

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Repotenciación de un sistema de secado por convección para muestras de
laboratorio de bioprocesos

INGE-2836

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero/a en mecatrónica

Presentado por:

Melany Lissette Fuentes Giler

Xavier Alexis Cedeño Flores

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

A Dios, quien encendió la luz en el corazón de mis padres: la llama que los sostuvo en oración y esperanza, para que este día pudiera llegar.

A mis padres: Antonio Fuentes y Katty Giler que, aunque sin lujos, hicieron lo imposible para que la educación nunca faltara. Gracias por enseñarme que cada decisión dignifica el camino; y aunque no siempre supe si mis pasos eran los correctos, los di con la convicción de quien sabe que la voluntad y el amor familiar lo sostienen todo. Estoy aquí no solo por mí, sino gracias a ustedes.

A mi hermana gemela, Melina Fuentes, compañera de mis días más inciertos y celebrante de mis triunfos. Has alzado el vuelo con tu maestría, y aun así caminas a mi lado. Tu ejemplo me impulsa a volar en mis propias alas. Y a mi voluntad, esa fuerza tenaz que, aunque tardía, no dudó: continuó con paso firme sostenidos por quienes me sostienen.

Melany Lissette Fuentes Giler

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo
agradecimiento:

A mis padres, por su sacrificio silencioso y
constante. Gracias por llevarme cada día a la
universidad, por procurar que nunca me faltara
nada y por enseñarme, con hechos más que con
palabras, lo que significa la entrega
incondicional.

A mis amigos, quienes hicieron que el camino
universitario fuese más llevadero, compartiendo
no solo estudios, sino también alegrías y
momentos que quedarán en mi memoria.

A Karin, quien en estos últimos semestres ha
sido un pilar fundamental. Gracias por tu
paciencia, por escucharme siempre y por
recordarme que nunca estaba sola en este
recorrido.

Y finalmente, al Ingeniero Livingsgton, por
confiar en este proyecto, abrírnos las puertas a
nuevas posibilidades y guiarnos con dedicación
y sabiduría en su labor como tutor.

Este logro no habría sido posible sin cada uno
de ustedes. Llevo en mí una parte de su
esfuerzo, cariño, amistad y confianza.

Melany Lissette Fuentes Giler

Dedicatoria

A mi familia, pilar inquebrantable en cada etapa de mi vida. Con su esfuerzo y amor me enseñaron que la educación es la herencia más valiosa, y que cada sacrificio deja huellas imborrables de grandeza.

De manera especial, a mi mamá, Jessica Flores, ejemplo de entrega y perseverancia. Tu amor constante fue el motor que me impulsó a no rendirme; cada página de este trabajo lleva también tu huella.

A mis mascotas, especialmente a mi gatita Venus, compañera silenciosa de estudios y desvelos, cuyo cariño incondicional alivió los días más pesados y me acompañó fielmente en este camino.

Y a Eunice, quien en esta última etapa se volvió un apoyo significativo y especial, brindando momentos de calma y alegría en los momentos más exigentes.

Xavier Alexis Cedeño Flores

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento:

A mi familia, por su apoyo incondicional, confianza y motivación constante; gracias a ustedes pude superar los desafíos de este proceso académico.

A mis docentes y tutores, por su orientación, paciencia y valiosos conocimientos, que fueron fundamentales para la planificación y ejecución de este trabajo. Sus enseñanzas marcaron un antes y un después en mi formación profesional.

A mis amigos, por su colaboración, disposición y el intercambio de experiencias, que hicieron de cada práctica un aprendizaje más enriquecedor y significativo.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo de este proyecto; su apoyo, orientación y ánimo fueron valiosos para alcanzar esta meta.

Xavier Alexis Cedeño Flores

Declaración Expresa

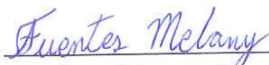
Nosotros, Melany Lissette Fuentes Giler y Xavier Alexis Cedeño Flores acordamos y reconocemos que:

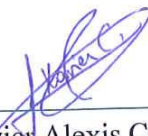
La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 27 de mayo del 2025.


Melany Lissette Fuentes
Giler


Xavier Alexis Cedeño
Flores

Evaluadores

Jorge Hurel, Ph.D

Profesor de Materia

Livingston Castro, M.Sc.

Tutor de proyecto

Resumen

El proyecto tiene como propósito reacondicionar un horno de secado por convección modelo DK-42, ubicado en el laboratorio de bioprocesos de la ESPOL, con el fin de restituir su funcionalidad y aprovechar su estructura física. Se establece como hipótesis que la modernización del sistema de control, mediante la incorporación de tecnologías actuales, permitirá optimizar el desempeño del equipo y aportar a la sostenibilidad académica y económica de la institución. Durante el desarrollo se sustituyeron los componentes obsoletos; se integró un sensor de temperatura tipo K, un transmisor de señal, resistencias eléctricas y un relé de estado sólido, todos gestionados por un PLC Siemes LOGO! 8.4 programado con un algoritmo PI. Se realizaron cálculos eléctricos y térmicos, así como simulaciones en LOGO Soft Comfort, que permitieron validar la estabilidad del sistema, el rango seguro de operación y la fiabilidad de la interfaz de usuario integrada. Los resultados demostraron un control térmico estable, seguridad frente a sobrecalentamiento y un ahorro superior al 60% en comparación con la adquisición de un horno nuevo. Se concluye que la propuesta es técnicamente viable, promueve la sostenibilidad institucional y fortalece la formación práctica de los estudiantes.

Palabras Clave: automatización, sostenibilidad, control térmico, innovación.

Abstract

This project focuses on refurbishing a DK-42 convection drying oven, located in the ESPOL bioprocess laboratory, to restore its functionality and extend the use of its physical structure. The central hypothesis is that modernizing the control system with current technologies enhances the equipment's performance while contributing to both academic and economic sustainability. The refurbishment involved replacing obsolete components with a type K thermocouple, a signal transmitter, electric heating elements, and a solid-state relay, all managed by a Siemens LOGO! 8.4 PLC configured with a PI control algorithm. Electrical and thermal calculations were carried out, and simulations in LOGO Soft Comfort were performed to validate system stability, safe operating limits, and the reliability of the integrated user interface. The results confirmed stable thermal control, effective protection against overheating, and a cost reduction exceeding 60% compared to purchasing a new oven. The study concludes that the proposal is technically feasible, supports institutional sustainability, and strengthens students' hands-on training in process control.

Keywords: *automation, sustainability, thermal control, innovation.*

Índice general

Resumen.....	I
Abstract	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología	VII
Índice de figuras.....	VIII
Índice de tablas	IX
Índice de planos	X
Capítulo 1	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del problema	2
1.3 Justificación del problema	3
1.4 Objetivos.....	4
<i>1.4.1 Objetivo general.....</i>	<i>4</i>
<i>1.4.2 Objetivos específicos.....</i>	<i>4</i>
1.5 Marco teórico	5
<i>1.5.1 Equipos de secado por convección: principios y aplicaciones</i>	<i>5</i>
<i>1.5.2 Sistemas de control de temperatura en hornos eléctricos</i>	<i>6</i>
<i>1.5.3 Sensores de temperatura y su aplicación.....</i>	<i>6</i>
<i>1.5.4 Controladores electrónicos y lógica PID</i>	<i>8</i>
<i>1.5.5 Interfaz Hombre-Máquina (HMI)</i>	<i>9</i>

1.5.6 Reacondicionamiento tecnológico y sostenibilidad.....	10
Capítulo 2.....	12
2.1 Metodología	13
2.1.1 Enfoque general del diseño.....	13
2.2 Identificación de requerimientos.....	13
2.3 Soluciones propuestas	14
2.4.1 Principios de solución.....	15
2.4.2 Criterios	15
2.4.3 Conclusión estratégica y toma de decisión.....	15
2.5 Diseño del sistema seleccionado.....	16
2.5.1 Descripción general.....	16
2.5.2 Diagrama de control de temperatura	16
2.5.2 Interfaz de usuario	18
2.5.3 Selección de componentes.....	19
2.6 Cálculos representativos	20
2.6.1 Potencia eléctrica de las resistencias calefactoras	20
2.6.2 Selección de cableado eléctrico.....	20
2.6.3 Protección térmica.....	20
2.6.4 Cálculo de espesor de la lana de vidrio.....	20
2.7 Diseño eléctrico y de control	21
2.7.1 Diseño eléctrico	21
2.7.2 Diseño de control.....	23
2.7.3 Simulación del programa.....	25

2.8 Especificaciones técnicas del producto o servicio final.....	26
2.9 Consideraciones éticas y legales	27
Capítulo 3.....	28
3.1 Resultados y análisis	29
3.1.1 Resultados obtenidos	29
3.1.2 Análisis de los resultados	33
3.2 Análisis de costos.....	35
3.2.1 Costos directos.....	36
3.2.2 Costos indirectos.....	37
3.2.3 Inversión total del proyecto	37
3.3 Viabilidad económica y aporte académico	38
Capítulo 4.....	40
4.1 Conclusiones y recomendaciones	41
4.1.1 Conclusiones	41
4.1.2 Recomendaciones.....	45
Referencias.....	50
Apéndice A	52
Apéndice B.....	60
Apéndice C.....	64
Apéndice D	65
Manual de operación del Horno.....	66

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
PLC	Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable)
HMI	Human Machine Interface (Interfaz Hombre-Máquina)
PI	Control Proporcional-Integral
SSR	Solid State Relay (Relé de Estado Sólido)
AC	Corriente Alterna
DC	Corriente Directa
MUX	Multiplexor
PWM	Modulación por Ancho de Pulso

Simbología

P	Potencia eléctrica (W)
V	Voltaje (V)
I	Corriente eléctrica (A)
S	Sección del conductor (mm^2)
L	Longitud del cable (m)
q''	Flujo de calor superficial (W/m^2)
t	Espesor del aislante (m)
k	Conductividad térmica (W/mK)
T_i	Temperatura interna ($^{\circ}C$)
T_s	Temperatura de la superficie ($^{\circ}C$)
T_{∞}	Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
h_i	Coefficiente de convección interior ($W/m^2 \cdot K$)
h_o	Coefficiente de convección ($W/m^2 \cdot K$)
$h_{o,ef}$	Coefficiente de convección–radiación exterior efectivo ($W/m^2 \cdot K$)
ε	emisividad de la superficie

Índice de figuras

Figura 1	17
Figura 2	18
Figura 3	18
Figura 4	22
Figura 5	23
Figura 6	25
Figura 7	29
Figura 8	30
Figura 9	31
Figura 10	38

Índice de tablas

Tabla 1	15
Tabla 2	32
Tabla 3	36

Índice de planos

PLANO 1 Diagrama de control

PLANO 2 Diagrama eléctrico

Capítulo 1

1.1 Introducción

Dentro del campo de la ingeniería mecatrónica es fundamental el diseño y optimización de sistemas que integren componentes mecánicos, electrónicos y de control para ofrecer soluciones innovadoras frente a problemas industriales o académicos, donde la innovación tecnológica resulta esencial para el desarrollo.

En este sentido, el reacondicionamiento de equipos antiguos se presenta como una oportunidad. Aunque muchos han superado su ciclo original de operación por el desgaste de sus componentes, su estructura aún puede aprovecharse integrando tecnología moderna, lo que reduce la necesidad de adquirir nuevos equipos costosos y fomenta la sostenibilidad mediante la incorporación de sistemas electrónicos y de control actuales.

Este proyecto busca repotenciar un horno de secado por convección, modelo DK-42 de American Scientific Products, ubicado en el laboratorio de bioprocesos de ESPOL. Dicho horno ya no está operativo debido a su devaluación tecnológica, fallas operativas y obsolescencia del sistema de control, lo que ha inhabilitado su uso en prácticas académicas.

El presente trabajo se enmarca en esta línea de acción. Como estudiantes de Ingeniería Mecatrónica, buscamos aplicar los conocimientos adquiridos para intervenir de manera técnica y responsable en el reacondicionamiento del horno, integrando conceptos de automatización, diseño y control en un entorno real, alineado con nuestras competencias profesionales y los valores de eficiencia y sostenibilidad.

1.2 Descripción del problema

El laboratorio de bioprocesos de la ESPOL cuenta con diversos equipos para prácticas relacionadas con procesos térmicos, entre ellos un horno de secado por convección.

Actualmente, este horno está inoperativo, lo que impide el desarrollo de prácticas clave y limita actividades de investigación.

El problema principal radica en fallas críticas: deterioro y obsolescencia del circuito eléctrico y un sistema de control completamente analógico que restringe ajustes precisos y monitoreo en tiempo real. Además, la carencia de sensores modernos que permitan evaluar las condiciones internas reduce el valor didáctico del equipo.

Desde la perspectiva institucional, la recuperación del horno es una prioridad, ya que su estado actual limita la disponibilidad de recursos experimentales en cursos de bioprocesos y afecta la eficiencia del laboratorio. Mantener este tipo de equipos en funcionamiento es vital para fortalecer la relación entre docencia, investigación y práctica.

El reacondicionamiento se plantea como una alternativa más viable y económica frente a la compra de un horno nuevo, lo que asegura tanto la seguridad como la calidad, aprovechando la estructura física existente y adaptándola a las exigencias tecnológicas actuales.

1.3 Justificación del problema

El horno, que actualmente se encuentra sin utilizar en el laboratorio de bioprocesos, ha quedado obsoleto debido al deterioro de sus componentes internos y la falta de control preciso sobre la temperatura, lo cual limita su aplicación en prácticas académicas y experimentales.

Dado que los laboratorios son espacios fundamentales para consolidar el aprendizaje en carreras técnicas, recuperar un equipo como este puede representar un impacto positivo en la formación académica. En especial en el área de bioprocesos, donde es indispensable contar con herramientas que permitan simular condiciones reales de tratamiento térmico, el acceso a equipos funcionales se convierte en una necesidad constante. Así; la intervención sobre el horno DK-42 releva lo técnico para convertirse en un aporte al entorno educativo.

Esta propuesta de reacondicionamiento se alinea a prácticas de sostenibilidad; evitando desaprovechar el desecho de la estructura, se propone una modernización haciendo uso de tecnologías actuales como controladores programables e interfaces HMI. Esta decisión se alinea con los principios de economía circular donde el enfoque es promover la reutilización y adaptación de recursos logrando reducir el impacto ambiental asociado a la producción de nuevos equipos y promoviendo la sostenibilidad dentro del ámbito universitario.

