



Evaluación, mantenimiento y automatización del Horno Fishier Isotem Serie 300

Enríquez Villarroel, Raúl Andrés

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Sánchez Sánchez, Xavier Rolando PhD.

25 de marzo del 2022



Escrito sin tablas.pdf

Scanned on: 20:1 March 2, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	185
Words with Minor Changes	185
Paraphrased Words	86
Omitted Words	0



Firmado electrónicamente por:
**XAVIER ROLANDO
SANCHEZ SANCHEZ**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Evaluación, mantenimiento y automatización del Horno Fishier Isotem Serie 300**” fue realizado por el señor **Raúl Andrés Enríquez Villarroel** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para lo que sustente públicamente.

Sangolquí, 25 de marzo de 2022

Firma

Ing. Sánchez Sánchez Xavier Rolando PhD.

Director de trabajo de titulación

CI: 1712575826



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Raúl Andrés Enríquez Villarroel**, con cédula de identidad N°: 172504241-8, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"Evaluación, mantenimiento y automatización del Horno Fishier Isotem Serie 300"** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando debidamente las citas bibliográficas.

Sangolquí, 25 de marzo de 2022

Enríquez Villarroel Raúl Andrés

CI: 172504241-8



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, **Raúl Andrés Enríquez Villarroel**, con cédula de identidad N°: 172504241-8, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Evaluación, mantenimiento y automatización del Horno Fishier Isotem Serie 300”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 25 de marzo de 2022

Enríquez Villarroel Raúl Andrés

CI: 172504241-8

Dedicatoria

Dedico este trabajo de titulación a un futuro Andrés, porque entre el caos del mundo moderno, la vida acelerada que se tiene que llevar y las eventualidades que se presenten, tendré una contundente evidencia de que he podido alcanzar por mi mismo cosas que creía inalcanzables y me dará seguridad de que, si pude superar este desafío, podré superar cualquier otra eventualidad que se me presente.

Raúl Andrés Enríquez Villarroel

Agradecimiento

Agradezco a cada una de las personas que me extendieron su mano para realizar este proyecto, a Adrián, Sergio y Pablo, que supieron darme una guía desde su experiencia y conocimiento, gracias por su valioso tiempo que me ofrecieron para resolver mis dudas.

Agradezco a mi hermana Belén, a mis padres, y a mi familia por apoyarme durante toda mi carrera, por estar presente en cada resbalón y no permitirme desfallecer en momentos cruciales, les agradezco por el soporte emocional que me brindaron y especialmente a mis padres por el soporte económico y las facilidades que supieron darme para poder estar donde estoy.

Finalmente quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi club de oratoria y debate, por darme la oportunidad de resurgir de lo más profundo, por darme una nueva esperanza en esta carrera, a Anthony y Alisson que sin ellos nada de esto hubiese sido posible.

Raúl Andrés Enríquez Villarroel

Índice General

Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Índice de tablas	12
Índice de figuras	14
Índice de ecuaciones	16
Nomenclatura	17
Resumen	20
Abstract	21
Parte I - Introducción	22
Titulo del proyecto	22
Definición del problema	22
Antecedentes	22
Hornos de convección para laboratorio	22
Horno "FISHER ISOTEMP®300 SERIES MODEL 338F"	29
Trabajos relacionados	30
Justificación e importancia	31
Justificación	31

Importancia	32
Objetivos	32
Objetivo general	32
Objetivos específicos	32
Alcance	33
Parte II - Marco teórico	34
Principios de funcionamiento	34
Principio eléctrico	34
Efecto Joule	36
Principios térmicos	38
Convección	38
Instrumentación para medición de temperatura	40
Automatización y control	43
Acciones de control	44
Control ON - OFF	44
Control PID	45
Hardware para automatización y control de procesos	46
Arduino	46
Relé de estado sólido	47
Mantenimiento	48
Mantenimiento preventivo	48

Mantenimiento modificativo	49
Parte III - Desarrollo	50
Diseño de pruebas para caracterización del horno	50
Protocolo de pruebas - caracterización del proceso de calentamiento y enfriamiento del aire	52
Prueba de calentamiento secuencial	52
Prueba de calentamiento continuo	53
Prueba de enfriamiento continuo	54
Obtención y tabulación de datos	55
Análisis de datos	56
Análisis del fenómeno físico en la cámara principal del horno	60
Desarrollo del modelo matemático	60
Análisis de la función de temperatura	62
Análisis de coeficientes	63
Corrección del modelo matemático	66
Análisis del fenómeno de enfriamiento del aire	66
Análisis de la función de temperatura	67
Ajuste por mínimos cuadrados	70
Estimación del coeficiente de corrección	71
Fase I de mantenimiento - Aplicación de actividades de mantenimiento preventivo	73
Actividades clave de mantenimiento	75
Actividades de mantenimiento según las partes del equipo	77

Fase II de mantenimiento - Implementación de sistema de control como manteni-	
miento modificativo	85
Diseño del sistema de control	85
Instrumentos utilizados en el sistema	86
Diseño del circuito eléctrico	88
Diseño, impresión y montaje en placa PCB	88
Programación del algoritmo de control y manejo de la interfaz	91
Diseño de la interfaz	92
Protocolo de pruebas II - Pruebas de funcionamiento del sistema de control . . .	94
Prueba de calentamiento secuencial	94
Prueba de calentamiento continuo	94
Prueba de enfriamiento continuo	95
Análisis y comparación de datos	96
Análisis de costos	102
Conclusiones y recomendaciones	104
Conclusiones	104
Sobre la caracterización del horno	104
Sobre el mantenimiento	106
Sobre el sistema de control	106
Recomendaciones	107
Parte IV - Referencias	109
Parte V - Anexos	113

Índice de tablas

Tabla 1	Comparación de características de tipos de sensores de temperatura	42
Tabla 2	Variables medibles en el proceso del horno.	51
Tabla 3	Ejemplo de tabla de datos para calentamiento secuencial.	53
Tabla 4	Ejemplo de tabla de datos para calentamiento continuo.	54
Tabla 5	Ejemplo de tabla de datos para registro de variables eléctricas . .	54
Tabla 6	Ejemplo de tabla de datos para enfriamiento continuo.	55
Tabla 7	Medidas estadísticas de los datos mostrados en la <i>Figura 13</i> en estado estable	56
Tabla 8	Características relevantes del equipo	75
Tabla 9	Desarrollo de actividades de mantenimiento según las partes del equipo	77
Tabla 10	Parámetros de diseño	85
Tabla 11	Análisis estadístico de los datos mostrados en la <i>Figura 31</i> en estado estable	97
Tabla 12	Cuadro de costos directos	102
Tabla 13	Remuneración a profesionales y a estudiante	103
Tabla 14	Costos indirectos	103

Índice de figuras

Figura 1	Ejemplos de calentadores de serpentín o cable	24
Figura 2	Ejemplos de calentadores de tira	25
Figura 3	Ejemplos de calentadores tubulares	25
Figura 4	Ilustración de ventilador radial con anillo guía de entrada	27
Figura 5	Ilustración de ventiladores axiales	28
Figura 6	Esquema de sección transversal de un ventilador de flujo cruzado	28
Figura 7	Elemento calefactor bobinado calentado por efecto Joule	37
Figura 8	Diagrama de control con retroalimentación	43
Figura 9	Gráfico del comportamiento del error en el control ON - OFF	44
Figura 10	Placa Arduino UNO	46
Figura 11	Ejemplo de relé de estado sólido de la marca SIEMENS	47
Figura 12	Circuito del relé de estado sólido de la marca SIEMENS	48
Figura 13	Curva Temperatura - Tiempo para prueba de calentamiento secuen- cial	56
Figura 14	Curva Temperatura - Tiempo para prueba de calentamiento continuo	57
Figura 15	Variables eléctricas	58
Figura 16	Curva Temperatura - Tiempo para prueba de enfriamiento continuo	59
Figura 17	Esquema del horno y su aporte en un balance energético al calen- tamiento	60
Figura 18	Comportamiento de la función de temperatura al variar los coefi- cientes.	63

Figura 19	Forma de la función conseguida por el modelo matemático vs datos tomados en el calentamiento	65
Figura 20	Esquema del horno y su aporte en un balance energético al enfriamiento	66
Figura 21	Forma de la función conseguida por el modelo matemático vs datos tomados en el enfriamiento	69
Figura 22	Forma de la función conseguida por el ajuste vs datos tomados en el calentamiento	71
Figura 23	Forma del modelo corregido vs datos tomados en el calentamiento	73
Figura 24	Horno “FISHER ISOTEMP®300 SERIES MODEL 338F”	74
Figura 25	Diseño de placa PCB	88
Figura 26	Impresión del diseño en la placa PCB	89
Figura 27	Impresión del diseño en la placa PCB	89
Figura 28	Impresión del diseño en la placa PCB	90
Figura 29	Placa PCB con instrumentos montados	91
Figura 30	Páginas de la interfaz	93
Figura 31	Curva Temperatura - Tiempo para prueba de calentamiento secuencial con sistema de control	96
Figura 32	Curva Temperatura - Tiempo para prueba de calentamiento continuo con sistema de control	98
Figura 33	Variables eléctricas con el sistema de control	99
Figura 34	Curva Temperatura - Tiempo para prueba de enfriamiento continuo con sistema de control	100

Índice de ecuaciones

Ecuación 1	Definición de potencia eléctrica	34
Ecuación 2	Función sinusoidal de voltaje alterno y corriente alterna	35
Ecuación 3	Potencia eléctrica instantánea en función del voltaje alterno y corriente alterna	35
Ecuación 4	Potencia eléctrica instantánea para circuitos puramente resistivos	35
Ecuación 5	Definición de potencia eléctrica media	35
Ecuación 6	Potencia eléctrica media para circuitos puramente resistivos . . .	36
Ecuación 7	Efecto joule de calentamiento resistivo	37
Ecuación 8	Flujo de calor por convección	38
Ecuación 9	Flujo de calor por convección	39
Ecuación 10	Número de Prandtl	39
Ecuación 11	Número de Reynolds	39
Ecuación 12	Número de Nusselt	40
Ecuación 13	Correlación de Nusselt para flujo laminar en placa plana	40
Ecuación 14	Correlación de Nusselt para flujo turbulento en placa plana	40
Ecuación 14	Expresión matemática de la acción derivativa	45
Ecuación 15	Forma del balance de energía aplicado al volumen de control para el calentamiento del aire.	61
Ecuación 16	Ampliación del balance de energía para el calentamiento del aire con todos los términos.	61
Ecuación 17	Función de temperatura transitoria del aire para el calentamiento.	62

Ecuación 18	Forma de la función de temperatura transitoria del aire para el fenómeno de calentamiento.	62
Ecuación 19	Función de temperatura transitoria del aire al calentamiento con valores numéricos.	65
Ecuación 20	Forma del balance de energía aplicado al volumen de control para el enfriamiento del aire.	67
Ecuación 21	Ampliación del balance de energía para el enfriamiento del aire con todos los términos.	67
Ecuación 22	Función de temperatura transitoria del aire para el enfriamiento	67
Ecuación 23	Forma de la función de temperatura transitoria del aire para el fenómeno de enfriamiento.	67
Ecuación 24	Función de temperatura transitoria del aire al enfriamiento con valores numéricos.	68
Ecuación 25	Desarrollo de la linealización de la <i>Ecuación 18</i>	70
Ecuación 26	Ecuación matricial para cálculo de coeficientes β	70
Ecuación 27	Función de temperatura transitoria del aire al calentamiento por mínimos cuadrados.	71
Ecuación 28	Inclusión del coeficiente de corrección al coeficiente B	72
Ecuación 29	Función de temperatura corregida del aire al calentamiento con valores numéricos.	72
Ecuación 30	Modelo corregido para el calentamiento del aire	101
Ecuación 31	Modelo corregido para el enfriamiento del aire	101

Nomenclatura

Términos

V	Voltaje	V
I	Corriente	A
R	Resistencia	Ω
T	Temperatura	$^{\circ}C$
t	Tiempo	s
E	Energía	J
q	Tasa de transferencia de calor	W
q''	Flujo de calor	W/m^2
η	Eficiencia	$adim$
P	Potencia	W
h	Coeficiente de transferencia de calor	$W/(m^2 \cdot K)$
H	Entalpía específica	J/kg
k	Conductividad térmica	$W/(m \cdot K)$
Pr	Número de Prandtl	$adim$
Re	Número de Reynolds	$adim$
Nu	Número de Nusselt	$adim$
ν	Viscosidad cinemática	m^2/s
μ	Viscosidad dinámica	$Pa \cdot s$
α	Difusividad térmica	m^2/s
ρ	Densidad	kg/m^3
v	Velocidad	m/s

c_p	Calor específico a presión constante	$J/(kg \cdot K)$
L	Longitud característica	m
U_{sens}	Energía sensible	J
sd	desviación estandar	
U_A	Coefficiente global de transferencia de calor	W/K
\mathcal{V}	Volumen de la cámara principal del horno	m^3
A	Área de la cámara principal del horno	m^2
\mathcal{L}	Longitud de la cámara principal del horno	m
\mathcal{H}	Altura de la cámara principal del horno	m
\mathcal{W}	Ancho de la cámara principal del horno	m
Θ	Temperatura en exceso	$^{\circ}C$
χ	Coefficiente de corrección	<i>adim</i>

Superíndices

x^E ... eléctrica

x^T ... térmica

x^M ... mecánica

\bar{x} ... medio/a

Subíndices

x_{max}	... máximo
x_c	... de convección
x_k	... de conducción
$x_{\text{serp}} \sim \text{serp}$... del serpentín de calentamiento
x_{∞}	... del aire
x_{st}	... de estado estable
x_{sp}	... set point
x_{in}	... de entrada
x_{out}	... de salida
x_g	... generada
x_{sist}	... del sistema

Resumen

El horno “FISHER ISOTEMP®300 SERIES MODEL 338F” es un equipo perteneciente al laboratorio de Ciencias de Materiales el cual poseía un sistema de control de temperatura obsoleto, no se contaba con documentación referencial, no se conocía sus características técnicas y no se ha realizado un mantenimiento apropiado desde que se lo adquirió. En este trabajo se modernizó el horno implementando un sistema de control automatizado, el cual controla la temperatura mediante un relé de estado sólido, un sensor de temperatura PT100 y un circuito diseñado con un microcontrolador Arduino MEGA 2560; se realizaron actividades de mantenimiento correctivo y se planteó un plan de mantenimiento preventivo además de un manual de usuario del equipo el cual posee una guía de uso del sistema, consideraciones de seguridad y un detalle de las características técnicas del horno con curvas características de calentamiento y enfriamiento del aire. Se realizó además una caracterización de: el proceso de estabilización de temperatura, el proceso transitorio de calentamiento y el proceso transitorio de enfriamiento mediante modelos matemáticos que describe dichos fenómenos apoyado de la comparación con un ajuste por mínimos cuadrados para refinar la precisión de las funciones de temperatura obtenidas de los mismos, las cuales describen el comportamiento del aire adecuadamente.

