



Horno Batch a GLP con control PID para la automatización del proceso de curado de pintura electrostática

LPG batch Oven with PID control for the automation of the electrostatic paint curing process

Ricardo John Palomares Orihuela, Enzo Pietro Morán Ugarelli, Rafael Marcel Sánchez Soto

RECIBIDO: 05 de mayo de 2024.

ACEPTADO: 10 de junio de 2024.

RESUMEN

El presente artículo presenta la mejora del proceso de recubrimiento superficial con pintura electrostática mediante la fabricación de un horno de curado tipo batch a GLP con un volumen de trabajo de 20 m³. La estructura se fabricó con ángulos estructurales de 3/16" x 2", los paneles tipo sándwich de planchas de acero galvanizado de 0.6 mm y 1.0 mm y con un interior de lana de 2" de espesor como aislante. Se emplearon 6 quemadores infrarrojos catalíticos a GLP con una potencia total de 65.4 kW/h, con lo cual se logró alcanzar la temperatura de 180 °C en 20 minutos con carga máxima. Se diseñó una interfaz gráfica con una pantalla táctil. Se utilizó una Raspberry Pi 3B+ para ejecutar el software de control y monitoreo desarrollado en Python. Se empleó controladores industriales de temperatura PID y sensores PT-100 de tres hilos. Se realizó el modelamiento matemático del horno para obtener la función de transferencia y las constantes de sintonización del controlador PID. Se realizaron nueve pruebas para garantizar el correcto funcionamiento del horno. Se realizó el pintado y curado de láminas de muestra con espesores de 90 μm hasta 106 μm, lo cual garantiza la durabilidad de esta. Finalmente, se realizó pruebas de adhesión, rayado, doblez y lijado que arrojaron resultados óptimos.

Palabras claves: controlador PID, automatización, pintura electrostática, horno industrial, quemador infrarrojo.

Cómo citar

E. P. Morán Ugarelli, R. M. Sánchez Soto, y R. J. Palomares Orihuela, «Horno Batch a GLP con control PID para la automatización del proceso de curado de pintura electrostática», *Perfiles_Ingenieria*, vol. 20, n.º 21, pp. 180-196, jun. 2024.

ABSTRACT

This article presents the improvement of the surface coating process with electrostatic painting by manufacturing an LPG batch-type curing oven with a working volume of 20 m³. The structure was manufactured with 3/16" x 2" structural angles, sandwich panels made of 0.6 mm and 1.0 mm galvanized steel sheets and with a 2" thick wool interior as insulation. 6 LPG catalytic infrared burners were used with a total power of 65.4 kW/h, with which the temperature of 180 °C was reached in 20 minutes with maximum load. A graphical interface was designed with a touch screen. A Raspberry Pi 3B+ was used to run the control and monitoring software developed in Python. Industrial PID temperature controllers and three-wire PT-100 sensors were used. Mathematical modeling of the oven was carried out to obtain the transfer function and tuning constants of the PID controller. Nine tests were carried out to ensure proper operation of the oven. Sample sheets with thicknesses from 90 μm to 106 μm were painted and cured, which guarantees the durability of the applied paint. Finally, adhesion, scratching, bending and sanding tests were carried out, obtaining optimal results in each one.

Keywords: PID controller, automation, electrostatic painting, industrial oven, infrared burner.

© Los autores. Este artículo Open Access está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC-BY 4.0).



1. Introducción

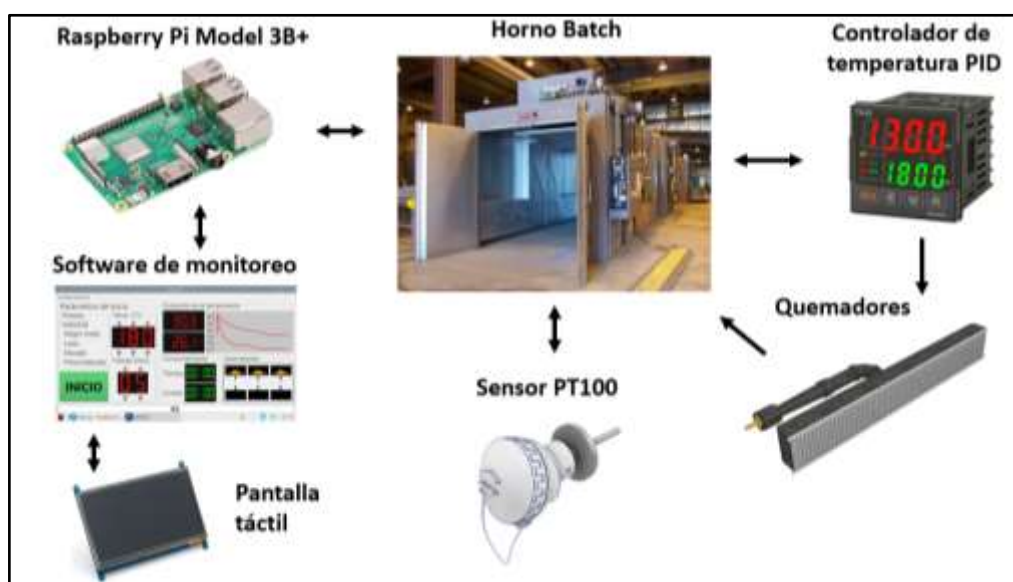
Muchas empresas metalmeccánicas están optando por utilizar pintura electrostática como recubrimiento superficial para sus productos. Esto se refleja, según la Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (SUNAT), en su reporte de consulta importador-exportador del año 2019, en que los 2 principales importadores de este producto en el Perú hacen una suma total de S/. 6,290,176.00 (equivalente a unas 800 toneladas) y en el reporte del año 2020 asciende a la suma de S/. 6,701,56.00, equivalente a unas 957 toneladas (Aduanas, 2021). Este tipo de pintura permite tener un lote completo en unas cuantas horas a comparación de las pinturas líquidas tradicionales que requieren hasta 3 días. Muchas empresas no cuentan con un proceso de curado para pintura electrostática y tercerizan el proceso a empresas que presentan problemas en cuanto al control de calidad (inadecuado proceso de curado, insuficiente recubrimiento, pintura quemada), el incremento de los costos (servicio de pintado y transporte) y el incremento de los tiempos de producción.

2. Materiales y métodos

En la figura 1, se aprecia el diagrama con los dispositivos y actuadores involucrados en el diseño del horno batch. En la Raspberry Pi se ejecuta el software de monitoreo y muestra los parámetros en una pantalla táctil para el ingreso de parámetros para la operación del horno. Estos son enviadas al controlador de temperatura PID para accionar los quemadores. La Raspberry Pi también opera un módulo de relés para energizar todos los dispositivos.

