz Hombre-Máquina (HMI)	22
SBC (Single Board Computer)	23
Sistemas Embebidos y Raspberry Pi	23
Internet de las Cosas (IoT).....	23
Lenguaje de Programación Python.....	23
Optoacoplador.....	24

Marco Teórico.....	24
Automatización Industrial y Modernización Tecnológica.....	24
Control PID en Procesos Térmicos Industriales	25
Impacto de la Obsolescencia Tecnológica en la Competitividad	25
Diseño de Interfaces HMI Para Sistemas Industriales.....	25
IOT en la Industria	26
Metodología	27
Fase 1: Diagnóstico y Caracterización del Sistema Actual	28
Fase 2: Diseño de la Arquitectura de Hardware y Selección de Componentes	28
Fase 3: Desarrollo de la Lógica de Control y Supervisión (Software)	28
Fase 4: Integración y Validación Experimental del Prototipo	29
Fase 5: Análisis de Resultados y Evaluación de Viabilidad Económica	29
Desarrollo Ingenieril.....	30
Caracterización y Arquitectura del Proceso Industrial	30
Descripción de la Secuencia Operativa de los Grupos	31
Diseño de la Arquitectura de Hardware y Selección de Componentes	32
Arquitectura del Sistema.....	32
Selección de Componentes (Unidad de Control y Procesamiento)	36
Diseño de Hardware y Mapeo de Puertos (I/O).....	44
Desarrollo de la Lógica de Control y Supervisión (Software).....	49

Lógica de Control y Secuencia de Operación.....	49
Diseño del Controlador PID	53
Diseño de la Interfaz Hombre-Máquina (HMI).....	55
Integración y Validación Experimental del Prototipo	60
Protocolo de Pruebas y Criterios de Aceptación	61
Análisis de Resultados y Evaluación de Viabilidad Económica	70
Análisis y Discusión de Resultados	70
Viabilidad Económica y Comparativa de Precios	71
Análisis de Viabilidad Económica.....	74
Conclusiones.....	75
Recomendaciones	77
Implementación de Etapas de Potencia y Sensores Reales.....	77
Monitoreo Predictivo y Eficiencia Energética.....	77
Trazabilidad de Producción y Análisis de Datos (OEE).....	78
Escalabilidad a la Nube y Ciberseguridad	78
Diseño de Circuito Impreso (PCB) y Empaquetamiento Comercial	78
Referencias.....	80
Apéndices.....	83

Lista de tablas

Tabla 1 <i>Entradas del Sistema</i>	47
Tabla 2 <i>Salidas del Sistema</i>	48
Tabla 3 <i>Matriz del Protocolo de Pruebas Del Sistema de Control</i>	61
Tabla 4 <i>Presupuesto Proyectado Para el Sistema Basado en Raspberry Pi 4</i>	72
Tabla 5 <i>Presupuesto Proyectado Para la Solución Industrial con PLC Siemens</i>	73

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Enchapadora de Cantos Rectos con Control de Mando Obsoleto</i>	14
Figura 2 <i>Diagrama de Flujo Proceso de Enchapado</i>	31
Figura 3 <i>Diagrama de Bloques General del Sistema</i>	33
Figura 4 <i>Raspberry Pi 4 Model B</i>	37
Figura 5 <i>Tarjeta de Extensión GPIO (T-Cobbler)</i>	38
Figura 6 <i>Pulsador Táctil NO</i>	39
Figura 7 <i>Dip Switch</i>	40
Figura 8 <i>Diodo Emisor de Luz (LED)</i>	41
Figura 9 <i>Resistencias Limitadoras 220 y 10 K</i>	41
Figura 10 <i>Potenciómetro Trimmer</i>	42
Figura 11 <i>MCP3008 - Conversor Análogo Digital</i>	43
Figura 12 <i>Modulo Optoacoplador PC817</i>	44
Figura 13 <i>Diagrama de Flujo Secuencia de Funcionamiento</i>	52
Figura 14 <i>Ejecución del Servidor Flask en el Entorno Virtual de la Raspberry Pi 4</i>	56
Figura 15 <i>Interfaz HMI Centralizada con Alarma de Temperatura y Grupos de Trabajo</i>	57
Figura 16 <i>Interfaz HMI Mostrando el Avance del Encoder y Estado de Máquina Ocupada</i>	59
Figura 17 <i>Montaje Físico del Sistema de Control y Simulación en Protoboard</i>	60
Figura 18 <i>Variación de la Tensión DC en la Salida PWM Ante el Acercamiento al Setpoint Térmico</i>	64
Figura 19 <i>Interrupción Inmediata de la Secuencia de Actuadores tras la Activación Física del Paro de Emergencia.</i>	66

Figura 20 <i>Sincronización en Tiempo Real de la Interfaz Web ante Estímulos Físicos en el Hardware</i>	67
Figura 21 <i>Comprobación Bidireccional de Aislamiento Galvánico Mediante el Optoacoplador PC817</i>	68

Lista de Apéndices

Apéndice A <i>Especificaciones Técnicas de la Raspberry Pi 4 Model B</i>	83
Apéndice B <i>Hoja de Datos (Datasheet) del Conversor Análogo-Digital MCP3008</i>	84
Apéndice C <i>Hoja de Datos (Datasheet) del Módulo Optoacoplador PC817</i>	85
Apéndice D <i>Repositorio de Código Fuente</i>	86

Introducción

La industria de fabricación de muebles en Colombia representa un sector estratégico debido a la gran cantidad de empleos directos e indirectos que genera. Las PYMES constituyen el núcleo de este mercado; sin embargo, muchas operan con máquinas enchapadoras de hasta 20 años de antigüedad. Esta situación hace que la necesidad de actualizaciones tecnológicas sea crítica, ya que la obsolescencia afecta los estándares de calidad y, por ende, la capacidad competitiva y el crecimiento continuo de las empresas. En la zona de Bogotá, se evidencia que muchas organizaciones prefieren continuar trabajando con maquinaria antigua debido al alto costo que implica la adquisición de equipos nuevos.

La enchapadora de cantos se considera una máquina vital en la fabricación de mobiliario. Al tratarse de equipos antiguos, cuentan con sistemas de control anticuados que pueden ocasionar fallas operativas y riesgos de accidentes laborales. Además, disponen de un control de temperatura de tipo ON-OFF por histéresis que, bajo los estándares actuales, resulta insuficiente. Si el control térmico no es preciso, el pegante tarda más tiempo del necesario en calentar y las fluctuaciones de temperatura provocan defectos en el pegue o la degradación prematura del adhesivo por exceso de calor. Todo lo anterior genera pérdidas de tiempo y materiales, lo cual es crítico para una PYME. Asimismo, la falta de repuestos originales provoca que, ante una falla en la tarjeta de control, la máquina quede completamente inoperativa.

Este proyecto aplicado propone una solución a dichas problemáticas mediante la implementación de un sistema de control centrado en la arquitectura Raspberry Pi y el lenguaje Python. La propuesta integra una interfaz HMI moderna desarrollada en HTML y tecnología IoT para permitir el monitoreo remoto de las variables. Mediante esta ejecución, se busca demostrar

que, a través de electrónica de bajo costo, es posible implementar tecnologías de vanguardia en la industria local.

Gracias al control realizado por la Raspberry Pi, se elimina la dependencia del operario respecto a botoneras y registros visuales de temperatura obsoletos. El monitoreo se realiza en tiempo real, lo que permite no solo automatizar el proceso, sino optimizarlo; el algoritmo PID genera un control térmico más preciso, mejorando el desempeño de la aplicación del pegante. Debido a que la Raspberry Pi opera con niveles de tensión distintos a los industriales, se realiza el acoplamiento mediante optoacopladores para garantizar el aislamiento galvánico. Adicionalmente, dado que la tarjeta no posee entradas análogas nativas para leer la señal de temperatura (simulada mediante un potenciómetro para representar la PT100), se integra el conversor análogo-digital MCP3008.

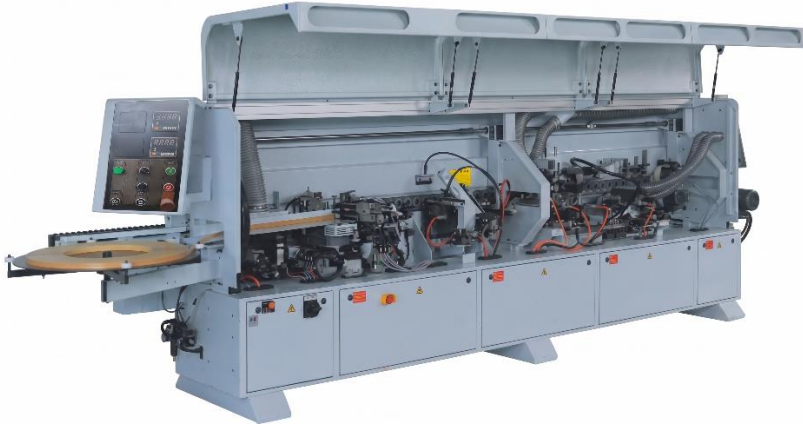
Este desarrollo demuestra la capacidad del ingeniero unadista para proponer soluciones reales a problemas industriales, promoviendo la actualización tecnológica y la sostenibilidad económica. Además, el proyecto sienta las bases para futuras implementaciones en otros tipos de maquinaria, gracias al uso de un software modular desarrollado en Python que permite la escalabilidad; esto facilita realizar mejoras al código sin necesidad de reescribir el sistema por completo.

Para detallar la ejecución de la propuesta, el documento se estructura en capítulos que abarcan el marco teórico, el diseño de hardware y la programación de la interfaz HMI en Python. Se incluyen los resultados de las pruebas en el prototipo físico para validar el control PID e IoT, concluyendo con recomendaciones para la modernización de este tipo de sistemas y las conclusiones.

Planteamiento del Problema

La industria de fabricación de mueble en Colombia constituye un sector relevante dentro de la economía nacional, no solo por sus productos, sino también por los empleos que genera. Según datos del Ministerio de Agricultura y de la Revista El Mueble y la Madera (2018), este sector emplea más de 90.000 personas de manera directa y cerca de 280.000 de forma indirecta, siendo un renglón productivo que impacta a miles de familias colombianas. No obstante, a pesar de esto, las empresas que trabajan con madera y las que fabrican muebles han mantenido históricamente una participación reducida en el PIB nacional, cercana al 0,67 %, lo que refleja limitaciones estructurales para su crecimiento y competitividad (Revista El Mueble y la Madera, 2018). Una de las principales barreras señaladas en estudios de política industrial en el país es la falta de modernización tecnológica en pequeñas y medianas empresas, lo cual restringe su capacidad de innovar, responder a mercados exigentes y mantenerse activas en contextos de crisis (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2018).

Dentro de este contexto, la obsolescencia de este tipo de maquinas utilizadas en la fabricación de muebles, como las enchapadoras de cantos rectos (ver Figura 1), se convierte en algo determinante. Estas máquinas, esenciales para la producción de muebles, en muchos casos operan con sistemas de control que datan de inicios de los años 2000 y que ahora presentan fallas recurrentes. El problema específico identificado radica en un sistema de control de temperatura basado en un esquema ON-OFF con histéresis, que genera fluctuaciones de hasta ± 5 °C en el pegante. Estas variaciones afectan la calidad del enchapado, producen defectos en el acabado y disminuyendo la calidad y la durabilidad del producto final.

Figura 1*Enchapadora de Cantos Rectos con Control de Mando Obsoleto*

Nota. Enchapadora de cantos rectos con panel de control original obsoleto. Elaboración propia con apoyo de Gemini (Google, 2026).

Las deficiencias térmicas mencionadas no representan solo un inconveniente técnico, sino un incremento directo en los costos operativos. Cuando el adhesivo no se aplica a la temperatura indicada en su ficha técnica, el canto no se adhiere correctamente, obligando al operario a retirarlo, limpiar la pieza y repetir el proceso de enchapado. Esto deriva en pérdidas de insumos como pegante, canto y, en ocasiones, el daño de la lámina de madera. Asimismo, un pegado deficiente compromete la reputación de la PYME si el desprendimiento ocurre meses después en manos del cliente.

A esta ineficiencia se suma que la operación de la máquina depende exclusivamente de pulsadores y selectores manuales. La carencia de una interfaz HMI moderna no solo dificulta la supervisión del equipo y aumenta la probabilidad de errores en la configuración, sino que también eleva el riesgo de accidentes laborales. Todo lo anterior, además de causar gastos extra en materiales, representa una pérdida considerable de tiempo productivo debido a los reprocesos

y fallas operativas que ocurren en momentos donde la máquina debería estar cumpliendo con nuevos pedidos.

El problema no se limita a la parte técnica. Al no existir un sistema completo de supervisión de sensores, actuadores y dispositivos de seguridad, la enchapadora funciona sin mecanismos que permitan monitorear en tiempo real su estado o prevenir fallas. A esto se suma la dificultad de mantenimiento debido a que el fabricante ha descontinuado los repuestos, lo que obliga a los técnicos en empresas a recurrir a reparaciones improvisadas, costosas y poco confiables. Todo lo anterior ocasiona paradas continuas de la máquina, tiempo improductivo y aumentando los costos de fabricación del mueble.

Las consecuencias económicas para las pequeñas y medianas empresas que dependen de estas máquinas son muy altas. La intermitencia de los procesos reduce la capacidad de cumplir con los pedidos, afecta la calidad percibida por los clientes y aumenta los costos de mantenimiento correctivo. Según el DNP (2018), el 67 % de las empresas manufactureras en Colombia demanda asistencia externa para adoptar tecnologías productivas, lo que evidencia que la falta de actualización es un problema muy evidente en este sector. De igual forma, un estudio sobre Industria 4.0 en PYMES colombianas reveló poca actualización en nuevas máquinas, lo que baja las posibilidades de competir frente a grandes empresas que han implementado nuevas tecnologías. En este sentido, las empresas con estos equipos obsoletos no solo reducen su eficiencia en fabricación de muebles, sino que puede comprometer la capacidad financiera de las empresas.

El impacto social también es muy evidente. La caída reciente de la producción en el sector muebles, colchones y otras manufacturas, cercana al 3 % en 2023, refleja la vulnerabilidad del sector frente a factores externos y tecnológicos (Portafolio, 2024). Si las empresas no logran

modernizarse, corren el riesgo de poder competir, reducción de personal o incluso cerrar la fábrica. Dado que el sector emplea directa e indirectamente a más de 370.000 personas, la obsolescencia tecnológica no solo amenaza la rentabilidad de las compañías, sino también el trabajo de miles de personas y el bienestar de sus familias (Revista El Mueble y la Madera, 2018).

Todo esto demuestra que la problemática va más allá de solo del ámbito técnico de una máquina específica. La falta de modernización de la enchapadora de cantos rectos muestra que no actualizar las tecnologías, limita la competitividad del sector de fabricación de muebles en Colombia y también pone en riesgo tanto la estabilidad de las empresas como los puestos de trabajo de su personal. De acuerdo con esto, se plantea la necesidad de analizar y diseñar alternativas que permitan superar las deficiencias identificadas, garantizando la producción constante de muebles y la competitividad de las pequeñas y medianas empresas.