Este proyecto representa una oportunidad de aplicación práctica de los conocimientos adquiridos en la carrera de Mecatrónica, abordando diseño electrónico, automatización, control y gestión de proyectos. Lo cual sienta la base para futuros proyectos de reacondicionamiento de maquinaria tanto en el entorno académico como industrial.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Repotenciar el diseño de control de temperatura de un horno mediante la incorporación de sensores, controladores y una interfaz HMI, para su reactivación en el laboratorio de bioprocesos de la universidad.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Diseñar un sistema de control automático de temperatura, empleando sensores adecuados y un controlador PID programable.
2. Implementar una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) que permita la visualización y configuración de parámetros operativos del horno por parte del usuario.
3. Integrar el sistema completo en condiciones de laboratorio, verificando la estabilidad térmica, la respuesta del sistema y su fiabilidad para actividades académicas.

4. Documentar el proceso de reacondicionamiento y generar un manual técnico, para facilitar su uso y mantenimiento.

1.5 Marco teórico

La repotenciación de sistemas térmicos como el horno de temperatura constante, responde a la necesidad de extender la vida útil de equipos cuya estructura física aún es funcional, pero que su sistema de control ha quedado obsoleto. Con respecto al laboratorio, esta práctica no solo representa un ahorro significativo, sino que también alinea los proyectos con principios de sostenibilidad tecnológica y aprendizaje aplicado.

1.5.1 Equipos de secado por convección: principios y aplicaciones

Los hornos de secado por convección son dispositivos diseñados para eliminar la humedad de materiales mediante circulación forzada de aire caliente. Este tipo de hornos consta típicamente de resistencias térmicas, una cámara aislada y un sistema de ventilación. El control adecuado de la temperatura y el flujo de aire garantiza la uniformidad del proceso, factor crítico para aplicaciones en biotecnología, microbiología y química de materiales.

En aplicaciones de laboratorio, estos hornos son esenciales para procedimientos que requieren condiciones térmicas estables y reproducibles. Su funcionamiento se basa en la transferencia de calor por convección, donde el aire calentado se distribuye de manera uniforme en la cámara interna, permitiendo un secado homogéneo de las muestras.

Estudios como los de Wang (2024) han resaltado que la precisión térmica influye directamente en la calidad de los resultados experimentales, especialmente cuando se trabaja con muestras sensibles. Por esta razón, es indispensable contar con un sistema de control que permita mantener la temperatura dentro de rangos estrechos durante el tiempo requerido para el proceso.

En muchos casos, los hornos de generaciones anteriores carecen de capacidades de regulación automática, lo que limita su utilidad en procedimientos que requieren alta precisión térmica. El reacondicionamiento de estos dispositivos, mediante la incorporación de sensores modernos y sistemas de control programables, permite actualizar su funcionamiento y adaptarlos a las exigencias actuales del entorno académico e investigativo.

1.5.2 Sistemas de control de temperatura en hornos eléctricos

Tradicionalmente, este tipo de hornos utilizaban controles analógicos o resistencias térmicas sin regularización automatizada, generando ineficiencias térmicas, operativas y de precisión.

La automatización moderna, a través de sensores térmicos, controladores PID y sistemas programables, ha permitido alcanzar una regulación más precisa. Por ejemplo, el sensor captura la temperatura real (PV), la compara con la deseada (SP) y el controlador ajusta la energía al elemento térmico (Pacanowsky, 2025). Este ciclo de realimentación continua mejora notablemente la exactitud y estabilidad del sistema, como resultado, se reduce el sobreimpulso, el error en estado estacionario y se acelera la respuesta.

Los sistemas de control modernos emplean microprocesadores para convertir señales analógicas en valores digitales, esto permite: mayor precisión, ya que no dependen de la deriva de componentes pasivos ni de las variaciones ambientales; flexibilidad, para programar diferentes rutinas de calentamiento, alarmas o registros automáticos; e integración con sistemas externos, como interfaces HMI, PLC o redes de monitoreo (DePalma, 2010).

1.5.3 Sensores de temperatura y su aplicación

El monitoreo térmico en sistemas como el horno DK-42 depende de sensores que convierten la temperatura en señales eléctricas. Los más comunes son los termopares

(especialmente de tipo K y J) y los sensores RTD como el PT100. Estos sensores se seleccionan según precisión, rango operativo, tiempo de respuesta y estabilidad, según las necesidades del proceso.

Los termopares tipo K están formados por aleaciones de níquel-cromo y níquel-aluminio, ofreciendo un rango de operación desde aproximadamente $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $1260\text{ }^{\circ}\text{C}$, con salida de voltaje cercana a $41\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ y alta resistencia a la oxidación; por ello se usan en aplicaciones industriales exigentes (; JVTIA, 2022). En cambio, los termopares tipo J, compuestos por hierro y constantán, cubren un rango menor, entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, con mayor sensibilidad (aproximadamente $50\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$), siendo óptimos para entornos menos extremos y de menor costo (TE Connectivity, s. f.).

Los sensores RTD, en particular los PT100, están contruidos con platino y se caracterizan por alta linealidad y precisión en un rango desde $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Fuji Electric, s. f.). Su resolución y estabilidad los hacen ideales en laboratorios, donde la trazabilidad térmica es crucial, soportando tolerancias de precisión de $\pm 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ para sondas clase A, y hasta $\pm 0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$ para sondas 1/10 DIN (Fuji Electric, s. f.).

Los termopares destacan por su rápido tiempo de respuesta y bajo costo, además de permitir mediciones en rangos muy elevados, aunque su precisión es limitada (semanas de error almacenamiento, deriva a lo largo del tiempo), lo cual los hace adecuados cuando la exactitud absoluta no es crítica (China-Gauges, 2023). En contraste, los sensores RTD como el PT100 son más costosos, pero proporcionan mayor exactitud, estabilidad y repetibilidad, características esenciales para procesos científicos y de bioprocesos (Dewesoft, s. f.).

Ambos tipos de sensores pueden integrarse en sistemas de control por medio de acondicionadores de señal o transmisores industriales (por ejemplo, $4\text{-}20\text{ mA}$), facilitando el

registro en tiempo real y la activación de actuadores como relés o contactores para mantener la temperatura dentro de los límites establecidos (Dewesoft, s. f.). Esta integración constituye la base de sistemas automáticos modernos, mejorando la eficiencia energética, la seguridad del equipo y la reproducibilidad de los procesos experimentales.

1.5.4 Controladores electrónicos y lógica PID

El control PID (Proporcional, Integral, Derivativo) es uno de los algoritmos más empleados en procedimientos térmicos por su facilidad, resistencia y efectividad. Este tipo de controlador funciona al comparar de manera continua la temperatura registrada (variable de proceso) con el valor deseado (setpoint), determinar un error y ejecutar tres acciones correctivas: proporcional (rectifica el error presente), integral (compensa el error acumulado) y derivativo (anticipa cambios futuros). Esta combinación posibilita disminuir el error en el estado estacionario, potenciar la reacción frente a variaciones, consiguiendo un sistema térmico más rápido y estable.

El control PID es ampliamente reconocido como uno de los métodos más efectivos para sistemas térmicos y de muchos otros tipos. Su aplicación permite minimizar el sobre impulso, mejorar la respuesta transitoria y mantener el sistema estable frente a perturbaciones.

En aplicaciones como la del horno DK-42, un controlador PID, sea implementado en un microcontrolador, un PLC (Controlador Lógico Programable) o un sistema embebido, puede regular eficientemente la temperatura. Además de que su configuración permite adaptarse a distintas curvas de calentamiento, necesarias para procesos específicos de secado o tratamiento térmico.

Uno de los beneficios adicionales de emplear controladores PID en contextos open source es la posibilidad de ajustar los parámetros de control mediante interfaces gráficas desarrolladas

en plataformas como Python, MATLAB o LabVIEW. Esto permite no solo un control más intuitivo del sistema, sino también la integración con sensores digitales modernos, como los mencionados anteriormente.

También es importante mencionar que una sintonización adecuada del PID es de mucha importancia para su correcto desempeño. Existen varios métodos para ello, desde técnicas manuales (como el método de Ziegler-Nichols) hasta algoritmos de ajuste automático asistidos por software. La elección del método dependerá del grado de precisión deseado y de la dinámica térmica del horno.

Finalmente, el uso de controladores electrónicos PID dentro de una filosofía de diseño de hardware libre promueve la reutilización de código, la mejora continua por parte de la comunidad y la posibilidad de implementar soluciones de bajo costo que resultan especialmente útiles en instituciones educativas o laboratorios con restricciones presupuestarias.

1.5.5 Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

La inclusión de una Interfaz Hombre-Máquina (HMI) en equipos térmicos permite al usuario visualizar y modificar parámetros en tiempo real, mejorando significativamente la interacción con el sistema, la formación técnica y la digitalización de procesos. En estudios industriales se ha demostrado que el monitoreo inmediato a través de pantallas gráficas (visualización de tendencias, alarmas de seguridad, indicadores de estado) ayuda a los operadores a detectar y corregir desviaciones antes de que generen fallos en el equipo (Infraswin Energy Co., 2025).

Las HMI modernas permiten mostrar gráficas dinámicas de evolución térmica, activar alarmas visuales y sonoras, y registrar históricos de funcionamiento. Esta capacidad histórica es clave en laboratorios donde es necesario garantizar la trazabilidad y realizar análisis posteriores.

Por ejemplo, Shanghai (2015) explica que el acceso inmediato a los datos históricos vía HMI permite al operador “identificar el efecto dominó en todo el sistema y determinar problemas y soluciones más rápidamente”, mientras que Staff (2015) subraya que la integración de datos históricos y en tiempo real en la HMI proporciona “información valiosa para la toma de decisiones rápidas”.

Además, las HMI modernas soportan la conectividad remota, lo que permite el control y monitoreo del sistema desde teléfonos, tabletas o computadoras, facilitando la implementación de paradigmas de Industria 4.0 y mantenimiento predictivo (Challaturu, 2025). También incorporan protocolos de seguridad, control de acceso por usuario y cifrado de datos, para proteger tanto la operación como la información recopilada (Kortier, 2017).

Todas estas capacidades se traducen en beneficios directos en contextos académicos: mejora de la usabilidad y formación técnica, facilitación en el análisis de datos, y mayor seguridad operativa.

1.5.6 Reacondicionamiento tecnológico y sostenibilidad

El reacondicionamiento de maquinaria es una práctica creciente en sectores industriales y académicos. La reutilización de estructuras físicas mediante la integración de componentes modernos no solo reduce costos, sino que disminuye el impacto ambiental por desecho tecnológico.

En entornos académicos, esta práctica permite reducir costos, evitar el desecho prematuro de equipos y fomentar el uso eficiente de recursos. De acuerdo con Pearce (2013), el reacondicionamiento mediante plataformas de hardware abierto puede reducir los costos de equipamiento hasta en un 97%, facilitando el acceso a herramientas científicas en instituciones educativas con presupuesto limitado.

Wenzel (2023) destaca que esta estrategia es especialmente relevante en contextos de bajos recursos, donde la combinación de componentes reacondicionados con plataformas como Arduino o Raspberry Pi permite crear equipos funcionales, documentados, escalables y de bajo costo. Estas soluciones democratizan el acceso a la tecnología científica, empoderando a los usuarios a adaptar, mantener y mejorar sus propios dispositivos, lo cual es fundamental en el entorno universitario.

El reacondicionamiento no solo tiene beneficios económicos, sino también ambientales. Al reducir la necesidad de adquirir equipos nuevos y evitar la generación de desechos electrónicos, se promueve una gestión responsable de los recursos. Esta práctica se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente con el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura) y el ODS 12 (Producción y consumo responsables).

Capítulo 2

2.1 Metodología

2.1.1 Enfoque general del diseño

El presente trabajo tuvo como objetivo el reacondicionamiento del horno DK-42, un horno de secado por convección originalmente utilizado en el laboratorio de bioprocesos de la ESPOL; a pesar de que el equipo se encontraba fuera de operación aún conservaba una estructura externa sólida que podía ser aprovechada. A partir de ello, se planteó el rediseño del sistema eléctrico interno mediante la incorporación de componentes modernos que permitieran automatizar el proceso de secado, controlar la temperatura y humedad interna; y ofrecer una interfaz amigable para los usuarios en el contexto de prácticas académicas.

2.2 Identificación de requerimientos

El proceso de identificación de requerimientos comenzó con un diagnóstico del estado actual del horno. A pesar de que la carcasa del equipo se encontraba en buen estado, los componentes internos habían quedado obsoletos tras décadas de uso; especialmente el sistema de calefacción, control y ventilación relacionado a las fallas en el sistema eléctrico.

Uno de los requerimientos principales fue asegurar un sistema de calefacción confiable, sistema de calefacción capaz de alcanzar temperaturas cercanas a los 200 °C, utilizando resistencias de alta calidad y control automático para mantener la temperatura deseada.

Por eso se prioriza la incorporación de sensores de temperatura de alta precisión, como termopares o RTDs, con tiempos de respuesta rápidos y rango adecuado para el proceso de secado.

Sumado al monitoreo térmico, fue esencial definir la necesidad de un sistema de control automático capaz de gestionar las resistencias de calefacción de forma dinámica. Se planteó la

implementación de un algoritmo PI, ya que este tipo de control ha demostrado ser eficaz en sistemas térmicos al reducir oscilaciones y mantener la estabilidad ante perturbaciones.

Otro requerimiento clave fue la mejor del sistema de convección forzada. El horno, al trabajar por transferencia de calor por convección, debía contar con un ventilador interno que garantizara la distribución homogénea del aire caliente.

La interacción con el usuario fue otra prioridad del diseño, el desarrollo de una interfaz que permitiera al usuario configurar parámetros como temperatura y tiempo, y visualizar el estado operativo en tiempo real, facilitando la interacción con el sistema. En términos eléctricos, se definió la necesidad de dividir claramente las líneas de potencia y de control.

Todo el diseño fue pensado para cumplir con normativas básicas de seguridad eléctrica y de operación en entornos educativos.

2.3 Soluciones propuestas

Durante la etapa inicial del proyecto se evaluaron diversas alternativas para reacondicionar el horno de secado DK-42. La primera opción consistió en un control térmico básico con el STC-1000, sencillo y económico, pero limitado en precisión y ajuste fino. La segunda propuso un microcontrolador (Arduino o ESP32) con algoritmo PID, sensores PT100 y relés de estado sólido, complementado con un ventilador de convección para distribución homogénea del calor. La tercera alternativa contempló un PLC compacto con HMI industrial, permitiendo configuración directa del PID, interacción profesional con el sistema y monitoreo claro de temperatura y alarmas. Finalmente, la cuarta opción planteó un sistema inteligente basado en IoT, integrando microcontroladores con capacidad de red o computadoras embebidas, sensores de temperatura, relés de estado sólido y una pantalla táctil capacitiva como interfaz local.