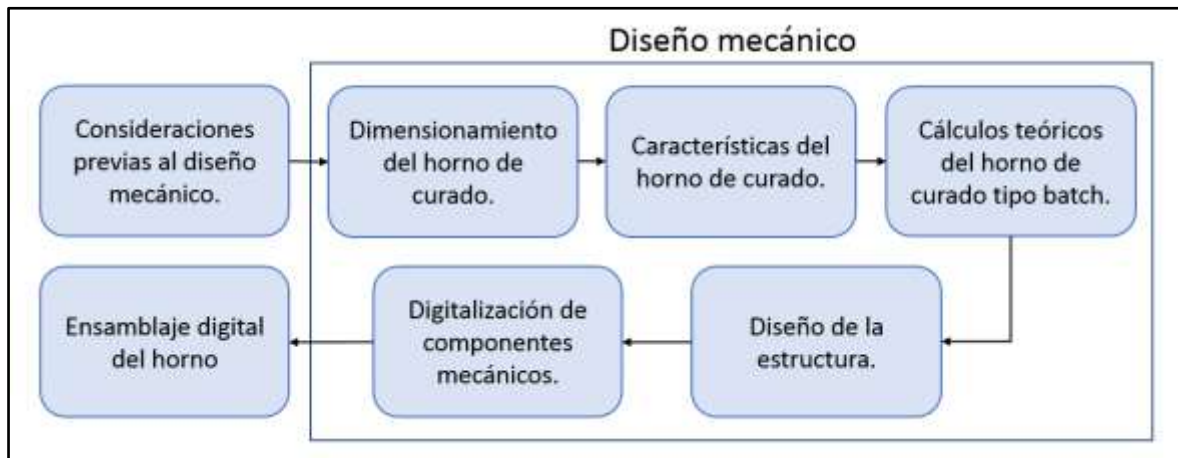
Figura 1.

Diagrama mecatrónico del sistema de control del horno

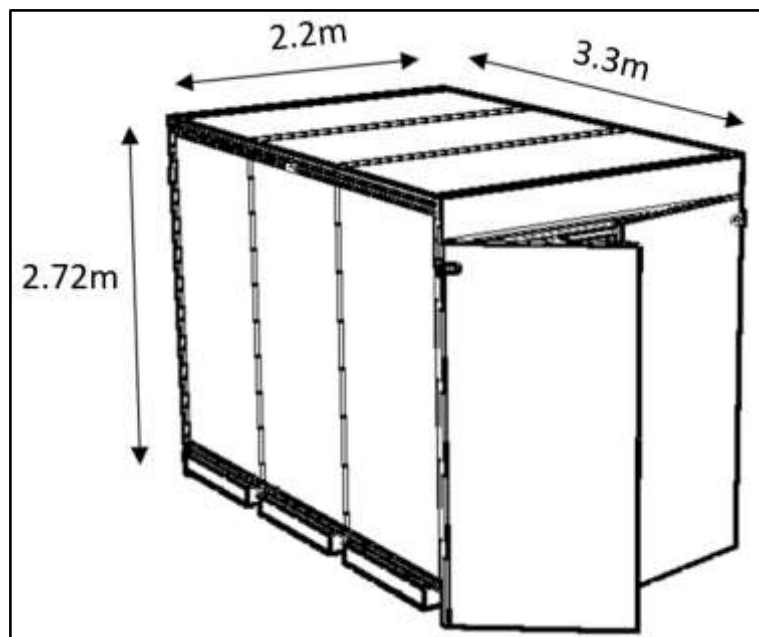


2.1. Diseño mecánico

En esta sección, se desarrolla los análisis y cálculos necesarios para realizar el diseño del horno batch. Se observa el flujograma del diseño mecánico con los pasos a desarrollar.

Figura 2.*Flujograma del diseño mecánico*

En la figura 3, se tiene un bosquejo del diseño del horno tipo batch utilizado para elaborar el proyecto.

Figura 3.*Vista isométrica del horno batch*

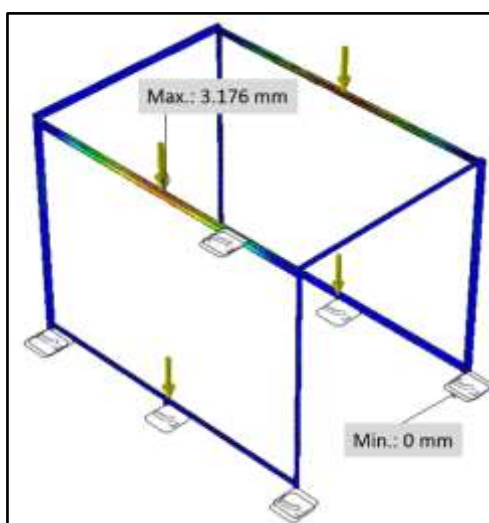
Para el cálculo de la potencia de los quemadores se utilizó la masa total de las paredes internas del horno, incluyendo las laterales, techo y puertas, y se tomó en cuenta el espesor de la plancha metálica de $e = 0.6 \text{ mm}$, $\rho_{\text{acero}} = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (densidad del acero) y el $A_{\text{total}} = 38.9 \text{ m}^2$ se obtiene que $Q_{\text{curado}} = 61.14 \text{ kW}$.

Los paneles aislantes están conformados por un núcleo y 2 placas de acero galvanizado de 0.6 mm y 1.0 mm. El aislante seleccionado es la lana de roca con las siguientes características: densidad de 100 kg/m^3 , conductividad térmica de 0.033 a 0.122 W/mK , y rango de temperatura de trabajo de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ a $400 \text{ }^\circ\text{C}$.

Se utiliza el ángulo estructural A36 de $3/16''$ (4.8 mm) para determinar el espesor ideal de los ángulos y se realiza la simulación de esfuerzos con una carga de 395 kg (peso total de paneles aislantes). En la figura 4, se aprecia la simulación de desplazamiento con un máximo de 3.176 mm en la parte superior de la estructura.

Figura 4.

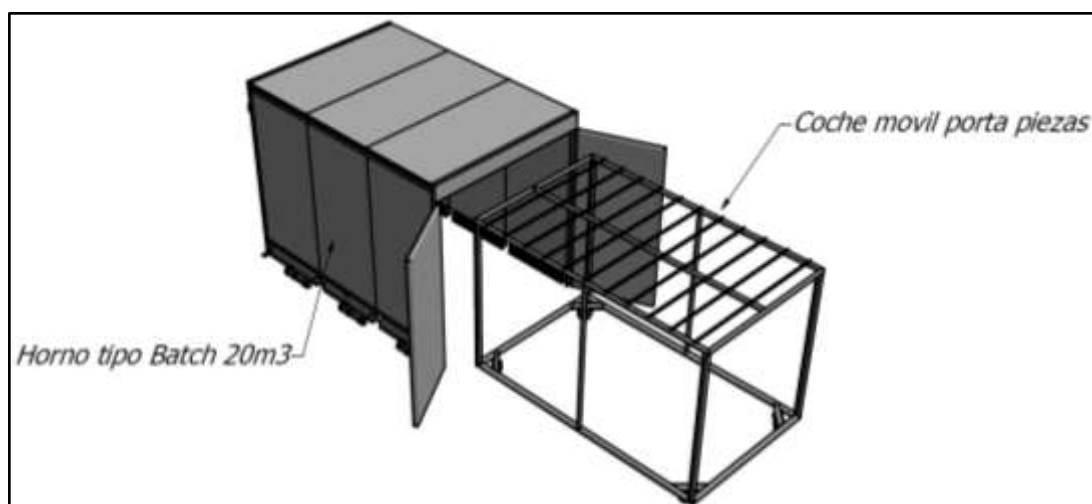
Simulación de desplazamiento máximo para ángulos de $3/16''$ (4.8 mm) espesor



En la figura 5, se muestra el ensamblaje final de las distintas piezas que conforman el horno de curado que está compuesto por ángulos de estructura, paneles aislantes, quemadores catalíticos infrarrojos y coche porta piezas.