El diseño se validará mediante el montaje experimental del circuito en *proto-board* conectado a la Raspberry Pi 4, comprobando el funcionamiento lógico y el aislamiento galvánico mediante optoacopladores. Este desarrollo físico permite verificar el correcto funcionamiento de la interfaz HMI para el control de los diferentes grupos de la máquina y el monitoreo remoto de las variables críticas desde cualquier dispositivo con conexión a internet, asegurando la recolección y análisis de datos en tiempo real. De esta forma, se confirma la pertinencia y viabilidad técnica del proyecto, orientado a dar respuesta a una problemática concreta del sector productivo y alineado con la línea de investigación en Electrónica, Automatización y Robótica de la Escuela ECBTI, dentro de la macro línea de Desarrollo tecnológico e innovación para la sostenibilidad de los territorios.

Pregunta de Investigación

¿De qué manera el diseño de un sistema de control integral, fundamentado en arquitectura Raspberry Pi, algoritmos PID e interfaces HMI con integración IoT, permite superar la obsolescencia tecnológica y optimizar la precisión de los procesos en las enchapadoras de cantos rectos utilizadas por las PYMES del sector mueblero en Colombia?

Justificación

La problemática identificada en la enchapadora de cantos rectos evidencia una situación recurrente en la industria de la madera en Colombia: la brecha tecnológica en las pequeñas y medianas empresas. La obsolescencia de los sistemas de control, derivada de la discontinuación de soporte por parte de los fabricantes, junto con las fallas operativas recurrentes, impacta negativamente en la competitividad. Resolver esta situación es fundamental para garantizar la continuidad operativa de las PYMES, asegurando estándares de calidad óptimos y la estabilidad económica de las familias que dependen de estas empresas.

Desde la perspectiva académica y disciplinaria, el proyecto es pertinente puesto que permite la aplicación de conocimientos de la ingeniería electrónica en un escenario industrial real. A través de metodologías de diseño y simulación, se aborda un problema de automatización que fortalece competencias en áreas críticas como el control automático, la integración de hardware embebido, el desarrollo de software bajo lenguaje Python y la creación de interfaces HMI. Este ejercicio potencia la capacidad profesional para proponer soluciones innovadoras, eficientes y de bajo costo, adaptadas a las realidades de los entornos productivos locales.

En el ámbito social, la propuesta adquiere relevancia al intervenir en un sector que sustenta más de 370.000 empleos directos e indirectos en el país. La falta de actualización tecnológica no solo limita la competitividad, sino que incrementa el riesgo de pérdida de empleos por cierres operativos. Modernizar estos procesos mediante tecnologías accesibles aporta a la productividad del sector mueblero, garantiza la permanencia de las organizaciones en el mercado y mejora la satisfacción del cliente final mediante productos con mejores acabados.

Finalmente, desde el componente de desarrollo profesional, este proyecto representa la oportunidad de validar cómo la formación académica se traduce en aportes tangibles para el

sector productivo. El desarrollo de este sistema evidencia que el diseño tecnológico, cuando se orienta correctamente, actúa como un motor de cambio positivo en las dimensiones económica y social del territorio, cumpliendo con la misión del ingeniero unadista de generar impacto regional.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un sistema de control integral basado en arquitectura Raspberry Pi y tecnología IoT para una enchapadora de cantos rectos, con el fin de superar las limitaciones de los sistemas obsoletos y contribuir a la productividad de las PYMES de fabricación de muebles en Colombia.

Objetivos Específicos

Diagnosticar el estado técnico y operativo de la enchapadora de cantos para establecer los requerimientos del nuevo sistema.

Diseñar la arquitectura de hardware y seleccionar los componentes electrónicos adecuados para el control.

Desarrollar la lógica de control en Python y la interfaz de supervisión HMI del dispositivo.

Validar el prototipo físico mediante pruebas experimentales para asegurar su correcto desempeño.

Analizar la viabilidad económica y técnica de la modernización propuesta frente a soluciones comerciales.

Marco Conceptual y Teórico

Marco Conceptual

El marco conceptual reúne los principales términos técnicos que sustentan el desarrollo del proyecto aplicado. Su objetivo es establecer una comprensión clara de los conceptos fundamentales relacionados con la automatización industrial, el control de procesos, la obsolescencia tecnológica y la integración de tecnologías emergentes. Estos conceptos permiten comprender los factores técnicos que influyen en la modernización de los sistemas de control y en la competitividad de las pequeñas y medianas empresas del sector mueblero colombiano.

Automatización Industrial

La automatización industrial consiste en implementar tecnologías electrónicas y de software en sistemas de producción, permitiendo así mejorar el control, reducir la intervención del operario y aumentar la eficiencia del proceso intervenido. Esta disciplina integra sensores, actuadores, controladores y sistemas de supervisión que garantizan precisión, seguridad y continuidad en la producción (Sánchez et al., 2021). En el contexto del proyecto, la automatización busca mejorar el desempeño de la enchapadora de cantos mediante tecnologías modernas de control.

Control PID

El control PID (Proporcional–Integral–Derivativo) es un algoritmo utilizado para regular variables de proceso, como la temperatura, mediante tres acciones combinadas que corrigen los errores entre el valor medido (Variable de Proceso) y el deseado (Setpoint). Este tipo de control ofrece mayor estabilidad y precisión frente a sistemas ON–OFF tradicionales, permitiendo respuestas más suaves y eficientes en sistemas térmicos e industriales (López & Hernández,

2020). En este proyecto se plantea como la alternativa técnica para optimizar la regulación de la temperatura del adhesivo.

PWM (Pulse Width Modulation)

La Modulación por Ancho de Pulso (PWM) es una técnica utilizada para controlar la potencia entregada a dispositivos eléctricos mediante la variación del ciclo de trabajo de una señal de onda cuadrada. En el proceso de control de temperatura, el controlador PID calcula la potencia necesaria y la entrega a la resistencia de calefacción a través de un relé de estado sólido mediante PWM. Este concepto se aplica en el presente diseño para garantizar que la temperatura del pegante permanezca estable y con fluctuaciones mínimas respecto al punto de consigna.

Obsolescencia Tecnológica

Se refiere al proceso mediante el cual equipos o sistemas pierden vigencia funcional debido al avance tecnológico, la falta de repuestos o el desuso de componentes (Martínez & Castaño, 2022). En el sector industrial, este fenómeno limita la eficiencia e incrementa los costos de mantenimiento. En el caso de la enchapadora, la obsolescencia del sistema de control original afecta la continuidad de la producción y genera fallas recurrentes que justifican su reemplazo.

Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

Una Interfaz Hombre Máquina (HMI) es el medio de comunicación que permite la interacción entre el operario y el sistema de control, visualizando datos en tiempo real. Estas interfaces mejoran la seguridad operativa y reducen errores humanos al ofrecer un entorno visual intuitivo (Ruiz & Pérez, 2020). En este proyecto, el diseño de una HMI moderna busca optimizar la operación y supervisión remota de la enchapadora.

SBC (Single Board Computer)

Una computadora de placa única (SBC) integra en un solo circuito impreso el microprocesador, la memoria RAM y los puertos de entrada/salida. Su tamaño compacto y bajo costo permiten su implementación en aplicaciones embebidas e IoT. Entre estas destaca la Raspberry Pi 4, que por su versatilidad en los puertos GPIO y capacidad de procesamiento, resulta adecuada para el control secuencial y la gestión de datos de la enchapadora.

Sistemas Embebidos y Raspberry Pi

Los sistemas embebidos son plataformas computacionales diseñadas para realizar funciones específicas dentro de un sistema mayor. En este proyecto, se utiliza la Raspberry Pi 4 como unidad central de procesamiento debido a su capacidad para ejecutar sistemas operativos basados en Linux y gestionar protocolos de comunicación industrial. Según las especificaciones del fabricante, cuenta con un procesador Broadcom BCM2711 Quad-core de 64 bits, garantizando la capacidad de cómputo necesaria para algoritmos en tiempo real (Raspberry Pi Ltd, 2019).

Internet de las Cosas (IoT)

El IoT se define como la infraestructura que permite la interconexión de objetos físicos con la red para el intercambio de información. Su aplicación en este diseño permite que los datos de temperatura y el estado de los grupos de la máquina sean accesibles desde cualquier dispositivo con conexión a internet, facilitando la toma de decisiones basada en datos históricos y en tiempo real.

Lenguaje de Programación Python

Python es un lenguaje de alto nivel, de código abierto, reconocido en la ingeniería por su sintaxis clara y su robustez en el manejo de datos. Es un lenguaje ampliamente adoptado para el

desarrollo de sistemas de control y automatización debido a su compatibilidad con librerías especializadas y sistemas embebidos, lo que lo hace óptimo para la implementación de la lógica de control y la interfaz web del presente proyecto.

Optoacoplador

Un optoacoplador (o foto acoplador) es un dispositivo capaz de transmitir una señal eléctrica entre dos circuitos que deben permanecer aislados galvánicamente, esto evita el paso directo de corriente entre ellos, pero permite la transferencia de las señales mediante luz (Floyd, 2008). Como la Raspberry Pi trabaja con voltajes de 3.3V DC y los dispositivos de control de la máquina, como contactores y sensores, operan a 24V DC, el optoacoplador facilita el acoplamiento de señales y evita que un pico de voltaje o un cortocircuito en la máquina dañe los puertos GPIO del controlador. También ayuda a eliminar el ruido eléctrico generado por los motores, asegurando que la señal que llega a la Raspberry Pi no presente perturbaciones

Marco Teórico

El presente marco teórico reúne estudios científicos que fundamentan la propuesta de modernización tecnológica aplicada a la enchapadora de cantos rectos. Estos trabajos abordan la automatización industrial, el control PID, las interfaces HMI y la problemática de la obsolescencia tecnológica, aportando bases técnicas y metodológicas para el diseño y simulación del sistema propuesto.

Automatización Industrial y Modernización Tecnológica

Sánchez, Rodríguez y Díaz (2021) analizan la evolución de la automatización en el contexto de la Industria 4.0, destacando que la integración de tecnologías digitales, como sensores inteligentes y sistemas de control embebidos, permite mejorar la productividad y reducir errores humanos. El estudio resalta que la automatización en pequeñas y medianas

empresas sigue siendo limitada por la falta de inversión en nuevas tecnologías, lo que genera baja competitividad. Este enfoque respalda la necesidad del proyecto al evidenciar que la actualización de sistemas de control representa poder tener una producción continua y sin errores de operación o calidad.

Control PID en Procesos Térmicos Industriales

López y Hernández (2020) desarrollaron un estudio experimental sobre la aplicación del control PID en sistemas térmicos, demostrando su eficiencia frente a controles ON-OFF tradicionales. Los resultados muestran que el uso del PID reduce significativamente la variación de temperatura y mejora la estabilidad del proceso. Este tipo de control permite obtener una respuesta más precisa y confiable, lo cual es fundamental en aplicaciones donde la calidad del producto depende de la temperatura, como en el caso del pegante aplicado en la enchapadora.

Impacto de la Obsolescencia Tecnológica en la Competitividad

Martínez y Castaño (2022) estudian cómo la obsolescencia tecnológica afecta la competitividad de las pequeñas y medianas empresas. Su investigación revela que la falta de modernización en equipos y sistemas de control genera costos adicionales, pérdidas en la producción y dificultad para cumplir con los estándares de calidad. Además, cuando una empresa implementa una nueva tecnología, debe capacitarse y enseñar a los operarios como trabajar de una nueva manera. Este análisis refuerza la pertinencia del proyecto, al proponer la renovación de una máquina obsoleta como una estrategia directa para mitigar estos impactos.

Diseño de Interfaces HMI Para Sistemas Industriales

Ruiz y Pérez (2020) investigan el impacto de las Interfaces Hombre Máquina (HMI) en la productividad y la seguridad operativa. Su estudio evidencia que las HMI modernas facilitan la supervisión del proceso mediante representaciones gráficas intuitivas, disminuyendo los errores

de los operarios y optimizando la interacción del operario con el sistema. Además, los autores resaltan que la incorporación de HMI en proyectos de automatización incrementa la capacidad de respuesta ante fallas y mejora la eficiencia en la producción. Esta evidencia sustenta la inclusión de una HMI en el diseño del sistema propuesto.

IOT en la Industria

El internet de las cosas es una tecnología basada en la comunicación en tiempo real de diferentes dispositivos para compartir información útil y mejorar procesos. En el contexto de la automatización industrial, el IoT permite sistemas más eficientes, facilitando la disponibilidad de datos para su análisis en tiempo real. Este tipo de sistemas son ampliamente utilizados en la Industria 4.0. En este sentido, Martínez Aguilar, G. M., Sosa Escobedo, A. y Morales Ibarra, V. M. (2022) señalan que estas tecnologías permiten la integración de dispositivos para compartir información y facilitar el monitoreo y análisis de datos en tiempo real. En este proyecto es clave la disponibilidad de la información de la máquina en tiempo real para su monitoreo.

Metodología

Metodológicamente este proyecto tiene un tipo de investigación aplicada y con un enfoque mixto, lo cual permite abordar de manera integral las problemáticas de la enchapadora actual. Según Elías (2007), la investigación aplicada se orienta a la generación de conocimiento con aplicación directa para resolver problemas concretos, actuando como puente entre la teoría y la práctica. De igual forma, Lozada (2014) enfatiza que este tipo de investigación transforma los hallazgos de la investigación básica en prototipos y productos viables, favoreciendo la transferencia tecnológica y el impacto económico social. Estas definiciones fundamentan la elección de la investigación aplicada para la actualización de la enchapadora, ya que se requiere una solución que responda de forma directa a las deficiencias del sistema actual.

Por otro lado, la investigación con enfoque mixto integra de manera sistemática técnicas cuantitativas y cualitativas para obtener una visión global del fenómeno. Bagur-Pons et al. (2021) señalan que este enfoque permite fusionar datos numéricos y narrativos, logrando una comprensión holística y enriquecida del objeto de estudio. Hernández Mendoza y Samperio Monroy (2018) complementan esta perspectiva al describir el enfoque mixto como un proceso en el que lo secuencial del método cuantitativo se combina con la naturaleza circular del cualitativo, lo que incrementa la validez y profundidad del análisis. La adopción de estos métodos es esencial en este proyecto, pues la modernización de la enchapadora requiere tanto la precisión en la medición de variables técnicas como la exploración de experiencias y necesidades económicas que permitan ajustar el diseño a la realidad del sector productivo.

Para desarrollar el proyecto aplicado se plantea una estrategia que se sustenta en el marco teórico y conceptual, la caracterización técnica de la máquina y la elaboración de un diseño integral del sistema de control empleando hardware de código abierto. Se utilizarán métodos de

recolección de datos mediante mediciones experimentales sobre el prototipo, validación del software y la interfaz HMI, así como una evaluación de viabilidad frente a equipos industriales. A continuación, se describen las cinco fases metodológicas estructuradas para el desarrollo del proyecto:

Fase 1: Diagnóstico y Caracterización del Sistema Actual

Se efectuó una caracterización técnica del modelo de operación estándar de enchapadoras industriales fabricadas a principios de la década del 2000, identificando las deficiencias características de sus sistemas de control por lógica cableada. A partir de este análisis de obsolescencia, se definieron las secuencias operativas de los grupos de trabajo y la condición de seguridad, estableciendo los requerimientos técnicos base para la modernización del equipo

Fase 2: Diseño de la Arquitectura de Hardware y Selección de Componentes

Se definió la arquitectura del nuevo sistema de control en tres niveles interdependientes: hardware, control lógico y supervisión. Se seleccionaron los componentes electrónicos (SBC, optoacopladores, conversores y simuladores de señales) con base en criterios de bajo costo y robustez industrial. Posteriormente, se elaboró el diseño del circuito y el mapeo de puertos GPIO, garantizando el aislamiento galvánico necesario para el entorno industrial.