Palabras clave:

- **MANTENIMIENTO**
- **SISTEMA DE CONTROL**
- **MODELO MATEMÁTICO**
- **AJUSTE POR MÍNIMOS CUADRADOS**

Abstract

The “FISHER ISOTEMP®300 SERIES MODEL 338F” oven is a device that belongs to the Materials Sciences laboratory which had an obsolete temperature control system, it didn't have reference documentation, its technical characteristics were unknown and a proper maintenance has not been carried out since it was acquired. In this work, the oven was modernized by implementing an automated control system, which controls the temperature through a solid state relay, a PT100 temperature sensor and a circuit designed with an Arduino MEGA 2560 microcontroller; corrective maintenance activities were done and a preventive maintenance plan was proposed, as well as a user manual for the equipment, which has a user guide for the system, safety considerations and a detail of the technical characteristics of the oven with air heating and cooling curves. A characterization of: the steady state temperature process, the transient heating process and the transient cooling process was also carried out through mathematical models that describe these phenomena supported by the comparison with a least-squares curve fitting method to refine the precision of the obtained temperature functions, which describe the air behavior appropriately.

Key words:

- **MAINTENANCE**

- **CONTROL SYSTEM**

- **MATHEMATICAL MODEL**

- **LEAST-SQUARES CURVE FITTING METHOD**

Parte I

Introducción

Titulo del proyecto

Evaluación, mantenimiento y automatización del horno “FISHER ISOTEMP®300 SERIES MODEL 338F”

Definición del problema

Falta de información, obsolescencia del sistema de control de temperatura y necesidad de mantenimiento del horno de convección “FISHER ISOTEMP®300 SERIES MODEL 338F”

Antecedentes

Hornos de convección para laboratorio

Los hornos de convección son equipos que funcionan mediante un elemento que se calienta a través de una fuente de energía¹ y a su vez calienta el aire al rededor, el aire recircula por convección y el tipo de convección define la clase de horno (CISLAB, 2022).

(CISLAB, 2022) clasifica los hornos de convección 2 tipos principales: hornos de convección natural² funcionan sin aire forzado, el elemento de calentamiento se sitúa en

¹La fuente de energía generalmente es eléctrica, puede ser de corriente alterna o de corriente continua.

²También son llamados hornos de gravedad

la parte inferior del horno, el aire caliente asciende y produce una circulación de forma natural; y, hornos de convección forzada, pueden ser hornos verticales u horizontales, ambos tienen un ventilador que fuerza el aire que entra para su circulación, un horno de convección forzada vertical tiene el elemento de calentamiento y el ventilador en la parte inferior; y, un horno de convección forzada horizontal los tiene a un costado.

Los hornos de convección para laboratorio poseen los siguientes sistemas:

- **Sistema de calentamiento:** El sistema de calentamiento para hornos eléctricos consta de un elemento resistivo por el cual pasa corriente; la potencia suministrada se transforma en calor por efecto Joule y este se transfiere al aire al rededor del elemento aumentando su temperatura.
- **Sistema de flujo de aire:** Este sistema consta de un motor eléctrico y un ventilador el cual fuerza el aire que ha sido calentado haciéndolo circular en el interior del horno; este sistema puede o no ser implementado dependiendo del tipo de horno.
- **Sistema de control de temperatura:** El control de temperatura se puede realizar con varios instrumentos, los hornos más antiguos utilizan termostatos, siendo una forma electromecánica de controlar el paso de corriente como un interruptor, los hornos más actuales usan controladores electrónicos como controles PID (Proportional Integral Derivative) en su forma más simple o PLCs (Programmable Logic Controller) en su forma más compleja.

Los elementos de calentamiento son muy diversos y se aplican en un sinnúmero de dispositivos, con el avance de la tecnología incluso han aumentado su nivel de complejidad para aplicaciones específicas dentro de la industria.(Tormec, 2002).

En hornos de convección de laboratorio se pueden implementar los calentadores clasificados según (Tempco, 1972), que se muestran en la *Figura 1*, *Figura 2* y *Figura 3*:

- **Calentadores de serpentín o cable:** La flexibilidad del cable facilita la aplicación en equipos diversos como en calentadores de gas o aire, calentadores de tubería o equipos de laboratorio.

Figura 1

Ejemplos de calentadores de serpentín o cable



(a)



(b)



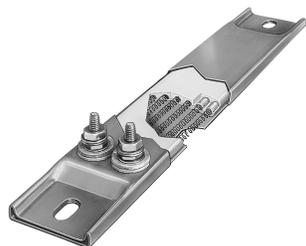
(c)

Nota: (a) Bulk Round Heater Cable, (b) Mightyband™ Coil Heaters, (c) Tempco-Pak Cable Heaters; Tomado de (Tempco, 1972)

- **Calentadores de tira:** Usados en calentamiento de superficies de tanques o en hornos industriales.

Figura 2

Ejemplos de calentadores de tira



(a)



(b)

Nota: (a) Bulk Round Heater Cable, (b) Mightyband™ Coil Heaters; Tomado de (Tempco, 1972)

- **Calentadores tubulares:** Adaptables a cualquier aplicacion, generalmente usado en hornos de cocina, hornos secadores, bañeras, entre otros.

Figura 3

Ejemplos de calentadores tubulares



(a)



(b)

Nota: (a) Calentadores tubulares con aletas, (b) Calentadores tubulares; Tomado de (Tempco, 1972)

Otros tipos de elementos de calentamiento que propone (Tempco, 1972) son:

- Calentadores de banda
- Calentadores de cartucho
- Calentadores empotrados
- Calentadores de fibra cerámica
- Calentadores de tambor
- Calentadores encerrados:
- Calentadores flexibles
- Calentadores infrarrojos
- Calentadores de proceso
- Calentadores de cubierta
- Calentadores de tanques

Los sistemas de flujo de aire tienen 2 componentes principales: el motor eléctrico y el ventilador. El motor eléctrico para la implementación en un horno, generalmente no es de alta potencia ya que no se requiere el movimiento de una carga muy alta, solamente de un ventilador para la circulación de aire.

(WEG, 2020) describe algunas consideraciones importantes que se deben evaluar para implementar motores en una planta: los monofásicos tienen limitación de potencia mientras que los trifásicos limitan el rendimiento y el par suministrado, la frecuencia

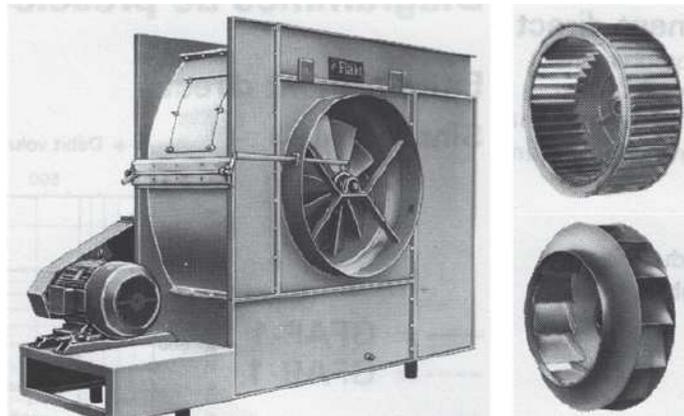
de trabajo afecta a la velocidad de operación del motor, el IP define el grado de protección contra cuerpos extraños y el aislamiento térmico define la temperatura máxima que soporta.

Existen 3 tipos de ventiladores según (Dick, 2015):

- **Ventiladores radiales:** Desplazan el aire admitido en dirección radial a la geometría del ventilador, están compuestos por un rotor con álabes curvadas hacia adelante o hacia atrás en una voluta. Los álabes curvados hacia atrás son destinadas para un incremento de presión y los curvados hacia adelante son destinadas para un aumento de energía cinética, se muestra una ilustración de este tipo en la *Figura 4*.

Figura 4

Ilustración de ventilador radial con anillo guía de entrada

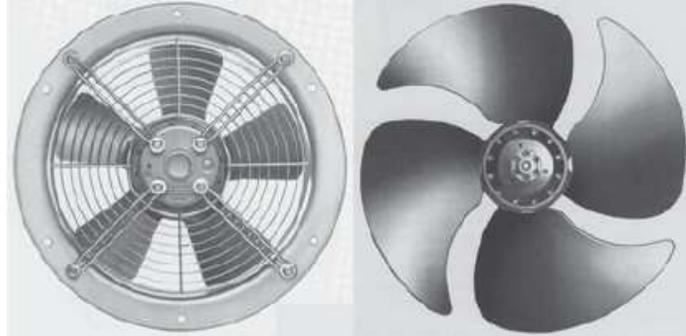


Nota: Tomado de (Dick, 2015)

- **Ventiladores axiales:** Desplazan el aire admitido en dirección axial a la geometría del ventilador, las álabes tienen forma de perfil aerodinámico, se muestra una ilustración de este tipo en la *Figura 5*.

Figura 5

Ilustración de ventiladores axiales

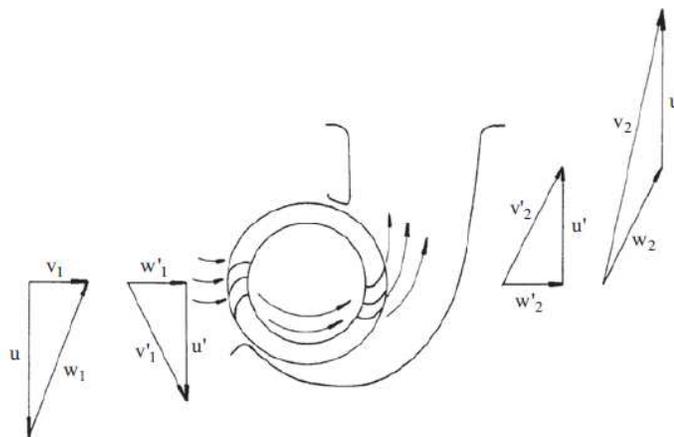


Nota: Tomado de (Dick, 2015)

- Ventiladores de flujo cruzado:** En estos ventiladores el aire pasa por el rotor 2 veces, esto se muestra en la *Figura 6*, la forma del estator determina los lados de succión y descarga, este tipo de ventiladores se pueden implementar en aplicaciones de baja potencia.

Figura 6

Esquema de sección transversal de un ventilador de flujo cruzado



Nota: Tomado de (Dick, 2015)

El sistema de control de temperatura para un horno puede ser de 2 tipos generales según (Tempco, 1972):

- **Electromecánicos:** El controlador electromecánico de temperatura más común es el termostato, puede ser un termostato con sistema bimetálico, sistema de activación por gas encerrado y por líquido encerrado.(Dunn, 2005)
- **Electrónicos:** Se pueden subdividir en controladores ON/OFF, los cuales a través de un sensor de temperatura envían una señal a un relé para que el sistema abra y cierre el paso de corriente hacia el sistema de calentamiento; y, controladores PID, que pueden predecir el comportamiento de calentamiento a través de dispositivos electrónicos (McMillan, 2011)

Horno “FISHER ISOTEMP®300 SERIES MODEL 338F”

Este horno puede ser clasificado como un horno de convección forzada horizontal de corriente alterna, con un sistema de calentamiento resistivo con un serpentín de calentamiento de 40Ω , un sistema de control por termostato electromecánico de gas accionado manualmente por una perilla, un motor eléctrico monofásico de $1/5hp$ y un ventilador centrífugo con álabes curvados hacia atrás como sistema de flujo de aire.

Este horno fue recibido en condiciones operativas, sin documentación, las partes muestran claramente su uso y los componentes eléctricos no muestran daños aparentes.

Trabajos relacionados

- «Automatización del horno autoclave de secado de materiales compuestos del Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana-CIDFAE». (Suárez Cañizares, 2019)

Enlace: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/20837>

- «Automatización del horno autoclave para pruebas y ensayos de materiales compuestos empleados en reparaciones estructurales del avión A-29B Super Tucano de la Fuerza Aérea Ecuatoriana» (Peñañiel Pérez, 2021)

Enlace: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/25631>

- «Diseño, construcción e implementación de un sistema de control digital para el secado de bloques prensados y otros derivados de bambú, mediante la automatización de un horno para BIGBAMBOO S.A.» (Jurado Robayo & Mosquera Gavilánez, 2021)

Enlace: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/6317>

- «Diseño e Implementación de un Sistema para Automatización de Dos Hornos para Tratamiento Térmico pertenecientes al Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla del Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional» (Herrera García, 2015)

Enlace: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10535>

- «Diseño y reconstrucción del control de temperatura de un horno con calentamiento eléctrico» (Dután Rodríguez, 2000)

Enlace: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11755>

- «Diseño e implementación de un sistema de control automático para seis hornos del Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Escuela Politécnica Nacional» (De La Vega Pardo & Enríquez Lozano, 2015)

Enlace: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11521>

- «Convection automated logic oven control». (Boyer & Eke, 1998)

DOI: [0.1109/28.663464](https://doi.org/10.1109/28.663464)

- «Diseño de un sistema de control de temperatura» (Betancour y col., 1970)

Enlace: <http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/taee:congreso-2006-1116/S3F04.pdf>

Justificación e importancia

Justificación

Es indispensable realizar mantenimiento a equipos de uso recurrente, tener conocimiento del sistema de funcionamiento y disponer de la documentación respectiva como un plan de mantenimiento y un manual de usuario para garantizar un correcto uso y una extensión de la vida útil de los componentes del mismo.