Figura 5.

Ensamble digital del horno batch



2.1.1. Modelamiento matemático del horno y el controlador PID

La función de transferencia del horno batch es obtenida utilizando las leyes termodinámicas y la ley de enfriamiento de Newton. Mediante las ecuaciones 1 y 2 se obtuvo una función de transferencia de primer orden.

$$\frac{\theta_0(t)}{Q_i(t)} = \frac{R_{te}}{R_t C_t s + 1} \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\theta_0(t)}{Q_i(t)} = \frac{86.7}{(85.41 \times 101.5)s + 1} = \frac{86.7}{8669.11s + 1} \dots \dots \dots (2)$$

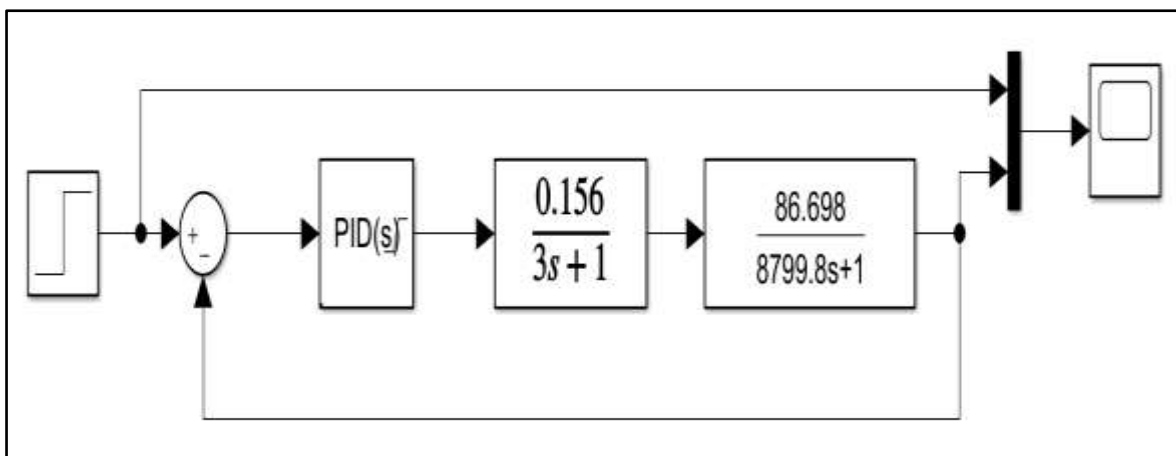
La función de transferencia de la válvula reguladora se expresa en la ecuación 3.

$$\frac{Q_i(s)}{P(s)} = \frac{0.0156}{3s + 1} \dots \dots \dots (3)$$

En la figura 6, se aprecia el diagrama de bloques desarrollado en Simulink en el que se ingresó la función de transferencia tanto del horno y como de la válvula reguladora.

Figura 6.

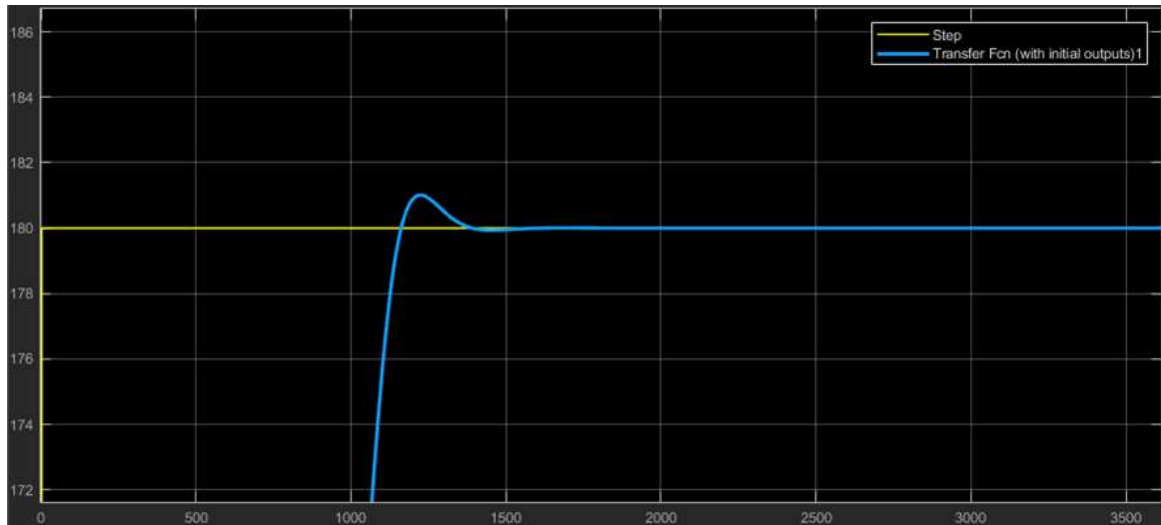
Ensamble digital del horno batch



Dado que la planta en lazo abierto no presenta un comportamiento sigmooidal y no obtiene la ganancia crítica que haga oscilar el sistema en lazo cerrado, no es posible la aplicación de métodos de sintonización del tipo Ziegler - Nichols o Cohen y Coon, por lo que se optó por un proceso heurístico, con valores pequeños para las ganancias K_p y K_i y analizar el comportamiento del sistema, cuyo resultado final se muestra en la figura 7.

Figura 7.