Fase 3: Desarrollo de la Lógica de Control y Supervisión (Software)

Se desarrolló el software de control centralizado en Python bajo un entorno virtual, implementando un ciclo de escaneo continuo y un *encoder* virtual para gestionar la secuencia de los actuadores en tiempo real. Para la estabilización térmica del calderín, se programó y sintonizó un controlador PID empírico. Simultáneamente, se construyó una interfaz hombre-máquina (HMI) mediante el *framework* Flask y plantillas web, integrando el protocolo de WebSockets

para garantizar una supervisión remota bidireccional y la visualización instantánea de las alertas de seguridad.

Fase 4: Integración y Validación Experimental del Prototipo

Se realizó el montaje físico del sistema sobre una placa de pruebas (*protoboard*) para validar la integración del hardware y el software desarrollado. Se ejecutó un protocolo de cuatro pruebas experimentales para evaluar el control térmico PID, la lógica secuencial de seguridad, la latencia de la interfaz HMI y el aislamiento galvánico de las señales. Los ensayos se verificaron mediante instrumentación electrónica e inspección visual, contrastando los resultados obtenidos frente a los criterios de aceptación técnicos definidos.

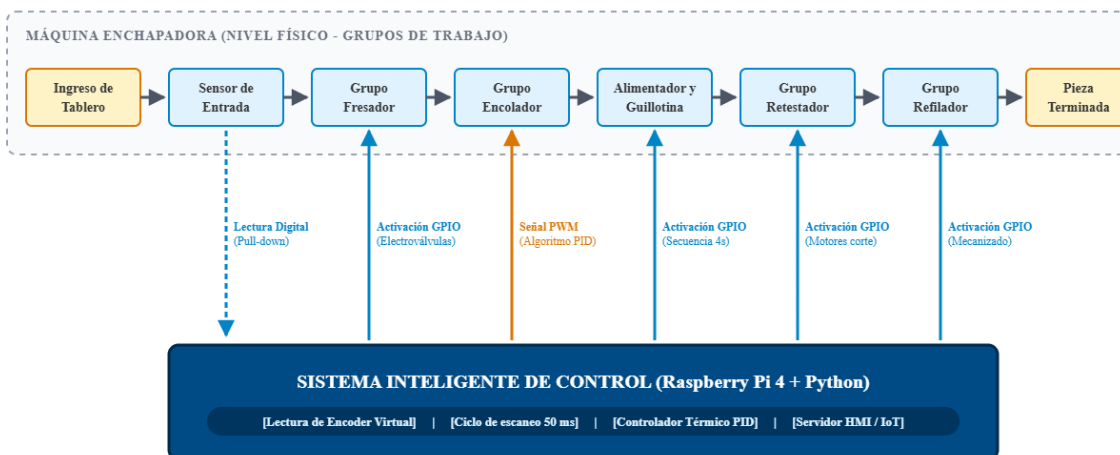
Fase 5: Análisis de Resultados y Evaluación de Viabilidad Económica

Se analizó el desempeño global del prototipo y se comparó con las soluciones industriales tradicionales del mercado. Se realizó un estudio de viabilidad económica contrastando el costo de implementación de la arquitectura basada en hardware libre frente a controladores lógicos programables (PLC) comerciales, determinando el impacto financiero y la factibilidad técnica del proyecto para su aplicación real en el sector de las PYMES.

Desarrollo Ingenieril

Caracterización y Arquitectura del Proceso Industrial

Para comprender el alcance y la integración del sistema de control desarrollado, es fundamental esquematizar el funcionamiento mecánico y secuencial de la enchapadora de cantos rectos. En un entorno industrial, la máquina opera mediante una serie de grupos de trabajo independientes que deben sincronizarse con precisión milimétrica al paso del tablero de madera. En la Figura 2, se ilustra el diagrama de flujo del proceso físico y la etapa exacta donde se integra la modernización tecnológica. Como se observa en el esquema, la unidad central de procesamiento (Raspberry Pi 4) actúa como el cerebro del sistema, adquiriendo las señales de entrada (como el sensor de posición de la pieza) y ejecutando la lógica de control en Python para activar secuencialmente las salidas hacia los actuadores de cada módulo (fresado, encolado, alimentación, retestado y refilado). Esta arquitectura centralizada permite eliminar la dependencia de la lógica cableada antigua, garantizando una operación automatizada, segura y monitoreada en tiempo real.

Figura 2*Diagrama de Flujo Proceso de Enchapado*

Nota. Secuencia operativa mecánica y su integración con el control inteligente. Elaboración propia con apoyo de Gemini (Google, 2026).

Descripción de la Secuencia Operativa de los Grupos

Para que la lógica de control que se va a desarrollar en Python tenga sentido dentro del entorno real, es necesario detallar la función mecánica que realiza cada uno de los grupos de trabajo de la enchapadora a medida que el tablero avanza por la cadena de avance:

Grupo Fresador. El primer paso en la operación de la máquina corresponde al grupo fresador. Este módulo cuenta con dos motores que utilizan herramientas de corte para perfilar el borde del tablero de madera. Su propósito principal es eliminar las astillas o imperfecciones que pudieron quedar de los cortes previos, de manera que se garantice una superficie totalmente plana y a 90 grados para que el pegante tenga una correcta adherencia más adelante.

Grupo Encolador. Posteriormente, la pieza de madera pasa al grupo encolador, el cual representa la etapa térmica crítica de todo el sistema. En esta parte de la máquina, un calderín se

encarga de derretir el adhesivo para mantenerlo a una temperatura de trabajo óptima cercana a los 180 °C. Una vez fundido, un rodillo se encarga de aplicar el pegante de forma uniforme sobre el borde del tablero que fue previamente rectificado.

Alimentador de Canto y Guillotina. De manera sincronizada con el encolador, el sistema de alimentación utiliza unos rodillos para empujar y pegar la cinta de canto contra el borde del tablero. Luego de esto, una guillotina neumática realiza un corte rápido del material, dejando un pequeño excedente de canto tanto en la parte delantera como en la parte trasera de la pieza de madera para asegurar que todo el borde quede cubierto.

Grupo Retestador. Después de que la cinta ha sido pegada, la pieza avanza por la cadena hacia el grupo retestador. Este mecanismo cuenta con dos motores equipados con sierras pequeñas que se encargan de cortar exactamente a ras los excedentes de material que dejó la guillotina en las puntas del tablero, operando de forma sincronizada con la velocidad de la máquina.

Grupo Refilador. Finalmente, el proceso de la máquina termina en el grupo refilador. En este punto, un par de motores ubicados en la parte superior e inferior eliminan el sobrante de canto que sobresale en las caras planas del tablero. Esta acción permite retirar el exceso de material y darle un acabado suave y ligeramente redondeado a la pieza para que quede lista.

Diseño de la Arquitectura de Hardware y Selección de Componentes

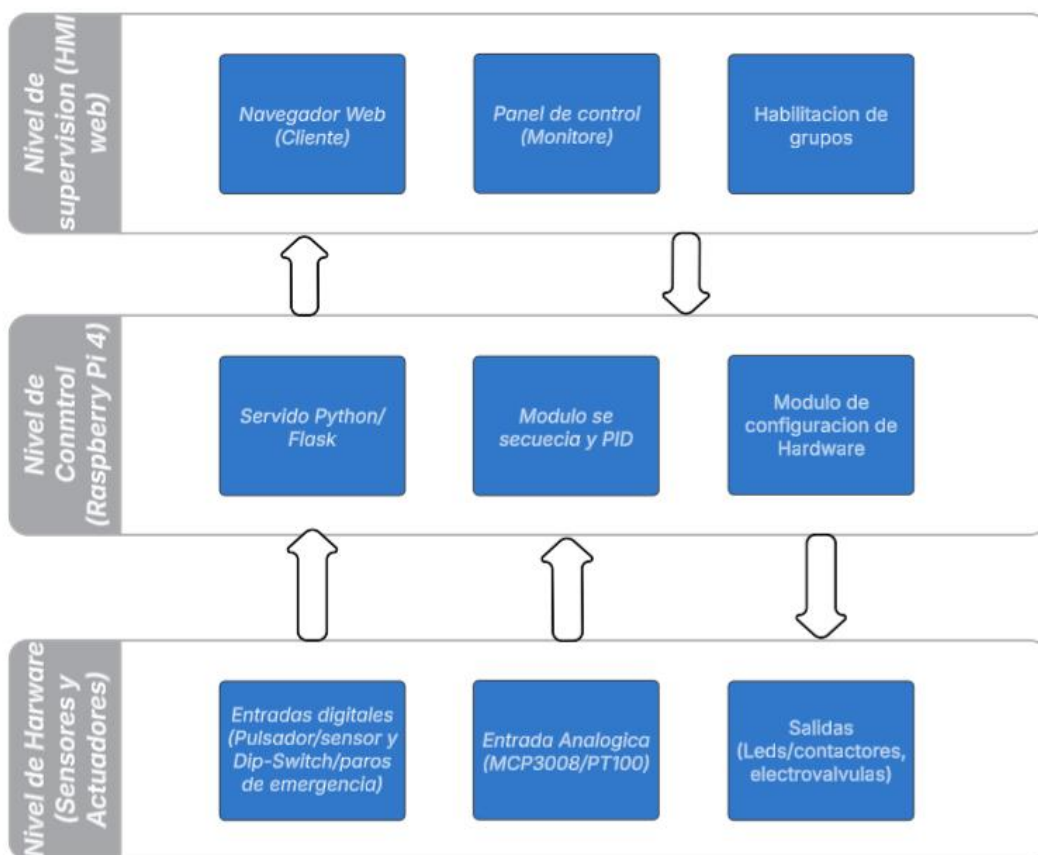
Arquitectura del Sistema

El diseño del sistema busca emular el funcionamiento y las secuencias de trabajo de los grupos de la enchapadora de forma robusta, basándose en el comportamiento de las máquinas industriales. Para mantener la estabilidad y confiabilidad de la máquina, el sistema se estructura en tres niveles o capas interdependientes: Nivel de Hardware (Raspberry Pi 4 y periféricos),

Nivel de Software (Python) y Nivel de Supervisión (HMI). En la Figura 3 se presenta el diagrama de bloques general del sistema.

Figura 3

Diagrama de Bloques General del Sistema



Nota. Interacción entre hardware, lógica de control e interfaz HMI. Fuente: Elaboración propia con apoyo de Canva (Canva, 2026).

Nivel de Hardware (Físico/Campo). Este nivel es fundamental en la arquitectura, ya que se encarga de transformar las variables físicas en señales eléctricas para que el sistema de control pueda entenderlas y viceversa. Es la conexión física directa con la máquina; las entradas,

como el sensor de pieza y los paros de emergencia, entregan la información de tipo digital al control, y este, a su vez, habilita las salidas hacia los contactores y electroválvulas. Para efectos de esta simulación, las entradas son simuladas por medio de un pulsador y un *dip-switch*, mientras que las salidas son representadas visualmente mediante LEDs. Dado que la máquina real maneja voltajes de control de 24 V DC, el planteamiento de este proyecto integra optoacopladores PC817 en este nivel. Estos actúan como un puente seguro para el acondicionamiento y aislamiento de las señales industriales antes de ingresar a los puertos GPIO de la Raspberry Pi 4 de 3.3 V DC. De igual manera, para la variable térmica analógica que no puede ser procesada directamente por el microcontrolador, se utiliza el conversor análogo-digital MCP3008, el cual digitaliza el valor del divisor de tensión (PT100 simulada) entregando la información térmica para ser calculada por el código de control. Cabe destacar que los detalles específicos de cableado, la configuración en topología *pull-down* y la lógica de polaridad se abordan a profundidad en la sección de Mapeo de Puertos (I/O)

Nivel de Control Lógico (Software/ Backend). Este nivel es el cerebro del control alojado dentro de la Raspberry Pi 4; aquí es donde se toman todas las decisiones sobre la secuencia de trabajo de todos los grupos de la máquina. El software está construido de forma modular utilizando Python, separando la configuración del hardware en el archivo `config.py` y la lógica principal de funcionamiento en el archivo `app.py`. En este nivel se lleva a cabo un procesamiento continuo y concurrente en ciclos de 50 ms. Durante este tiempo, el sistema realiza la lectura de las señales de entrada, calcula el algoritmo PID, lee el estado general y gestiona el *encoder* virtual para activar o desactivar los diferentes grupos (refilador, retestador, etc.) en los momentos exactos en que la pieza pasa frente a estos, emulando fielmente el comportamiento de un PLC industrial.

El módulo `config.py` define los parámetros de la máquina, como los puertos GPIO asignados a cada entrada y salida, las posiciones en milímetros de los grupos, el *setpoint* de temperatura y la velocidad de avance. Este módulo almacena las variables de forma clara y ordenada, permitiendo realizar ajustes técnicos en planta sin el riesgo de alterar la lógica central. Por su parte, el módulo `app.py` centraliza la conexión entre el hardware y la HMI. Se decidió integrar toda la lógica de control operativa en un solo script principal (`app.py`) para evitar latencias de comunicación interna y garantizar la estabilidad del sistema en tiempo real, asegurando el cumplimiento estricto del ciclo de 50 ms sin sobrecargar la capacidad de procesamiento del microcontrolador.

Nivel de Supervisión (HMI/ IoT). Esta es la capa superior donde el usuario interactúa con el sistema de control, permitiendo realizar el monitoreo en tiempo real de variables críticas como la temperatura y el estado de los actuadores. A diferencia del control obsoleto por botonera física que poseía la máquina original, esta nueva interfaz aplica conceptos directos de la Industria 4.0 y el IoT. Para la implementación de esta HMI, se creó una interfaz web moderna en HTML (`index.html`) estructurada con Bootstrap 5, incorporando un tema oscuro (*Dark Mode*) que ayuda a reducir la fatiga visual del operario en planta y destaca visualmente las alarmas y el estado de la unidad de aplicación. Asimismo, se implementó un servidor web utilizando el *framework* Flask para permitir el acceso a la HMI desde cualquier dispositivo (tablet, celular o PC) conectado a la red LAN local. Para garantizar que la información de seguridad y los paros de emergencia se reflejen instantáneamente en la pantalla sin necesidad de que el usuario recargue el navegador, la comunicación entre este nivel y el control lógico se realiza mediante el protocolo de WebSockets (Flask-SocketIO), logrando un monitoreo y control verdaderamente bidireccional y en tiempo real.

Selección de Componentes (Unidad de Control y Procesamiento)

La solución propuesta consiste en un sistema de control basado en una Raspberry Pi 4 como unidad central, ejecutando un programa desarrollado en lenguaje Python y un servidor web mediante Flask. A continuación, se describen las especificaciones técnicas de los componentes principales seleccionados para la validación del proyecto:

Raspberry Pi 4 Model B. Ante la obsolescencia y el cese de servicio del PLC original de la máquina, se plantea la utilización de esta computadora de placa única (SBC) para que actúe como el cerebro central de todo el sistema. De acuerdo con Upton y Halfacree (2014), una Raspberry Pi es un ordenador de placa reducida de bajo costo que integra en un solo circuito impreso las capacidades de procesamiento de una computadora convencional junto con pines de hardware de entrada y salida de propósito general (GPIO). Su elección se fundamenta en su versatilidad para ejecutar el lenguaje Python, la disponibilidad de los puertos GPIO para interactuar físicamente con los sensores y actuadores (reemplazando el hardware del PLC), y su capacidad de procesamiento para alojar el servidor web (Flask) de forma simultánea al control de la máquina, de acuerdo con las especificaciones del fabricante (Raspberry Pi Ltd, s.f.; ver Anexo A). En la Figura 4 se observa la unidad de control utilizada en este proyecto.