Se pretende cumplir este cometido con este horno a través de: realizar un mantenimiento modificativo, implementar un sistema de control de temperatura electrónico automatizado para la realización de tratamientos térmicos y caracterizar el mismo a través de un sistema de pruebas; y, el modelamiento del proceso térmico.

Importancia

La importancia de este proyecto radica en el uso adecuado de este horno como recurso brindado por la universidad para el desarrollo académico de sus estudiantes, se van a mitigar los fallos que puede tener el equipo o sus componentes mediante la adecuación y modernización del mismo, así se mantendrá funcional por un periodo de tiempo determinado, siendo aprovechable de una forma efectiva para motivos académicos.

Objetivos

Objetivo general

Modernizar el horno "FISHER ISOTEMP®300 SERIES MODEL 338F" del laboratorio de Ciencia de Materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Objetivos específicos

- Diseñar un plan de mantenimiento del equipo.
- Caracterizar el horno mediante un sistema de pruebas y el modelamiento del proceso térmico.
- Diseñar e implementar un sistema de control automatizado de calentamiento del horno.

Alcance

Se establece dentro de este proyecto la puesta en servicio del horno "FISHER ISOTEMP®300 SERIES MODEL 338F" para su uso académico, facilitando el proceso de ensayos y tratamientos térmicos mediante el control temporal de secuencias escalón de temperatura que se puede programar en el sistema de control automatizado que se va a implementar y elaborar documentación referencial con información del horno y el sistema implementado.

Parte II

Marco teórico

Principios de funcionamiento

El horno tratado en este proyecto funciona bajo principios eléctricos aplicados en el sistema de calentamiento y bajo principios térmicos aplicados en la distribución de calor en el aire.

Principio eléctrico

La potencia eléctrica es definida en la *Ecuación 1*.³

$$P^E = VI \quad (1)$$

Para circuitos de corriente alterna hay que considerar varios factores importantes. (Nilsson & Riedel, 2005) menciona que la característica de la corriente alterna es que tanto el voltaje alterno V como la corriente alterna I es generada en una onda sinusoidal; esta forma de onda está descrita como se muestra en la *Ecuación 2*.

$$V(t) = V_{max} \cos(\omega t + \theta_v) \quad ; \quad I(t) = I_{max} \cos(\omega t + \theta_i) \quad (2)$$

³También es llamada potencia instantánea ya que la operación resulta en un valor que se produce en un instante t considerando corriente alterna.

Realizando la operación algebraica-trigonométrica al incluir la *Ecuación 2* en la *Ecuación 1* se obtiene la siguiente expresión mostrada en la *Ecuación 3*

$$P^E = \frac{V_{max}I_{max}}{2} \cos(\theta_v - \theta_i) + \frac{V_{max}I_{max}}{2} \cos(\theta_v - \theta_i) \cos(2\omega t) - \frac{V_{max}I_{max}}{2} \sin(\theta_v - \theta_i) \sin(2\omega t) \quad (3)$$

Para circuitos puramente resistivos (Nilsson & Riedel, 2005) menciona que la corriente está en fase con el voltaje por lo que $\theta_v = \theta_i$, entonces la *Ecuación 3* se reduce a la expresión mostrada en la *Ecuación 4*

$$P^E = \frac{V_{max}I_{max}}{2} + \frac{V_{max}I_{max}}{2} \cos(2\omega t) \quad (4)$$

En la *Ecuación 5* se define la potencia media, en conjunto con los valores efectivos de voltaje y corriente. No es práctico calcular potencia siendo esta dependiente del tiempo en una forma sinusoidal; (Floyd, 2007) afirma que el valor efectivo o rms (root mean square) de un voltaje sinusoidal es una medida del efecto de calentamiento de una carga conectada a una fuente, este valor es el que mide un voltímetro común.

$$\bar{P}^E = \frac{1}{\tau} \int_{t_o}^{t_o+\tau} P^E dt \quad (5)$$

Al resolver la integral que resulta de introducir la *Ecuación 4* en la *Ecuación 5*, se tiene que $P_m^{E} = \frac{V_{max}I_{max}}{2}$, si a esta expresión la arreglamos de la forma $\frac{V_{max}I_{max}}{2} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$ se infiere que la potencia eléctrica para un circuito puramente resistivo es la multiplicación de los valores efectivos de voltaje y corriente como se muestra en la *Ecuación 6*; a esta ecuación se la conoce como potencia efectiva.

$$\bar{P}^E = V_{rms}I_{rms} \quad (6)$$

Efecto Joule

(Floyd, 2007) afirma que cuando circula corriente a través de una resistencia, las colisiones de los electrones producen calor a consecuencia de la conversión de la energía eléctrica, la cantidad de potencia disipada depende de la cantidad de resistencia y de corriente .

Una referencia histórica sobre la investigación experimental de James Prescott Joule es la investigación realizada por (de Andrade Martins, 2020) y menciona que mediante varios experimentos en alambres metálicos, Joule concluyó que el calor producido por la corriente aplicada en el material es directamente proporcional a: la resistencia eléctrica de dicho material, al cuadrado de la corriente que lo atraviesa y al tiempo en el cual la corriente fluye por el material.

Joule quiso generalizar esta ley aplicándola también a electrolitos, a este fenómeno lo llamó calentamiento resistivo y se lo atribuyó como efecto de Joule.

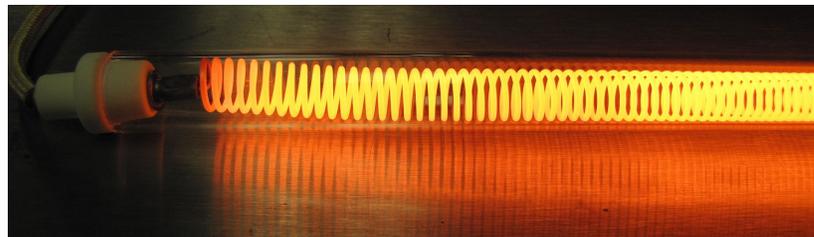
Dada la afirmación de Joule, la potencia eléctrica suministrada a un elemento resistivo en un intervalo de tiempo se transforma en calor, considerando pérdidas como en todo sistema no ideal se puede incluir un término de eficiencia η en el producto final mostrado en la *Ecuación 7*.

$$q = \eta \bar{P}^E = \eta V_{rms} I_{rms} \quad (7)$$

En la *Figura 7* se muestra un elemento calefactor similar al serpentín de calentamiento con el que trabaja el horno tratado en este proyecto.

Figura 7

Elemento calefactor bobinado calentado por efecto Joule



Nota: Tomado de https://en.wikipedia.org/wiki/Joule_heating

Principios térmicos

Convección

El fenómeno de convección está compuesto esencialmente por 2 mecanismos: la difusión térmica⁴ del fluido en contacto con una superficie y el movimiento macroscópico de un fluido. (Kreith y col., 2011)

(Incropera y col., 2011) afirma que la forma de la ecuación de flujo de calor por convección es la que se muestra en la *Ecuación 8*, esta expresión es dependiente del área de contacto.

$$q_c'' = \bar{h}_c(T_s - T_\infty) \quad (8)$$

La ley de enfriamiento de Newton se refiere a la de la tasa de transferencia de calor que se produce por convección la cual se expresa como $q_c = \bar{h}_c A_s (T_s - T_\infty)$ esta resulta de integrar la *Ecuación 8* sobre un área.

Si se considera un balance de energía en la superficie por la que pasa el fluido, según (Kreith y col., 2011) se tiene que la conducción en la superficie debe ser igual a la convección en el fluido como se muestra en la *Ecuación 9*

$$q_k'' = -k \left(\frac{\partial T}{\partial Y} \right) \Big|_{y=0} = \bar{h}_c (T_s - T_\infty) \quad (9)$$

⁴Transferencia de energía cinética por el movimiento molecular aleatorio que se transforma en calor. (Incropera y col., 2011)

Al realizar un análisis adimensional a las ecuaciones de las capas límite y el balance de energía en la superficie del material sujeto a convección, (Incropera y col., 2011) y (Kreith y col., 2011) muestran que 3 parámetros adimensionales importantes que aparecen.

- **Número de Pradtl:** Relaciona la velocidad de difusión de la cantidad de movimiento con la velocidad de difusión de calor, este número aparece al adimensionalizar la ecuación de la capa límite térmica y se muestra en la *Ecuación 10*

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (10)$$

- **Número de Reynolds:** Relaciona las fuerzas inerciales de un fluido con sus fuerzas viscosas, este número aparece al adimensionalizar la ecuación de la capa límite de velocidad y se muestra en la *Ecuación 11*

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{u L}{\nu} \quad (11)$$

- **Número de Nusselt:** Relaciona la transferencia de calor por conducción con la transferencia de calor por convección, este número aparece al adimensionalizar la ecuación *Ecuación 9* de balance de energía y se muestra en la *Ecuación 12*

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}_c L}{k} \quad (12)$$

(Incropera y col., 2011) menciona que para el cálculo de coeficientes de convección de forma experimental se pueden usar varias correlaciones de Nusselt que dependen de las condiciones del problema, algunas que nos serán útiles se listan a continuación:

Correlación de Nusselt para flujo laminar en placa plana $\overline{Nu} = 0.453Re^{1/2}Pr^{1/3}$

(13)

Correlación de Nusselt para flujo turbulento en placa plana $\overline{Nu} = 0.0308Re^{4/5}Pr^{1/3}$

(14)

Instrumentación para medición de temperatura

(Dunn, 2005) clasifica a los instrumentos de medición de temperatura en las siguientes categorías.

- Expansión de un material que de una indicación visual, de presión o un cambio dimensional.
- Cambio en la resistencia eléctrica.
- Cambio en las características de un semiconductor.
- Voltaje generado por materiales disimiles.

- Energía radiada.

En esta sección nos centraremos en los dispositivos con materiales que cambian su resistencia eléctrica con la temperatura y los que generan un voltaje por sus materiales disimiles. Estos son los más usados, hasta un 99 % en la industria de procesos según (McMillan, 2011).

Los dispositivos que cambian su resistencia eléctrica con la temperatura se llaman RTD (Resistance Temperature Devices), (Dunn, 2005) los caracteriza como películas metálicas o alambres resistivos enrollados que son sellados en materiales compuestos cerámicos, estos dispositivos pueden ser usados en un rango de $-170^{\circ}C$ a $780^{\circ}C$.

Los dispositivos que generan un voltaje por materiales disimiles son llamados termocuplas, según (Dunn, 2005) 2 materiales disimiles se juntan por ambos extremos formando un circuito, ambas juntas deben estar a diferente temperatura, esta diferencia de temperatura genera una diferencia de voltaje muy pequeña⁵.

El tipo de termocupla está definido por los tipos de materiales por los que están formados y esto caracteriza el rango de medida.

Los RTDs tienen características superiores a las termocuplas como mayor sensibilidad, repetibilidad, menor desplazamiento de cero, entre otros como lo menciona (McMillan, 2011), se puede observar la cuantificación de esta comparación en la *Tabla 1*

⁵Efecto Seebeck

Tabla 1

Comparación de características de tipos de sensores de temperatura

Criterio	Termocupla	RTD de platino	Termistor
Repetibilidad ($^{\circ}C$)	1 - 8	0.02 - 0.5	0.1 - 1
Desplazamiento de 0 ($^{\circ}C$)	1 - 20	0.01 - 0.1	0.01 - 1
Sensibilidad ($^{\circ}C$)	0.05	0.001	0.0001
Rango de temperatura ($^{\circ}C$)	-200 - 2000	-200 - 850	-100 - 300
Señal de salida (V)	0 - 0.06	1 - 6	1 - 3
Potencia (W) 100Ω	1.6×10^{-7}	4×10^{-2}	8×10^{-1}
Diámetro mínimo (mm)	0.4	2	0.4

Nota: Tomado de (McMillan, 2011)

Para poder implementar este tipo de sensores en un sistema de control se necesitan acondicionadores de señal los cuales pueden convertir la señal en términos de la variable a medir, amplificar la señal cuando esta es muy pequeña o filtrar la señal de ruidos.

Para estos sensores de temperatura (maxim-integrated, 2010) brinda módulos acondicionadores de señal aplicables para termocuplas o RTDs.

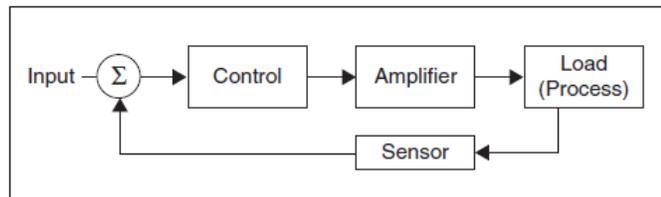
- **MAX6675:** Convertidor digital con compensación de junta fría para termocuplas tipo K.
- **MAX31865:** Convertidor digital para RTDs, maneja RTDs desde 100Ω a 1000Ω a $0^{\circ}C$ (PT100 a PT1000)

Automatización y control

(Lamb, 2013) afirma que los sistemas de control generalmente se realizan mediante sistemas con retroalimentación o de lazo cerrado como se lo representa en la *Figura 8*

Figura 8

Diagrama de control con retroalimentación



Nota: Tomado de (Lamb, 2013)

Los controladores se pueden clasificar como no lineales y lineales según (Valdivia Miranda, 2012).

- **No lineales:** implican una relación limitada entre la acción de control y el error⁶, como un control ON - OFF
- **Lineales:** tienen una relación directa entre la acción de control y el error, como un control PID.