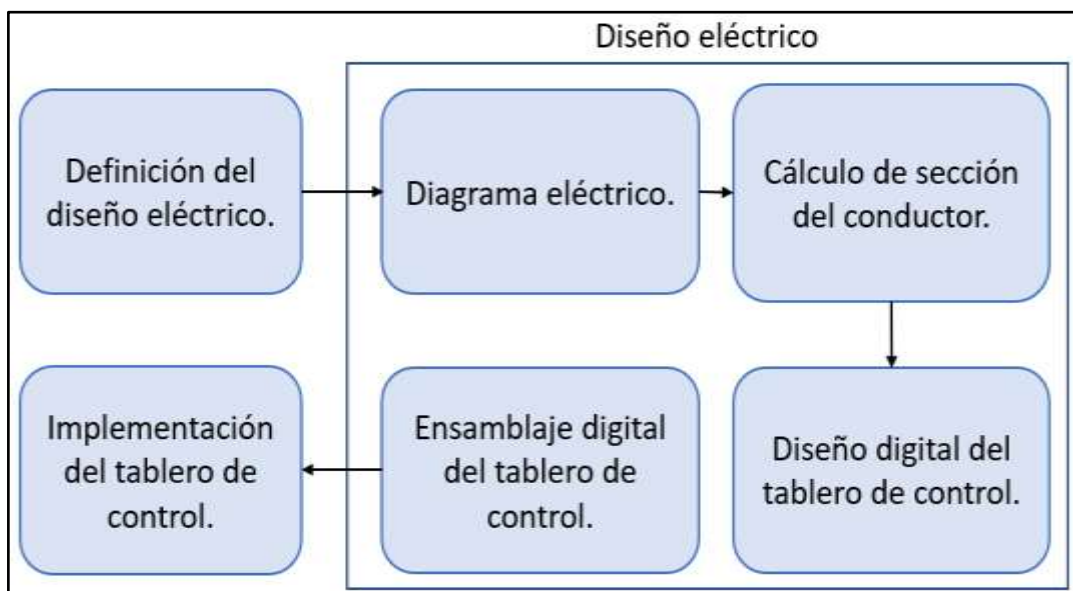
Respuesta del controlador PID con ganancia $K_p=15$, $K_i=0.2$ y $K_d=0$

**2.2. Diseño eléctrico**

Para la elaboración del diseño eléctrico se hizo uso del software AutoCAD para diseñar el diagrama eléctrico de conexionado de controladores de temperatura, quemadores infrarrojos catalíticos (parte de control) y la comunicación del controlador con la Raspberry Pi. En la figura 8, se observa el flujograma del diseño eléctrico.

Figura 8.

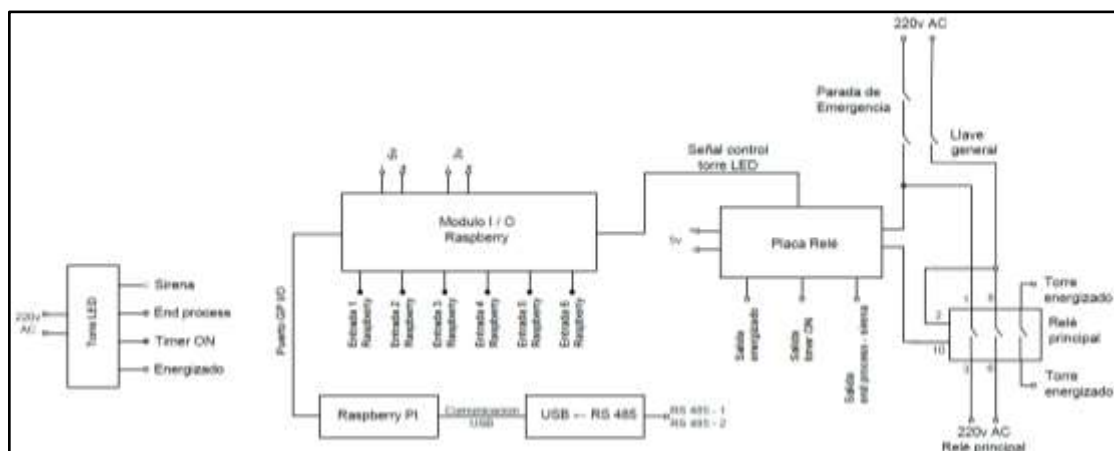
Flujograma del diseño eléctrico



En la figura 9, se observa el diagrama de conexiones de la etapa de control. El módulo de entradas y salidas de la Raspberry Pi, que controla el módulo de relés y activa las luces LED para indicar distintos estados de funcionamiento del horno.

Figura 9.

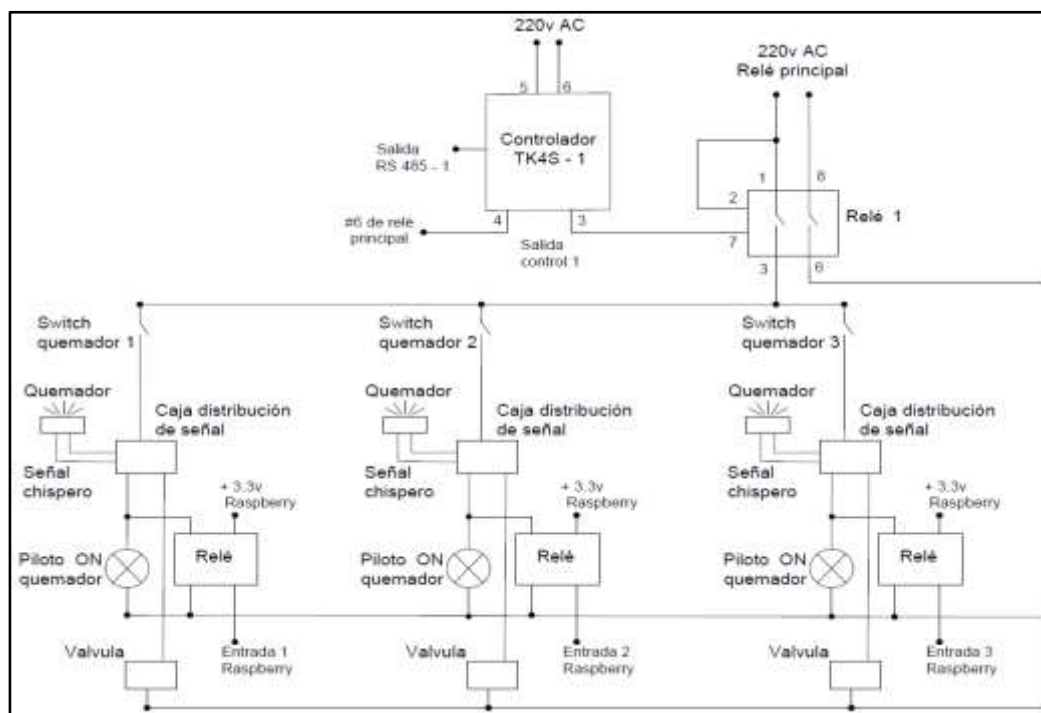
Diagrama de conexiones etapa de control



En la figura 10, se observa el diagrama de conexiones de la etapa de fuerza, que incluye un relé accionado por el controlador de temperatura TK4S-B4RN de la marca Autonics. Al energizar este relé, los módulos de control de los quemadores mandan la señal de abrir la electroválvula y activan el chispero hasta que encienda la llama. Cuando el módulo de control detecta la llama, este envía una señal de 220 V y enciende una luz piloto y activa el relé que envía una señal hacia la Raspberry Pi. Cada controlador comanda un relé, el cual energiza 3 quemadores.