Figura 4

Raspberry Pi 4 Model B



Nota. Unidad central de procesamiento del sistema.

Características del dispositivo:

- Modelo utilizado: Raspberry Pi 4 Model B.
- Procesador: Broadcom BCM2711, Quad-core 1.5 GHz.
- Sistema operativo: Raspberry Pi OS.
- Arquitectura: Ejecución en Python 3.11 bajo entorno virtual.
- Conectividad utilizada: Puertos GPIO para entradas y salidas digitales, y red Wifi

para la conexión del servidor web IoT.

Funciones dentro del proyecto:

- Ejecuta el código de control basado en programación estructurada y orientada a eventos.
- Gestiona la lectura de sensores, paros de emergencia y activación de actuadores (fase de simulación).

- Aloja y procesa la interfaz gráfica HMI basada en tecnologías web (HTML/CSS y WebSockets).
- Controla la lógica de funcionamiento secuencial de la máquina y el algoritmo PID.

Tarjeta de Extensión GPIO (T-Cobbler). Este componente se utiliza en conjunto con un cable de cinta plana para trasladar de forma segura y ordenada las señales de las entradas y salidas desde los puertos de la Raspberry Pi hacia el protoboard. Su implementación minimiza el desgaste mecánico de los pines originales y reduce significativamente el riesgo de cortocircuitos en la tarjeta principal durante la fase de validación física (Figura 5).

Figura 5

Tarjeta de Extensión GPIO (T-Cobbler)



Nota. Placa de expansión para conexiones de puertos GPIO

Pulsador (Simulación Sensor de Entrada). La máquina enchapadora cuenta con un sensor capacitivo PNP que detecta la entrada de la pieza y, junto con el encoder, determina la longitud de esta y su posición dentro del proceso. En el montaje para la simulación en el

protoboard, este sensor es simulado con un pulsador táctil normalmente abierto para emular el ingreso de la pieza de trabajo. Según la literatura técnica, un interruptor de tipo pulsador es un dispositivo electromecánico que permite o interrumpe el flujo de corriente en un circuito únicamente mientras se le aplica una fuerza física (Boylestad & Nashelsky, 2013). La Figura 6 ilustra el componente utilizado en el proyecto.

Figura 6

Pulsador Táctil NO



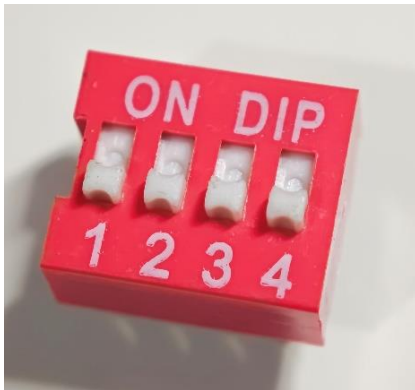
Nota. Pulsador táctil simulando el sensor de ingreso de madera.

Dip Switch (Simulación Paros de Emergencia). El estándar en la seguridad de las máquinas industriales y sus paros de emergencia consiste en circuitos cerrados que se abren al presentarse una falla. Para garantizar este principio de seguridad intrínseca en la simulación, se utiliza un dip switch de cuatro contactos, de los cuales se implementaron dos: uno para el paro de emergencia de la entrada y otro para la salida de la máquina. Un interruptor DIP (Dual In-line Package) es un conjunto de interruptores eléctricos manuales empaquetados en un formato estándar de circuito integrado, diseñados para configurar comportamientos en placas de circuito

impreso (Floyd, 2008). Para observar el interruptor utilizado en este proyecto, diríjase a la Figura 7.

Figura 7

Dip Switch



Nota. Interruptores que emulan la activación de los paros de emergencia

Diodos Leds y Resistencias Limitadoras. En la máquina real, las salidas manejadas corresponden a contactores y electroválvulas que operan a 24V DC. Dado que este nivel de tensión no puede ser suministrado directamente por la Raspberry Pi 4 (la cual opera a 3.3V DC), las secuencias de trabajo de las salidas se visualizaron por medio de LEDs para fines de simulación y validación (Figura 8). Estos diodos tienen conectadas resistencias limitadoras de 220Ω (Figura 9), al igual que se emplearon resistencias de $10 K\Omega$ en configuración pull-down para las entradas, garantizando que no se excedan los límites de corriente del microcontrolador. Un diodo emisor de luz (LED) es un dispositivo semiconductor que emite fotones cuando es atravesado por una corriente directa, requiriendo siempre un elemento resistivo en serie para limitar dicha corriente y evitar su destrucción térmica (Boylestad & Nashelsky, 2013).

Figura 8

Diodo Emisor de Luz (LED)



Nota. Diodos indicadores de la activación de actuadores y electroválvulas

Figura 9

Resistencias Limitadoras 220 y 10 K



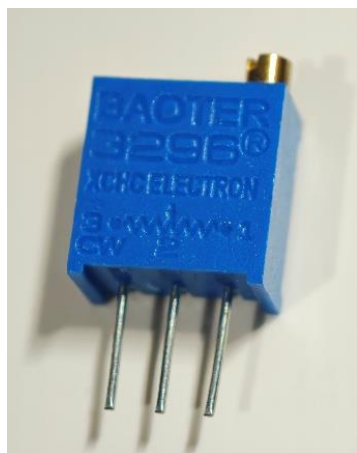
Nota. Resistencias para limitación de corriente y configuración *pull-down*.

Potenciómetro Trimmer (Simulación PT100). El grupo encolador de la máquina original usa una PT100 (termorresistencia) para determinar la temperatura del adhesivo. En este

proyecto, dicha variación térmica se emula utilizando un potenciómetro tipo trimmer de $20K\Omega$ (Figura 10). Dado que el control PID implementado en el software necesita leer la retroalimentación de una variable dinámica, el potenciómetro se configuró como un divisor de tensión. Al girar su tornillo central, se simula el incremento de la temperatura, entregando un voltaje analógico variable de 0 a 3.3V DC que es leído y procesado por el conversor ADC. Un potenciómetro es un resistor variable con un contacto móvil (cursor) que permite dividir el voltaje de entrada de manera proporcional a su posición mecánica (Floyd, 2008).

Figura 10

Potenciómetro Trimmer



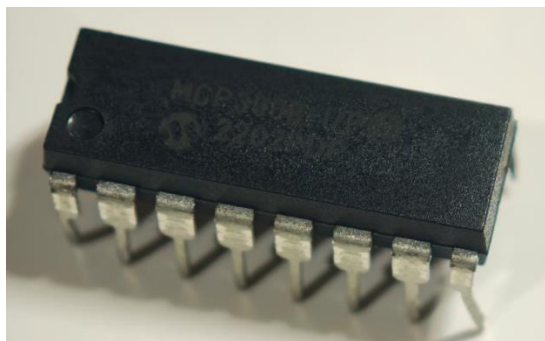
Nota. Potenciómetro simulando el comportamiento térmico de la sonda PT100

Conversor Análogo – Digital (MCP3008). Debido a que la Raspberry Pi 4 carece de pines con conversores analógicos nativos, no puede leer directamente las variaciones de voltaje generadas por el potenciómetro. Por lo tanto, fue estrictamente necesario integrar un dispositivo intermediario que realizara el acondicionamiento de esta señal. La temperatura simulada es procesada por el integrado MCP3008 (Microchip Technology Inc., 2007; ver Anexo B), el cual digitaliza la información térmica para que posteriormente sea evaluada por el algoritmo PID en

Python. Para la conversión de esta señal, se utilizó el circuito integrado mostrado en la Figura 11. Un convertidor analógico a digital (ADC) es un circuito electrónico que traduce una magnitud de entrada analógica continua, como voltaje o corriente, en una representación digital discreta proporcional, permitiendo su procesamiento por sistemas lógicos (Tocci et al., 2007).

Figura 11

MCP3008 - Conversor Análogo Digital



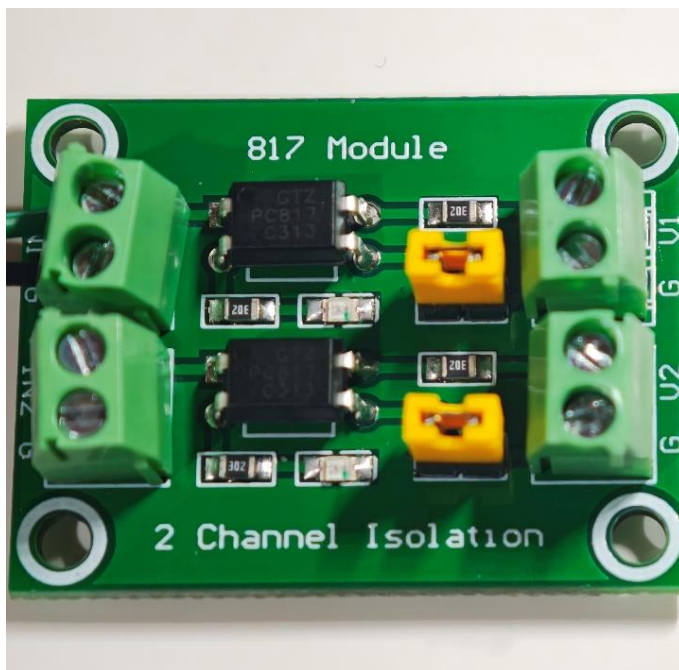
Nota. Conversor analógico-digital para la lectura de la temperatura

Módulos Optoacopladores (PC817). Es fundamental proteger la lógica de control de 3.3V DC de la Raspberry Pi frente a las tensiones industriales de 24V DC y los ruidos electromagnéticos generados por las bobinas de las electroválvulas y contactores de la máquina. Aunque en la fase de validación de escritorio se utilizaron LEDs trabajando a bajo voltaje, para la etapa de implementación física se planteó la utilización de módulos optoacopladores basados en el integrado PC817. La elección de este modelo se sustenta en el enfoque principal del proyecto: la automatización mediante electrónica de bajo costo. El PC817 es un componente económico y accesible, pero totalmente viable a nivel industrial para aislar señales de control. Su principio de funcionamiento interno se basa en un aislamiento óptico: la señal eléctrica de la entrada enciende un diodo emisor de luz (LED) infrarroja; esta luz es detectada en la salida por

un sensor fotosensible (fototransistor) que, al activarse, entra en saturación y permite el paso del voltaje actuando como un interruptor cerrado, logrando la conmutación sin que exista ningún contacto eléctrico físico entre la entrada y la salida, según sus características de aislamiento óptico (Sharp Corporation, 1996; ver Anexo C). Técnicamente, un optoacoplador es un dispositivo de estado sólido que utiliza luz para transmitir señales entre dos circuitos aislados galvánicamente, bloqueando los picos de alto voltaje y el ruido de modo común (Rashid, 2015). La Figura 12 presenta los módulos propuestos para garantizar este aislamiento.

Figura 12

Modulo Optoacoplador PC817



Nota. Módulo optoacoplador para el aislamiento galvánico de señales.

Diseño de Hardware y Mapeo de Puertos (I/O)

La conexión física entre la Raspberry Pi 4 y el protoboard se realizó utilizando la tarjeta de extensión GPIO (T-Cobbler), la cual, además de proteger los pines GPIO de la tarjeta SBC del

desgaste mecánico y prevenir un cortocircuito, permite organizar y visualizar los puertos de forma clara directamente en la placa de pruebas.

Antes de detallar la asignación de estos puertos, es necesario definir el alcance de la simulación. El objetivo principal de esta fase de desarrollo no consiste en emular la totalidad de las conexiones eléctricas y neumáticas de la enchapadora industrial, sino en validar la capacidad de procesamiento de la Raspberry Pi 4 frente a los comportamientos secuenciales más críticos y evaluar la estabilidad de su ciclo de control en tiempo real. Bajo esta premisa, se establecieron delimitaciones físicas intencionales en el montaje del protoboard. Por ejemplo, en la arquitectura física de la máquina, los grupos operativos como el fresador, el retestador y el refilador funcionan con dos motores independientes, lo que requiere la activación de dos contactores de potencia por cada grupo. Para efectos prácticos de la simulación y optimización de los puertos GPIO, la señal de mando lógico de estos motores se unificó; por lo tanto, en la maqueta de pruebas se utiliza un único diodo LED por grupo para representar la orden de activación simultánea de ambos contactores.

De igual manera, se delimitó el alcance operativo del grupo retestador. En la máquina real, este grupo opera mediante un sistema dinámico complejo que combina el giro continuo de los motores de corte con un posicionamiento neumático (activado por electroválvulas) en los extremos exactos de la pieza. Para el diseño y validación de este controlador lógico, el comportamiento del retestador se simplificó a su etapa de potencia estática. En consecuencia, el modelo de control asume la activación continua de los motores de corte desde el momento en que el operario habilita la tensión de mando general en la HMI, omitiendo el subproceso del seguimiento neumático. Esta abstracción técnica permite concentrar los recursos de

procesamiento y el análisis de latencia del *encoder* virtual en los grupos de mayor exigencia de sincronización (fresador, alimentador de canto y guillotina).

Para el acondicionamiento de las señales de entrada de la máquina, se implementaron resistencias en configuración *pull-down*. Esta topología conecta físicamente el pin del microcontrolador a tierra (GND), asegurando un estado lógico bajo (0V) estable en reposo para evitar falsas activaciones por ruido electromagnético; al cerrarse el contacto del sensor, el voltaje de alimentación fluye hacia el puerto, registrando un nivel lógico alto de forma confiable (Floyd, 2006). Para la integración del conversor análogo-digital MCP3008, se utilizaron los pines GPIO destinados a la comunicación mediante el protocolo síncrono SPI (Serial Peripheral Interface). Esta arquitectura requiere de cuatro líneas fundamentales: la selección de chip (CS) para habilitar el esclavo, la señal de reloj (CLK) para la sincronización de datos, el bus MOSI para enviar los comandos de lectura desde el microcontrolador y el bus MISO para retornar el valor digitalizado de 10 bits (Schmidt, 2022). Adicionalmente, el integrado se energiza directamente a los 3.3V DC de la placa, utilizando este mismo voltaje como referencia estable para la lectura del dato de la temperatura. La distribución exacta de las entradas se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1*Entradas del Sistema*

GPIO de entrada	Tipo de señal	Origen (Simulación)
GPIO 10 (MOSI)	Comunicación SPI	PIN 11 MCP3008
GPIO 9 (MISO)	Comunicación SPI	PIN 12 MCP3008
GPIO 11 (SCLK)	Comunicación SPI	PIN 13 MCP3008
GPIO8 (CSO)	Comunicación SPI	PIN 10 MCP3008
CH0 (Vía MCP3008)	Señal Analógica	Potenciómetro (PT100 simulada)
GPIO 4	Digital (pulsador NO)	Sensor de entrada de pieza simulado
GPIO 27	Digital (Dip – Switch NC)	Paro de emergencia entrada simulado
GPIO 22	Digital (Dip – Switch NC)	Paro de emergencia salida simulado

Nota. Asignación de señales de entrada digitales y analógicas del sistema.

Para la correcta visualización de la activación de las salidas se utilizaron LEDs para simular los actuadores (contactores y electroválvulas). Estos se conectaron de la siguiente forma: el ánodo de cada LED se conectó directamente al pin GPIO asignado de la Raspberry Pi, mientras que el cátodo se conectó a una resistencia limitadora de 220Ω derivando a tierra (GND). Cuando el software envía un "1" lógico (3.3V DC), el LED enciende, confirmando la activación de la etapa de potencia. La Tabla 2 presenta el mapeo completo de las salidas.