⁶Diferencia entre el set point y la medición

Acciones de control

Control ON - OFF

El control ON - OFF es el tipo más sencillo de controlador, la variable de control solo puede asumir 2 valores, un máximo y un mínimo (Visioli, 2006).

Este tipo de controlador, por su característica no lineal, no se puede analizar mediante funciones de transferencia ya que la variable manipulada no puede ser variada de forma continua.

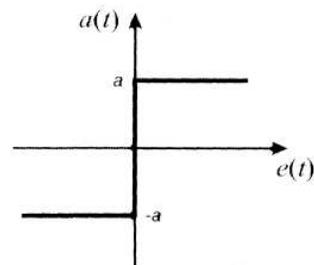
(Valdivia Miranda, 2012) menciona que estos controladores son útiles para aplicaciones en las que las oscilaciones no provoquen problemas en el elemento de control ni en el sistema como tal.

En la *Figura 9* se muestra un esquema con el comportamiento del error en este tipo de controlador.

Figura 9

Gráfico del comportamiento del error en el control ON - OFF

$$a(t) = \begin{cases} +a & \text{para } e(t) > 0 \\ -a & \text{para } e(t) < 0 \end{cases}$$



Nota: Tomado de (Valdivia Miranda, 2012)

Control PID

Los controladores PID⁷ (Proporcional Integral Derivativo) son controladores de lazo cerrado, (Lamb, 2013) los describe como sistemas en los cuales un sensor monitorea el proceso de la variable a medir, esta medición es digitalizada en valores numéricos los cuales son comparados con el setpoint definido, se calcula el error y se manipula la variable que mide el sensor para que se reduzca el error, así cerrando el lazo de control.

(Visioli, 2006) describe las 3 acciones del control PID de la siguiente forma:

- **Acción Proporcional:** Esta acción se encarga de incrementar el cambio de la variable de control proporcionalmente al error de control en un instante t .
- **Acción integral:** En base al registro de los errores de control pasado, esta acción permite reducir a 0 el error en estado estable cuando se llega al setpoint.
- **Acción derivativa:** Esta acción, a diferencia de la proporcional e integral, se basa en los valores futuros del error de control, esta acción produce una medida de la tasa de cambio la cual previene que la variable de control se exceda del setpoint.

⁷Son los sistemas de control que se han empleado mayormente en los procesos industriales según (O'Dwyer, 2006).

Hardware para automatización y control de procesos

Arduino

Figura 10

Placa Arduino UNO



Nota: Tomado de <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3/>

Arduino es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software fáciles de usar, la placa se programa enviando un conjunto de instrucciones al microcontrolador desde su computador. Para hacerlo, utiliza el lenguaje de programación Arduino basado en Wiring y el Software Arduino (IDE), basado en Processing.(Arduino, 2021)

Este sistema es el que se ha utilizado comúnmente para proyectos electrónicos debido a su facilidad de uso, accesibilidad y bajo costo, la placa Arduino UNO se muestra en la *Figura 10*.

Varios módulos acondicionadores de señal para sensores de temperatura son amigables con Arduino, proveyendo librerías para facilitar el uso del módulo sin necesidad de programación compleja dentro del entorno de trabajo.(Arduino, 2021)

Relé de estado sólido

Figura 11

Ejemplo de relé de estado sólido de la marca SIEMENS



Nota: Tomado de (Manesis & Nikolakopoulos, 2018)

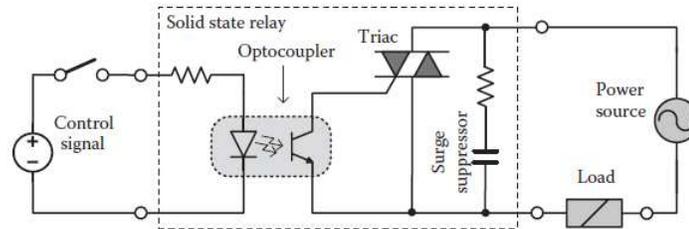
(Manesis & Nikolakopoulos, 2018) define a un relé de estado sólido (SSR) como un dispositivo electrónico sin contactos mecánicos capaz de conmutar cargas AC o DC, como elementos de calentamiento; los SSRs proveen una conmutación ON - OFF de alta velocidad o de alta frecuencia y generan bajo ruido.

En la *Figura 11* se muestra un ejemplo de este dispositivo, según (Manesis & Nikolakopoulos, 2018) este dispositivo funciona de la siguiente forma: la señal de control se aplica a un LED, La luz; o su radiación infraroja, es detectada por un fototransistor que activa un triac, este enciende la corriente que pasa hacia la carga desde una fuente externa, la señal de control puede activar rápidamente el sistema.

En la *Figura 12* se muestra un esquema del circuito de funcionamiento de este dispositivo.

Figura 12

Circuito del relé de estado sólido de la marca SIEMENS



Nota: Tomado de (Manesis & Nikolakopoulos, 2018)

Mantenimiento

(Medrano Márquez y col., 2017) define el mantenimiento como toda acción eficaz que se ejecuta para conservar los aspectos operativos en importantes de un elemento⁸. La importancia del mantenimiento radica en asegurar la disponibilidad de los elementos mencionados ya que de estos dependen que una planta se conserve operativa en condiciones óptimas.

Mantenimiento preventivo

El mantenimiento preventivo es un procedimiento de evaluación que previene la ocurrencia de fallas en un elemento, según (Medrano Márquez y col., 2017) sus actividades principales son: Limpieza, lubricación, cambio programado de piezas, ajustes en el equipo.

⁸Estos elementos pueden ser equipos, edificios, instalaciones, vehículos, entre otros, en este caso tratamos con un equipo

Para aplicar este mantenimiento se debe elaborar un plan anticipado con las actividades a realizarse detalladas con su periodicidad.

Los componentes de un plan de mantenimiento preventivo, referidos de (Medrano Márquez y col., 2017), son:

- Régimen de control (por frecuencia o por condición de estado).
- Partes y subpartes del equipo incluidas.
- Actividades de mantenimiento para cada parte y subparte.
- La especialidad de quien realiza la actividad.
- La prioridad de la actividad.
- Cronograma con imagenes de las partes críticas a inspeccionar.
- Criterios de revisión y métodos a realizar para cada caso.

El régimen de control puede ajustarse conforme el historial del equipo o de la experiencia del personal de mantenimiento.

Mantenimiento modificativo

(Muñoz Abella, 2020) define el mantenimiento modificativo como un procedimiento que pretende eliminar la causa de un fallo a través de: sustitución de materiales o partes, modificación de disposición de las piezas de un equipo, cambios en el diseño e una instalación y cualquier actividad que implique un cambio físico de un sistema.

Este tipo de mantenimiento es un subtipo dentro del mantenimiento preventivo.

Parte III

Desarrollo

Diseño de pruebas para caracterización del horno

Dada la falta de documentación del horno con el que se va a trabajar, se propone una planificación donde se detallan una serie de pruebas para determinar el estado inicial, los principios de funcionamiento, las variables necesarias para la automatización y un enfoque para una planificación de mantenimiento.

Para diseñar un sistema de pruebas o experimentos es importante identificar las condiciones de operación, por ende las variables implicadas en el proceso. (Gutiérrez Pulido & de la Vara Salazar, 2012).

En base a una inspección general del horno se identificaron las siguientes características:

- El horno trabaja con una conexión de corriente alterna de 220(V) monofásico.
- El sistema de calentamiento consta únicamente de un serpentín de calentamiento en una sección diferente a la cámara principal del horno y un ventilador centrífugo que fuerza el aire caliente a dicha cámara.
- El control de temperatura se efectúa mediante una perilla que controla dos termostatos acoplados mecánicamente.
- No existe ningún control de voltaje o de corriente variable para el control de temperatura.

- Mientras el termostato no desconecte el circuito, el serpentín de calentamiento recibe constantemente un voltaje de $220(V)$

Bajo este análisis se infiere que, para una caracterización correcta, se requiere evaluar el proceso de calentamiento del aire en la cámara principal del horno, evaluar el proceso de calentamiento del serpentín, medir la resistencia eléctrica del serpentín y evaluar si esta varía con respecto a la temperatura.

En la *Tabla 2* se detallan las variables identificadas del proceso de calentamiento que realiza el horno.

Tabla 2

Variables medibles en el proceso del horno.

V	Voltaje suministrado
I	Corriente producida
R_{serp}^E	Resistencia eléctrica del serpentín de calentamiento
T_{∞}	Temperatura del aire

(USBR, s.f.) plantea un procedimiento para calibración de hornos de convección que llegan hasta $300^{\circ}C$, por lo que este procedimiento que se detalla a continuación fue adaptado de la sección *11. Report*, del documento mencionado anteriormente, según las necesidades para caracterizar este horno.

Protocolo de pruebas I - caracterización del proceso de calentamiento y enfriamiento del aire

Este protocolo de pruebas pretende evaluar el comportamiento de la temperatura del aire con respecto al tiempo en el proceso de calentamiento y de enfriamiento y el comportamiento de la estabilización de temperatura efectuada por el termostato.

Prueba de calentamiento secuencial

1. Colocar la perilla de control de temperatura en la posición “*LOW*” y tomar datos de temperatura cada 30 segundos durante 15 minutos.
2. Mover la perilla a la posición numerada siguiente y realizar este procedimiento hasta llegar a la posición “20”.
3. Registrar los datos de temperatura según la *Tabla 3*.

Tabla 3

Ejemplo de tabla de datos para calentamiento secuencial.

Ord	$t(\text{min})$	$T_{\infty}(\text{°C})$ en posiciones de la perilla				
		<i>LOW</i>	2	4	6	...
1	0.5					
2	1					
3	1.5					
⋮	⋮					
30	15					

Prueba de calentamiento continuo

1. Colocar la perilla de control de temperatura en la posición “*LOW*” y verificar la temperatura ambiente en el instante.
2. Mover la perilla a la posición “20” y a partir de ese punto tomar datos de temperatura cada minuto hasta que llegue a la temperatura máxima medida en la *Tabla 3*.
3. Registrar los datos según la *Tabla 4*.
4. Medir el voltaje y la corriente cada minuto, calcular la resistencia eléctrica y registrar los datos según la *Tabla 5*

Tabla 4

Ejemplo de tabla de datos para calentamiento continuo.

Ord	$t(\text{min})$	$T_{\infty}(\text{°C})$
1	1	
2	2	
3	3	
⋮	⋮	

Tabla 5

Ejemplo de tabla de datos para registro de variables eléctricas

Ord	$t(\text{min})$	$V(\text{V})$	$I(\text{A})$	$R_{\text{w}}^E(\Omega)$
1	1			
2	2			
3	3			
⋮	⋮			

Prueba de enfriamiento continuo

1. Colocar la perilla de control de temperatura en la posición “20” y esperar a que la temperatura alcance su máximo medido en la *Tabla 3*
2. Mover la perilla a la posición “LOW” y a partir de ese punto medir y anotar la temperatura cada minuto hasta que llegue a una temperatura de al menos 30°C

3. Registrar los datos según la *Tabla 6*.

Tabla 6

Ejemplo de tabla de datos para enfriamiento continuo.

Ord	$t(\text{min})$	$T_{\infty}(\text{°C})$
1	1	
2	2	
3	3	
⋮	⋮	

Obtención y tabulación de datos

Para las pruebas detalladas en en la seccion anterior se implementaron los siguientes dispositivos:

- Termómetro digital “MONARCH 309” con sonda de temperatura (termocupla tipo K)
- Pinza amperimétrica “FLUKE 322”

La tabulación de datos obtenidos para estas pruebas se encuentran en el ANEXO

1.

Análisis de datos

Figura 13

Curva Temperatura - Tiempo para prueba de calentamiento secuencial

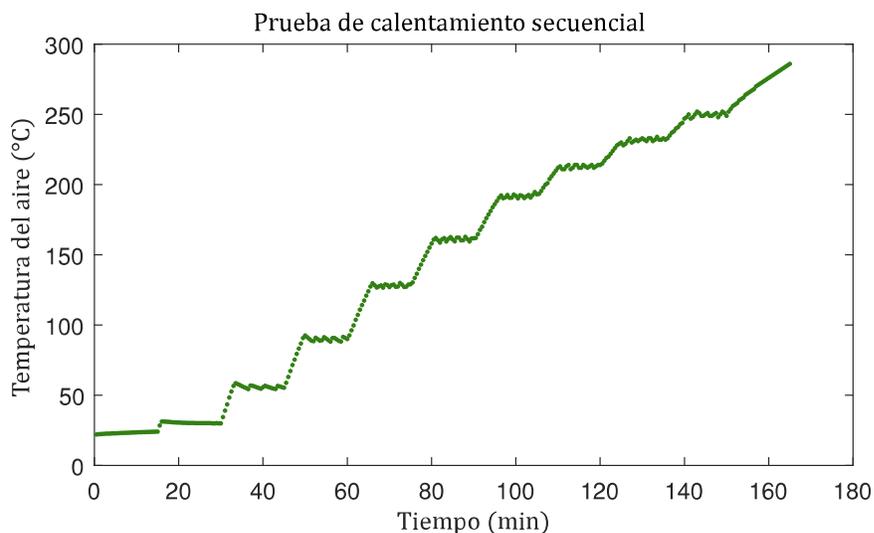


Tabla 7

Medidas estadísticas de los datos mostrados en la Figura 13 en estado estable

Medidas	LOW	2	4	6	8	10	12	14	16	18
\bar{T}_{st}	23.28	30.28	55.92	89.96	128.1	161.05	191.81	212.8	231.57	249.78
sd	0.495	0.331	1.063	1.216	0.989	1.167	1.215	1.105	1.468	1.357
$Rango$	1.6	1.2	4.2	4.4	3.3	4.1	4.5	3	6	5

Nota: Revisar términos en la sección de nomenclatura

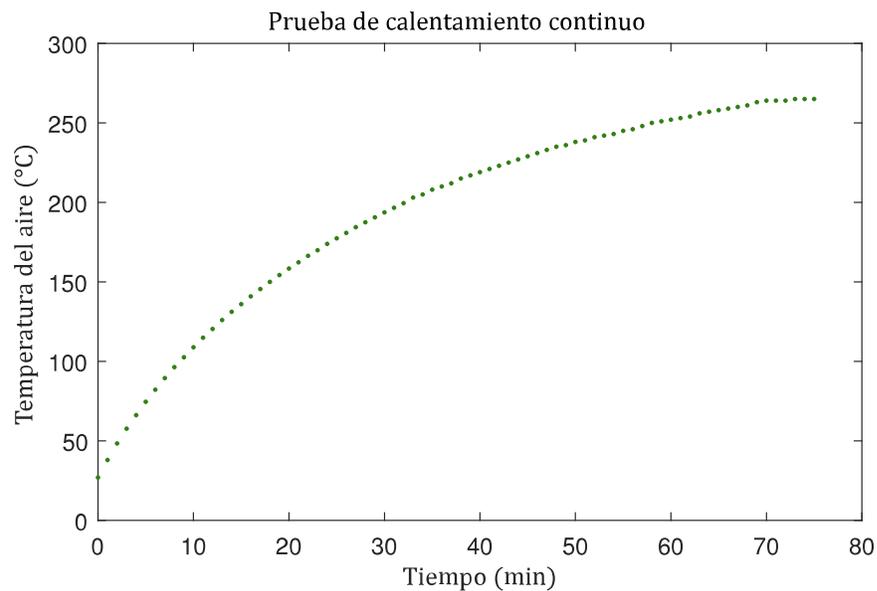
Análisis de la Figura 13 y la Tabla 7

- En la *Figura 13* se muestra el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo de la acción del termostato.