Figura 10.

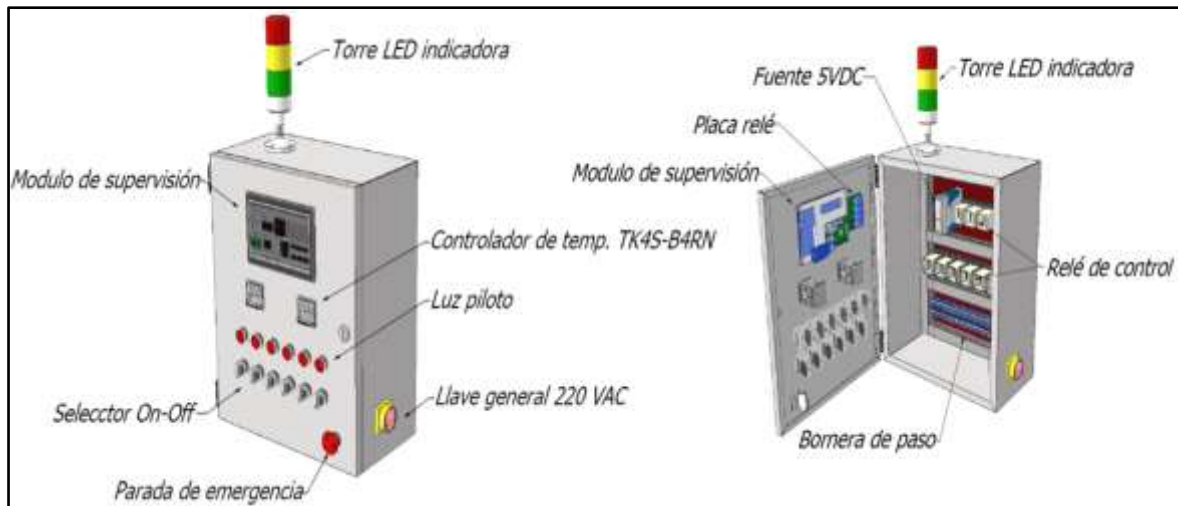
Diagrama de conexiones etapa de control



Se digitaliza el tablero de control y los componentes que lo integran para determinar la disposición final. En la figura 11, se aprecia tanto la vista exterior como interior.

Figura 11.

Vista exterior e interior del tablero de control

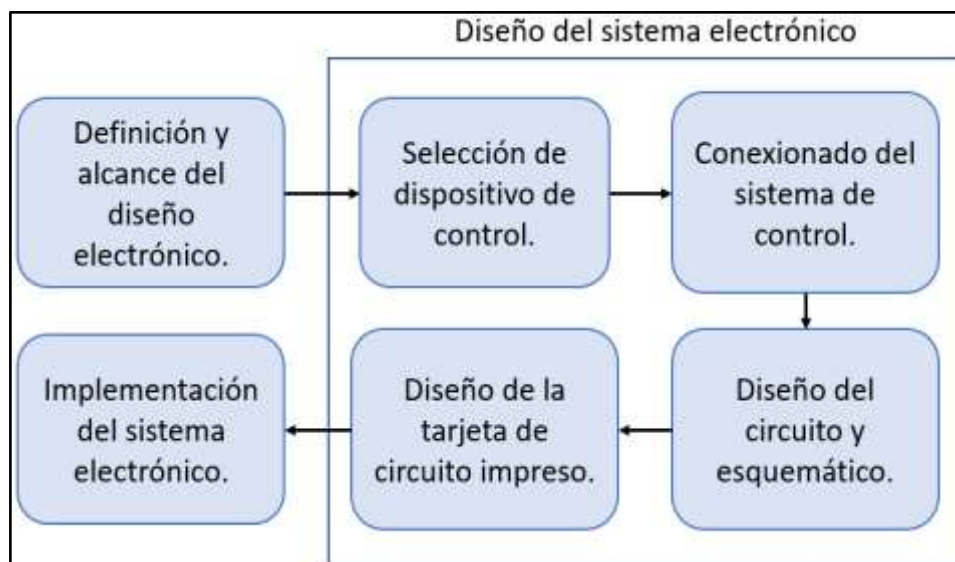


2.3. Diseño electrónico

En la figura 12, se muestra el flujograma con las consideraciones iniciales, diseños y cálculos realizados para la operación y control del horno tipo batch.

Figura 12.

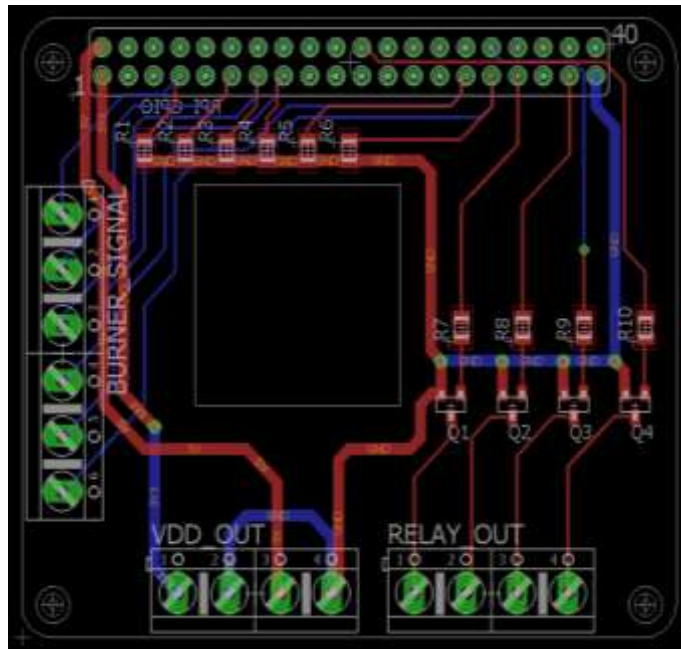
Flujograma del diseño electrónico



Se diseña una PCB de doble capa, con interconexión entre las vías pasantes. En la figura 13, las líneas azules y rojas representan al ruteado en las capas inferiores y superiores respectivamente. Se consideró una sección hueca a la altura del disipador térmico del procesador para evitar recalentamientos de la Raspberry Pi.

Figura 13.