Tabla 2*Salidas del Sistema*

GPIO de salida	Tipo de señal	Destino (Simulación)
GPIO 5	Digital (LED)	Contactador Cadena Avance
GPIO 6	Digital (LED)	Contactores Motores Fresado
GPIO 12	Digital (LED)	Electroválvula Fresa 1
GPIO 16	Digital (LED)	Electroválvula Fresa 2
GPIO 18	PWM (LED)	SSR Calefacción Encoladora
GPIO 20	Digital (LED)	Electroválvula Alimentador
GPIO 21	Digital (LED)	Electroválvula Guillotina
GPIO 23	Digital (LED)	Contactores Motores Retestador
GPIO 26	Digital (LED)	Contactores Motores Refilador

Nota. Mapeo de puertos GPIO para la activación de actuadores y control térmico.

Desarrollo de la Lógica de Control y Supervisión (Software)

Lógica de Control y Secuencia de Operación

Para emular fielmente el comportamiento físico descrito en el funcionamiento de la máquina, la tensión de mando se integró al software de control. Esta condición está dispuesta como un botón virtual en la interfaz HMI. Mientras esta condición esté apagada, el algoritmo de control que está estructurado como un bucle infinito que emula el ciclo de *scan* (barrido) de un Controlador Lógico Programable (PLC), sigue iterando cada 50 ms. Esto garantiza no perder la conexión con la HMI y seguir monitoreando las emergencias, pero mantiene las salidas de los puertos GPIO apagadas. Una vez se activa la tensión de mando, se “liberan” los actuadores, se autoriza la activación de los grupos y se permite que el *encoder* virtual empiece su conteo si ingresa una pieza de trabajo.

Asumiendo que el sistema se encuentra con la tensión de mando activada, los grupos de trabajo habilitados desde la interfaz HMI y el pegante en su temperatura operativa, la secuencia dinámica ejecuta su iteración estricta. En cada ciclo de 50 ms, como prioridad absoluta, se realiza la verificación de los paros de emergencia; si se detecta alguna activación, el sistema interrumpe cualquier secuencia y apaga los actuadores para garantizar la integridad del operador y de la máquina. Como lo respalda la literatura, "la implementación de bucles de control temporizados en Python permite a la Raspberry Pi gestionar múltiples entradas y salidas de forma determinista" (Schmidt, 2022). Esta estrategia asegura que el microcontrolador no se detenga a esperar mecánicamente el avance de la pieza, permitiendo que el monitoreo de seguridad y el lazo de control térmico PID se ejecuten en tiempo real sin interrupciones.

La máquina real utiliza un *encoder* rotativo acoplado a la cadena de avance, la cual se encarga de transportar la pieza a través de la máquina por todos sus grupos de trabajo. En la simulación se utilizó un *encoder* virtual creado en Python. Cuando el sensor de entrada informa al control que ingresó una pieza de madera, este inicia un contador de posición. En cada ciclo de 50 ms, el código suma matemáticamente la distancia recorrida multiplicando el tiempo del ciclo por la velocidad teórica de la cadena de avance en mm/s. De esta forma, el control determina la medida de la pieza en milímetros de acuerdo con el tiempo que el sensor de entrada está enviando la señal lógica en alto, calculando así los tiempos exactos en que se debe realizar la secuencia de funcionamiento.

Para el control de los actuadores, el sistema diferencia dos niveles de operación. Los contactores que encienden los motores de los grupos de trabajo se habilitan como un permiso general desde la HMI con botones virtuales. Por el contrario, los actuadores dinámicos, como las electroválvulas del grupo fresador y el alimentador, se activan de forma totalmente automática dependiendo de la posición de la pieza de trabajo. El *encoder* virtual determina estos tiempos de activación comparando la posición de la pieza con las cotas físicas dentro de la máquina (puntos de línea). Tomando el sensor de entrada como el punto cero (0), cada uno de los grupos tiene una medida determinada por su distancia física. Cuando la posición de la pieza entra en el rango de un grupo, el programa envía un "1" lógico al puerto GPIO correspondiente para encender el actuador simulado (LED), apagándola una vez que la longitud calculada de la pieza abandona esa zona.

Una vez el sensor de entrada detecta el tablero y el *encoder* virtual comienza a calcular su posición y longitud, se desencadena el trabajo secuencial de los grupos. En el grupo fresador, la electroválvula de la fresa 2 permanece encendida por defecto; esta se apaga únicamente cuando

faltan 30 mm para que la pieza termine de pasar frente al grupo y se mantiene inactiva hasta la salida del tablero. Por el contrario, la electroválvula de la fresa 1 se activa cuando restan 40 mm de la parte final de la pieza y se apaga al terminar el recorrido, retornando la fresa 2 a su estado activo para el siguiente ciclo. Posteriormente, al pasar frente al grupo encolador para la aplicación del adhesivo, se activa la electroválvula del alimentador de canto durante 4 segundos, haciendo avanzar la cinta para que se adhiera a la madera dejando un sobrante de 10 mm en la parte delantera. Al finalizar el paso por este grupo, la guillotina se activa para cortar el canto, dejando nuevamente un excedente de 10 mm en la parte posterior. Más adelante, la pieza alcanza el grupo retestador, cuyos motores se encuentran funcionando de forma continua (tal como se estableció en la delimitación del sistema), realizando el corte estático a ras de estos sobrantes. Finalmente, el grupo refileador elimina el excedente de canto en las caras superior e inferior de la pieza. Cuando el sistema determina que el tablero ha superado la longitud total de la máquina, se reinician las variables de seguimiento, quedando el sistema habilitado para un nuevo ciclo.

El diagrama de flujo de la Figura 13 describe visualmente la integración de la secuencia dinámica, la verificación de seguridad y la subrutina del PID durante cada iteración del sistema.

El código fuente completo estructurado para la operación de la máquina, incluyendo el algoritmo PID y el servidor web Flask, se encuentra documentado y disponible para su consulta en el Anexo D.

Diseño del Controlador PID

La máquina enchapadora de cantos utiliza pegante granulado tipo EVA, cuya temperatura óptima de aplicación es de 180 °C. El control original de la máquina operaba mediante un esquema ON/OFF que genera una alta inercia térmica, provocando variaciones del valor de referencia de hasta ± 5 °C. Estas fluctuaciones causan que, si el pegante no alcanza la temperatura ideal, el canto no tenga una adherencia correcta; por el contrario, si se sobrecalienta, tiende a quemarse, perdiendo sus propiedades de viscosidad. El control PID elimina estos problemas calculando la potencia exacta requerida y manteniendo la temperatura real sobre el *setpoint* con fluctuaciones mínimas. Como se ha demostrado en estudios industriales, "el uso del control PID reduce significativamente la variación de temperatura y mejora la estabilidad del proceso" frente a los sistemas ON-OFF tradicionales (López & Hernández, 2020).

En el montaje de validación en el protoboard, la variable de temperatura (Variable de Proceso o PV) es simulada por medio de un potenciómetro *trimmer* de 20 K Ω configurado como divisor de tensión, tomando como referencia los 3.3 V DC de la placa. Este voltaje es leído constantemente por el conversor MCP3008, el cual entrega el valor en formato digital al código. Luego, el algoritmo calcula el error restando esta lectura al valor de referencia (*setpoint* de 180 °C). Con base en este error, el algoritmo PID emite una Variable Manipulada (MV) que se traduce en una señal de Modulación por Ancho de Pulso (PWM) enviada al puerto GPIO 18. Esta señal es visualizada por medio de un diodo LED; a mayor error térmico, mayor será el ciclo de trabajo entregado al actuador, lo que se refleja en una mayor intensidad lumínica del LED. Para la máquina real, se propone acoplar esta señal a un relé de estado sólido (SSR) para evitar la fatiga y el desgaste mecánico que sufriría un contactor tradicional ante las rápidas conmutaciones. Como respalda la literatura técnica, el uso de PWM controlado por software

permite gestionar la potencia eléctrica entregada de forma proporcional y eficiente (Schmidt, 2022).

La sintonización de las constantes del algoritmo PID (ubicado en el archivo `app.py`) se realizó mediante el método de sintonización empírica. Como señalan López y Hernández (2020), en los procesos térmicos industriales el ajuste guiado en campo es una práctica altamente validada, ya que permite adaptar la respuesta del controlador observando el comportamiento físico de la planta de forma directa. Esta metodología optimiza los tiempos de implementación al evitar el modelado matemático complejo de la termodinámica del calderín, el cual no es estrictamente necesario para alcanzar la estabilidad requerida en este nivel de automatización. De esta forma, las variables se establecieron de la siguiente manera:

Acción Proporcional ($K_p = 10.0$). Es la encargada del calentamiento rápido. Cuando el sistema arranca a temperatura ambiente (aprox. $15\text{ }^\circ\text{C}$), el error respecto a los $180\text{ }^\circ\text{C}$ es muy grande. La acción proporcional multiplica este error, entregando el 100% del ciclo de trabajo PWM para que la calefacción opere a máxima potencia.

Acción Integral ($K_i = 0.1$). Es la encargada de eliminar el error en estado estacionario. Cuando la temperatura se acerca a la referencia, el K_i acumula el error pasado y se encarga de entregar la potencia exacta de mantenimiento. Esto asegura la energía continua necesaria para contrarrestar la pérdida de calor hacia el ambiente frío, logrando que el sistema se mantenga estático en $180\text{ }^\circ\text{C}$ sin fluctuar.

Acción Derivativa ($K_d = 5.0$). Actúa como un freno predictivo. Cuando la temperatura del encolador se acerca rápidamente al *setpoint*, la acción derivativa evalúa esta velocidad de cambio y reduce la potencia PWM de forma anticipada. Esto evita que la inercia térmica

sobrepase los 180 °C, eliminando el riesgo de un sobre impulso (*overshoot*) que quemaría el adhesivo.

Diseño de la Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

Para la implementación del *Backend* e IoT se utilizó la Raspberry Pi 4 como servidor web. Para gestionar la interfaz y el control simultáneamente, se implementó el *framework* Flask dentro del código `app.py` en Python, ejecutándose directamente en la Raspberry Pi 4 bajo un entorno virtual (`venv`), como se evidencia en la Figura 14. Esta técnica crea un espacio de trabajo aislado donde se instalan únicamente las librerías específicas del proyecto (como Flask y Flask-SocketIO), separándolas de las dependencias globales del sistema operativo. La configuración de la Raspberry Pi 4 como servidor local permite que cualquier dispositivo (celular, tablet o PC) se conecte a la HMI de la máquina sin necesidad de instalar *software* de terceros, accediendo mediante la dirección IP local (ej. `http://192.168.0.110:5000/`). Como lo respalda la literatura, el desarrollo de aplicaciones web para IoT facilita integrar dispositivos y monitorear datos en tiempo real (Martínez Aguilar et al., 2022).

Figura 14

Ejecución del Servidor Flask en el Entorno Virtual de la Raspberry Pi 4

```

william@raspberrypi: ~/Enchapadora/Enchapadora_v2.0.0
Archivo Editar Pestañas Ayuda
william@raspberrypi:~/Enchapadora $ cd Enchapadora_v2.0.0
william@raspberrypi:~/Enchapadora/Enchapadora_v2.0.0 $ ls
app.py config.py __pycache__ README templates venv
william@raspberrypi:~/Enchapadora/Enchapadora_v2.0.0 $ source venv/bin/activate
(venv) william@raspberrypi:~/Enchapadora/Enchapadora_v2.0.0 $ python3 app.py
--- PLC ENCHAPADORA V2.1.1 INICIADO ---
* Serving Flask app 'app'
* Debug mode: off
WARNING: This is a development server. Do not use it in a production deployment.
Use a production WSGI server instead.
* Running on all addresses (0.0.0.0)
* Running on http://127.0.0.1:5000
* Running on http://192.168.0.110:5000
Press CTRL+C to quit
192.168.0.103 - - [29/Mar/2026 21:42:24] "GET / HTTP/1.1" 200 -
192.168.0.103 - - [29/Mar/2026 21:42:25] "GET /socket.io/?EI0=4&transport=pollin
g&t=PqydLN5 HTTP/1.1" 200 -
192.168.0.103 - - [29/Mar/2026 21:42:25] "POST /socket.io/?EI0=4&transport=pollin
g&t=PqydLNY&sid=3W7Xe2sR0l2ZGHcNAAAA HTTP/1.1" 200 -
192.168.0.103 - - [29/Mar/2026 21:42:25] "GET /socket.io/?EI0=4&transport=pollin
g&t=PqydLNa&sid=3W7Xe2sR0l2ZGHcNAAAA HTTP/1.1" 200 -
192.168.0.103 - - [29/Mar/2026 21:42:26] "GET /favicon.ico HTTP/1.1" 404 -
192.168.0.108 - - [29/Mar/2026 21:51:13] "GET / HTTP/1.1" 200 -
192.168.0.108 - - [29/Mar/2026 21:51:13] "GET /socket.io/?EI0=4&transport=pollin

```

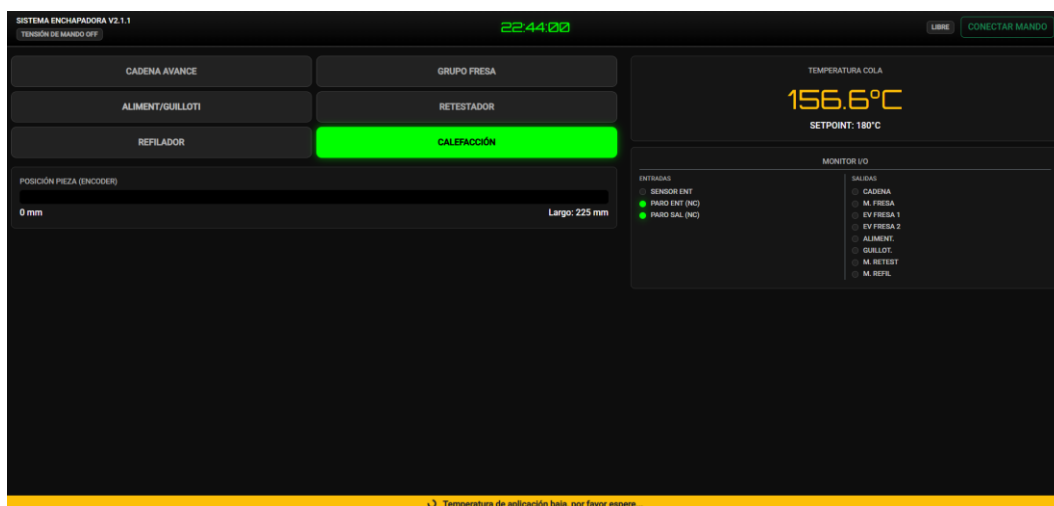
Nota. Consola iniciando el entorno virtual y el servidor web local.

Para el diseño visual (*Frontend*) y el control operativo se emplearon HTML y Bootstrap 5, aplicando un tema oscuro (*Dark Mode*) para proporcionar un diseño moderno y evitar la fatiga visual del operario. En la esquina superior derecha se ubica el botón virtual de conectar/desconectar la "Tensión de Mando", el cual actúa como permisivo de seguridad; al activarse, habilita los puertos GPIO para que los grupos de la máquina se puedan encender mediante sus respectivos botones virtuales (cadena de avance, grupo fresa, alimentador, etc.), ubicados en la sección central. En el panel derecho se visualiza la temperatura en tiempo real simulada por medio del potenciómetro *trimmer*. Como medida de seguridad, si el sistema térmico aún no alcanza el *setpoint* de 180 °C, se despliega un *banner* amarillo en la parte inferior

que indica al operador que debe esperar. Todos estos elementos operativos, incluyendo los botones de habilitación, la lectura térmica y las advertencias, se pueden observar detalladamente en la Figura 15. El uso de estas HMI modernas mejora la productividad porque facilita la supervisión gráfica y disminuye errores operativos (Ruiz & Pérez, 2020).