- Las medias de temperatura muestran el punto relativo de estabilización, pero no se puede controlar directamente el valor de temperatura, este depende del comportamiento del termostato.
- En la posición 16 existe la mayor dispersión de datos respecto a la media con un valor de desviación estándar de 1.468 puntos.
- En la posición 2 existe la menor dispersión de datos respecto a la media con un valor de desviación estándar de 0.331 puntos.
- El sistema ON - OFF del termostato indica rangos de variación de temperatura de entre $1.2^{\circ}C$ y $6^{\circ}C$ obteniendo una tolerancia de entre $\pm 0.6^{\circ}C$ y $\pm 3^{\circ}C$ en el sistema de control por termostato.

Figura 14

Curva Temperatura - Tiempo para prueba de calentamiento continuo

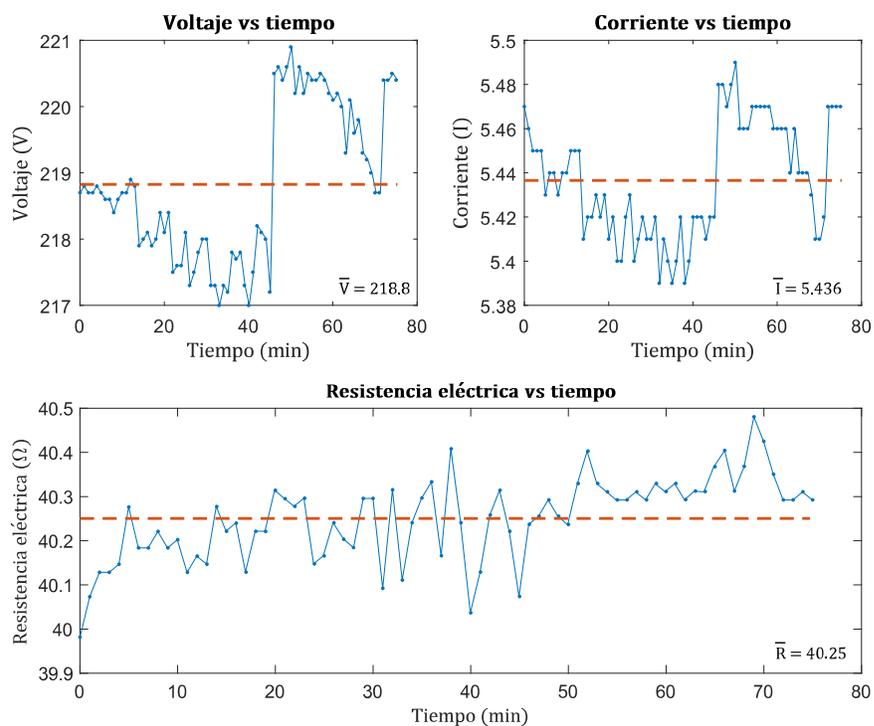


Análisis de la Figura 14

- En la *Figura 14* se muestra el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo cuando el sistema se calienta al máximo.
- El calentamiento del aire en la cámara principal del horno es bastante lento, llegando a $250^{\circ}C$ en $59min$.
- Se tiene una temperatura máxima de $265^{\circ}C$ a los $76(min)$
- El tiempo de estabilización del aire, dados los resultados de las mediciones, se estima empíricamente en $+90min$ a $280^{\circ}C$.
- A temperaturas más altas el fenómeno se vuelve exponencialmente más lento.

Figura 15

Variables eléctricas

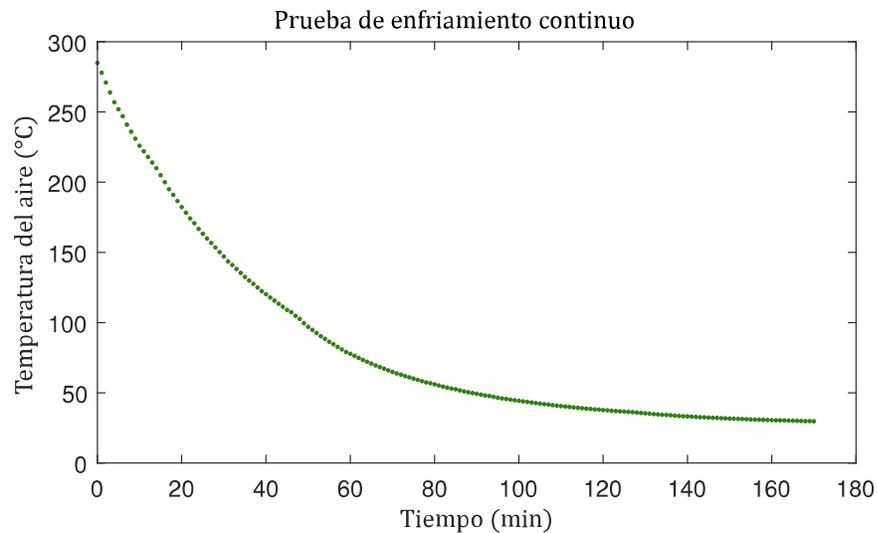


Análisis de la Figura 15

- En la *Figura 15* se muestra el comportamiento de el voltaje, corriente y resistencia eléctrica calculada en el proceso de calentamiento continuo.
- Se tienen valores promedio de voltaje, corriente y resistencia calculada de $218.8V$, $5.436A$ y 40.25Ω respectivamente
- Al minuto 40 existe una subida de voltaje desde la fuente la cual es reflejada también en la corriente.
- La resistencia eléctrica calculada tiene un rango de 0.499Ω a lo largo del proceso, lo cual se puede asumir como despreciable, por lo tanto se le puede considerar constante e independiente de la temperatura

Figura 16

Curva Temperatura - Tiempo para prueba de enfriamiento continuo



Análisis de la *Figura 16*

- En la *Figura 16* se muestra el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo en el proceso de enfriamiento del aire desde la temperatura máxima.

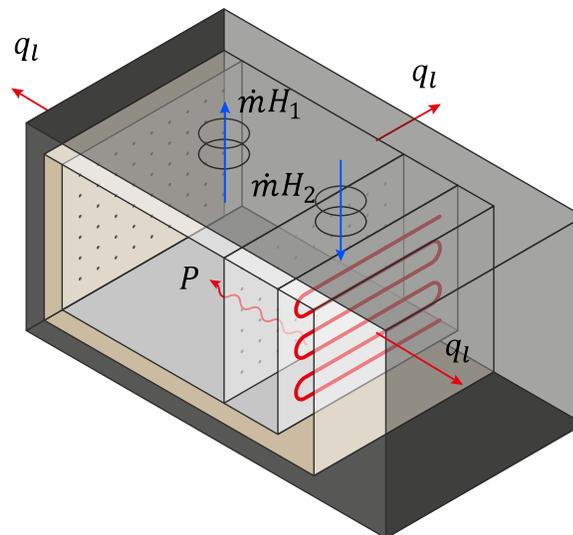
- El enfriamiento desde la temperatura máxima hasta la temperatura ambiente tarda $+171min$ por lo que es un fenómeno incluso más lento que el calentamiento.
- La temperatura consigue bajar en un 90 % a los $82min$ casi a la mitad del tiempo total de medición.
- A temperaturas más bajas se vuelve exponencialmente más lento el fenómeno.

Análisis del fenómeno físico en la cámara principal del horno

Desarrollo del modelo matemático

Figura 17

Esquema del horno y su aporte en un balance energético al calentamiento



En la *Figura 17* se muestran todas las condiciones energéticas presentadas en ese volumen de control, se puede realizar un balance energético del sistema, el cual se muestra en la *Ecuación 15*. Este balance es independiente del espacio y se despreciarán los efectos

de la energía potencial y cinética de los flujos másicos para evitar complicaciones con EDPs y fenómenos muy complejos que no atienden a los objetivos de este trabajo.

$$\underbrace{E_{in}}_{P+\dot{m}H_2} + \underbrace{E_g}_0 - \underbrace{E_{out}}_{q_l+\dot{m}H_1} = \underbrace{\Delta E_{sist}}_{\frac{dU_{sens}}{dt}} \quad (15)$$

Consideraciones:

- P es la ganancia de calor por la potencia eléctrica $\bar{P}^E = \eta^E \frac{V^2}{R_{\text{w}}^E}$ y mecánica $P^M = \eta^M 1/5(hp)$ suministrada.
- $\dot{m}H_1, \dot{m}H_2$ son expresiones para el balance másico energético del aire que sale y entra por los orificios superiores, H es entalpía específica⁹.
- $q_l = U_A(T_{\infty in} - T_{\infty out})$ es el calor perdido por las paredes.
- $\frac{dU_{sens}}{dt} = \rho_a c_{pa} \mathcal{V} \frac{dT_{\infty in}}{dt}$ es el calor almacenado en el sistema.

Al introducir los términos correspondientes en la *Ecuación 15* se obtiene la *Ecuación 16*

$$(P + \dot{m}H_2) - (U_A(T_{\infty in} - T_{\infty out}) + \dot{m}H_1) = \rho_{\infty} c_{p\infty} \mathcal{V} \frac{dT}{dt} \quad (16)$$

⁹Por motivos de nomenclatura, se utilizará la entalpía específica como H para no confundirla con el coeficiente de convección h

La *Ecuación 17* es el resultado de resolver la *Ecuación 16*, en el ANEXO 3 se encuentra el desarrollo matemático de esta solución.

$$T_{\infty in}(t) = \frac{P}{\rho_{\infty} v \mathcal{A} c_{p\infty} + U_A} \left[1 - \exp\left(\frac{-(\rho_{\infty} v \mathcal{A} c_{p\infty} + U_A)}{\rho_{\infty} c_{p\infty} \mathcal{V}} t\right) \right] + T_{\infty out} \quad (17)$$

Análisis de la función de temperatura

La *Ecuación 17* muestra una función de temperatura de la forma planteada en la *Ecuación 18*.

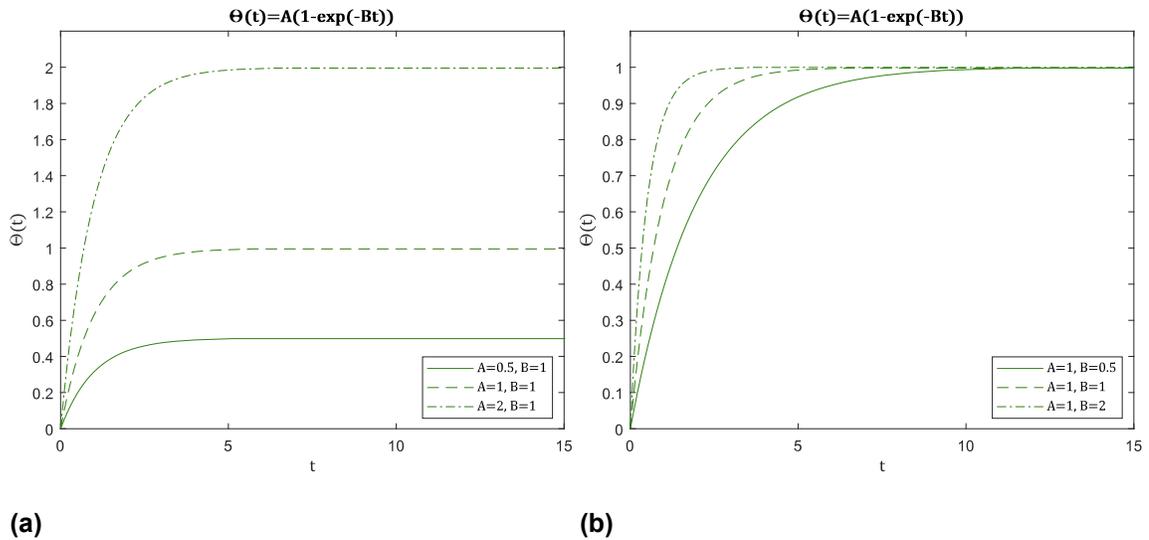
$$\Theta(t) = A[1 - \exp(-Bt)] \quad (18)$$

Donde:

- $A = \frac{P}{\rho_{\infty} v \mathcal{A} c_{p\infty} + U_A}$ define el límite asintótico de la curva en el eje $\Theta(t)$ y escala la forma de la función uniformemente en el mismo eje.
- $B = \frac{-(\rho_{\infty} v \mathcal{A} c_{p\infty} + U_A)}{\rho_{\infty} c_{p\infty} \mathcal{V}}$ determina que tan repentino es el comportamiento creciente exponencial.