Diseño del PCB para el puerto GPIO de la Raspberry Pi

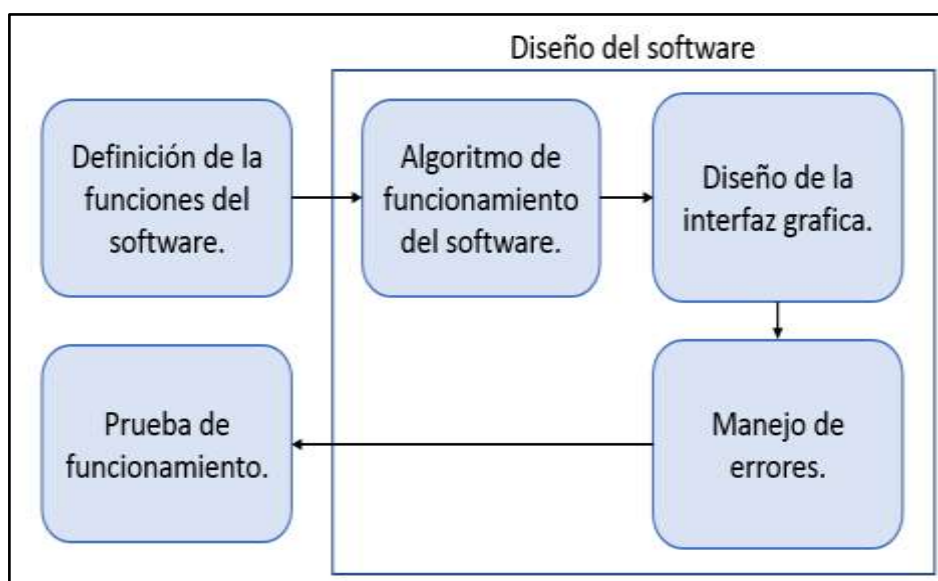


2.4. Diseño de software

En la figura 14, se aprecia el flujograma de desarrollo del software para la Raspberry Pi que permite operar el horno batch.

Figura 14.

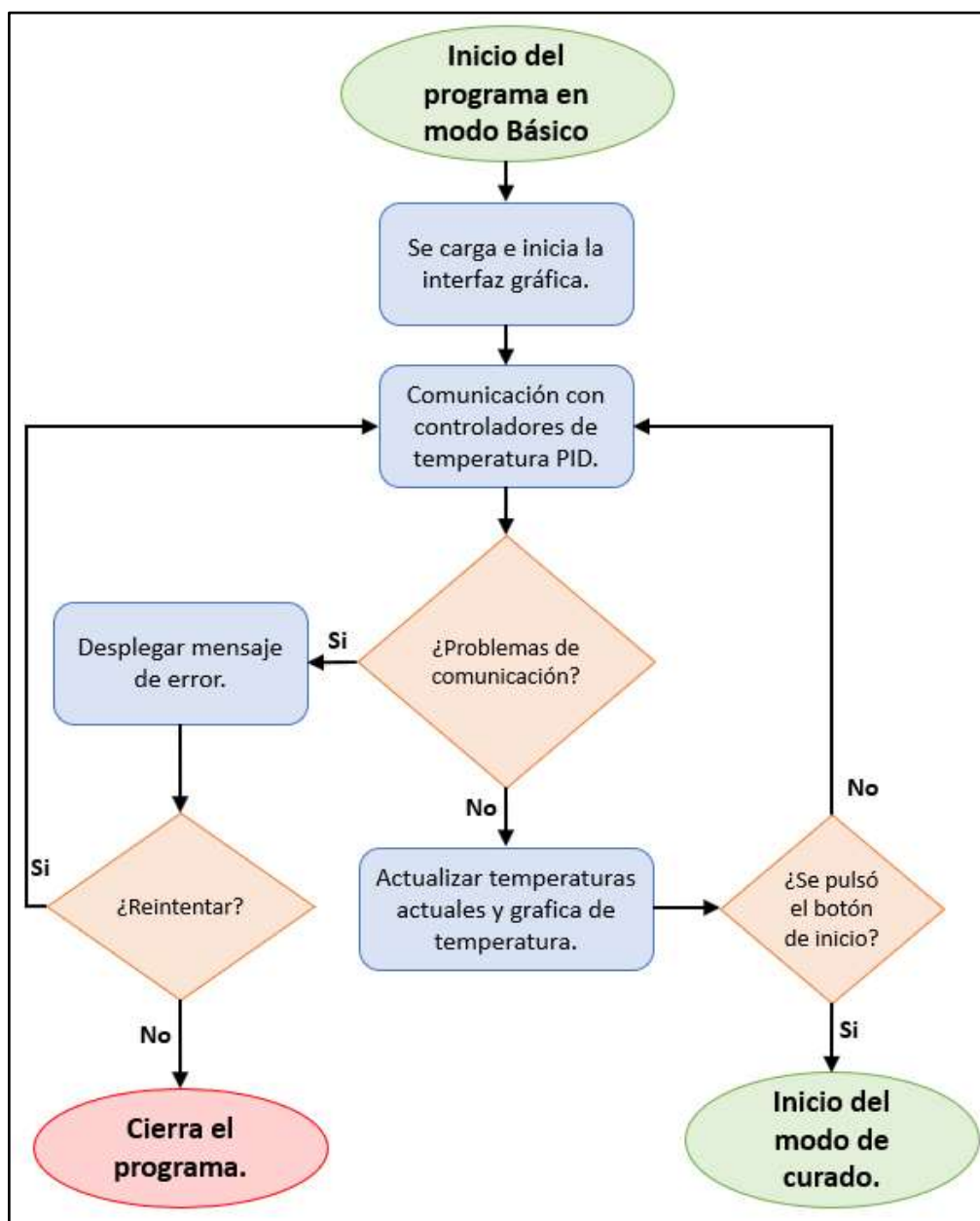
Vista interior y exterior del tablero de control