Figura 15

Interfaz HMI Centralizada con Alarma de Temperatura y Grupos de Trabajo



Nota. Interfaz gráfica HMI en estado de reposo.

De acuerdo con lo anterior, y para garantizar una correcta interacción del operario con la máquina, es fundamental documentar de manera detallada las cuatro secciones operativas que conforman esta interfaz gráfica de usuario. En primer lugar, en la parte superior de la pantalla se encuentra la cabecera de estado y seguridad, la cual contiene el botón principal de "Tensión de Mando". El usuario debe presionar este botón para energizar el sistema; cuando la máquina está desconectada, el indicador permanece en color verde, y al activarse, cambia a color rojo para advertir que el hardware está energizado y listo para operar. De igual forma, en esta misma

sección se ubica un texto dinámico que le señala al operador si el equipo se encuentra "LIBRE" para ingresar un nuevo tablero.

Por otro lado, en la sección central izquierda se dispuso el panel de control de grupos. Este espacio agrupa los botones virtuales que le permiten al operario habilitar o deshabilitar de forma manual módulos específicos, como la cadena de avance, el grupo fresador y el retestador. En su estado de reposo, estos botones presentan un color gris, pero una vez que el usuario hace clic sobre ellos para encenderlos y el sistema confirma la orden, cambian a color verde, indicando visualmente que la etapa correspondiente se encuentra en funcionamiento.

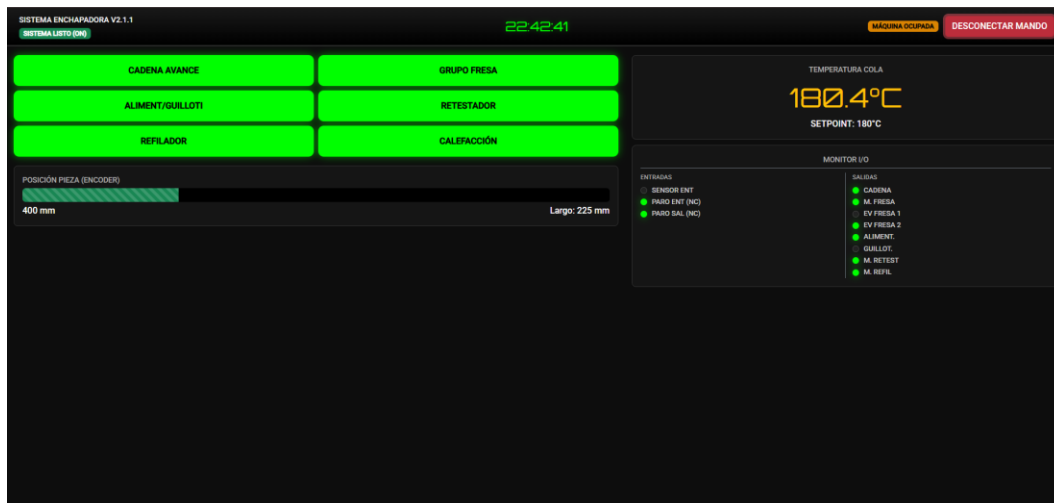
Adicionalmente, en la parte central derecha de la pantalla se estableció el panel térmico del controlador PID. Esta sección tiene la función de mostrar la lectura de la temperatura en tiempo real que proviene del calderín, comparándola constantemente con el valor objetivo o *setpoint* (180 °C). Si la temperatura actual es inferior a la requerida para derretir el pegante, la interfaz alerta al operario mediante el banner amarillo de la parte inferior, indicándole que debe esperar y evitando así que introduzca material que pueda causar defectos en el proceso de enchapado.

Finalmente, en la zona inferior y en el panel lateral derecho, se integraron las herramientas de diagnóstico continuo. La barra de progreso actúa como un indicador visual que ilustra el avance de la pieza de madera en milímetros a medida que transcurre el tiempo. Al mismo tiempo, el Monitor I/O refleja el estado lógico (encendido o apagado) de todas las entradas y salidas físicas, lo cual resulta de gran utilidad para que el personal de la planta pueda identificar rápidamente cómo se están comportando los sensores y actuadores sin necesidad de manipular el tablero eléctrico físico.

Para que la HMI ofrezca un monitoreo en tiempo real del estado de la máquina sin necesidad de recargar la página, se utilizaron WebSockets (mediante la librería Flask-SocketIO). Esto mantiene una conexión bidireccional continua que refleja fielmente el ciclo de escaneo de 50 ms. En el panel lateral derecho se implementó un monitor visual (Monitor I/O) que indica el estado lógico de las entradas y salidas, facilitando la ubicación rápida de fallas físicas en la planta. Adicionalmente, debajo de los botones de los grupos, se integró un indicador gráfico (barra de progreso) que muestra en tiempo real la posición y longitud de la pieza de trabajo al ingresar a la máquina. En sincronía con este evento, un indicador en la cabecera superior cambia dinámicamente para informar si la máquina está "LIBRE" o como "MÁQUINA OCUPADA". En la Figura 16 se ilustra este cambio de estado y el inicio del conteo del *encoder* virtual.

Figura 16

Interfaz HMI Mostrando el Avance del Encoder y Estado de Máquina Ocupada



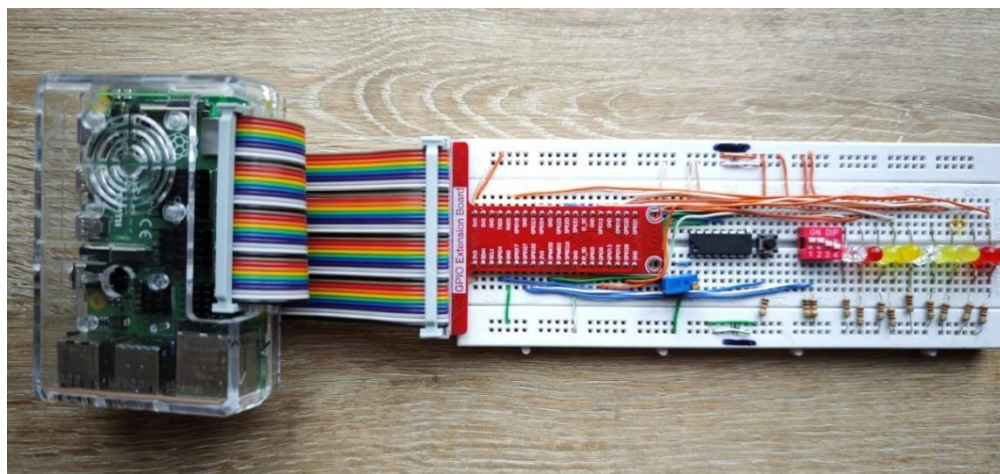
Nota. Interfaz HMI mostrando el progreso de la pieza y ocupación.

Integración y Validación Experimental del Prototipo

El propósito de esta fase es someter el diseño integral del sistema de control a un riguroso proceso de comprobación física, asegurando que la interacción entre el *hardware*, la lógica de programación y la interfaz de supervisión HMI opere de manera estable y predecible. Debido a que la enchapadora de cantos original se encuentra fuera de servicio y presenta riesgos operativos, la validación se realiza en un entorno de simulación física controlado. Este montaje, cuyo ensamble general se evidencia en la Figura 17, utiliza la Raspberry Pi 4 como núcleo de procesamiento y servidor web, interactuando con un prototipo en protoboard que integra componentes de emulación como diodos LED para los actuadores, un potenciómetro para la variable térmica, un pulsador para el sensor y un *dip switch* doble para los paros de emergencia. Como se establece en los fundamentos de sistemas digitales, la validación experimental es una etapa crítica para confirmar que el diseño lógico se traduce correctamente en un comportamiento físico esperado bajo condiciones controladas antes de su implementación final (Floyd, 2006).

Figura 17

Montaje Físico del Sistema de Control y Simulación en Protoboard



Nota. Ensamble físico del circuito de simulación y control.

Protocolo de Pruebas y Criterios de Aceptación

Para garantizar el rigor técnico y la objetividad en la recolección de datos, se estructuró un protocolo de pruebas basado en una matriz de validación. Este instrumento define los objetivos específicos de cada ensayo, las herramientas de medición, tales como el multímetro digital para magnitudes eléctricas e inspección visual para respuestas lógicas, y los criterios de aceptación que determinan el éxito de la prueba. El cumplimiento de estos criterios asegura que el sistema es capaz de gestionar los parámetros críticos de la máquina, permitiendo identificar anomalías o comportamientos no previstos que serán analizados en los resultados finales del proyecto. La estructuración de pruebas sistemáticas permite verificar la integridad de la arquitectura propuesta en sus tres niveles: físico, de control y de supervisión. El detalle estructurado de estas evaluaciones y sus respectivos criterios de éxito se describen a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3

Matriz del Protocolo de Pruebas Del Sistema de Control

No.	Nombre de la Prueba	Objetivo	Herramienta / Método	Criterio de Aceptación (Éxito)
1	Control Térmico PID (Software)	Comprobar el cálculo de error térmico y el ajuste de potencia mediante PWM.	Multímetro y observación de LED (GPIO 18).	El voltaje promedio en el LED debe disminuir proporcionalmente a medida que la temperatura se acerca a los 180 °C.

No.	Nombre de la Prueba	Objetivo	Herramienta / Método	Criterio de Aceptación (Éxito)
2	Lógica Secuencial y Seguridad	Verificar el ciclo de 50 ms, el encoder virtual y la interrupción de emergencia.	Inspección visual de LEDs y Dip Switch.	Los actuadores deben encender en secuencia. Al activar la emergencia, todos deben apagarse instantáneamente.
3	Latencia IoT y HMI (Comunicaciones)	Evaluar la respuesta bidireccional entre el hardware y la interfaz web.	Inspección visual simultánea (Montaje físico vs. HMI).	Los cambios físicos (Monitor I/O) deben reflejarse en tiempo real en la pantalla sin recargar el navegador.
4	Aislamiento Galvánico (Hardware)	Validar que el módulo PC817 proteja a la Raspberry Pi aislando voltajes.	Multímetro digital (Medición de voltaje DC).	Al inyectar 12 V DC en la entrada, la salida hacia el GPIO debe marcar exactamente 3.3 V DC, sin fluctuaciones.

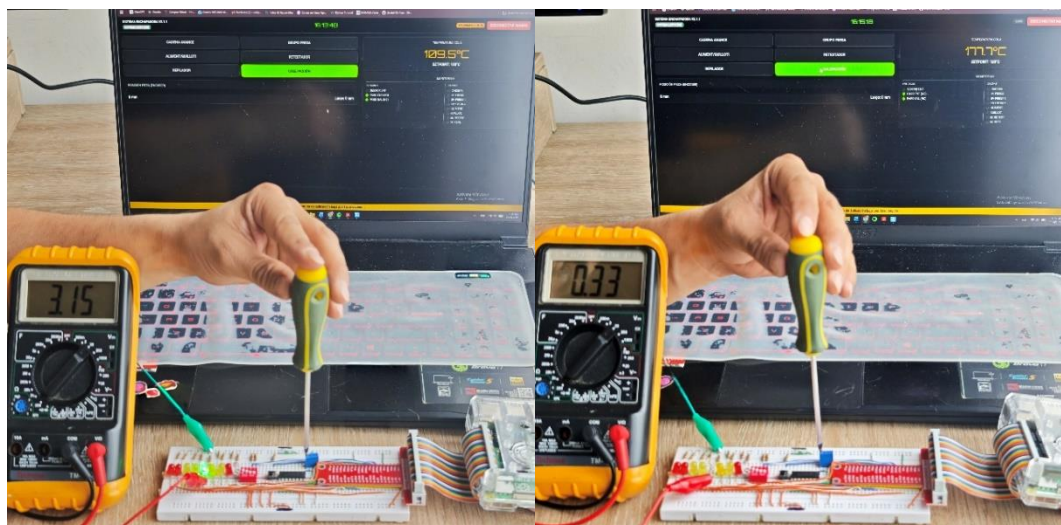
Nota. Criterios y métodos de validación aplicados al prototipo físico.

Prueba 1: Control Térmico PID (Software). El procedimiento experimental inició con la habilitación de la tensión de mando y la activación del botón virtual de calefacción desde la interfaz HMI para habilitar la salida correspondiente. Al manipular el potenciómetro *trimmer* para simular la variación de la temperatura (PV), se evidenció mediante inspección visual que cuando el valor reportado en la HMI se encontraba por debajo de los 110 °C (presentando un error térmico significativo), el actuador simulado (LED) permanecía encendido a su máximo brillo. De manera cuantitativa, la lectura tomada con el multímetro en los terminales del LED registró 3.15 V DC. Es imperativo destacar que el instrumento, al operar en escala de corriente continua (DC), integra la señal cuadrada del PWM mostrando el voltaje promedio equivalente, el cual es directamente proporcional al ciclo de trabajo del 100 % entregado por el puerto GPIO.

En el momento en que la temperatura superaba los 160 °C, las acciones proporcional y derivativa del algoritmo comenzaron a reducir predictivamente la potencia. Se observó que la intensidad lumínica del LED disminuyó gradualmente mediante un parpadeo de alta frecuencia que se hizo más evidente a medida que la temperatura se acercaba al *setpoint* de 180 °C. Este comportamiento fue corroborado por la medición del multímetro, el cual registró una caída del voltaje promedio equivalente hasta los 0.33 V DC al llegar a las proximidades del valor de referencia. La relación entre la reducción de la tensión en la salida PWM y el acercamiento al *setpoint* térmico se ilustra en la Figura 18.

Figura 18

Variación de la Tensión DC en la Salida PWM Ante el Acercamiento al Setpoint Térmico



Nota. (a) Salida PWM a potencia máxima con temperatura de 109.5 °C (3.15 V DC); (b) Reducción de la salida PWM en proximidad al setpoint con temperatura de 177.7 °C (0.33 V DC).

Veredicto: La prueba se considera Exitosa. El sistema cumplió a cabalidad con el criterio de aceptación, comprobando que el algoritmo calcula correctamente el error y modula la potencia entregada de forma proporcional, lo cual garantiza la estabilidad térmica requerida para el posterior uso de un relé de estado sólido.

Prueba 2: Validación de Lógica Secuencial y Seguridad. Con los paros de emergencia físicos en estado liberado, el procedimiento inició activando la "Tensión de Mando" y habilitando los grupos de trabajo desde la HMI. Simultáneamente, mediante el potenciómetro se estabilizó la temperatura simulada en 180 °C para cumplir con las condiciones operativas.

Al accionar el pulsador del sensor de entrada, se validó que el *encoder* virtual iniciara el conteo de posición, activando los diodos LED (actuadores) en la secuencia y tiempos

programados sin bloqueos lógicos. Una vez comprobada la fluidez del ciclo normal, se procedió a evaluar la respuesta ante eventos críticos; durante la simulación de un nuevo ciclo, se indujo un fallo activando el *dip switch* de entrada. El código detectó el cambio en su ciclo de escaneo de 50 ms, enviando un "0 lógico" (0 V DC) a todos los puertos GPIO de salida para desenergizar los actuadores.