Figura 18

Comportamiento de la función de temperatura al variar los coeficientes.



Nota: (a) Comportamiento de la función al variar A , (b) Comportamiento de la función al variar B .

La *Figura 18* ilustra como se comporta la curva con valores de A y B distintos, por lo tanto se entiende que los coeficientes de la función de la *Ecuación 17* son los que van a determinar tanto el límite de temperatura como la rapidez de calentamiento.

Análisis de coeficientes

Se tienen las siguientes propiedades a evaluar en los coeficientes de la función de temperatura:

- P : Potencia eléctrica y mecánica suministrada.

$$P = \bar{P}^E + P^M \text{ donde } \bar{P}^E = \eta^E \frac{V^2}{R^E} = \eta^E \frac{220^2}{40} = \eta^E 1210(W) \text{ y } P^M = \eta^M 1/5(hp) =$$

$$\eta^M 149.14(W)$$

- $\rho_\infty, c_{p\infty}$: Densidad y calor específico del aire a temperatura promedio.

$$\rho_\infty = 0.8995(kg/m^3) \quad c_{p\infty} = 1016.2(J/kgK) \text{ tomados de (Incropera y col., 2011).}$$

- v : Velocidad promedio de entrada y salida del aire en los orificios superiores.

$$v = 1.25 - 2.42(m/s) \text{ medido en el horno.}$$

- \mathcal{V}, \mathcal{A} : Volumen de la cámara principal y área de los orificios superiores.

$$\mathcal{V} = 0.169(m^3) \quad \mathcal{A} = 1.5904 \times 10^{-3}(m^2) \text{ calculados de medidas del horno.}$$

- $U_A = 1.959(W/K)$ el cálculo numérico se desarrolla en el ANEXO 4.

Obtenidos todos los valores necesarios, una eficiencia eléctrica del 95 % para el calentamiento del serpentín y un porcentaje de calor aportado por la potencia del motor de 1 %; referidos de (ASTM, s.f.), los coeficientes toman los siguientes valores:

$$A = \frac{P}{\rho_\infty v \mathcal{A} c_{p\infty} + U_A} = \frac{0.95(1210) + 0.01(149.14)}{0.8995(1.835)(1.5904 \times 10^{-3})(1016.12) + 1.959} = 248.773(^{\circ}C)$$

$$B = \frac{-(\rho_\infty v \mathcal{A} c_{p\infty} + U_A)}{\rho_\infty c_{p\infty} \mathcal{V}} = \frac{-[0.8995(1.835)(1.5904 \times 10^{-3})(1016.12) + 1.959]}{0.8995(1016.12)(0.169)}$$

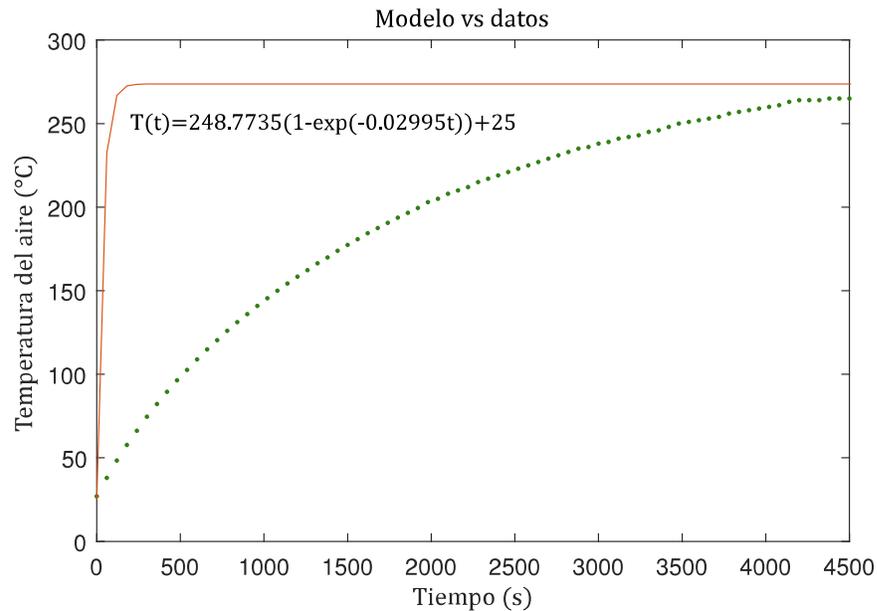
$$B = -0.02995(1/s)$$

Reemplazando estos valores en la *Ecuación 17* y una temperatura ambiente considerara a condiciones de aire estándar de $25^{\circ}C$ se obtiene la función mostrada en la *Ecuación 19*.

$$T_{\infty in}(t) = 248.773[1 - \exp(-0.02995t)] + 25 \quad (19)$$

Figura 19

Forma de la función conseguida por el modelo matemático vs datos tomados en el calentamiento



La *Figura 19* muestra una diferencia muy grande entre la curva de la *Ecuación 19* y los datos tomados.

Entendiendo que el coeficiente B detallado en la *Ecuación 18*, es el que controla la rapidez del comportamiento creciente de la temperatura, se atribuye la diferencia mencionada a este coeficiente y para corregir este comportamiento del modelo matemático se propone lo siguiente:

- Evaluar el fenómeno de enfriamiento del aire para comparar propiedades y coeficien-

tes.

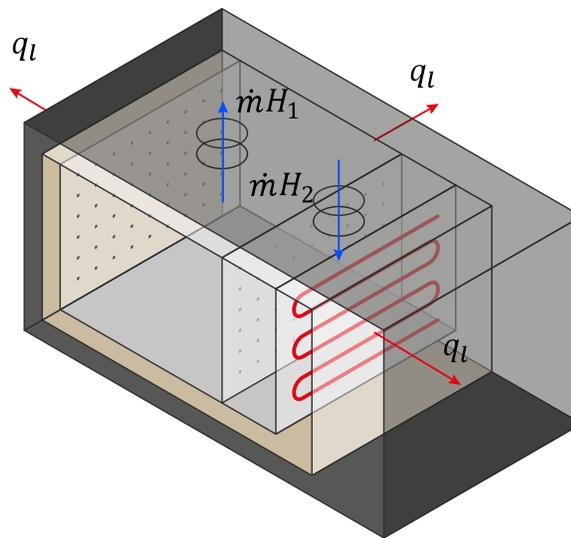
- Mediante la *Ecuación 18* realizar un ajuste por mínimos cuadrados para obtener una curva fiel al fenómeno y comparar los coeficientes del mismo con los del modelo.

Corrección del modelo matemático

Análisis del fenómeno de enfriamiento del aire

Figura 20

Esquema del horno y su aporte en un balance energético al enfriamiento



Al igual que en el análisis del calentamiento, en la *Figura 20* se muestra un volumen de control, el balance energético se plantea en la *Ecuación 20*¹⁰.

$$\underbrace{E_{in}}_{\dot{m}H_2} + \underbrace{E_g}_0 - \underbrace{E_{out}}_{q_l + \dot{m}H_1} = \underbrace{\Delta E_{sist}}_{\frac{dU_{sens}}{dt}} \quad (20)$$

¹⁰Tener en cuenta las mismas consideraciones que se tomaron en el análisis de la *Ecuación 15*

Al introducir los términos correspondientes en la *Ecuación 20* se obtiene la *Ecuación 21*

$$\dot{m}H_2 - (U_A(T_{\infty in} - T_{\infty out}) + \dot{m}H_1) = \rho_{\infty}c_{p\infty}\mathcal{V}\frac{dT}{dt} \quad (21)$$

La *Ecuación 22* Es el resultado de resolver la *Ecuación 21*, en el ANEXO 5 se desarrolla la solución matemática.

$$T_{\infty in} = (T_{\infty max} - T_{\infty out}) \exp\left[\frac{-(\rho_{\infty}vAc_{p\infty} + U_A)}{\rho_{\infty}c_{p\infty}\mathcal{V}}t\right] + T_{\infty out} \quad (22)$$

Análisis de la función de temperatura

La *Ecuación 22* muestra una función de temperatura de la forma planteada en la *Ecuación 23*

$$\Theta(t) = A[\exp(-Bt)] \quad (23)$$

Donde:

- $A = T_{\infty max} - T_{\infty out}$ define el límite asintótico de la curva en el eje $\Theta(t)$ y escala la

forma de la función uniformemente en el mismo eje.

- $B = \frac{-(\rho_{\infty} v A c_{p\infty} + U_A)}{\rho_{\infty} c_{p\infty} \mathcal{V}}$ determina que tan repentino es el comportamiento decreciente exponencial.

Los coeficientes de la *Ecuación 23* tienen el mismo efecto analizado de los coeficiente de la *Ecuación 18*

Reemplazando las mismas propiedades tomadas en el análisis de la *Ecuación 19*, se consigue una función de temperatura mostrada en la *Ecuación 24*

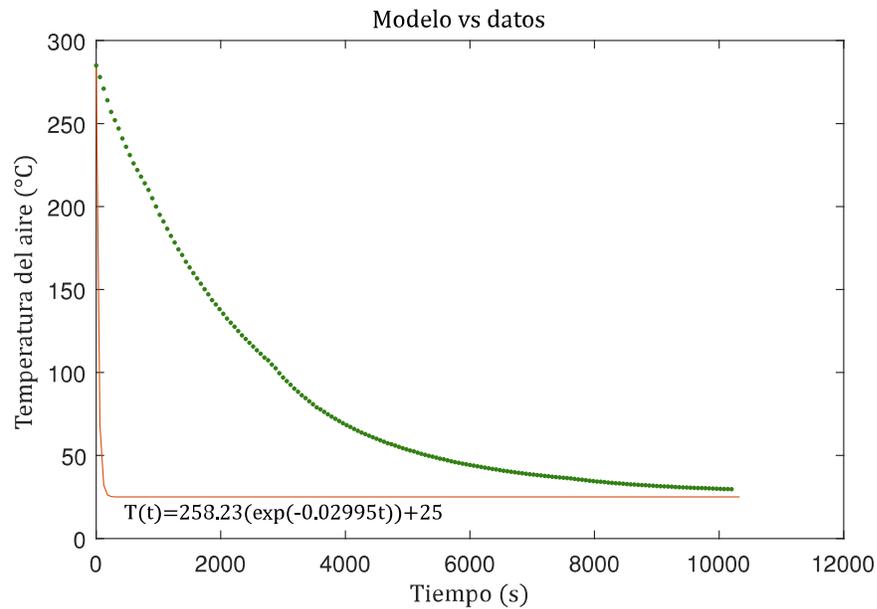
$$T_{\infty in}(t) = 258.23[\exp(-0.02995t)] + 25 \quad (24)$$

El valor del coeficiente B^{11} de la *Ecuación 19* y la *Ecuación 24* son iguales ya que tanto para el calentamiento como para el enfriamiento $B = \frac{-(\rho_{\infty} v A c_{p\infty} + U_A)}{\rho_{\infty} c_{p\infty} \mathcal{V}}$

¹¹El coeficiente B es referido y explicado en la *Ecuación 18* y *Ecuación 23*

Figura 21

Forma de la función conseguida por el modelo matemático vs datos tomados en el enfriamiento



La Figura 21 muestra que el comportamiento del modelo tampoco se ajusta a los datos, de esto se concluye que asumir que todo el volumen de aire se calienta instantáneamente es experimentalmente incorrecto, el fenómeno es dependiente del espacio además del tiempo.

Para mitigar este efecto se plantea implementar un coeficiente de corrección χ en el coeficiente B que asuma los efectos espaciales e incluso del tiempo de respuesta y variables del sensor.

Ajuste por mínimos cuadrados

Dada la función definida en la *Ecuación 18*, para aplicar un ajuste por mínimos cuadrados, la misma tiene que ser linealizada, este proceso se muestra en la *Ecuación 25*.

$$\Theta(t) = A[1 - \exp(-Bt)]$$

$$A - \Theta(t) = A \exp(-Bt)$$

$$\ln(A - \Theta(t)) = \ln(A \exp(-Bt))$$

$$\ln(A - \Theta(t)) = \ln(A) - Bt \quad (25)$$

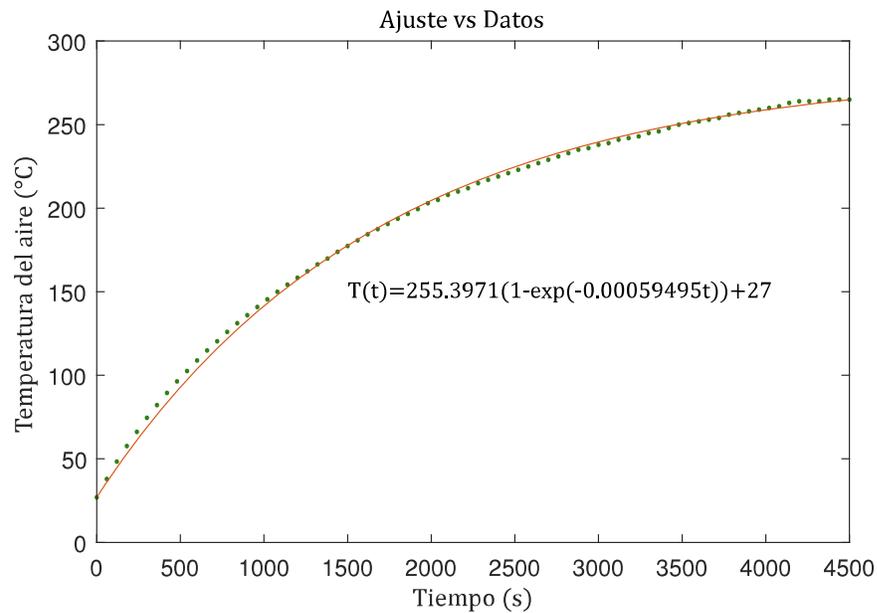
La *Ecuación 25* se linealizó de la forma $Y = \beta_0 + \beta_1 X$, donde los coeficientes β_0 y β_1 se pueden calcular mediante la ecuación matricial mostrada en la *Ecuación 26*

$$\beta_i = (X^t X)^{-1} X^t Y \quad (26)$$

$$\text{Donde } X = \begin{pmatrix} 1 & x_0 \\ 1 & x_1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_n \end{pmatrix} \text{ y } Y = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}$$

Figura 22

Forma de la función conseguida por el ajuste vs datos tomados en el calentamiento



Estimación del coeficiente de corrección

$$T(t) = 255.3971[1 - \exp(-0.00059495t)] + 27 \quad (27)$$

En el ajuste se obtiene la función de temperatura mostrada en la *Ecuación 27*, si se compara los coeficientes con la *Ecuación 19*, podemos calcular que:

- Coeficiente de determinación del ajuste de la *Ecuación 27*: 0.9978 – 99.78 %
- Error relativo entre coeficientes *A* de la *Ecuación 27* y la *Ecuación 19*: 0.026 – 2.6 %
- Error relativo entre coeficientes *B* de la *Ecuación 27* y la *Ecuación 19*: 43.3404 – 4334.04 %

Se puede apreciar en la *Figura 22* que la *Ecuación 27* es mucho más fiel a los datos, por lo tanto, aproxima con mucha precisión el modelo matemático al fenómeno real.