2.4.1 Principios de solución

Solución A: Control ON/OFF con termostato STC-1000

Solución B: Arduino o ESP32 con control PID y pantalla LCD/TFT

Solución C: MicroPLC compacto con HMI táctil (o con teclado físico)

Solución D: Sistema IoT con ESP32/Raspberry, monitoreo remoto y nube

2.4.2 Criterios

Para evaluar las alternativas propuestas, se establecieron seis criterios fundamentales listados en la **Tabla 1**, donde se realizó una evaluación por pares por cada criterio a la par de los principios de solución. El análisis detallado se puede consultar en el **Apéndice A**.

Tabla 1

Matriz de evaluación de criterios ponderados

CONCLUSION	precisión	costo	implementación	robustez	interfaz	aplicabilidad	Σ	prioridad
Solución A (ON/OFF)	0.026	0.01	0.076	0.026	0.01	0.01	0.16	4
Solución B (Microcontrolador)	0.065	0.02	0.038	0.052	0.02	0.025	0.22	3
Solución C (MicroPLC + HMI)	0.104	0.035	0.0475	0.104	0.04	0.04	0.37	1
Solución D (IoT)	0.065	0.025	0.0285	0.078	0.03	0.025	0.25	2

2.4.3 Conclusión estratégica y toma de decisión

Pese a su mayor inversión inicial, se optó por la solución C para maximizar la utilidad académica y garantizar la durabilidad del equipo ya que ofrece un sistema seguro, escalable y alineado con los estándares de automatización industrial. Para optimizar el presupuesto, se

decidió prescindir de la pantalla HMI externa, usando la integrada del microcontrolador, y no incluir el sensor de humedad relativa, priorizando sensores térmicos confiables para un control preciso de la temperatura.

2.5 Diseño del sistema seleccionado

2.5.1 Descripción general

El sistema de control del horno se basa en un PLC Siemens LOGO! 8.4, que gestiona el proceso de secado térmico mediante la lectura de sensores, así como el procesamiento de señales y activación de actuadores. La señal de temperatura es captada por una termocupla conectada a un transmisor que convierte la señal analógica en una señal de 0–10 V DC, compatible con la entrada analógica del PLC. El PLC compara esta señal con el valor de consigna determinado por el usuario a través de su interfaz. En función de la diferencia entre la temperatura medida y la deseada (error), el PLC genera una señal proporcional que regula el encendido o apagado de las resistencias calefactoras mediante un relé de estado sólido. Simultáneamente, el ventilador de convección se mantiene activo constantemente para asegurar una distribución homogénea del calor en la cámara. Además, el PLC cuenta con una pantalla integrada que permite visualizar parámetros como la temperatura actual, el setpoint y el estado del sistema, facilitando la interacción del usuario con el equipo.

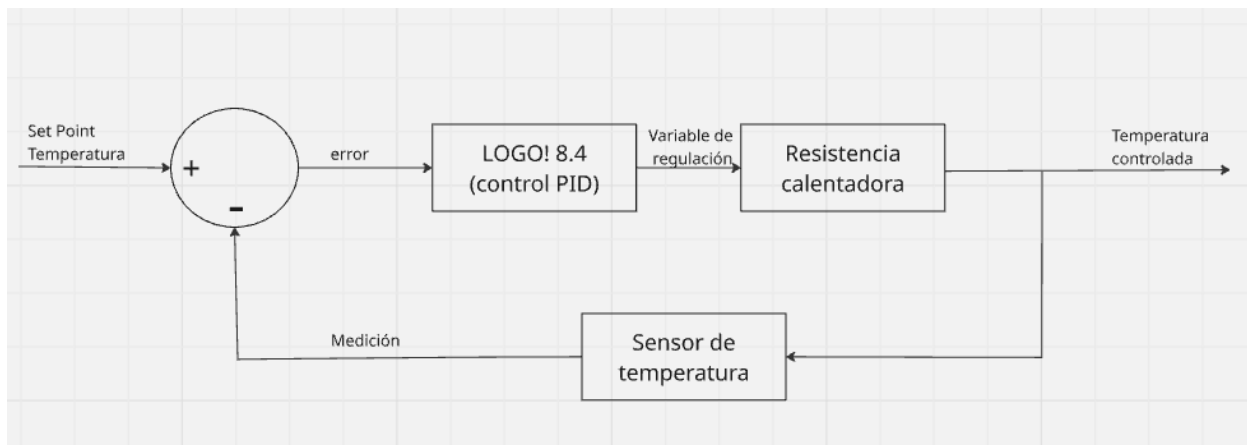
2.5.2 Diagrama de control de temperatura

El sistema seleccionado opera bajo una arquitectura de control en lazo cerrado, como se muestra en la **Figura 1**, donde la variable de proceso a controlar es la temperatura interna del

horno. El diagrama de bloques que se presenta describe el flujo de información y control entre los distintos componentes que conforman el sistema automatizado.

Figura 1

Diagrama de control del proceso



En este esquema, el usuario establece un valor de referencia o set point de temperatura deseada, que es comparado continuamente con la temperatura real medida dentro del horno. Esta comparación genera una señal de error, la cual es procesada por el PLC Siemens LOGO! 8.4, que cuenta con funcionalidad para implementar un algoritmo PI interno.

El resultado de dicho procesamiento es una señal de control que regula el encendido o apagado de la resistencia calefactora, utilizando un relé de estado sólido (SSR) como actuador de potencia. La variación en el tiempo de encendido o apagado de la resistencia permite estabilizar la temperatura del sistema conforme al valor objetivo definido por el usuario, minimizando las oscilaciones y los tiempos de sobreeimpulso.

Para la medición de temperatura, se utiliza una termocupla conectada a un módulo acondicionador de señal, el cual entrega una señal digital precisa y compatible con las entradas analógicas del PLC.

2.5.2 Interfaz de usuario

El PLC Siemens LOGO! 8.4 incluye una pantalla integrada que actúa como interfaz Hombre-Máquina (HMI). La navegación se realiza mediante botones físicos y la interfaz de usuario está integrada directamente en la pantalla del PLC Siemens LOGO!.

Figura 2

Programación de la interfaz en el programa LOGO! Soft Comfort

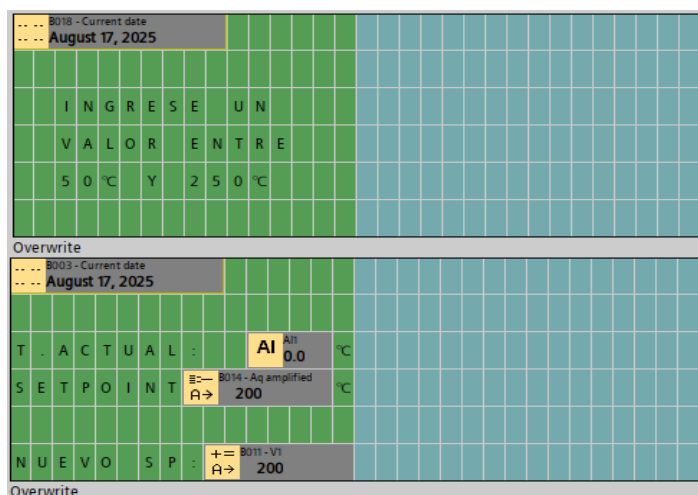
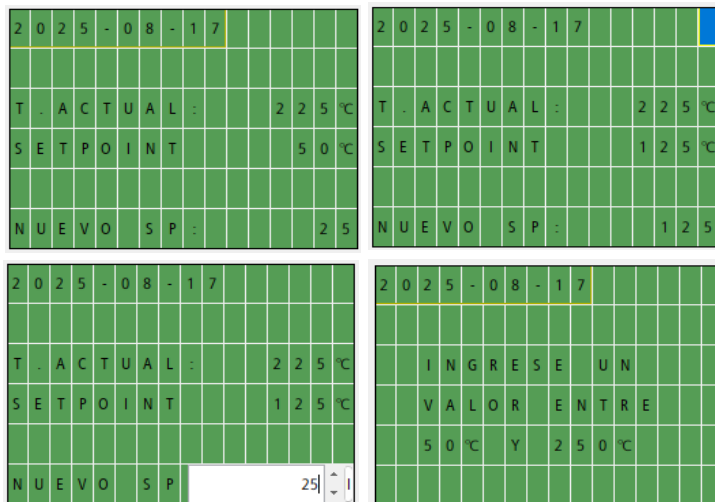


Figura 3

Simulación de la vista de la interfaz



Esta interfaz, como se aprecia en la **Figura 2**, permite visualizar en tiempo real la temperatura actual, configurar el setpoint, establecer rangos seguros y visualizar advertencias si el valor ingresado no es válido.

El sistema evalúa automáticamente si el valor de temperatura deseado se encuentra dentro del rango permitido: entre 50 °C y 250 °C. Caso contrario, se activa una segunda pantalla de advertencia que notifica al usuario que debe ingresar un valor correcto. El sistema, de forma intuitiva, establece automáticamente el valor mínimo o máximo permitido en caso de ingreso erróneo, como se muestra en la **Figura 3**.

2.5.3 Selección de componentes

- Controlador principal (PLC): Siemens LOGO! 8.4 PLC 12/24RC con 8 entradas digitales, 4 salidas digitales con puerto integrado; integra PI, entradas analógicas y pantalla que evita HMI externa y simplifica mantenimiento.
- Fuente de alimentación DC: Se seleccionó una fuente EBC 24VDC 2.5A, suministra energía estable al PLC y al transmisor de temperatura.
- Sensor de temperatura: Termopar tipo K con longitud de 20 cm y diámetro de 6 mm, con cabezal de conexión. Este sensor es robusto, de respuesta rápida y adecuado para aplicaciones en hornos de laboratorio.
- Transmisor para termopar: Se seleccionó el transmisor de temperatura Maxwell TT-500, tipo pastilla con entrada universal para termopar y salida de 0-10 VDC. Este dispositivo convierte la señal de milivoltios del termopar en una señal analógica lineal compatible con el PLC, garantizando precisión y estabilidad en la medición.

- Elemento calefactor: Resistencias eléctricas, 110 V AC, con potencia suficiente para alcanzar 250 °C con margen; aptas para convección.
- Relé de estado sólido (SSR): Control DC, salida AC 110 V, ≥ 25 A.
- Ventilador de convección: Motor AC 110 V. Flujo continuo para homogeneidad térmica
- Aislamiento térmico: Lana de vidrio.
- Accesorios de control y señalización: teclas del LOGO para navegación y confirmación.

2.6 Cálculos representativos

2.6.1 Potencia eléctrica de las resistencias calefactoras

$$P = V \cdot I = 110V \cdot 9A = 990W = 0.99kW$$

2.6.2 Selección de cableado eléctrico

$$S = \frac{(2 \cdot L \cdot I)}{K \cdot \Delta V} = \frac{(2 \cdot 10m \cdot 9A)}{\frac{(56mm^2)}{V \cdot m} \cdot 3.3V} = 0.98mm^2 \rightarrow AWG14$$

2.6.3 Protección térmica

$$I_{proteccion} = 1.25 + 9A = 11.25A \rightarrow Breaker 15A monopolar$$

2.6.4 Cálculo de espesor de la lana de vidrio

Para dimensionar el espesor de lana de vidrio, en caso de reemplazarla en un futuro para mejorar eficiencia térmica se aplicó el modelo de resistencias térmicas en serie, considerando conducción a través de la pared y convección–radiación en ambas superficies, de acuerdo con

Incropera et al. (2006). Los parámetros adoptados, coeficientes y cálculos detallados se presentan en el **Apéndice B**.

El flujo de calor superficial se expresa como:

$$q'' = h_{o,ef}(T_s - T_\infty)$$

Y el espesor mínimo requerido del aislante se determina mediante:

$$t = k \left[\frac{T_{int} - T_\infty}{h_{o,ef}(T_{s,max} - T_\infty)} - \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{o,ef}} \right) \right]$$

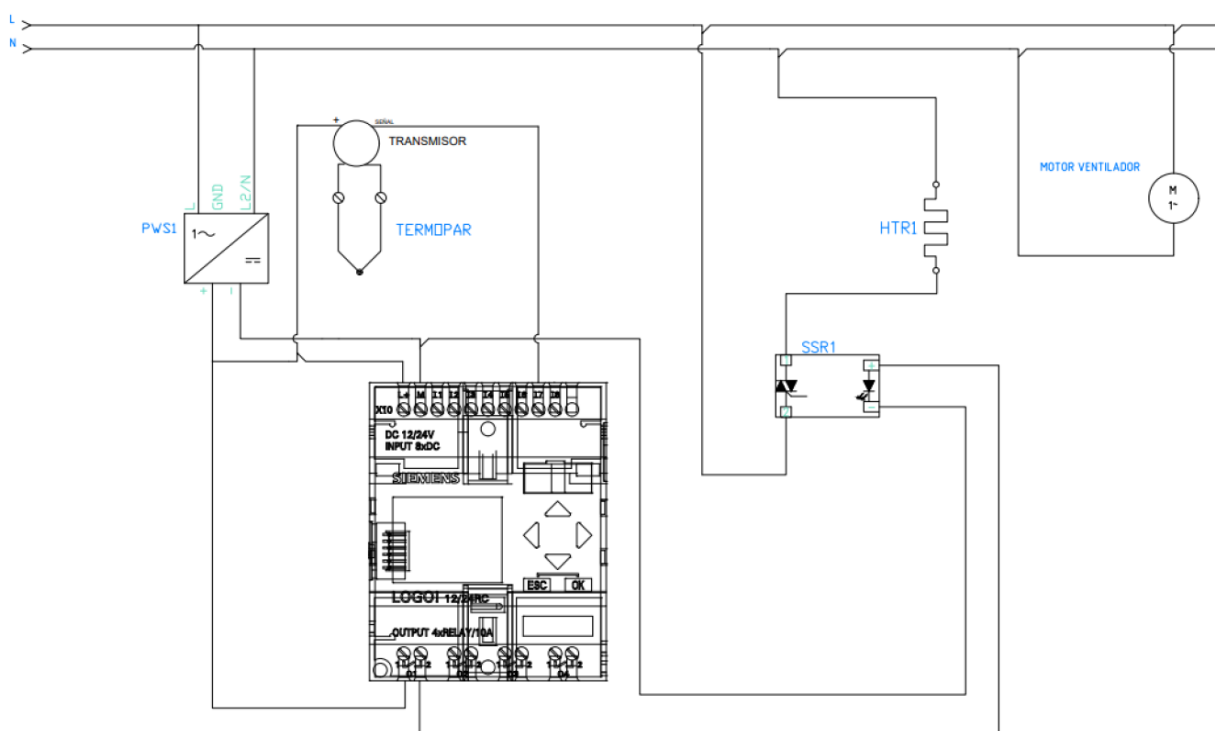
Con una temperatura interna de 200°C, ambiente a 25°C y emisividad superficial $\varepsilon = 0.8$, el espesor calculado para limitar la superficie a 45°C:

$$t \approx 0.0284m$$

2.7 Diseño eléctrico y de control

2.7.1 Diseño eléctrico

El diseño eléctrico del sistema, mostrado como **Figura 4**, se basa en una red de alimentación monofásica de 110 V AC. Esta red provee energía tanto a los componentes de potencia como a los elementos de control. Para alimentar el sistema de control con corriente continua, se incorpora una fuente PVS1, encargada de transformar la corriente alterna en una salida de 12 V DC. Esta fuente suministra tensión al PLC Siemens LOGO, así como a los sensores involucrados.