A nivel de *software*, la HMI desconectó la tensión de mando y desplegó un *banner* de alarma en color rojo. Para rearmar el sistema, fue obligatorio devolver el *dip switch* a su posición de reposo y ejecutar el protocolo de rearme virtual en la HMI. Este procedimiento se repitió para el paro de salida con resultados idénticos. En la Figura 19 se contrasta el funcionamiento secuencial del *encoder* frente a la interrupción general del sistema.

Figura 19

Interrupción Inmediata de la Secuencia de Actuadores tras la Activación Física del Paro de Emergencia



Nota. (a) Secuencia normal de operación iniciada por el sensor de entrada; (b) Bloqueo instantáneo de actuadores y visualización de la alarma en la HMI al activar el *dip switch* de emergencia.

Veredicto: La prueba se considera Exitosa. Se comprobó la ejecución correcta de la secuencia lógica y se validó que el sistema prioriza las interrupciones de seguridad, deteniendo las salidas en milisegundos y exigiendo un protocolo de rearme bidireccional.

Prueba 3: Validación Latencia y HMI. El objetivo de esta prueba fue comprobar, mediante inspección visual, el tiempo de respuesta entre el *hardware* y la interfaz ejecutada desde un PC conectado a la red LAN. El acceso se realizó mediante la dirección IP del servidor *web* para evaluar la comunicación bidireccional a través de WebSockets.

Desde el PC, y visualizando la HMI, se interactuó con los botones virtuales asignados a cada uno de los grupos, pudiendo confirmar que cada diodo LED asociado a un grupo específico se activaba de forma instantánea al encenderlo desde su botón virtual. Asimismo, por medio del pulsador que simula el sensor de entrada y el potenciómetro que simula la sonda PT100, se pudo evidenciar que la HMI reporta de forma inmediata la interacción con los elementos físicos.

Se comprobó que cualquier estímulo físico en el *hardware* se refleja instantáneamente en los indicadores lógicos del Monitor I/O, así como las secuencias de trabajo en los LEDs responden sin demoras al activarlos desde la HMI. La actualización de los datos ocurrió en tiempo real y sin la necesidad de recargar el navegador, validando la eficiencia del protocolo de transferencia de datos. Esta sincronización entre el estado físico y el visual se detalla en la Figura 20.

Figura 20

Sincronización en Tiempo Real de la Interfaz Web ante Estímulos Físicos en el Hardware.



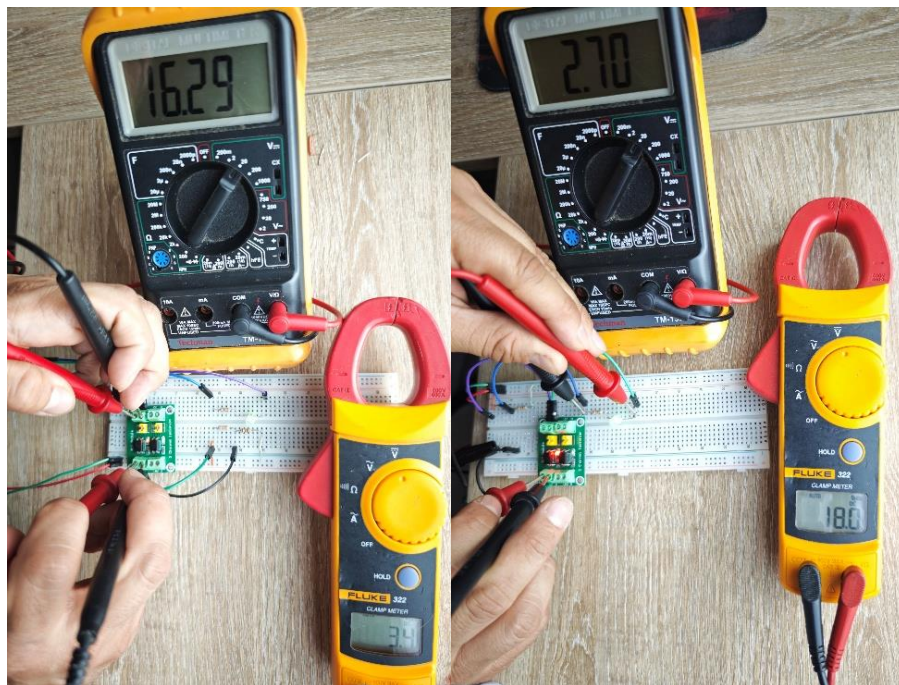
Nota. Sincronización en tiempo real entre el hardware y la HMI

Veredicto: La prueba se considera Exitosa. La latencia de la red local y el tiempo de reacción del sistema ante estímulos físicos y virtuales son mínimos; por lo tanto, la arquitectura cliente-servidor propuesta es totalmente válida para la supervisión de la máquina en tiempo real.

Prueba 4: Validación Aislamiento Galvánico (Hardware). El objetivo de esta prueba fue comprobar el aislamiento bidireccional entre los pines GPIO de la Raspberry Pi 4 y los 18 V DC que simulan la tensión industrial de la máquina. Para ello, se realizó un montaje independiente en *protoboard*, alimentando inicialmente el optoacoplador PC817 con 3.3 V DC en su entrada para verificar la conmutación de los 18 V DC en la salida. Posteriormente, se invirtió el proceso, inyectando los 18 V DC para validar la respuesta lógica de 3.3 V DC (Figura 21).

Figura 21

Comprobación Bidireccional de Aislamiento Galvánico Mediante el Optoacoplador PC817



Nota. (a) validación de señales de salida; (b) validación de señales de entrada.

Para simular las salidas del sistema, se conectaron los pines IN1 y G del módulo a 3.3 V DC, mientras que en los terminales V1 y G se integró la fuente de 18 V DC junto a un LED con resistencia limitadora. Esto permitió observar físicamente cómo la salida respondía de forma instantánea al aplicar y retirar la señal de 3.3 V DC en la entrada. De manera análoga, para simular las entradas, se inyectó la señal de potencia (18 V DC) en los pines primarios, dejando el circuito de control (3.3 V DC) y el indicador visual en el secundario, confirmando la conmutación inmediata de la salida al alternar el estado de la entrada.

Empleando dos multímetros en simultáneo, se monitoreó el voltaje en ambas etapas del PC817. Durante la prueba de salidas, al aplicar los 3.3 V DC, el LED infrarrojo interno excitó al fototransistor, permitiendo el paso de la tensión de potencia; debido a la carga del circuito, esta se estabilizó en su valor real de 16.27 V DC, manteniendo un aislamiento eléctrico total. En sentido inverso, al simular las entradas excitando el módulo con 18 V DC, la etapa de baja tensión conmutó exitosamente, estabilizando su nivel lógico útil en 2.7 V DC por efecto de la carga, sin presentar retornos eléctricos.

Finalmente, se validó la independencia total de las referencias mediante una prueba de continuidad entre la tierra del circuito de control (GND 3.3 V) y la tierra de potencia (GND 18 V), obteniendo una lectura de impedancia infinita (fuera de escala). Complementariamente, con el sistema energizado, la medición de diferencia de potencial entre ambas tierras resultó nula, confirmando la ausencia de lazos de retorno y garantizando un aislamiento eléctrico del 100 % entre ambas etapas.

Veredicto: La prueba se considera Exitosa. El optoacoplador bloqueó de forma segura el flujo directo de corriente entre los circuitos de 3.3 V DC y 18 V DC, garantizando el aislamiento galvánico al tiempo que permitió la transferencia instantánea de las señales en los diferentes

niveles de tensión. Esto comprueba su viabilidad y robustez para proteger el *hardware* en una implementación industrial.

Análisis de Resultados y Evaluación de Viabilidad Económica

Análisis y Discusión de Resultados

De acuerdo con las pruebas realizadas, se concluye que la integración de la Raspberry Pi 4 y el servidor Flask para la gestión de la enchapadora de cantos fue exitosa. La interfaz HMI con capacidades IoT logró sustituir funcionalmente la botonera obsoleta de la máquina, garantizando tiempos de respuesta exactos con ciclos de escaneo de 50 ms. La arquitectura permitió un monitoreo bidireccional fluido y en tiempo real a través de WebSockets, cumpliendo con los pilares de conectividad y supervisión propios de la Industria 4.0.

Respecto al control térmico, el algoritmo PID diseñado en Python validó la lógica de modulación de la señal PWM en función del error térmico, logrando estabilizar la variable en el *setpoint* de operación. No obstante, es preciso señalar que, debido a que la temperatura se emuló mediante un potenciómetro lineal, los datos obtenidos no contemplan la inercia térmica real de la unidad de encolado ni la curva de resistencia no lineal característica de una sonda PT100. Por lo tanto, aunque el algoritmo reaccionó matemáticamente según lo previsto, los valores de sintonización (K_p , K_i , K_d) obtenidos en laboratorio representan una aproximación inicial; su implementación final en la máquina real requerirá un ajuste fino basado en la recolección de datos térmicos de la planta física, lo cual queda planteado como una fase de optimización post-proyecto.

En cuanto a la integridad eléctrica, se comprobó que el módulo optoacoplador PC817 protege eficazmente los puertos GPIO al aislar las señales industriales de 18 V DC. Durante las pruebas se evidenció una caída de tensión en la salida del integrado, lo cual, sumado a su

limitación física de corriente (máximo 50 mA), confirma que el PC817 actúa exclusivamente como una etapa de control y disparo. En consecuencia, se establece como una recomendación técnica necesaria para la futura puesta en marcha en la máquina real la incorporación de una etapa de amplificación de potencia (como transistores MOSFET o relés de estado sólido) que permita gestionar las cargas inductivas de las electroválvulas y contactores originales.

Finalmente, los resultados demuestran que el uso de *hardware* libre (SBC) y *software* de código abierto constituye una alternativa económica y técnicamente viable frente a los controladores lógicos programables (PLC) de alto costo. La solución propuesta no solo restaura la funcionalidad de un equipo obsoleto, sino que añade características avanzadas de monitoreo remoto y gestión de datos que habitualmente se reservan para sistemas industriales de alta gama, optimizando la relación costo-beneficio para las PYMES del sector.

Viabilidad Económica y Comparativa de Precios

Para determinar la viabilidad financiera de la modernización propuesta, se realizó una comparativa de costos proyectada a una implementación real en planta. En la Tabla 4 se detalla el presupuesto para la solución basada en *hardware* libre, mientras que en la Tabla 5 se establece el costo de una solución industrial cerrada de marca líder (Siemens), permitiendo un análisis de ahorro directo.

Tabla 4*Presupuesto Proyectado Para el Sistema Basado en Raspberry Pi 4*

Ítem	Componente / Modelo	Cantidad	Costo Unitario (COP)	Costo Total (COP)
1	Raspberry Pi 4 Model B (4GB RAM)	1	\$350.000	\$ 350.000
2	Fuente de poder oficial 5.1V / 3A	1	\$60.000	\$ 60.000
3	Pantalla Táctil Capacitiva 7" (Waveshare)	1	\$320.000	\$ 320.000
4	Módulo Optoacoplador PC817 (8 Canales)	2	\$22.500	\$ 45.000
5	Módulo Relé de Estado Sólido (SSR) 2A	8	\$12.000	\$ 96.000
6	Convertor ADC MCP3008-I/P	1	\$15.000	\$ 15.000
7	Gabinete Industrial NEMA y accesorios	1	\$100.000	\$ 100.000
8	Servicios de Ingeniería (Diseño de hardware, Programación Python/IoT, Ensamble e Instalación en planta)	1	\$3.500.000	\$3.500.000
Total				4.486.000

Nota. Costos de adquisición de hardware libre y honorarios de ingeniería. Adaptado de

Raspberry Pi 4 Model B 4GB y periféricos, Dynamo Electronics, (2026)

<https://tienda.dynamoelectronics.com/>

Tabla 5
Presupuesto Proyectado Para la Solución Industrial con PLC Siemens

Ítem	Componente / Modelo	Cantidad	Costo Unitario (COP)	Costo Total (COP)
1	PLC SIMATIC S7-1200 CPU 1212C AC/DC/RLY	1	\$1.450.000	\$1.450.000
2	Módulo de Expansión SM 1231 RTD (PT100)	1	\$850.000	\$850.000
3	Panel Táctil SIMATIC HMI KTP700 Basic	1	\$1.950.000	\$1.950.000
4	Fuente de Poder SITOP 24 V DC / 5 A	1	\$180.000	\$180.000
5	Licencia TIA Portal Step 7 Basic	1	\$550.000	\$550.000
6	Servicios de Ingeniería (Programación PLC en TIA Portal, diseño HMI e Integración)	1	\$4.500.000	\$4.500.000
	Total			\$9.480.000

Nota. Costos de adquisición e implementación de un sistema de control industrial comercial.

Adaptado de Catálogo de precios industria: Controladores SIMATIC S7-1200 e interfaces HMI, Siemens, (2026) <https://mall.industry.siemens.com>

Análisis de Viabilidad Económica

Para determinar la viabilidad financiera de la modernización propuesta, se estructuró una comparativa comercial, la cual incluye tanto el costo de adquisición del hardware como los honorarios por servicios de ingeniería (diseño, programación, montaje e implementación). Al contrastar ambas propuestas, se evidencia que la solución basada en la arquitectura de Raspberry Pi 4 representa una inversión total de \$4.486.000 COP para el cliente final, frente a los \$9.480.000 COP que requeriría la implementación de una solución industrial de la marca Siemens.

Este contraste demuestra una reducción del 52.6% en el costo total del proyecto. El diferencial económico radica no solo en el bajo costo de los componentes físicos de código abierto, sino en la eliminación de rubros asociados a licencias de software privativas y módulos de expansión IoT. Se concluye que el diseño desarrollado ofrece una propuesta de valor altamente competitiva y financieramente viable para las PYMES colombianas, permitiéndoles acceder a tecnologías de la Industria 4.0 y modernización de maquinaria con un retorno de inversión a corto plazo.

Conclusiones

A través de la metodología integral de diseño y pruebas desarrollada en este proyecto, se demostró que el uso de la arquitectura Raspberry Pi 4 en conjunto con el *software* de código abierto Python es una solución robusta para sustituir lógicas cableadas obsoletas. La transición hacia un sistema embebido logró la digitalización funcional de la enchapadora de cantos, confirmando que la integración de computadoras de placa única (SBC) de bajo costo es una estrategia viable para modernizar el sector productivo de las PYMES en Colombia, alineándolas con los estándares de la Industria 4.0.

Tras identificar la temperatura de aplicación del adhesivo como un parámetro crítico del proceso, se comprobó la eficacia de integrar el conversor análogo-digital MCP3008. Este componente permitió el acondicionamiento óptimo de la señal térmica, superando con alta precisión la limitación de la Raspberry Pi 4 respecto a la carencia de entradas analógicas nativas y garantizando que el microcontrolador procesara la información de las variables físicas de manera exacta y confiable.

El desarrollo del algoritmo de control PID en lenguaje Python representó una mejora sustancial frente al ineficiente sistema original tipo ON-OFF con histéresis. Se validó que la lógica de control calcula adecuadamente el error térmico y ejecuta una modulación precisa de la señal PWM. Esta gestión garantiza la estabilidad térmica del calderín, lo cual se traduce directamente en una adherencia correcta del material, minimizando defectos de calidad, reduciendo reprocesos y mitigando las pérdidas económicas por desperdicios de canto y pegante.