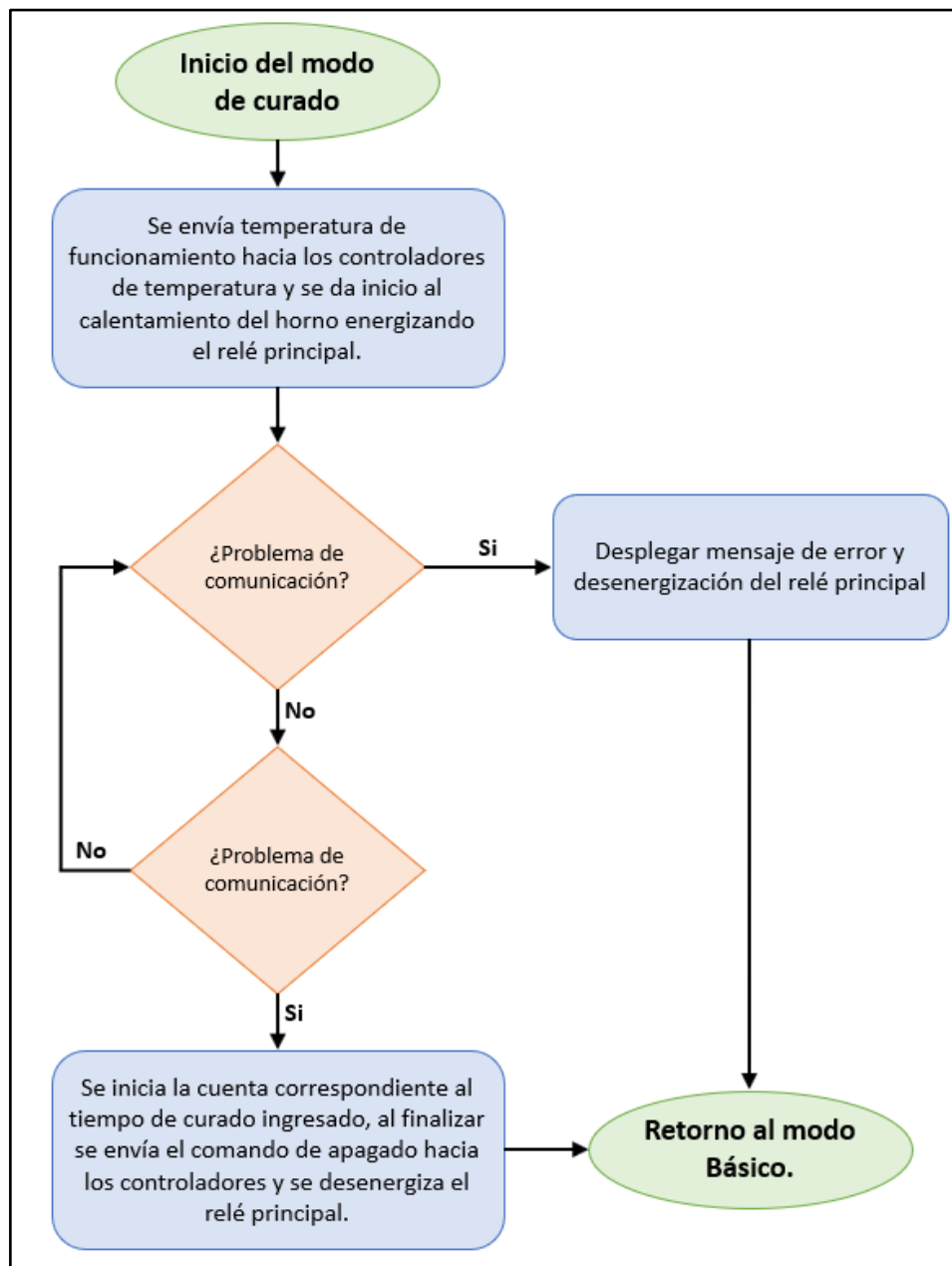
Para el desarrollo del software se utilizó el lenguaje de programación Python. Este tiene la capacidad de comunicarse vía Modbus con los controladores de temperatura PID. Para ello, se hace uso de un conversor USB a RS485. En la figura 15, se aprecia el diagrama de funcionamiento del programa mientras está en el modo Básico, previo al modo de curado.

Figura 15.

Diagrama de funcionamiento del programa en el modo Básico



En la figura 16, se aprecia el diagrama del funcionamiento del programa mientras está en el modo Curado. En este modo, se energiza el relé principal para accionar los módulos que controlan los quemadores. Al finalizar este proceso, se retoma al modo básico y se desenergiza el relé principal.

Figura 16.*Diagrama de funcionamiento del programa en el modo Curado*

2.5 Diseño de la interfaz gráfica

Se hace uso del lenguaje de programación Python para el programa y la interfaz gráfica. La figura 17 corresponde a la interfaz del programa siendo ejecutada en la Raspberry Pi. Esta interfaz fue diseñada acorde a la resolución de la pantalla empleada (1280 x 720 píxeles). Se optimizó el espacio en pantalla con indicadores y botones fáciles de visualizar y operar.

Figura 17.

Ventana principal de la interfaz gráfica



3. Resultados

3.1. Resultado de las pruebas de la interfaz gráfica de usuario (GUI)

Se realizó la capacitación del manejo de la interfaz gráfica a 5 trabajadores, y se solicitó opinión respecto al manejo. Así, se concluyó que la interfaz gráfica resulta sencilla de operar e intuitiva. Los usuarios fueron capaces de ingresar los valores de operación, iniciar o detener el proceso y monitorear los distintos parámetros de funcionamiento. En la figura 18, se aprecia al operario interactuando con la interfaz gráfica.

Figura 18.

Operario probando la interfaz gráfica de usuario para el control del horno



3.2. Resultado de temperatura de pared exterior del horno

Se realizaron mediciones de la temperatura en varios puntos de las paredes exteriores del horno, y se observó que la zona de las juntas de los paneles presentaba temperaturas superiores ($43\text{ }^{\circ}\text{C}$) con respecto a los puntos centrales de los paneles ($35\text{ }^{\circ}\text{C}$), debido a que la unión entre los paneles no presentaba un sello hermético. Por eso, se optó por rellenar estas juntas con silicona de alta temperatura y se obtuvo una temperatura exterior media de $36\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura que no excede los $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ como protección al personal operario. En la figura 19, se observa una medición de temperatura en la pared exterior del horno, donde se obtuvo $35.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ cuando el horno está a $179.5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figura 19.

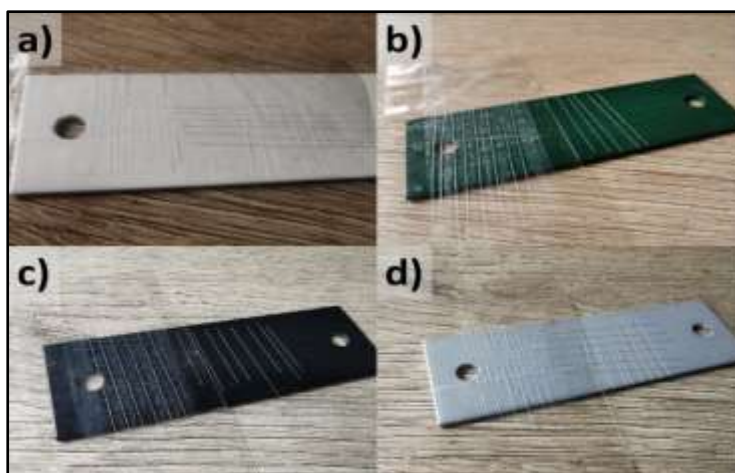
Operario probando la interfaz gráfica de usuario para el control del horno



Se realizó una prueba de adhesión de la pintura en base a la norma ASTM D 3359. Se hicieron marcas en forma de cruz o cuadrícula hasta llegar al metal de la pieza, luego, se procede a pegar una cinta adhesiva sobre la parte marcada y se ejerce una leve presión. Se espera aproximadamente 1 minuto y se retira la cinta de forma súbita. En un resultado satisfactorio, no debe quedar restos de pintura en la cinta, lo cual indica un buen curado de pintura electrostática. En la figura 20, se observan los resultados de esta prueba en los distintos colores de pintura sin desprendimiento de pintura para ninguno de los 4 casos.