Figura 4*Diagrama eléctrico*

La medición de la temperatura interna del horno se realiza mediante un termopar tipo K. Este sensor entrega señales en milivoltios, por lo que se conecta a un transmisor que convierte su salida a un rango de 0 a 10 V DC, compatible con la entrada analógica del PLC. Así de esta forma, el controlador puede interpretar en tiempo real la temperatura del sistema.

El PLC ejecuta la lógica de control basada en un algoritmo PI, el cual regula la temperatura del horno a partir del valor deseado ingresado por el usuario. Este valor se compara continuamente con la medición real. El resultado de dicha comparación se transforma en una señal de control analógica que luego es procesada por un bloque convertidor PWM. El convertidor genera una señal digital modulada, que es enviada a un relé de estado sólido.

El relé controla el paso de corriente hacia la resistencia calefactora. Según la señal recibida, esta resistencia se activa o desactiva de manera proporcional a la necesidad de

calentamiento del sistema. Adicionalmente, se emplea un ventilador que se mantiene encendido durante todo el ciclo de operación, con el objetivo de asegurar una distribución uniforme del aire caliente en el interior del horno.

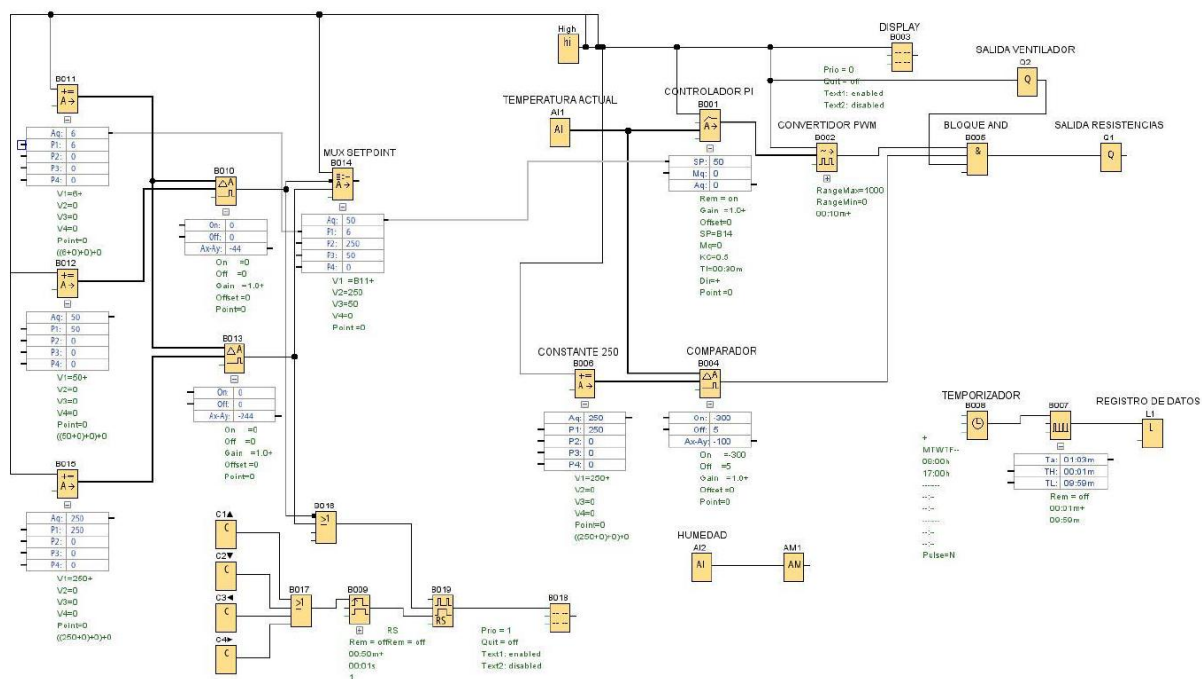
Este diseño contempla también medidas de protección. El sistema incorpora una rutina de seguridad que apaga todo el funcionamiento si la temperatura supera los 300 °C, que se describe con más claridad en el diseño de control, actuando como un paro de emergencia.

2.7.2 Diseño de control

El diseño de control se implementó completamente en el entorno de programación LOGO Soft Comfort utilizando bloques funcionales que permiten estructurar de forma visual y modular la lógica de operación del horno.

Figura 5

Diagrama de control en Logo Soft Comfort.



En el circuito mostrado en la **Figura 5**, se presentan los principales bloques lógicos:

a) Validación del setpoint ingresado por el usuario:

Antes de aceptar el valor de temperatura definido por el usuario, el sistema lo compara con dos constantes fijas: 50 °C como mínimo y 250 °C como máximo. Si el valor está fuera de este rango, el sistema automáticamente ajusta el valor al límite permitido más cercano y despliega una pantalla de advertencia que solicita al usuario ingresar un valor correcto. Esta lógica se implementa con dos bloques de comparación y un MUX que selecciona el valor válido. El retorno a la pantalla principal se activa al presionar cualquier tecla (C1–C4).

b) Control PI de temperatura:

La temperatura actual, medida por la sonda conectada al transmisor, es leída como una señal analógica de 0–10 V. Esta señal representa la variable de proceso y se compara con el setpoint definido. La diferencia; el error, es procesada por un bloque PI (Proporcional–Integral) que genera una señal proporcional a la necesidad de calefacción.

c) Modulación PWM para control de resistencias:

La salida del controlador PI se dirige a un bloque PWM que convierte la señal analógica en pulsos digitales de encendido y apagado. Este módulo permite controlar de forma proporcional la cantidad de energía entregada a las resistencias, extendiendo o acortando el tiempo de encendido por cada ciclo; por ejemplo: en intervalos de 10 segundos.

d) Control de seguridad por sobretemperatura:

Se incorpora una lógica de seguridad basada en comparación de la temperatura actual con un umbral crítico (en este caso, 300 °C). Si esta temperatura se alcanza, el sistema activa un bloque de paro de emergencia que desactiva todo el sistema y muestra una advertencia en pantalla.

e) Registro de datos:

Se incluye una función que permite programar el almacenamiento de datos de temperatura en una computadora o tarjeta SD. El usuario define el horario de registro, el cual puede luego utilizarse para realizar un análisis que ayude a verificar la estabilidad térmica y el rendimiento del sistema.

f) Control del ventilador:

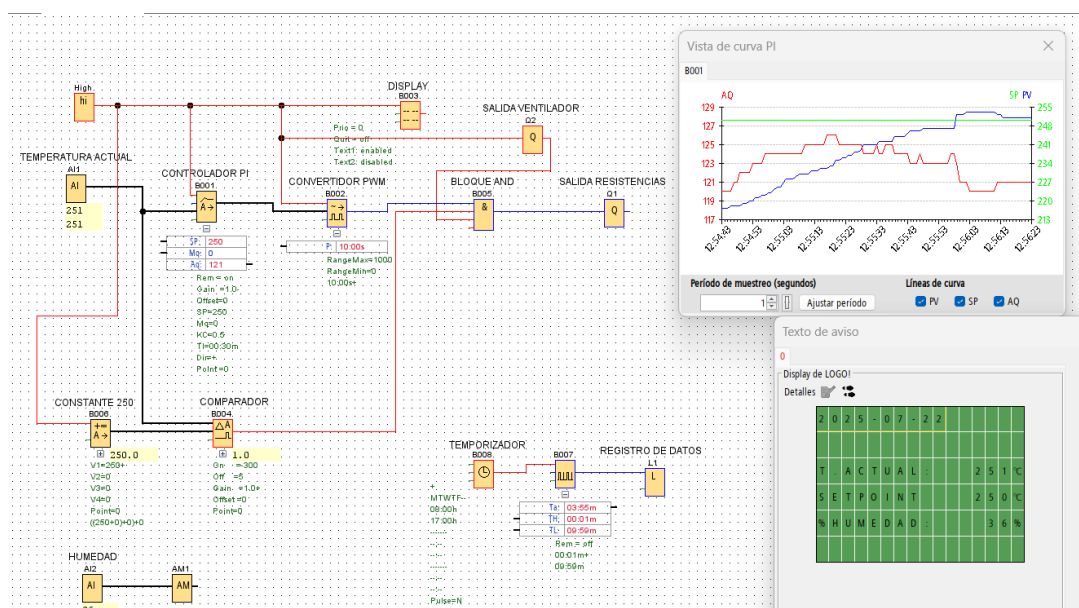
El ventilador de convección se mantiene activo durante todo el proceso de secado, independientemente del estado de las resistencias. Esta decisión se tomó para asegurar una distribución térmica constante y evitar acumulación de calor en zonas puntuales del horno.

2.7.3 Simulación del programa

Durante el proceso de validación del diseño, se utilizaron herramientas de simulación disponibles en LOGO!. Se usó el software Soft Comfort para verificar el comportamiento del sistema antes de su implementación física.

Figura 6

Simulaciones del proceso y comportamiento con el control PI.



Las simulaciones, visualizadas en la **Figura 6** permitieron probar lo siguiente:

- Verificación de la lógica de validación del setpoint.
- Comprobación del funcionamiento del control PI ante cambios súbitos de temperatura.
- Evaluación del tiempo de respuesta del sistema ante variaciones térmicas.
- Comportamiento del PWM en diferentes condiciones de carga térmica.
- Activación correcta del paro de emergencia en escenarios de sobrecalentamiento.
- Navegación funcional entre pantallas y validación del feedback visual al usuario.

Estas simulaciones fueron fundamentales para ajustar los parámetros del controlador PI, optimizar la lógica de seguridad, validar la interfaz de usuario y garantizar que los valores medidos y procesados fueran consistentes con el comportamiento esperado.

2.8 Especificaciones técnicas del producto o servicio final

El horno de secado reacondicionado presenta las siguientes especificaciones técnicas, definidas en base a los ensayos de funcionamiento y a las características de sus componentes:

- Modelo base: DK-42 (estructura externa conservada y reacondicionada)
- Tipo de proceso: Secado por convección forzada
- Rango de temperatura operativa: 50 °C – 250 °C
- Temperatura máxima de seguridad: 300 °C (activación de paro de emergencia)
- Sensor de temperatura: Termocupla tipo K, longitud 200 mm, diámetro 6 mm, rosca ½ NPT, cabezal metálico, rango de operación hasta 1200 °C.
- Transmisor de señal: Transmisor Maxwell TT-500, entrada universal para termopar tipo K, salida analógica lineal 0–10 VDC, precisión ± 0.2 % FS, montaje tipo pastilla
- Controlador: PLC Siemens LOGO! 12/24RC con pantalla integrada
- Algoritmo de control: PI implementado en PLC
- Elemento calefactor: Resistencia eléctrica de potencia nominal 2 kW

- Actuación calefactora: Relé de estado sólido (SSR) 25 A, control PWM
- Sistema de ventilación: Motor ventilador AC, operación continua
- Alimentación eléctrica: 110 V AC – 60 Hz
- Fuente de control: Fuente de alimentación EBC 24 VDC, 2.5 A
- Interfaz de usuario: Pantalla integrada del PLC para visualización y ajuste de setpoint, mensajes de advertencia y valores en tiempo real
- Dimensiones externas: Según estructura original del DK-42 reacondicionado.

Estas especificaciones aseguran que el horno cumple con los requerimientos de seguridad, estabilidad térmica y facilidad de uso establecidos para su empleo en entornos académicos.

2.9 Consideraciones éticas y legales

Durante el desarrollo del proyecto se respetaron principios de sostenibilidad, reutilizando la carcasa del horno original para reducir desechos. Se procuró la selección de componentes con disponibilidad local y manuales técnicos accesibles, fomentando la replicabilidad. Además, se consideraron normas básicas de seguridad eléctrica y compatibilidad con estándares institucionales para el uso seguro en laboratorios educativos. No se utilizó información patentada ni se violaron derechos de autor en la construcción del sistema, garantizando el cumplimiento ético en cada etapa del diseño.

Capítulo 3

3.1 Resultados y análisis

Una vez implementadas las modificaciones al horno DK-42, se llevaron a cabo las pruebas experimentales destinadas a validar el desempeño térmico, la estabilidad del control y la seguridad eléctrica del sistema.

3.1.1 Resultados obtenidos

Figura 7

Horno reacondicionado

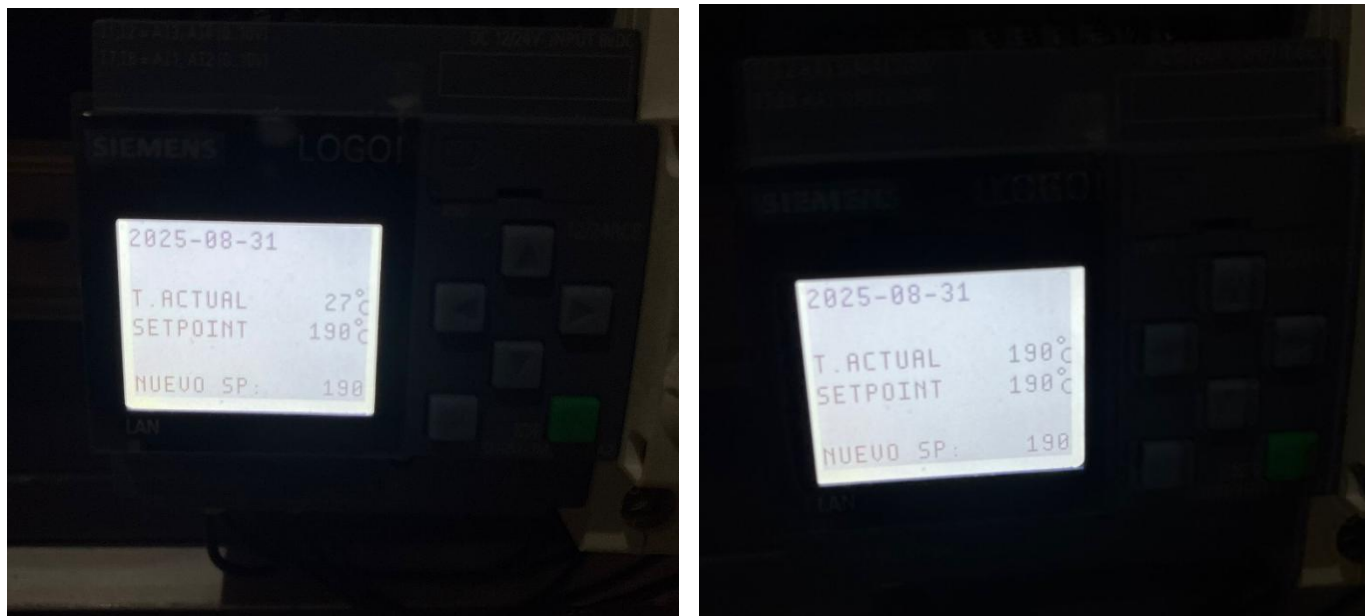


Como se observa en la **Figura 7** el reacondicionamiento incluyó la instalación del PLC Siemens LOGO!, resistencias calefactoras, termopar tipo K con transmisor de señal, reconexión

de terminales del ventilador para convección forzada y un sistema de protección eléctrica (breaker) montado sobre un riel DIN en la carcasa del horno.