A través de igualar los coeficientes B^{12} de la *Ecuación 27* y la *Ecuación 19* se puede corregir el mismo mediante un coeficiente χ como se muestra en la *Ecuación 28*

$$B = \chi \frac{-(\rho v A c_p + U_A)}{\rho c_p \mathcal{V}} \quad (28)$$

De la *Ecuación 28* se puede despejar χ obteniendo el siguiente resultado

$$\chi = \frac{-5.9495 \times 10^{-4}}{0.02995} = 19.868 \times 10^{-3}$$

Al introducir este nuevo coeficiente χ en la *Ecuación 16*, obtenemos la función mostrada en la *Ecuación 29*

$$T(t) = 248.7735[1 - \exp(-0.00059496t)] + 25 \quad (29)$$

El coeficiente de determinación de esta nueva función graficada en la *Figura 23* comparada con los datos obtenidos, resulta en un valor de 0.9967, lo cual indica una bondad del ajuste muy alta.

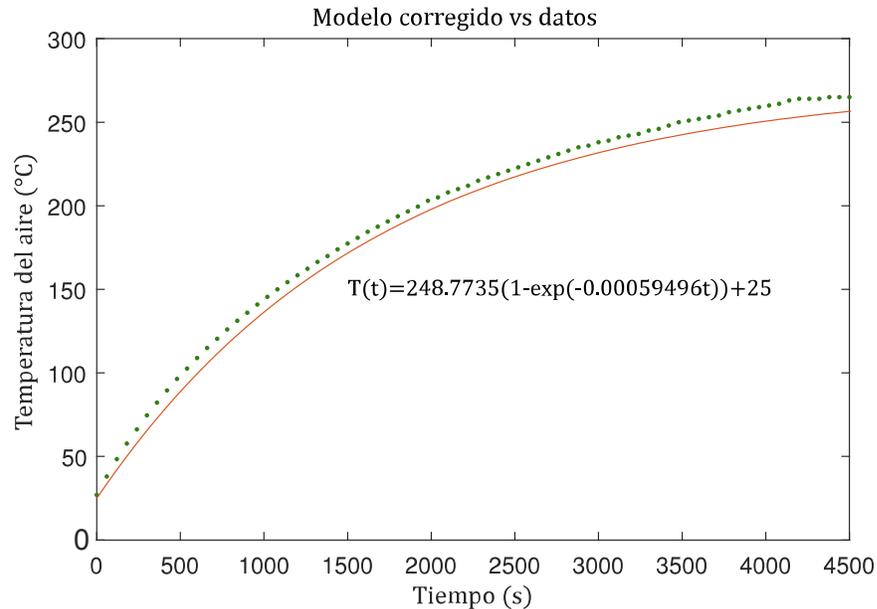
Este modelo puede ser flexible con la velocidad de entrada y salida de aire por los orificios v y con el coeficiente χ por lo cual, variaciones en estas medidas; en la forma de la curva y por efectos del propio sensor, se pueden ajustar de mejor manera modificando

¹²El coeficiente B es referido y explicado en la *Ecuación 18* y *Ecuación 23*

estos criterios.

Figura 23

Forma del modelo corregido vs datos tomados en el calentamiento



Se desarrollará el modelo final para el calentamiento y enfriamiento del aire en las pruebas que se realicen con el sistema de control electrónico.

Fase I de mantenimiento - Aplicación de actividades de mantenimiento preventivo

En esta primera fase se aplicarán actividades de mantenimiento preventivo a este horno para evaluar las condiciones físicas de sus partes y adecuarlo para la implementación del sistema de control.

El horno "FISHER ISOTEMP®300 SERIES MODEL 338F" que se muestra en la *Figura 24* tiene las características listadas en la *Tabla 8*:

Figura 24

Horno "FISHER ISOTEMP® 300 SERIES MODEL 338F"



Tabla 8*Características relevantes del equipo*

Características del horno	
Dimensiones exteriores	$(92.5 \times 53.5 \times 67)(cm)$
Dimensiones de la cámara principal	$(45.8 \times 45.5 \times 51)(cm)$
Material de la cámara principal	Acero inoxidable
Tipo de aislante térmico	Lana de vidrio
Material del serpentín de calentamiento	Nicromo (80 % Níquel 20 % Cromo)
Resistencia del serpentín de calentamiento	$40(\Omega)$
Tipo de ventilador	Ventilador centrífugo con álabes hacia atrás
Tipo de control de temperatura	Termostatos de gas encerrado
Características del motor eléctrico	
Voltaje de trabajo	$208(V) - 240(V)$
Potencia	$1/5(hp)$
Velocidad de rotación	$925(rpm) - 1100(rpm)$ sentido antihorario
Frecuencia de trabajo	$50(Hz) - 60(Hz)$
Número de fases	1

Actividades clave de mantenimiento

- **Limpeza:** Actividad periódica que mantiene los componentes del horno libre de impurezas y suciedad que dificulten o imposibiliten su buen funcionamiento.
- **Inspección de estado:** Revisión visual o con instrumentos de verificación tanto de componentes eléctricos como mecánicos para obtener información del funcio-

namiento de los mismos.

- **Calibración:** Corrección de posición o ajuste de componentes mecánicos o corrección de calibración y/o programación de componentes electrónicos sujeto a afecciones sufridas por el uso del equipo.
- **Cambio de componentes:** Reemplazo de componentes que hayan cumplido su tiempo de vida útil para prevenir paros imprevistos del horno.
- **Lubricación:** Lubricar motor según indicaciones del fabricante.

Actividades de mantenimiento según las partes del equipo

Tabla 9

Desarrollo de actividades de mantenimiento según las partes del equipo

Parte	Ilustración
Carcasa del horno	
Actividades realizadas	
<ul style="list-style-type: none"> •Desarmado, retirado de remaches. •Limpieza profunda. •Enderezado de partes deformadas. 	
Análisis	
<p>Se desarmó la carcasa retirando los remaches de la tapa trasera, los tornillos de las tapas laterales y se retiró la puerta. Las paredes tenían polvo y suciedad; se realizó una limpieza superficial, la tapa trasera presentó puntos con oxido y corrosión de la pintura; para esto se aplicó un desoxidante en estos puntos que a su vez deja una protección contra el oxido superficial, se hallaron leves deformaciones; se enderezaron manualmente las láminas dobladas, los lugares abollados en el techo se enderezaron con un martillo de goma.</p>	

Continuación

Parte	Ilustración
Puerta del horno	

Actividades realizadas

- Desarmado, retirado de remaches.
- Limpieza profunda.
- Enderezado de esquina deformada.
- Cambio de aislante

Análisis

Para retirar la puerta se debe desenroscar un perno Allen en el soporte superior, para desarmar la cobertura metálica se tiene que retirar 16 remaches en la periferia del interior de la puerta, el aislante presentó desgaste y reducción en su tamaño; se reemplazó completamente por planchas de lana de roca, también se halló una abolladura en la esquina superior izquierda; para arreglar la abolladura se colocó una placa metálica plana al interior de la esquina afectada y por el otro lado se golpeó con un martillo de goma, también tenía suciedad superficial, y en las hendiduras; se realizó una limpieza superficial.

Continuación

Parte	Ilustración
láminas metálicas y parrillas de la cámara principal	

Actividades realizadas

- Limpieza profunda.
- Enderezado de partes deformadas.

Análisis

Las varias láminas extraíbles de la cámara principal del horno presentaron restos quemados de materiales en la superficie y leves deformaciones en los orificios de tornillos y corrosión; se limpió integralmente con desoxidante y se arreglaron las deformaciones golpeándolas con un martillo de goma sobre una superficie plana.

Continuación

Parte	Ilustración
Serpentín de calentamiento	
Actividades realizadas	
<ul style="list-style-type: none">•Limpieza profunda.•Revisión de parámetros eléctricos (resistencia, continuidad).	
Análisis	
<p>Para desmontarlo se debe retirar los 4 tornillos sobre los cuales está montada la estructura que soporta el serpentín y se deben desenroscar las 2 tuercas de los terminales de los cables, se hallaron secciones con oxido de coloración azul provocado por el calor; se aplicó desoxidante para poder retirar este oxido y evitar la corrosión del material, se evaluó la resistencia eléctrica del serpentín la cual de punta a punta se mantuvo en $40(\Omega)$.</p>	

Continuación

Parte	Ilustración
Ventilador centrífugo	

Actividades realizadas

- Limpieza profunda.
-

Análisis

Se encuentra montado sobre un eje con un pasador el cual se debe retirar con una llave Allen, presenta corrosión tanto en el cuerpo como en los álabes; se aplicó desoxidante en todas las partes corroídas.

Continuación

Parte	Ilustración
Motor eléctrico	

Actividades realizadas

- Limpieza profunda.
- Evaluación de la calidad del bobinado.
- Lubricación.
- Evaluación del estado de los cables.
- Reemplazo de los terminales.

Análisis

Se encuentra montado sobre un soporte de chapa metálica unido con 4 pernos de cabeza hexagonal, el motor se encontró en perfectas condiciones operativas, se halló polvo quemado en la superficie, oxido y corrosión en la pintura; se realizó una limpieza profunda y se aplicó desoxidante para eliminar la corrosión y proteger la superficie, al desmontarlo se evaluó el bobinado y la jaula de ardilla del motor; se aplicó aceite lubricante y se realizó una limpieza del interior y de las tapas.

Continuación

Parte	Ilustración
Aislante térmico	

Actividades realizadas

- Reemplazo.
-

Análisis

El aislante térmico se encuentra calcinado en ciertas partes de la superficie y presenta reducción en su tamaño; se lo reemplazó integralmente con planchas de lana de roca.

Continuación

Parte	Ilustración
Cableado, termostatos, perilla de control, indicadores LED	

Actividades realizadas

- Evaluación del circuito eléctrico.
- Retirado de cables sin utilidad.
- Retirado de termostatos perilla de control e indicadores LED.

Análisis

El cableado se encontró en buen estado, se retiró el termostato, los indicadores LED y la perilla de control debido a la implementación del sistema de control de temperatura automático.

Terminado el mantenimiento inicial y determinadas las partes y subpartes; y, las actividades necesarias a realizar, se diseñó un plan de mantenimiento el cual se detalla en el ANEXO 7.

Fase II de mantenimiento - Implementación de sistema de control como mantenimiento modificativo

En esta segunda fase se va a diseñar un sistema de control que cumpla con los parámetros de diseño listados en la *Tabla 10* para posteriormente implementar en el horno.

Tabla 10

Parámetros de diseño

Tolerancia de temperatura en estado estable	$\pm 2^{\circ}C$
Máxima temperatura requerida	$250^{\circ}C$
Alimentación del sistema de control	directamente de la fuente del horno

Diseño del sistema de control

Es indispensable caracterizar el proceso tanto estática como dinámicamente para poder diseñar un sistema de control (Hägglund & Åström, 1995).

Características del proceso según el análisis realizado del fenómeno de calentamiento y enfriamiento:

- Proceso de baja rapidez.
- Proceso sin control lineal de la variable controlada¹³ V .
- Proceso con una respuesta lenta de la variable de control T al manipular la variable de proceso V .

¹³Variable de proceso

Según (Valdivia Miranda, 2012) se implementan controladores PID en sistemas de respuesta rápida, en los que se requiera un control preciso de la variable de control y se deba evitar el overshooting¹⁴.

Según las características del proceso, no se puede incrementar la velocidad de calentamiento del horno por ende el proceso es intrínsecamente lento y no es razonable el manipular la velocidad de calentamiento para que se vuelva aún más lento.

Implementar un control PID es una solución sobredimensionada además de que no se necesita tener una alta exactitud al mantener la temperatura en un set point dada la tolerancia como parámetro de diseño.

Tomando en cuenta estos criterios, se determina que un control ON - OFF es ideal para este proceso. El valor agregado es el aporte de un control más exacto de la temperatura mediante un circuito electrónico, en vez de un sistema mecánico y una HMI¹⁵.

Instrumentos utilizados en el sistema

- Sensor de temperatura.
 - **Tipo:** RTD
 - **Denominación:** PT100
 - **Marca:** TWIDEC
 - **Datasheet:** No disponible

¹⁴El overshooting es el sobrepaso del setpoint por la variable de control debido a que se requiere una respuesta muy rápida pero la variable de proceso no puede superar un valor, a esto se le llama saturación de la variable de proceso.