Figura 20.

Prueba de adhesión de pintura electrostática



4. CONCLUSIONES

- Se diseñó e implementó el sistema mecánico para el horno tipo Batch de 20 m³ mediante el software Autodesk Inventor. En la prueba de temperatura en la pared exterior, los resultados teóricos y las simulaciones concuerdan con las mediciones realizadas.
- Se diseñó e implementó el sistema eléctrico para el horno tipo batch que garantiza la correcta operación del sistema de acuerdo con las pruebas del tablero de control y de los elementos de seguridad.
- Se diseñó e implementó el sistema electrónico del módulo de control, así como el software de monitoreo embebido para la operación y visualización de parámetros del horno batch.
- Se logró mantener la estabilidad térmica en el horno tipo batch, lo cual fue demostrado con las pruebas de funcionamiento de los quemadores catalíticos y los controladores de temperatura PID industriales.
- Se diseñó e implementó un horno batch con control de temperatura PID para el curado de pintura electrostática en la empresa Maker Asociados S.A.C. Las pruebas realizadas durante el proceso de curado de la pintura electrostática demostraron que el horno cumple con los estándares industriales y los requisitos de la empresa, por lo que se obtuvieron resultados satisfactorios.

5. Referencias

- [1] Aduanas. (s.f.). Consulta por Importador/Exportador. http://www.aduanet.gob.pe/cl-ad-itconsultadwh/ieITS01Alias?accion=consultar&CG_consulta=1
- [2] Åström, K. (2009). Control PID avanzado. Madrid, España: Pearson Educación S. A.
- [3] Brucart, E. B. (1987). GAS NATURAL Características, distribución y aplicaciones industriales. Barcelona: Editores técnicos asociados.
- [4] Callejón Ferre, Á. J. (2009). Instalaciones de gas en el sector industrial, Agrícola, urbano y doméstico. Almería: Universidad de Almería.
- [5] Castaño Giraldo, S., Hernández Gómez, D., & Gallo Blandón, J. (Julio de 2013). Control y monitoreo de temperatura para un horno de curado de prendas índigo utilizando lógica difusa y controles PI. Revista Politécnica ISSN, 69-81.
- [6] Çengel, Y. (2007). Transferencia de calor y masa, un enfoque práctico. Reno: McGraw-Hill Companies, Inc.
- [7] García Higuera, A. (2005). El control automático en la industria. Cuenca: Ediciones de la Universidad de Castilla - La Mancha.
- [8] Lizarraga, G. (2016). Diseño de línea para pintado electrostático. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.

- [9] Logicbus. (17 de 06 de 2019). Protocolos de comunicación industriales. <https://www.logicbus.com.mx/blog/protocolos-de-comunicacion-industriales/>
- [10] Montenegro, S., & Tixe, T. (2012). Mejora del proceso de pintura electrostática de la planta de producción “SUMAR”. Quito: Universidad Central de Ecuador.
- [11] Montoya, J., Orozco, C., & González, H. (abril de 2011). Optimización energética de un horno de secado de piezas de PRFV implementando PML. *Scientia Et Technica*, 17(47), 307-312.
- [12] Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5 ed.). Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- [13] ONSEMI. (s.f.). MMBT3904L DATASHEET. https://www.mouser.pe/datasheet/2/308/1/MMBT3904LT1_D-2316262.pdf
- [14] Pintura Para. (17 de julio de 2016). Pintura electrostática. <https://www.pintura-para.com/pintura-electrostatica/>
- [15] Ponsa, P., & Granollers, A. (2007). *Diseño y automatización industrial*. Madrid: Pirámide.
- [16] Ramos, I. (2020). *Diseño energético de un horno piloto de curado para tratamiento de acabado de pintura electrostática en superficies metálicas y MDF*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- [17] Rougeron, C. (1977). *Aislamiento acústico y térmico en la construcción*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S.A.
- [18] Senner, A. (1994). *Principios de electrotecnia*. Barcelona: Editorial Reverté S.A.
- [19] Silge Electrónica. (s.f.). Silge. <https://blog.silge.com.ar/>: <https://blog.silge.com.ar/soluciones-para-el-control-de-temperatura-industrial>
- [20] Trinks, W. (2004). *Industrial Furnaces* (6 ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [21] Yarasca, J., & Espinoza, M. (2015). *Propuesta de implementación de un sistema de pintura electrostática para piezas metálicas utilizadas en tableros y celdas eléctricas*. Lima: Universidad Ricardo Palma.

Trayectoria académica

Ricardo John Palomares Orihuela

Universidad Ricardo Palma, Perú.

Docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Ricardo Palma. Ingeniero Mecatrónico de la Universidad Nacional de Ingeniería, doctor en Ciencias de la Educación, magister en Ciencias de la Educación con mención en Docencia Universitaria y maestría en Ciencias de la Electrónica con mención en Ingeniería Biomédica. Senior Member IEEE. Miembro Profesional RAS, EMBS, ComSoc y EduSoc - IEEE. Investigador RENACYT – Nivel V.

Autor corresponsal: ricardo.palomares@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9076-3674>

Enzo Pietro Jesús Morán Ugarelli

Universidad Ricardo Palma, Perú.

Ingeniero Mecatrónico egresado de la Universidad Ricardo Palma. Actualmente desempeñando el rol de analista de mantenimiento preventivo para maquinaria minera.

enzo.2401@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-5191-3589>

Rafael Marcel Sánchez Soto

Universidad Ricardo Palma, Perú.

Ingeniero Mecatrónico de la Universidad Ricardo Palma. Ingeniero de proyectos con asesoría en mejora de procesos automatizados en AGP PERÚ, con especialización avanzada en Autodesk Inventor, gestor de proyectos retail en HMY PERÚ y Gerente General en Maker Asociados SAC.

sanchez.rafael16@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-3020-1902>

Contribución de autoría

Ricardo Palomares: Investigación, metodología, supervisión, escritura – revisión y edición.

Enzo Morán: Conceptualización, análisis formal, adquisición de financiación, investigación, software, recursos, validación, visualización, escritura – borrador original.

Rafael Sánchez: Conceptualización, análisis formal, adquisición de financiación, investigación, software, recursos, validación, visualización, escritura – borrador original.

Conflicto de intereses

Los autores sostienen que no existe conflictos de intereses en el desarrollo de la presente investigación.

Responsabilidad ética y legal

La presente investigación se llevó a cabo siguiendo los principios éticos del conocimiento, asegurándose de que la información es original y confiable.

Declaración sobre el uso de LLM (Large Language Model)

Este artículo no ha utilizado para el desarrollo de la investigación textos provenientes de LLM (ChatGPT u otros).

Financiamiento

La empresa MAKER ASOCIADOS S.A.C. y los investigadores.

Correspondencia: ricardo.palomares@urp.edu.pe