Figura 8

Valores de temperatura durante pruebas.



Nota. La figura derecha muestra la temperatura inicial del horno al inicio de la prueba, la figura derecha; la temperatura final alcanzada.

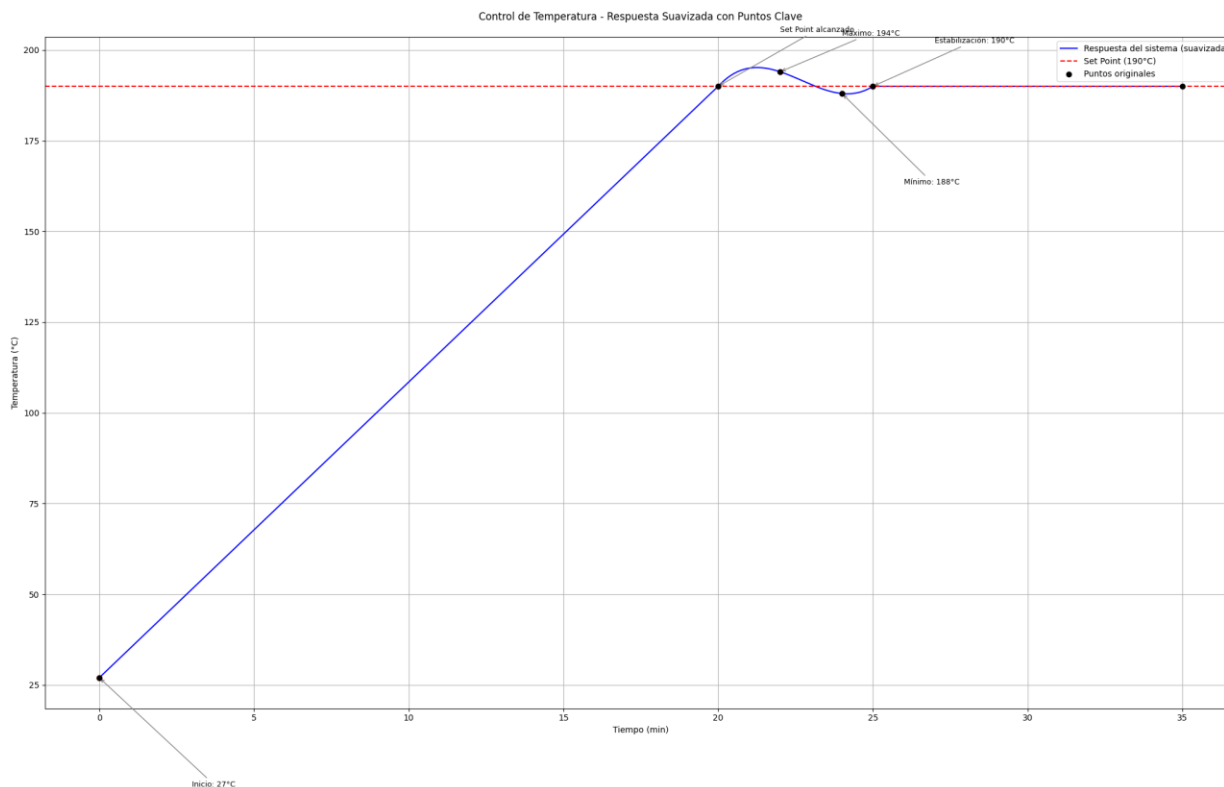
Las primeras pruebas se realizaron en condiciones de operación estándar, partiendo desde la temperatura ambiente del laboratorio (27 °C) hasta un valor de consigna o setpoint de 190 °C. El tiempo total de observación fue de 45 minutos, durante los cuales se registraron los valores de temperatura, mostrados en la **Figura 8**.

Los resultados mostraron que el horno alcanzó por primera vez el setpoint a los 20 minutos. Posteriormente, se registró un sobreimpulso máximo de 192 °C, ocurrido aproximadamente dos minutos después de haber alcanzado la consigna. Este sobreimpulso fue transitorio y se redujo de manera natural debido a la acción del control PI. A los 24 minutos, la temperatura descendió hasta un valor mínimo de 188 °C, estabilizándose en torno a los 190 °C a

partir del minuto 25. De esta forma, el tiempo de establecimiento final se determinó en 25 minutos.

Figura 9

Curva de estabilización, respuesta térmica del sistema.



La **Figura 9** muestra la gráfica de la respuesta térmica del sistema, donde se puede apreciar la tendencia ascendente de la temperatura, el sobreimpulso y la posterior estabilización en el valor de referencia.

Con base en estos resultados, se calcularon los principales parámetros de desempeño dinámico del sistema. El error en estado estacionario fue prácticamente nulo (0 °C), dado que el controlador mostró valores enteros en su display, aunque el sensor mantenía oscilaciones menores de $\pm 0,5$ °C. El sobreimpulso relativo fue de 2,10 %, calculado mediante la fórmula:

$$\text{overshoot} = ((194 - 190) / 190) * 100$$

$$\text{overshoot} = 2.10\%$$

Tabla 2

Parámetros de desempeño del horno reacondicionado

Parámetro	Valor obtenido
Temperatura inicial	27 °C
Temperatura de consigna	190 °C
Tiempo para alcanzar el setpoint	20 min
Sobreimpulso máximo	192 °C
Overshoot relativo	2,10 %
Mínimo tras sobreimpulso	188 °C
Tiempo de establecimiento	25 min
Error en estado estacionario	0 °C ($\pm 0,5$ °C)

La **Tabla 2** resume los parámetros obtenidos durante esta prueba.

Además de las pruebas de respuesta térmica, se realizaron evaluaciones comparativas con el sistema de control analógico previo. Este consistía en un regulador manual por perillas, sin retroalimentación automática, que generaba fluctuaciones significativas en la temperatura. Durante las pruebas históricas, se observaban desviaciones de hasta ± 5 °C en estado estacionario y tiempos de establecimiento superiores a 35 minutos. En contraste, el sistema digital reacondicionado logró reducir el error a prácticamente cero y mejorar en un 28 % el tiempo de estabilización, evidenciando una respuesta más eficiente y confiable.

En lo referente a la estabilidad, el sistema mostró un comportamiento robusto ante perturbaciones externas. Al abrir parcialmente la puerta del horno durante el proceso de

estabilización, la temperatura descendió momentáneamente en 5 °C, pero recuperó el setpoint en menos de 3 minutos. Este resultado confirma la capacidad del controlador PI para compensar variaciones de carga térmica sin comprometer el desempeño del sistema.

Por otro lado, se evaluó el desempeño de la convección forzada. El ventilador interno garantizó una distribución homogénea del aire caliente, reduciendo las diferencias de temperatura entre distintos puntos del horno.

En cuanto a la interfaz de usuario, las pruebas demostraron una mejora significativa en la facilidad de operación. El display del PLC permitió configurar rápidamente la temperatura deseada y el tiempo de operación, con validación automática de límites seguros (50 °C – 250 °C). Los usuarios pudieron monitorear la temperatura actual en tiempo real y verificar el estado de las resistencias y ventiladores.

3.1.2 Análisis de los resultados

El comportamiento térmico observado en el horno reacondicionado permitió validar la eficacia del rediseño eléctrico y de control. El proceso de calentamiento, que partió desde una temperatura ambiente de 27 °C hasta alcanzar el setpoint de 190 °C, presentó un tiempo de establecimiento de aproximadamente 25 minutos. Este valor, aunque relativamente elevado en comparación con hornos industriales de mayor potencia, se encuentra dentro de los parámetros aceptables para equipos de laboratorio de pequeña escala, cuyo diseño prioriza estabilidad y seguridad sobre rapidez. La respuesta evidenció un sobreimpulso del 2,10 %, considerado bajo para sistemas térmicos, donde se aceptan sobreimpulsos de hasta un 10 % sin comprometer la integridad del material sometido a secado.

El error en estado estable fue nulo en términos prácticos, dado que el PLC Siemens LOGO! reporta únicamente valores enteros en pantalla. Si bien esto implica una limitación en la

precisión de visualización, los registros internos y la linealidad del transmisor de señal aseguraron que la temperatura real se mantuviera dentro de una desviación máxima de $\pm 0,5$ °C. Este desempeño confirma que el algoritmo PI implementado fue suficiente para garantizar un control robusto, evitando oscilaciones prolongadas y permitiendo un comportamiento cercano al ideal.

Al comparar el nuevo sistema digital con el antiguo control analógico, se observaron ventajas claras. El sistema anterior carecía de capacidad de retroalimentación automática y dependía exclusivamente de ajustes manuales mediante perillas de regulación. Esto generaba tiempos de estabilización mucho más prolongados, variaciones de más del 5 °C en el estado estacionario y una notable susceptibilidad a perturbaciones externas, como cambios de carga térmica o apertura accidental de la puerta del horno. En contraste, el control PI digital compensó automáticamente estas perturbaciones, reduciendo de manera considerable la variabilidad de la temperatura y asegurando la reproducibilidad de los ensayos.

El análisis del tiempo de respuesta mostró que los 25 minutos necesarios para alcanzar el setpoint representaron un compromiso entre la inercia térmica del sistema y la capacidad de las resistencias instaladas. Si bien un tiempo menor habría sido deseable, reducirlo implicaría aumentar la potencia instalada, lo cual generaría mayores demandas eléctricas y riesgos de sobrecalentamiento. Por tanto, el tiempo obtenido refleja un balance adecuado entre eficiencia energética, seguridad y adaptabilidad a un entorno académico.

Desde el punto de vista de estabilidad, el sistema demostró ser consistente al mantener la temperatura dentro de un rango de ± 0.5 °C alrededor del setpoint, incluso bajo variaciones menores en el voltaje de alimentación. Esto resultó fundamental para garantizar que los procesos de secado realizados en el laboratorio no se vieran comprometidos por fluctuaciones externas. La

estabilidad alcanzada valida la pertinencia del diseño modular implementado, donde la separación entre los circuitos de potencia y control redujo significativamente las interferencias eléctricas.

La interfaz de usuario también representó un avance notable frente a la configuración original del horno. La pantalla integrada del PLC permitió no solo visualizar los valores de temperatura en tiempo real, sino también establecer setpoints de manera sencilla, validando automáticamente los límites operativos de 50 °C a 250 °C. Esta funcionalidad evitó errores en la configuración, incrementando la seguridad y reduciendo el riesgo de fallas por parámetros mal ingresados. Esta característica constituye un aporte relevante, pues facilita la interacción de estudiantes con conocimientos básicos en automatización sin comprometer la integridad del equipo.

En resumen, los resultados obtenidos en esta fase demostraron que el horno reacondicionado cumplió con los requerimientos planteados en términos de estabilidad, precisión, confiabilidad y seguridad. El sistema logró un control eficiente de la temperatura, redujo significativamente las oscilaciones frente al sistema analógico, mejoró la homogeneidad térmica mediante convección forzada y ofreció una interfaz amigable para el usuario.

3.2 Análisis de costos

El análisis económico del proyecto permitió determinar la viabilidad del reacondicionamiento del horno de secado modelo DK-42 en comparación con la adquisición de un equipo nuevo. Para ello se clasificaron los costos en: directos e indirectos. Esto con el fin de obtener una visión integral de los recursos empleados y proyectar la sostenibilidad financiera del sistema desarrollado.

En este punto, es importante aclarar que el análisis económico desarrollado no tuvo como objetivo calcular márgenes de ganancia ni puntos de equilibrio financiero, puesto que el horno reacondicionado no corresponde a un producto destinado a la comercialización. La finalidad del proyecto fue demostrar la viabilidad técnica y económica de extender la vida útil de un equipo existente para ponerlo nuevamente en funcionamiento dentro del laboratorio de la universidad.

Por tanto, el valor agregado no se mide en términos de utilidad monetaria sino en el aporte académico e investigativo que representa para la formación de estudiantes y el fortalecimiento de la infraestructura educativa.

3.2.1 Costos directos

Los costos directos corresponden a los componentes adquiridos específicamente para la implementación del sistema de control y reacondicionamiento del horno. Estos elementos son indispensables para el funcionamiento del equipo y constituyen la base material del proyecto.

Entre ellos se incluyen:

Tabla 3

Precio de mercado de los componentes eléctricos y de control

COMPONENTES	PRECIO
LOGO 8.4 PLC 12/24RCE ETHERNET 8ED (4EA)/4SD	\$175.95
12/24VDC/RELE	
FUENTE DE ALIMENTACION EBC 24VDC 2.5AMP	\$37.10
TERMOCUPLA TIPO K, L=20CM DIAM=6MM 1/2 NPT C/CABEZAL	\$48.00
TRASMISOR DE TEMP. TIPO PASTILLA INPUT UNIVERSAL	\$42.00
OUTPUT 0-10V MAXWELL TT-500	
TOTAL	303.05

3.2.2 Costos indirectos

Además de los componentes, se identificaron los costos indirectos asociados a la ejecución del proyecto. Estos no se reflejan directamente en el producto final, pero resultan necesarios para su desarrollo. Se consideraron:

- Mano de obra técnica, correspondiente al tiempo dedicado por los estudiantes, programación y pruebas del sistema.
- Herramientas y materiales de apoyo, como cables eléctricos, conectores, fusibles, relés de estado sólido y elementos de fijación.
- Gastos de energía eléctrica, vinculados al uso de infraestructura académica para el montaje y pruebas del sistema.