La implementación de una arquitectura cliente-servidor mediante el *framework* Flask y el protocolo WebSockets garantizó la supervisión bidireccional y continua de las entradas y salidas del sistema. Se evidenció que la nueva interfaz HMI *web* proporciona al operario un entorno de

monitoreo muy superior a la botonera tradicional, facilitando la identificación inmediata de fallas a través de *banners* interactivos. Además, la latencia mínima de la red permitió validar la respuesta instantánea ante paros de emergencia, reflejando el estado crítico de la máquina sin necesidad de recargar el navegador, desde cualquier dispositivo conectado a la red LAN.

La validación experimental confirmó que el diseño del *hardware* perimetral mediante módulos optoacopladores PC817 proporciona un aislamiento galvánico del 100 %, blindando eficazmente la etapa lógica de los puertos GPIO contra los voltajes y el ruido electromagnético característicos del entorno industrial. En su conjunto, este proyecto ratifica que la automatización basada en tecnologías emergentes, modulares y de bajo costo no solo resuelve problemáticas operativas concretas, sino que constituye una hoja de ruta técnica y económicamente factible para la modernización de la maquinaria en el sector mueblero nacional.

Se demostró mediante un análisis comparativo que la implementación de este sistema de control representa un ahorro superior al 80% en comparación con tecnologías industriales propietarias. Esto valida la propuesta como una alternativa real de modernización para pequeñas y medianas empresas que carecen de grandes capitales para la reposición de maquinaria obsoleta.

Recomendaciones

A partir del diseño, simulación y validación experimental de la arquitectura de control propuesta para la enchapadora de cantos rectos, se plantean las siguientes recomendaciones técnicas orientadas a la implementación física definitiva en planta y a futuras actualizaciones del sistema:

Implementación de Etapas de Potencia y Sensores Reales

Para la transición del prototipo de laboratorio a la máquina industrial, es preciso diseñar una etapa de potencia a la salida de los módulos optoacopladores PC817. Se recomienda el uso de relés de estado sólido (SSR) o transistores MOSFET de alta potencia para gestionar las corrientes de arranque de los contactores y electroválvulas de 24 V DC. Asimismo, se debe reemplazar el potenciómetro de simulación por una sonda de temperatura PT100 real, integrando un amplificador de instrumentación (ej. MAX31865) que garantice una lectura térmica precisa en entornos industriales ruidosos.

Monitoreo Predictivo y Eficiencia Energética

Se sugiere aprovechar la capacidad de procesamiento de la Raspberry Pi 4 para implementar algoritmos de mantenimiento predictivo. El sistema puede programarse para guardar un historial de la curva de calentamiento del calderín; si el tiempo de calentamiento supera el promedio histórico, la HMI generaría una alerta temprana indicando una posible degradación de las resistencias o fallos en el sensor, anticipándose a paradas no programadas. Adicionalmente, se recomienda implementar una subrutina de ahorro de energía (*Standby*); si los sensores no detectan ingreso de tableros durante un tiempo prolongado, el sistema reducirá automáticamente el *setpoint* de temperatura y apagará los grupos inactivos, optimizando el consumo eléctrico.

Trazabilidad de Producción y Análisis de Datos (OEE)

Para escalar el componente de *software*, se recomienda la implementación de una base de datos local (como SQLite o el uso estructurado de archivos JSON) que registre los eventos de producción, tiempos de inactividad, alarmas térmicas y metros de canto aplicados. Utilizando librerías de análisis de datos como Pandas en Python, el sistema permitiría a la gerencia exportar automáticamente estos reportes en formato Excel, facilitando la medición de la Eficiencia General de los Equipos y la toma de decisiones administrativas.

Escalabilidad a la Nube y Ciberseguridad

Actualmente, el sistema IoT opera de forma eficiente en una red LAN local. Como proyección a largo plazo para la Industria 4.0, se recomienda migrar el servidor Flask hacia una infraestructura en la nube (ej. AWS o Google Cloud). Esto permitiría a la gerencia supervisar múltiples enchapadoras en diferentes sucursales desde cualquier parte del mundo. Para acompañar esta migración, será necesario implementar un sistema de ciberseguridad con autenticación de usuarios y Control de Acceso Basado en Roles, delimitando qué operarios pueden encender la máquina y qué usuarios solo tienen permisos de visualización.

Diseño de Circuito Impreso (PCB) y Empaquetamiento Comercial

Para escalar el proyecto de un prototipo funcional a un producto comercialmente viable, se sugiere consolidar todo el hardware de control en una placa de circuito impreso (PCB) personalizada. Esta placa debe diseñarse como una tarjeta de expansión que se acople directamente sobre los pines de la Raspberry Pi, integrando en una sola placa los optoacopladores, el conversor ADC y las etapas de potencia. Asimismo, el sistema completo debe ensamblarse dentro de un módulo o gabinete industrial con fijación para riel DIN. Esta presentación otorgará robustez mecánica frente a vibraciones, mitigará ruidos electromagnéticos

y estandarizará la instalación en planta, permitiendo entregar al cliente final una solución compacta, estética y de rápida implementación

Referencias

- Bagur-Pons, S., Rosselló-Ramon, M. R., Paz-Lourido, B., & Verger, S. (2021). *El enfoque integrador de la metodología mixta en la investigación educativa. RELIEVE. Revista Electrónica de Investigación y Evaluación Educativa*, 27(1), .
<https://doi.org/10.30827/relieve.v27i1.21053>
- Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2013). *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos (10.ª ed.)*. Pearson Educación.
- Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2018). *Revisión de la productividad en las empresas en Colombia*. https://www.dnp.gov.co/LaEntidad_/misiones/mision-internacionalizacion/Documents/Notas_politica_Espanol/Revision_de_la_productividad_en_las_empresas_en_Colombia.pdf
- Dynamo Electronics. (2026). *Raspberry Pi 4 Model B 4GB y periféricos*.
<https://tienda.dynamoelectronics.com/>
- Elías, V. J., (2007). *Investigación aplicada: entonces y hoy. Estudios económicos*, 24(49), 21-34.
- Floyd, T. L. (2006). *Fundamentos de sistemas digitales (9.ª ed.)*. Pearson Educación.
- Floyd, T. L. (2008). *Dispositivos electrónicos (8va ed.)*. Pearson Educación.
- Hernández Mendoza, S. L., & Samperio Monroy, T. I. (2018). *Enfoques de la Investigación. Boletín Científico De Las Ciencias Económico Administrativas Del ICEA*, 7(13), 67-68. <https://doi.org/10.29057/icea.v7i13.3519>
- López, A., & Hernández, R. (2020). *Aplicación del control PID en sistemas térmicos industriales*. *Revista de Automatización*.

- Lozada, J. (2014). *Investigación Aplicada : Definición, Propiedad Intelectual e Industria. CienciAmérica: Revista de Divulgación Científica de La Universidad Tecnológica Indoamérica*, 3(1), 47–50.
- Martínez Aguilar, G. M., Sosa Escobedo, A., & Morales Ibarra, V. M. (2022). *Desarrollo de sitio web para IoT con Arduino*. *Científica*, 26(1), 1-12.
- Martínez, J., & Castaño, L. (2022). *Impacto de la obsolescencia tecnológica en la competitividad de las PYMES*. *Estudios Industriales*.
- Microchip Technology Inc. (2007). *MCP3004/3008: 2.7V 4-Channel/8-Channel 10-Bit A/D Converters* [Data sheet].
- Portafolio. (2024, marzo 12). *Reindustrialización y automatización en 2026: opinión*.
<https://www.portafolio.co/opinion/analisis/reindustrializacion-y-automatizacion-en-2026-opinion-598743>
- Rashid, M. H. (2015). *Electrónica de potencia: Dispositivos, circuitos y aplicaciones* (4.^a ed.). Pearson Educación.
- Raspberry Pi Ltd. (2019). *Raspberry Pi 4 Model B Product Brief*.
<https://datasheets.raspberrypi.com/rpi4/raspberry-pi-4-product-brief.pdf>
- Revista El Mueble y la Madera. (2018). *Así van cifras del mueble y la madera*. <https://revista-mm.com/economia-sectorial/asi-van-cifras-del-mueble-y-la-madera/>
- Ruiz, M., & Pérez, S. (2020). *Impacto de las Interfaces Hombre Máquina (HMI) en la productividad*. *Ingeniería y Desarrollo*.
- Sánchez, C., Rodríguez, J., & Díaz, L. (2021). *Automatización industrial y modernización tecnológica en el contexto de la Industria 4.0*. *Tecnura*.

Schmidt, D. R. (2022). *Raspberry Pi: Configuración y programación con Python* (2.^a ed.). RA-MA Editorial.

Sharp Corporation. (1996). *Device specification for photocoupler Model No. PC817X* [Data sheet].

Siemens. (2026). *Catálogo de precios industria: Controladores SIMATIC S7-1200 e interfaces HMI*. <https://mall.industry.siemens.com/>

Tocci, R. J., Widmer, N. S., & Moss, G. L. (2007). *Sistemas digitales: Principios y aplicaciones* (10.^a ed.). Pearson Educación.

Upton, E., & Halfacree, G. (2014). *Raspberry Pi User Guide* (3.^a ed.). John Wiley & Sons.

Apéndices

Apéndice A

Especificaciones Técnicas de la Raspberry Pi 4 Model B

Broadcom BCM2711, Quad core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.8GHz

1GB, 2GB, 3GB, 4GB or 8GB LPDDR4-3200 SDRAM (depending on model)

2.4 GHz and 5.0 GHz IEEE 802.11ac wireless, Bluetooth 5.0, BLE

Gigabit Ethernet

2 USB 3.0 ports; 2 USB 2.0 ports.

Raspberry Pi standard 40 pin GPIO header (fully backwards compatible with previous boards)

2 × micro-HDMI® ports (up to 4kp60 supported)

2-lane MIPI DSI display port

2-lane MIPI CSI camera port

4-pole stereo audio and composite video port

H.265 (4kp60 decode), H264 (1080p60 decode, 1080p30 encode)

OpenGL ES 3.1, Vulkan 1.0

Micro-SD card slot for loading operating system and data storage

5V DC via USB-C connector (minimum 3A*)

5V DC via GPIO header (minimum 3A*)

Power over Ethernet (PoE) enabled (requires separate PoE HAT)

Operating temperature: 0 – 50 degrees C ambient

Apéndice B

Hoja de Datos (Datasheet) del Conversor Análogo-Digital MCP3008



MCP3004/3008

2.7V 4-Channel/8-Channel 10-Bit A/D Converters with SPI™ Serial Interface

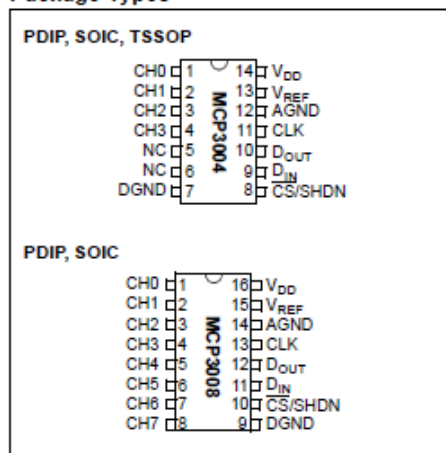
Features

- 10-bit resolution
- ± 1 LSB max DNL
- ± 1 LSB max INL
- 4 (MCP3004) or 8 (MCP3008) input channels
- Analog inputs programmable as single-ended or pseudo-differential pairs
- On-chip sample and hold
- SPI serial interface (modes 0,0 and 1,1)
- Single supply operation: 2.7V - 5.5V
- 200 ksp/s max. sampling rate at $V_{DD} = 5V$
- 75 ksp/s max. sampling rate at $V_{DD} = 2.7V$
- Low power CMOS technology
- 5 nA typical standby current, 2 μA max.
- 500 μA max. active current at 5V
- Industrial temp range: $-40^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$
- Available in PDIP, SOIC and TSSOP packages

Applications

- Sensor Interface
- Process Control
- Data Acquisition
- Battery Operated Systems

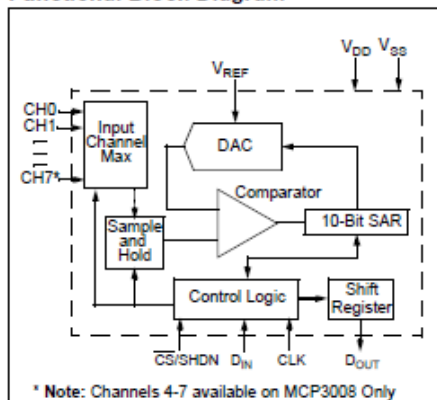
Package Types



Description

The Microchip Technology Inc. MCP3004/3008 devices are successive approximation 10-bit Analog-to-Digital (A/D) converters with on-board sample and hold circuitry. The MCP3004 is programmable to provide two pseudo-differential input pairs or four single-ended inputs. The MCP3008 is programmable to provide four pseudo-differential input pairs or eight single-ended inputs. Differential Nonlinearity (DNL) and Integral Nonlinearity (INL) are specified at ± 1 LSB. Communication with the devices is accomplished using a simple serial interface compatible with the SPI protocol. The devices are capable of conversion rates of up to 200 ksp/s. The MCP3004/3008 devices operate over a broad voltage range (2.7V - 5.5V). Low current design permits operation with typical standby currents of only 5 nA and typical active currents of 320 μA . The MCP3004 is offered in 14-pin PDIP, 150 mil SOIC and TSSOP packages, while the MCP3008 is offered in 16-pin PDIP and SOIC packages.

Functional Block Diagram

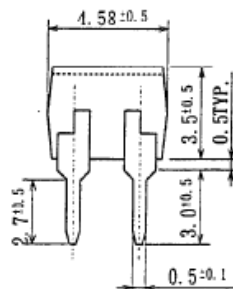
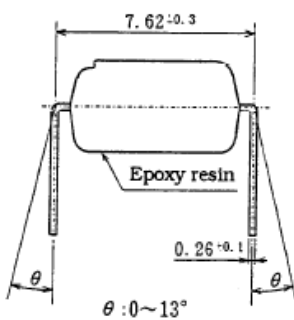
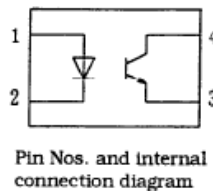
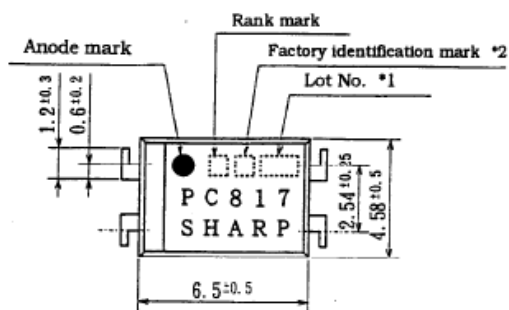


Apéndice C

Hoja de Datos (Datasheet) del Módulo Optoacoplador PC817

SHARP CORPORATION

ED-94054D	June 14, 1996
MODEL No. PC817X	PAGE 5/8



*1) 2-digit number shall be marked according to DIN standard.

*2) Factory identification mark shall be or shall not be marked.

*3) Marking is laser marking

UNIT : 1/1 mm	
Name	PC817 Outline Dimensions (Business dealing name : PC817X)
Drawing No.	CY6961K02

Apéndice D

Repositorio de Código Fuente

El código fuente desarrollado en Python para el control lógico, el algoritmo PID y la interfaz HMI basada en Flask, se encuentra alojado y documentado en el siguiente repositorio público de GitHub: https://github.com/KaladinW/Enchapadora_v2.0.0