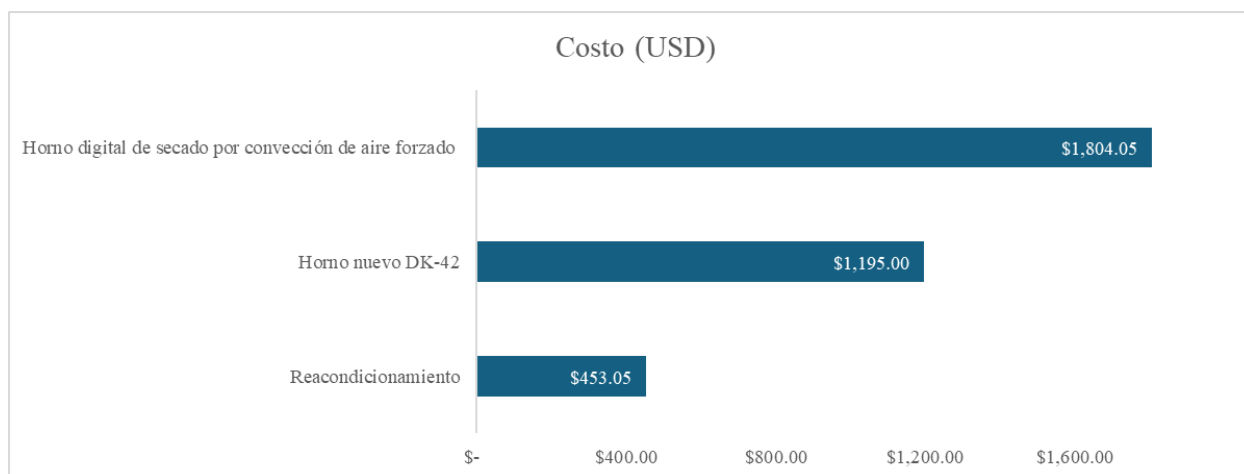
Aunque no se contabilizaron monetariamente en su totalidad debido a la naturaleza académica del proyecto, se estima que estos costos indirectos representaron un valor aproximado de USD 150, considerando el tiempo invertido y los insumos complementarios empleados.

3.2.3 Inversión total del proyecto

Sumando los costos directos e indirectos, la inversión global del reacondicionamiento ascendió a USD 453,05. Este valor refleja una alternativa económicamente accesible frente a la adquisición de un horno nuevo del mismo modelo e incluso un horno nuevo con control digital.

Figura 10

Diagrama de barras, comparación de costos.



La comparación entre las opciones de la **Figura 10** permite evidenciar el ahorro económico significativo del proyecto. Representando una reducción de aproximadamente al menos de un 62% de un horno DK-42 nuevo, sin sacrificar la confiabilidad, alcance funcional del sistema y además brindando un control moderno adaptado a hornos digitales actuales que ostentan un precio más elevado.

3.3 Viabilidad económica y aporte académico

La solución seleccionada demostró ser económicamente viable, ya que con una fracción del costo de un equipo nuevo se obtuvo un sistema con mejores características técnicas en términos de control, seguridad y aplicabilidad educativa. Además, la modularidad del diseño asegura que futuras expansiones puedan realizarse con costos adicionales moderados, maximizando la vida útil del equipo.

En consecuencia, la inversión realizada no solo se justificó en términos de ahorro inmediato, sino que también generó un impacto positivo a nivel académico, al brindar a los

estudiantes la oportunidad de interactuar con tecnologías de automatización modernas en un entorno real de laboratorio.

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

- Se logró diseñar un sistema de control automático de temperatura, empleando un PLC Siemens LOGO! 8.4 en conjunto con una termocupla tipo K y un transmisor de señal de 0–10 V. Este diseño permitió regular la temperatura del horno mediante un algoritmo PI y un módulo de modulación por ancho de pulso (PWM) hacia un relé de estado sólido, lo que posibilitó alcanzar un control estable, minimizar las oscilaciones y garantizar la seguridad del proceso con límites configurados de operación y paro. Además, la decisión de implementar un PLC en lugar de microcontroladores de bajo costo otorgó mayor robustez al sistema, brindando a los estudiantes la oportunidad de familiarizarse con tecnologías presentes en la industria real. Esto fortalece el aprendizaje práctico en asignaturas de control de procesos, al exponer a los usuarios a escenarios que simulan aplicaciones industriales, y refuerza la capacidad institucional de mantener equipos confiables que prolonguen su vida útil.
- Se implementó una interfaz de usuario haciendo uso de la pantalla integrada del PLC, la cual fue configurada para mostrar el valor de la temperatura actual, editar y validar el setpoint dentro del rango de operación permitido (50–250 °C), y desplegar mensajes de advertencia en caso de error. Esta interfaz, diseñada con navegación intuitiva a través de teclas físicas, permitió la configuración directa de parámetros sin necesidad de dispositivos externos, lo que facilitó la operación del sistema y la interacción de los estudiantes con un entorno seguro y amigable. La simplicidad de la interfaz permitió reducir la posibilidad de errores de operación, asegurando que incluso usuarios con experiencia limitada pudieran manejar el equipo sin dificultad. Con ello, se incrementó la

accesibilidad del horno y se generó un entorno más inclusivo para el aprendizaje práctico en automatización.

- Se integró el sistema completo de control y potencia, estructurando entradas analógicas desde sensores, procesamiento mediante lógica ladder en LOGO! Soft Comfort, y salidas digitales hacia resistencias calefactoras y ventiladores de convección. Esta integración no solo demostró la viabilidad técnica del reacondicionamiento, sino que también fortaleció las competencias de diseño de sistemas de automatización, al combinar hardware, software y cableado eléctrico en un entorno funcional. Asimismo, la inclusión de ventilación forzada mejoró la distribución térmica, logrando que las pruebas confirmaran una respuesta más homogénea frente a perturbaciones. Esta sinergia entre control y potencia asegura que el horno no solo cumpla su función principal, sino que también sirva como plataforma académica para la comprensión integral de sistemas automatizados.
- Se redactó un manual técnico que incluyó diagramas de bloques, esquemas eléctricos, descripción de la lógica de control y lineamientos de mantenimiento, lo que permitió consolidar el conocimiento generado durante el proyecto y dejar una guía clara y estructurada para los futuros usuarios del horno. Este manual mejoró la trazabilidad del trabajo y aseguró la correcta operación del sistema.
- El cuarto objetivo se alcanzó mediante la elaboración de documentación técnica detallada, que incluyó la descripción del diseño, la selección de componentes, los diagramas de control y las especificaciones técnicas. Este material constituye la base de un manual de operación y mantenimiento, lo que asegura la sostenibilidad del equipo a lo largo del tiempo y facilita su uso pedagógico en el laboratorio. Además, el nivel de

detalle de la documentación permite que futuras cohortes puedan replicar, modificar o escalar el proyecto hacia nuevos desarrollos, fomentando una cultura de innovación y continuidad dentro de la institución.

- Se desarrolló un análisis de costos detallado, diferenciando gastos directos, indirectos y de inversión, que permitió evidenciar la pertinencia del reacondicionamiento frente a la compra de un equipo nuevo. La inversión total ascendió a USD 453,05, lo que representó un ahorro aproximado del 62 % en comparación con la adquisición de un horno nuevo más sin embargo con características de un horno digital que en el mercado ronda precios de +1,500\$. Este resultado demuestra que es posible extender la vida útil de equipos con un costo reducido, fomentando la sostenibilidad financiera y alineándose con los principios de economía circular al evitar la generación de desechos tecnológicos.
- Se comprobó que el proyecto de reacondicionamiento del horno de secado por convección modelo DK-42 permitió validar la hipótesis de que la modernización de equipos obsoletos mediante la integración de tecnologías de automatización constituye una alternativa técnica y económicamente viable para entornos académicos. Los resultados experimentales mostraron que el sistema alcanzó un control de temperatura estable con un error en estado estacionario prácticamente nulo ($\pm 0,5$ °C), un sobreimpulso reducido del 2,10 % y un tiempo de establecimiento de 25 minutos. Estos valores evidencian un comportamiento robusto y confiable frente a variaciones de carga térmica, lo cual garantiza la reproducibilidad de los ensayos y consolida el aprendizaje práctico en control de procesos. Este desempeño, aunque menor al de hornos industriales de gran capacidad, resulta adecuado para el contexto académico, en el que la precisión y la seguridad son prioritarias frente a la velocidad de operación.

- Se fortaleció la seguridad del sistema al incorporar medidas como la protección contra sobrecarga eléctrica y la programación de un paro automático al alcanzar temperaturas críticas, en este caso 300 °C. Durante las pruebas estas funciones respondieron correctamente, garantizando que el equipo no se exponga a riesgos de sobrecalentamiento. Esta capacidad preventiva refleja una mejora considerable respecto al sistema analógico original, que carecía de mecanismos automáticos de protección. Con ello, se incrementó la confiabilidad del horno y se promovió una cultura de seguridad en el laboratorio, asegurando que las prácticas se realicen en condiciones controladas y con menor riesgo para los estudiantes y el equipo.
- Entre los aspectos relevantes se destacó la mejora en la homogeneidad térmica gracias al uso de ventilación forzada. Durante las pruebas experimentales, la apertura parcial de la puerta del horno provocó una caída momentánea de 5 °C, que fue compensada en menos de tres minutos, confirmando la capacidad del sistema para recuperarse frente a perturbaciones. Esta robustez en la respuesta consolida al horno como un recurso confiable en el laboratorio, capaz de simular condiciones reales de operación industrial.
- Se logró destacar que, en comparación con otros estudios de reacondicionamiento de equipos académicos, este proyecto sobresale por su enfoque en la sostenibilidad, el uso de un PLC industrial compacto y la reducción significativa de costos frente a la compra de equipos nuevos. Mientras que en algunos casos se opta por microcontroladores de bajo costo como Arduino o ESP32, la elección de un PLC refuerza la aplicabilidad del proyecto en entornos de mayor exigencia, brindando mayor durabilidad y escalabilidad. Esta decisión, aunque representó un mayor costo inicial, incrementó el valor académico del trabajo al acercar a los estudiantes a las tecnologías que encontrarán en la práctica

profesional, y permitió validar un modelo de reacondicionamiento que podría replicarse en otros equipos de la universidad.

- No obstante, también se identificaron limitaciones. El tiempo de establecimiento de 25 minutos, aunque aceptable para aplicaciones de laboratorio, es relativamente alto en comparación con hornos industriales de mayor potencia. Asimismo, la ausencia de sensores de humedad restringe la capacidad del horno a procesos de secado que dependan únicamente de la variable térmica, limitando su versatilidad en aplicaciones de bioprocesos avanzados o en ingeniería de alimentos.

4.1.2 Recomendaciones

El proyecto realizado permitió sentar las bases para la reactivación de un equipo de laboratorio con gran valor académico. No obstante, con el propósito de asegurar la durabilidad y la mejora continua del sistema, es necesario considerar una serie de recomendaciones orientadas a la consolidación técnica, el aprovechamiento pedagógico y el fortalecimiento institucional del horno.

En el ámbito técnico, se recomienda ampliar el rango de variables monitoreadas dentro del horno. Aunque en esta propuesta se priorizó la temperatura como variable de control, la integración de sensores de humedad relativa permitiría realizar procesos de secado más precisos y ajustados a la naturaleza de cada muestra. Esta mejora no solo diversificaría los usos del horno en bioprocesos y ciencias de los alimentos, sino que también abriría posibilidades para investigaciones en áreas como biotecnología, ingeniería química y farmacéutica. La inclusión de estas variables fortalecería el carácter multidisciplinario del equipo y potenciaría su utilidad en diferentes líneas de investigación.

Asimismo, sería conveniente evaluar el rendimiento energético del horno reacondicionado frente a hornos comerciales equivalentes. Establecer un sistema de registro del consumo eléctrico en cada ciclo de operación permitiría comprobar la eficiencia alcanzada y, al mismo tiempo, identificar oportunidades de optimización adicionales. Entre estas podrían considerarse la sustitución de resistencias calefactoras por modelos más eficientes, la implementación de un aislamiento térmico con materiales de menor conductividad, o la incorporación de modos de operación con ahorro de energía para procesos de larga duración. Con estas mejoras, el horno no solo mantendría su competitividad académica, sino que también se alinearía con políticas institucionales de sostenibilidad y reducción de la huella energética.

En cuanto a la seguridad, aunque el diseño actual contempla protecciones contra sobrecarga y un límite máximo de temperatura, se aconseja la incorporación de sistemas redundantes que refuercen la confiabilidad del equipo. La implementación de alarmas visuales y sonoras en caso de operación fuera de parámetros incrementaría la seguridad del usuario, especialmente en un entorno académico con estudiantes en formación. También sería recomendable añadir un paro de emergencia manual accesible desde el panel frontal, que permita interrumpir inmediatamente la operación en caso de situaciones imprevistas. Estas medidas adicionales fortalecerían la cultura de seguridad en el laboratorio y garantizarían la protección tanto de los usuarios como de la infraestructura.

Otra recomendación importante consiste en mantener actualizado el manual técnico y el plan de mantenimiento preventivo. Estos documentos deberían evolucionar con cada modificación del sistema, incluyendo no solo instrucciones de uso y limpieza, sino también guías para la reprogramación básica del PLC, la verificación de sensores y los procedimientos de sustitución de componentes. De esta manera, se asegura que el horno no pierda vigencia con el

paso del tiempo y se mantenga como un recurso pedagógico vigente para futuras cohortes.

Además, disponer de un manual actualizado reduce la curva de aprendizaje para los nuevos usuarios y garantiza que el equipo se use de manera estandarizada, evitando fallos por manipulación incorrecta.

Desde la perspectiva académica, se recomienda integrar el horno reacondicionado como un banco de pruebas en diversas asignaturas relacionadas con automatización, control de procesos, transferencia de calor y eficiencia energética. De esta forma, los estudiantes no solo lo utilizarían en prácticas de bioprocesos, sino también en proyectos multidisciplinarios que demanden interacción entre teoría y práctica. Este enfoque fortalecería el desarrollo de competencias técnicas y fomentaría el aprendizaje basado en problemas, al exponer a los estudiantes a retos reales que involucren la integración de sensores, programación de controladores y análisis de resultados experimentales.

A nivel institucional, se sugiere considerar la creación de un programa de reacondicionamiento de equipos dentro de la universidad. La experiencia adquirida en este proyecto demuestra que muchos dispositivos inactivos podrían ser revalorizados con intervenciones similares, lo que permitiría ampliar la infraestructura disponible en los laboratorios sin incurrir en gastos elevados. Esta iniciativa reforzaría el compromiso de la institución con la sostenibilidad y el aprovechamiento responsable de recursos, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible en materia de innovación y producción responsable. Al mismo tiempo, generaría un espacio de aprendizaje práctico donde los estudiantes puedan participar en la recuperación de equipos, aplicando sus conocimientos a problemas concretos de la universidad.

En cuanto a innovación, se recomienda explorar la integración del horno con tecnologías de monitoreo remoto e IoT. La incorporación de módulos de comunicación industrial permitiría registrar datos en tiempo real, generar históricos de temperatura y humedad o incluso controlar el equipo de manera remota desde un computador o dispositivo móvil. Este tipo de mejora abriría nuevas oportunidades de investigación en campos como el mantenimiento predictivo, la analítica de datos y la industria 4.0 aplicada a entornos académicos. Además, al exponer a los estudiantes a estas tecnologías, se incrementaría su preparación para los desafíos que enfrentarán en el sector productivo.

Respecto a líneas de investigación futura, el horno reacondicionado puede servir como base para el desarrollo e implementación de algoritmos de control más avanzados, tales como PID completo, control adaptativo, predictivo o incluso control difuso. Estos enfoques permitirían mejorar aún más la respuesta dinámica del sistema, reducir el tiempo de establecimiento y optimizar el consumo energético. Dado que se trata de un equipo de bajo costo en comparación con un horno industrial, representa una plataforma accesible para experimentar con nuevas metodologías sin comprometer grandes recursos financieros. Además, al haber sido diseñado dentro de la institución, abre la posibilidad de involucrar a estudiantes de distintas generaciones en procesos de mejora continua, consolidando un ciclo de innovación permanente.

Finalmente, se recomienda difundir los resultados del proyecto dentro y fuera de la institución. La publicación de artículos académicos, la participación en ferias tecnológicas y la inclusión del horno como caso de estudio en congresos estudiantiles permitirían compartir la experiencia y motivar a otras instituciones a replicar iniciativas similares. De esta forma, el impacto del trabajo trasciende el laboratorio, contribuyendo al desarrollo de una cultura de innovación y sostenibilidad en la ingeniería.

En síntesis, las recomendaciones propuestas buscan no solo prolongar la vida útil del horno reacondicionado, sino también maximizar su valor académico, técnico e institucional. La implementación de mejoras en monitoreo, seguridad, documentación, integración curricular y difusión garantizaría que el equipo continúe evolucionando y se mantenga como un recurso pedagógico y de investigación de gran utilidad para las próximas generaciones de estudiantes e investigadores.

Referencias

- Cómo medir la temperatura con sensores RTD. (2025, 6 abril). Soluciones de Adquisición de Datos (DAQ). <https://dewesoft.com/es/blog/medir-temperatura-con-sensores-rtd>,
- China-Gauges. (2023). Thermocouple Type K. Recuperado de <https://www.china-gauges.com/news/Thermocouple-Type-K.html>
- Dewesoft. (s. f.). Cómo medir la temperatura con sensores RTD. Recuperado de <https://dewesoft.com/es/blog/medir-temperatura-con-sensores-rtd>
- Fuji Electric. (s. f.). Sensor de temperatura PT100. Recuperado de <https://www.fujielectric.fr/es/tecnologias/sensor-de-temperatura-pt100/>
- Heatcon Sensors. (s. f.). Thermocouple Comparison – Types, Ranges, and Material Properties. Recuperado de <https://heatconsensors.com/thermocouple-comparison-type...>
- Infra-View. (s. f.). J Type Vs. K Type Thermocouple: The Difference Explained. Recuperado de <https://www.infra-view.com/j-type-vs-k-type-thermocouple-the-difference-explained/>
- JVTIA. (2022, 27 de abril). Features and Applications of Type K Thermocouples.
- TE Connectivity. (s. f.). Thermocouple Types. Recuperado de <https://www.te.com/en/products/sensors/temperature-sensors/resources/thermocouple-types.html>
- Wang, C., Pei, Y., Mu, Z., Fan, L., Kong, J., Tian, G., Miao, S., Meng, X., & Qiu, H. (2024). Simulation analysis of 3-D airflow and temperature uniformity of paddy in a laboratory drying oven. *Foods*, 13(21), 3466. <https://doi.org/10.3390/foods13213466>
- Pearce, J. M. (2013). Open-Source Lab: How to Build Your Own Hardware and Reduce Research Costs. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2012-0-02784-5>

Zhang, C., Anzalone, N. C., Faria, R. P., & Pearce, J. M. (2013). Open-Source 3D-Printable Optics equipment. PLoS ONE, 8(3), e59840.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0059840>

Harnessing Real-Time Data and Analytics in HMI Control Panels for Industrial Optimization- Shanghai Infracwin Energy Co., Ltd. (s. f.).
<https://www.infracwin.com/news/industry-news/harnessing-realtime-data-and-analytics-in-hmi-control-panels-for-industrial-optimization.html>

Stern, E. (2025, 4 abril). 7 benefits of integrating human-machine interfaces, historians - Plant Engineering. Plant Engineering. <https://www.plantengineering.com/articles/7-benefits-of-integrating-human-machine-interfaces-historians>

Staff, C. E. (2024, 10 noviembre). 7 benefits of integrating human-machine interfaces, historians. Control Engineering. <https://www.controleng.com/7-benefits-of-integrating-human-machine-interfaces-historians/>

Challaturu, M. K. (2025, 2 enero). Why are HMI panels used in industrial systems? | Key benefits explained. Indmall Automation. <https://www.indmallautomation.com/faq/why-are-hmi-panels-used-in-industrial-systems>

Kortier, S. (2017, mayo 25). Managing manufacturing with HMIs and the IIoT. Machine Design. <https://www.machinedesign.com/automation-iiot/article/21835547/managing-manufacturing-with-hmis-and-the-iiot>

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2006). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6th ed.). John Wiley & Sons.

Apéndice A

Tabla 1

Matriz de criterios ponderados

Criterio	Precisión	Costo	Implementación	Robustez	Interfaz	Aplicabilidad	$\sum+1$	Ponderación
Precisión	-	1	1	0.5	1	1	5.5	0.26
Costo	0	-	0	0	0.5	0.5	2	0.10
Implementación	0	1	-	0	1	1	4	0.19
Robustez	0.5	1	1	-	1	1	5.5	0.26
Interfaz	0	0.5	0	0	-	0.5	2	0.10
Aplicabilidad	0	0.5	0	0	0.5	-	2	0.10

La matriz general evidencia que los criterios más determinantes en la elección de la solución son precisión y robustez, ambos con un peso del 26 %, seguidos por la facilidad de implementación con un 19 %. Estos tres criterios representan más del 70 % de la ponderación total, lo que indica que la selección debe priorizar soluciones técnicamente confiables, estables y que no impliquen una complejidad excesiva en su instalación.

Por otro lado, costo, interfaz de usuario y aplicabilidad educativa tienen un peso menor (10 % cada uno), lo que sugiere que si bien son importantes, no son decisivos frente a la necesidad de un control preciso y una estructura robusta. En consecuencia, la estrategia de selección se orienta hacia soluciones industriales y profesionales, aunque impliquen un mayor costo, siempre que ofrezcan estabilidad y seguridad.

2.4.5 Matrices por cada criterio

a) Precisión

	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A (ON/OFF)	–	0	0	0	1	0.1
Solución B (Microcontrolador)	1	–	0	0.5	2.5	0.25
Solución C (MicroPLC + HMI)	1	1	–	1	4	0.4
Solución D (IoT)	1	0.5	0	–	2.5	0.25

La alternativa C (PLC + HMI) lidera con una ponderación de 0.40, lo que confirma que es la solución más adecuada para garantizar estabilidad térmica y control preciso mediante algoritmos PID industriales.

Las soluciones B (Microcontrolador) y D (IoT) obtienen 0.25 cada una, mostrando un desempeño aceptable, aunque dependiente de la correcta programación y calidad de los sensores, lo que las hace menos robustas que un PLC.

Por último, la solución A (ON/OFF) obtiene solo 0.10, evidenciando que este método básico no permite un control estable y genera oscilaciones, por lo que no es recomendable para prácticas que exijan reproducibilidad. En términos de precisión, la opción C es claramente prioritaria.

b) Costo

CRITERIO: COSTO						
	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A (ON/OFF)	–	0	0	0	1	0.1
Solución B (Microcontrolador)	0	–	0.5	0.5	2	0.2
Solución C (MicroPLC + HMI)	1	0.5	–	1	3.5	0.35
Solución D (IoT)	1	0.5	0	–	2.5	0.25

La evaluación muestra que la solución más económica es A (ON/OFF) con 0.10, seguida por B (Microcontrolador) con 0.20, lo que las hace viables en entornos con presupuesto limitado.

La opción D (IoT) obtiene 0.25, mientras que C (PLC + HMI) alcanza 0.35, posicionándose como la más costosa debido a la inversión en hardware industrial y una HMI profesional.

Si el presupuesto fuera la principal restricción, la opción A sería la más conveniente, aunque sacrifica funcionalidad. Sin embargo, dado que el criterio de costo tiene baja ponderación (10 %), se priorizarán soluciones con mejor rendimiento global ya que estas pueden justificar una inversión mayor si se obtiene valor académico y técnico a largo plazo.

c) Implementación

CRITERIO: IMPLEMENTACION						
	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A (ON/OFF)	–	1	1	1	4	0.4
Solución B (Microcontrolador)	0	–	0.5	0.5	2	0.2
Solución C (MicroPLC + HMI)	0	0.5	–	1	2.5	0.25
Solución D (IoT)	0	0.5	0	–	1.5	0.15

La solución A (ON/OFF) obtiene el puntaje más alto (0.40), destacando por su simplicidad en montaje y configuración.

La alternativa C (PLC + HMI) logra 0.25, ya que, aunque requiere programación básica, su entorno industrial reduce el riesgo de fallas durante la integración.

La solución B (Microcontrolador) tiene 0.20, debido a la necesidad de programación y calibración de sensores, mientras que D (IoT) se ubica última con 0.15, pues su conectividad y servicios en la nube aumentan la complejidad técnica.

Decisión: Si se priorizara la rapidez y simplicidad, la opción A sería preferida. No obstante, dado que la implementación tiene un peso intermedio (19 %), se puede optar por soluciones con mayor funcionalidad, aunque requieran más tiempo.

d) Robustez

CRITERIO: ROBUSTEZ						
	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A (ON/OFF)	–	0	0	0	1	0.1
Solución B (Microcontrolador)	1	–	0	0	2	0.2
Solución C (MicroPLC + HMI)	1	1	–	1	4	0.4
Solución D (IoT)	1	1	0	–	3	0.3

En este aspecto, la solución C (PLC + HMI) vuelve a liderar con 0.40, ya que ofrece componentes industriales diseñados para alta durabilidad y resistencia a fallas. La opción D (IoT) obtiene 0.30, gracias a la redundancia y escalabilidad de sus sistemas conectados. La solución B (Microcontrolador) alcanza 0.20, pero presenta limitaciones frente a entornos adversos o uso intensivo. Finalmente, la alternativa A (ON/OFF) queda con 0.10, mostrando baja confiabilidad a largo plazo.

e) Interfaz

CRITERIO: INTERFAZ						
	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A (ON/OFF)	–	0	0	0	1	0.1
Solución B (Microcontrolador)	1	–	0	0	2	0.2
Solución C (MicroPLC + HMI)	1	1	–	1	4	0.4
Solución D (IoT)	1	1	0	–	3	0.3

La alternativa C (MicroPLC + HMI) nuevamente obtiene la máxima ponderación (0.40), gracias a su pantalla táctil intuitiva y funciones gráficas que facilitan la operación. La opción D (IoT) sigue con 0.30, por la posibilidad de monitoreo remoto y aplicaciones móviles. La solución B (Microcontrolador) logra 0.20, ya que su interfaz se limita a pantallas básicas o LCD.

Por último, A (ON/OFF) obtiene 0.10, pues carece prácticamente de interfaz visual, limitándose a un control básico.

f) Aplicabilidad

CRITERIO: APLICABILIDAD						
	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A (ON/OFF)	–	0	0	0	1	0.1
Solución B (Microcontrolador)	1	–	0	0.5	2.5	0.25
Solución C (MicroPLC + HMI)	1	1	–	1	4	0.4
Solución D (IoT)	1	0.5	0	–	2.5	0.25

2.4.6 Tabla de conclusiones

CONCLUSION	precisi ón	costo	impleme ntación	robuste z	interfa z	aplicabi lidad	Σ	priori dad
Solución A (ON/OFF)	0.026	0.01	0.076	0.026	0.01	0.01	0.16	4
Solución B (Microcontrola dor)	0.065	0.02	0.038	0.052	0.02	0.025	0.22	3
Solución C (MicroPLC + HMI)	0.104	0.035	0.0475	0.104	0.04	0.04	0.37	1
Solución D (IoT)	0.065	0.025	0.0285	0.078	0.03	0.025	0.25	2

Apéndice B

Cálculo de espesor de la lana de vidrio

Se busca determinar el espesor de lana de vidrio requerido en las paredes del horno de secado por convección forzada, de manera que la temperatura de la superficie exceda un límite seguro al tacto. Para esto, denominaremos el espesor como t , considerando un límite de $T_{s, \text{máx}} = 45^\circ\text{C}$, con una temperatura ambiente del laboratorio es $T_\infty = 25^\circ\text{C}$.

El horno presenta dimensiones externas de $22.5'' \times 22.5'' \times 31.75''$. Aproximando su carcasa a un paralelepípedo, el área externa:

$$A_{\text{ext}} = 2(WD + WH + DH)$$

$$\text{Donde } W = D = 22.5'' = 0.5715\text{m}, H = 31.75'' = 0.80645\text{m}$$

$$A_{\text{ext}} = 2.50\text{m}^2$$

El cálculo se realiza mediante el modelo de resistencias térmicas en serie, descrito en *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (Incropera, DeWitt, Bergman & Lavine, 2006). El intercambio se modela con resistencias térmicas en serie: convección interna + conducción en el aislante + convección (y radiación) externa.

En régimen permanente, el flujo de calor a través de una pared plana con convección en ambas superficies se expresa como:

$$q'' = \frac{T_{\text{int}} - T_\infty}{\frac{1}{h_i A} + \frac{t}{kA} + \frac{1}{h_o A}}$$

Donde h_i y h_o son los coeficientes de convección internos y externos respectivamente, la k conductividad térmica del aislante con un valor de 0.040 W/mK y t el espesor. El efecto de radiación externa se incluyó mediante un coeficiente radiativo linealizado h_r , que se suma al coeficiente convectivo externo:

$$h_{o,ef} = h_o + h_r, \quad h_r = \varepsilon \sigma (T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty)$$

En cuanto a los coeficientes de convección, la literatura reporta que para aire en convección natural los valores típicos se encuentran entre 2–10 W/m²K, mientras que en convección forzada pueden variar entre 10–100 W/m²K dependiendo de la velocidad del flujo y las dimensiones del recinto (Incropera & DeWitt, 2006).

Dado que el horno analizado dispone de un ventilador interno que genera movimiento de aire en el volumen de secado, se seleccionó un valor representativo de $h_i = 15 \frac{W}{m^2K}$ adecuado para un flujo forzado de baja velocidad en una cámara de laboratorio. Por su parte, para la cara externa se consideró convección natural con $h_o = 5 \frac{W}{m^2K}$, a lo cual se adicionó el efecto de radiación superficial modelado con emisividad $\epsilon=0.8$ de la superficie metálica sin acabado mate. Además, considerando $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4}$, $T_s = 45^\circ C = 318.15K$, $T_\infty = 25^\circ C = 298.15K$

$$\text{Se tendría } h_r \approx 5.32 \frac{W}{m^2K}, \quad h_{o,ef} = 10.32 \frac{W}{m^2K}$$

Además, en la superficie externa:

$$q'' = h_{o,ef}(T_s - T_\infty)$$

Imponiendo $T_s = T_{s,max}$ despejamos espesor t:

$$t = k \left[\frac{T_{int} - T_\infty}{h_{o,ef}(T_{s,max} - T_\infty)} - \left(\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{o,ef}} \right) \right]$$

Para el caso base que $T_{s,max} = 45^\circ C$:

$$t = 0.040 \left[\frac{200 - 25}{10.32(20)} - \left(\frac{1}{15} + \frac{1}{10.32} \right) \right]$$

$$t \approx 0.0284m$$

Ahora procediendo con análisis de pérdidas térmicas, el flujo de calor superficial venía definido por:

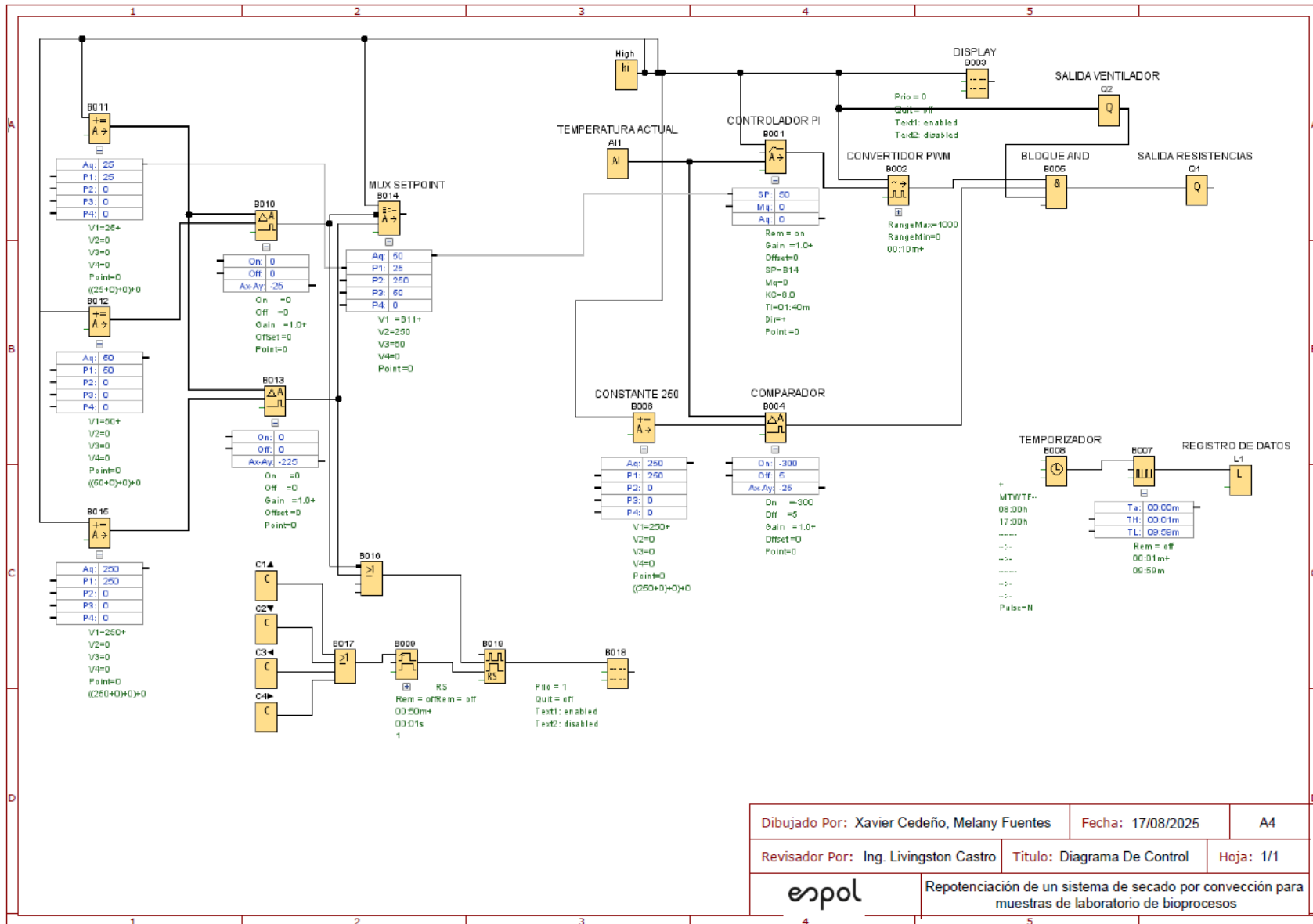
$$q'' = h_{o,ef}(T_s - T_\infty) = 10(45 - 25) \approx 206 \frac{W}{m^2}$$

La pérdida total resulta en:

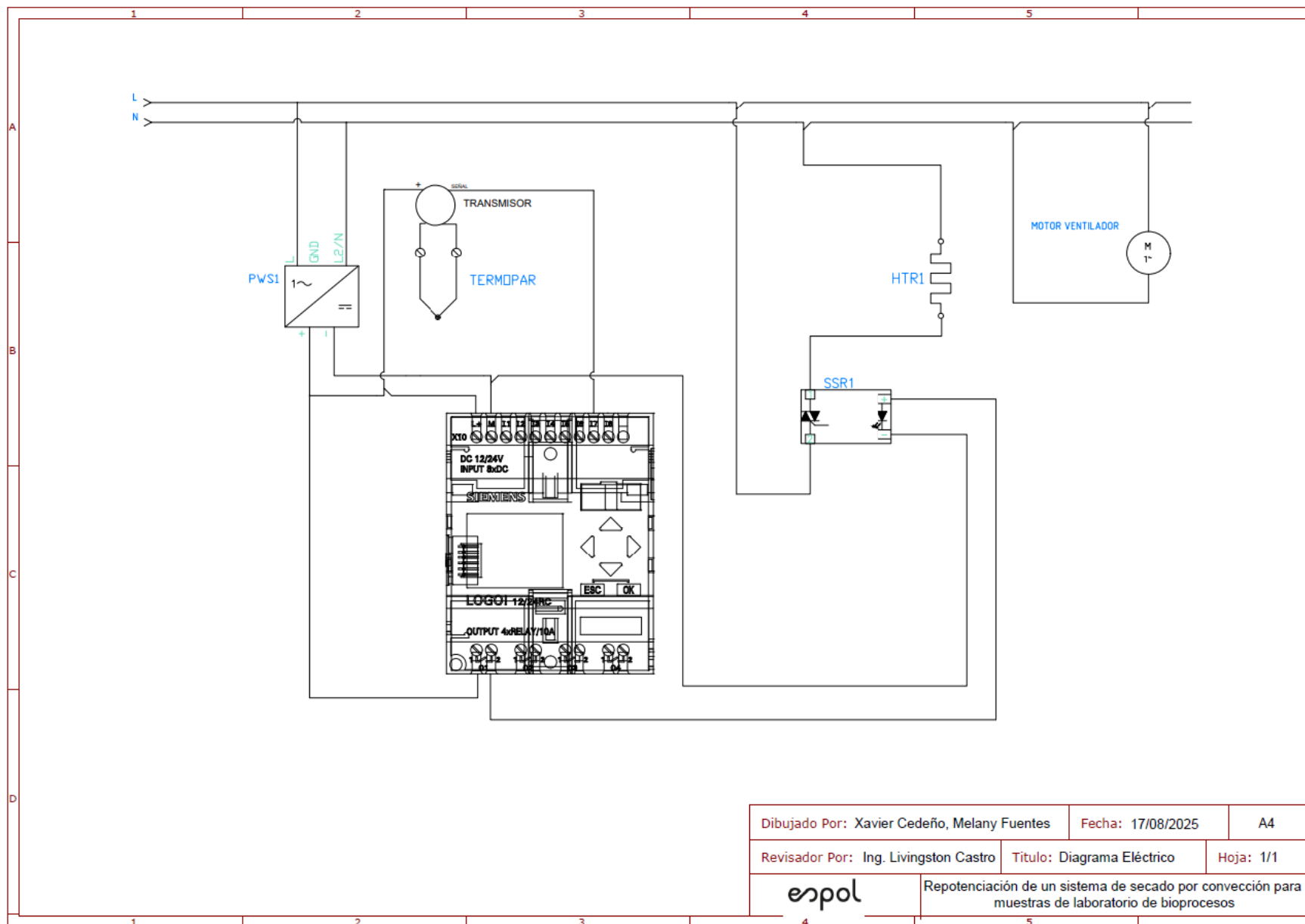
$$Q = q'' A_{ext} \approx 206 \times 2.50 \approx 0.52 kW$$

Con emisividad $\varepsilon=0.8$, el espesor requerido para mantener la superficie externa por debajo de 45 °C es de aproximadamente 28 mm de lana de vidrio. Un espesor comercial de 30 mm resulta adecuado para garantizar la seguridad y mantener pérdidas inferiores a 0.6 kW. En caso de exigir una superficie a 40 °C, se recomienda aumentar el espesor a unos 40 mm.

Apendice C



Apendice D



Manual de operación del Horno



Horno de secado por convección

Manual del Usuario

Versión: 1.0

Índice

Introducción	69
Alcance	69
Funcionalidad	69
Normas generales de seguridad	70
Seguridad eléctrica.....	70
Seguridad personal	71
Normas Específicas de Seguridad.....	71
Especificaciones técnicas	71
Instrucciones de operación.....	73
Listado de partes	75

Introducción

En este manual se describe el buen manejo y operación del horno de secado por convección, máquina destinada para su uso en el laboratorio de bioprocesos, generalmente se emplea para el secado de muestras.

Alcance

Este manual describe el funcionamiento del horno, sus características y partes que lo conforman.

Funcionalidad

El manual sirve como guía práctica para el buen manejo y operación del horno, también para dar a conocer los riesgos de su uso.



ADVERTENCIA: Lea atentamente el manual completo antes de intentar operar esta máquina. Asegúrese de prestar atención a todas las advertencias y precauciones a lo largo de este manual.

Normas generales de seguridad



ADVERTENCIA: Lea y entienda todas las instrucciones. La falta de seguimiento de las instrucciones listadas abajo puede resultar en una descarga eléctrica y/o lastimaduras personales serias.

GUARDE ESTAS INSTRUCCIONES

Seguridad eléctrica



ADVERTENCIA

- Si algún componente electrónico o eléctrico de la máquina se daña deberá ser reemplazado por personal autorizado.
- No modificar el sistema eléctrico ni la programación de ninguna forma.
- Sistema controlado por LOGO! 12-24VDC RCE.

- El equipo cuenta con un breaker que protege el sistema de control.

Seguridad personal

- Manténgase alerta, mientras el equipo está encendido, no tocar dentro del horno, podría ocasionar quemaduras graves.
- No opere la máquina cuando esté bajo la influencia de drogas, alcohol o medicación. Un momento de desatención puede tener como resultado una lastimadura seria.
- El operario no debe retirarse del sitio dejando el horno encendido y con la puerta abierta.

Normas Específicas de Seguridad

- El equipo debe ser operado por personal capacitado en el proceso.

Especificaciones técnicas

Modelo	DK-42
---------------	-------

Temperatura nominal	50-250 °C
Voltaje nominal	115 V AC
Frecuencia	60 Hz
Corriente nominal	9 A
Dimensión externa	22.5''W x 22.5''D x 31.75''H
Dimensión interna	15''W x 17''D x 16''H

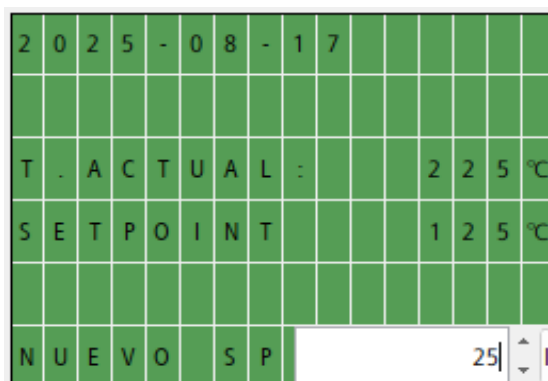
-
- La máquina se opera mediante un panel de control en la interfaz del LOGO! el cual acciona las resistencias calentadoras y el ventilador, provocando el calentamiento uniforme del interior del horno.

- Control es realizado por el accionamiento de las resistencias calentadoras, mediante un sensor de temperatura. La estructura cuenta con un aislamiento general de lana de vidrio.

Instrucciones de operación

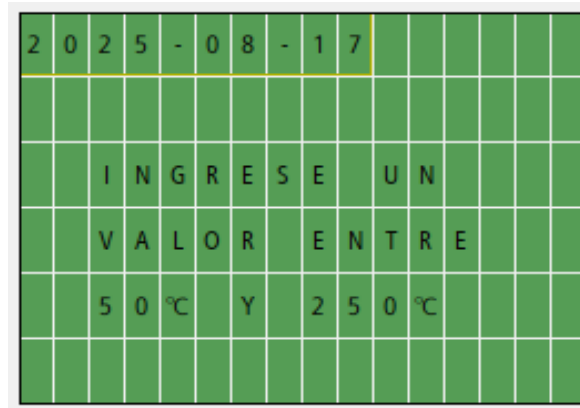
Para realizar el encendido:

1. Asegúrese de que el breaker esté en la posición **“ON”**
2. Para editar el set point, mantenga presionada la tecla “ESC” hasta que el cursor se posicione en la variable: “NUEVO SP”, y luego presione la tecla “OK”
3. Escriba un “Set Point” en la interfaz del logo, subiendo los valores con las teclas de cursor ($\leftarrow \uparrow \rightarrow \downarrow$):



4. Cuando ya esté cambiado el valor del SP, presione la letra “OK”

5. Asegúrese de que el valor ingresado esté entre 50 y 250, si elige un valor fuera de rango, el programa mostrará este mensaje:



6. Si esto pasa, el programa ajustará el set point al valor disponible más cercano, por ejemplo, si pone 20, se ajustará el valor a 50.
7. Una vez le aparezca el mensaje, debe presionar cualquier tecla del LOGO, para volver a la pantalla principal.

Listado de partes

1. LOGO! 8.4 12-24 VDC RCE
2. TERMOPAR TIPO K
3. FUENTE DE ALIMENTACIÓN 24V
4. BREAKER MONOPOLAR 2A
5. RELÉ ESTADO SÓLIDO