¹⁵Interfaz Humano Máquina

- Acondicionador de señal para el sensor de temperatura.
 - **Tipo:** Convertidor RTD a digital
 - **Denominación:** MAX31865
 - **Marca:** Maxim Integrated
 - **Datasheet:** ver en <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31865.pdf>

- Actuador para el control.
 - **Tipo:** Relé de estado sólido
 - **Denominación:** SSR-25 DA
 - **Marca:** FOTEK
 - **Datasheet:** ver en <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Components/General/SSR40DA.pdf>

- Controlador para el procesamiento.
 - **Tipo:** Microcontrolador
 - **Denominación:** Arduino MEGA 2560
 - **Marca:** Arduino
 - **Datasheet:** ver en <https://www.mantech.co.za/datasheets/products/A000047.pdf>

- Sistema de alimentación independiente.
 - **Tipo:** Módulo de alimentación de energía
 - **Denominación:** IRM 20-5

- **Marca:** MEAN WELL
- **Datasheet:** ver en <https://www.meanwell.com/webapp/product/search.aspx?prod=IRM-20>

- HMI

- **Tipo:** Pantalla táctil
- **Denominación:** NX8048T070
- **Marca:** Nextion
- **Datasheet:** ver en <https://nextion.tech/datasheets/nx8048t070/>

Diseño del circuito eléctrico

En el ANEXO 2 se plantea el esquema del circuito eléctrico del sistema de control.

Diseño, impresión y montaje en placa PCB

Figura 25

Diseño de placa PCB

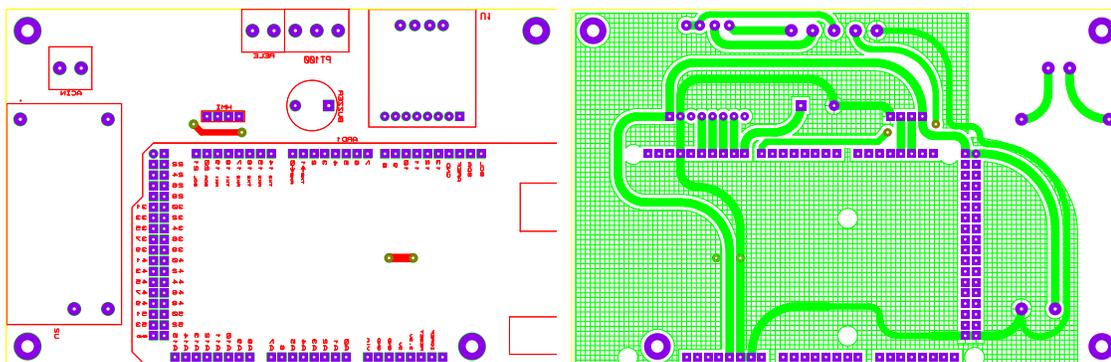
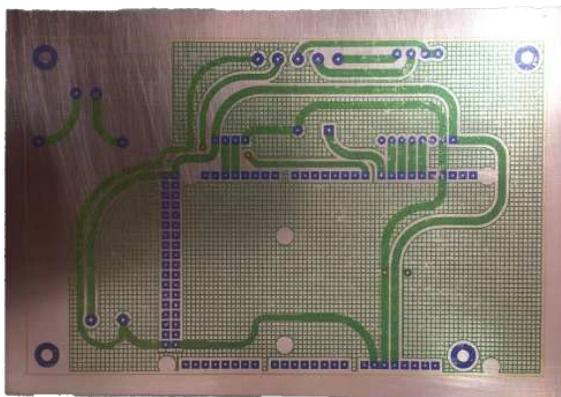


Figura 26

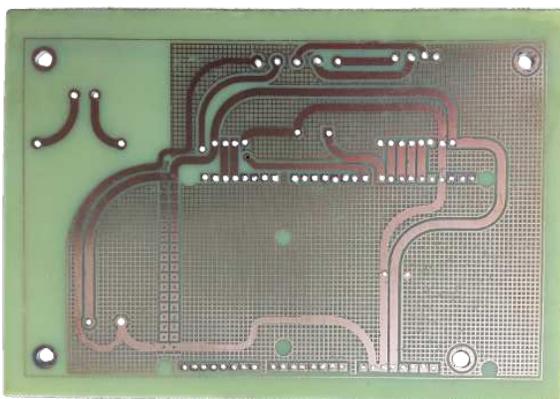
Impresión del diseño en la placa PCB



En la *Figura 25* se muestra el diagrama del diseño del circuito en una placa PCB para su impresión, la cual ya impresa y copiada en la cara metálica de la placa se muestra en la *Figura 26*

Figura 27

Impresión del diseño en la placa PCB

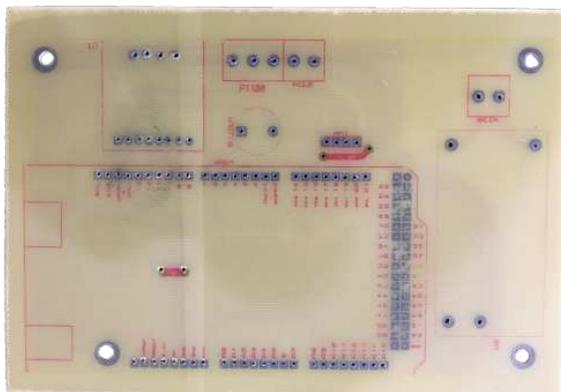


Para poder remover el metal y dejar la parte impresa para realizar el circuito se debe aplicar ácido clorhídrico y dejar sumergida la placa hasta que se haya disuelto el metal innecesario, al finalizar este proceso la placa presenta el resultado mostrado en la

Figura 27

Figura 28

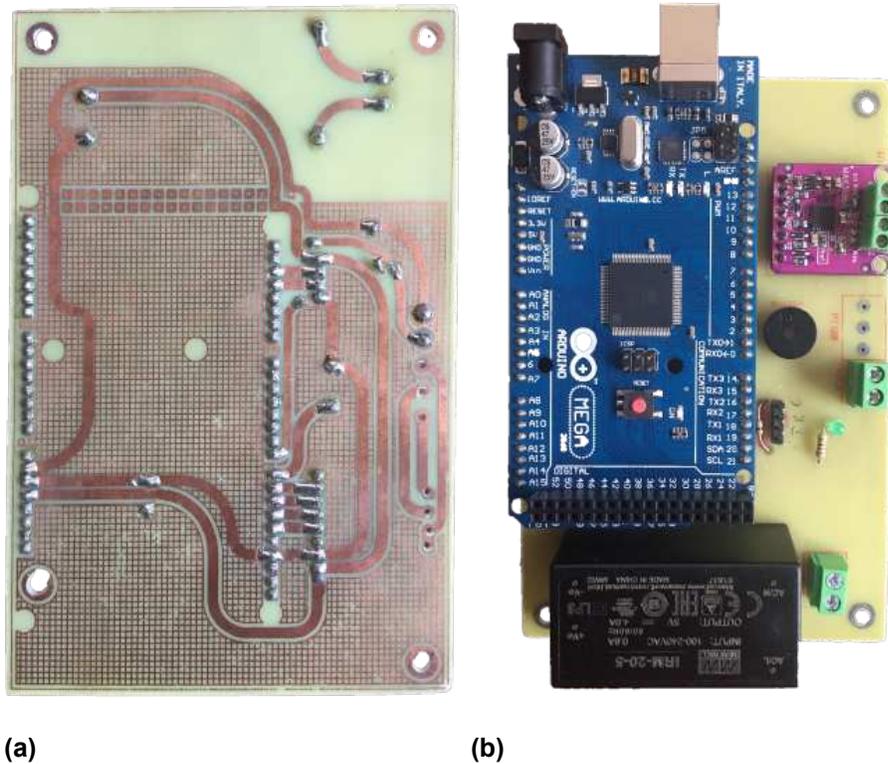
Impresión del diseño en la placa PCB



Finalmente se corta la placa en la medida adecuada y se perfora los agujeros para montar el circuito, el resultado se muestra en la *Figura 28*

Figura 29

Placa PCB con instrumentos montados



Nota: (a) Parte trasera de la placa soldada, (b) Parte frontal de la placa con los instrumentos montados.

Se montan y sueldan al circuito los instrumentos, en la *Figura 29 (a)*. se muestra la parte trasera del circuito con los puntos de suelda y en la *Figura 29 (b)* se muestra la parte delantera del circuito con todos los instrumentos montados.

Programación del algoritmo de control y manejo de la interfaz

Para la programación del algoritmo se utilizó la IDE de Arduino y el software Nextion Editor, el algoritmo se detalla en el ANEXO 6.

El algoritmo está estructurado con instrucciones para:

- Recibir datos como caracteres de la pantalla
- Transformar los datos recibidos en números y almacenarlos en variables.
- Enviar las variables a las subrutinas tanto de control como de impresión de vuelta en la pantalla.
- Controlar botones para enviar datos, iniciar el proceso y detener el proceso.

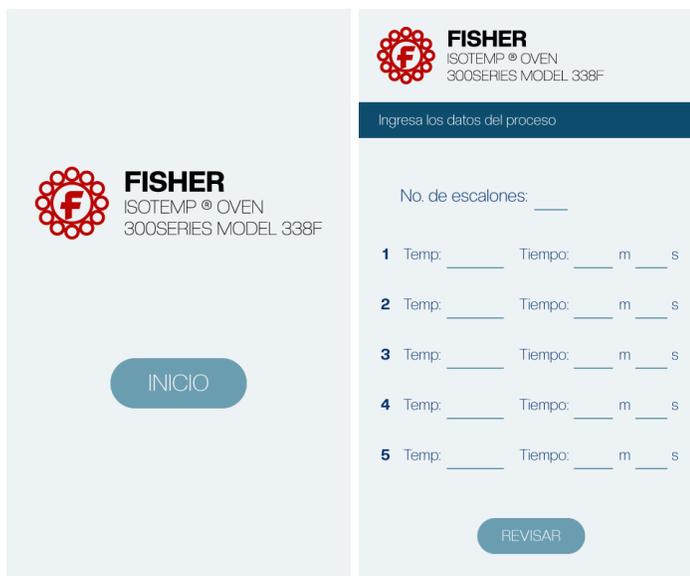
Diseño de la interfaz

En la *Figura 30* se presentan las páginas que va a tener la interfaz, su diseño se basó en recomendaciones de (Filipiuk, s.f.) para tener una imagen balanceada en cuanto a colores, geometrías, espacios y texto.

Cada página tiene su función dentro del algoritmo planteado en el ANEXO 6. Los datos se deben introducir en la página mostrada en la *Figura 30* (b) y el proceso empieza en la página mostrada en la *Figura 30* (c) donde se muestra el gráfico de Temperatura - tiempo, se verificarán los valores tanto del sensor, del setpoint actual, el tiempo transcurrido y el proceso se puede detener en cualquier instante con el botón rojo.

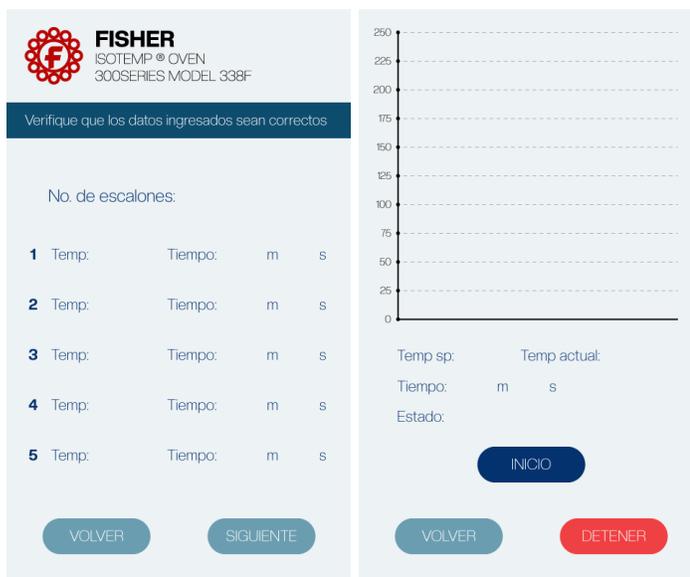
Figura 30

Páginas de la interfaz



(a)

(b)



(c)

(d)

Nota: (a) Primera página, (b) Segunda página, (c) Tercera página, (d) Cuarta página

Protocolo de pruebas II - Pruebas de funcionamiento del sistema de control

Para la ejecución de estas pruebas se adecuó a lo realizado en *Protocolo de pruebas I - caracterización del proceso de calentamiento y enfriamiento del aire* considerando la implementación del sistema electrónico ¹⁶.

En la ejecución de las pruebas de calentamiento secuencial, calentamiento continuo y enfriamiento continuo se plantea realizarlas con las siguientes características.

Prueba de calentamiento secuencial

1. Setear la temperatura en $50^{\circ}C$, el tiempo en 30 minutos e iniciar el proceso.
2. Cuando la temperatura llegue al set point, guardar los datos desde Arduino cada segundo.
3. Setear temperaturas cada $25^{\circ}C$ hasta llegar a los $250^{\circ}C$ y repetir el paso 2.

Prueba de calentamiento continuo

1. Setear la temperatura en $250^{\circ}C$, verificar la temperatura ambiente e iniciar el proceso.
2. Cuando empiece el proceso, guardar los datos desde Arduino cada 30 segundos.

¹⁶Usar Arduino facilita la obtención y manejo de datos por lo cual se pueden tomar cantidades mucho más grandes de datos y procesarlos directamente en un software, dada esta ventaja, tabularlos de forma manual se vuelve innecesario y complicado por lo cual en este documento no se presenta una tabulación explícita de los datos pero se puede encontrar los archivos en el enlace puesto en el ANEXO 9.

3. Medir el voltaje y la corriente cada minuto, calcular la resistencia eléctrica y registrar los datos según la *Tabla 5*

Prueba de enfriamiento continuo

1. Setear la temperatura del escalón 1 en $250^{\circ}C$ con tiempo de $10s$ y la temperatura de escalón 2 en $0^{\circ}C$ con tiempo de $120m$ e iniciar el proceso.
2. Cuando el proceso termine el primer escalón, guardar los datos desde Arduino cada 30 segundos hasta que la temperatura llegue a al menos $30^{\circ}C$.

Análisis y comparación de datos

Figura 31

Curva Temperatura - Tiempo para prueba de calentamiento secuencial con sistema de control

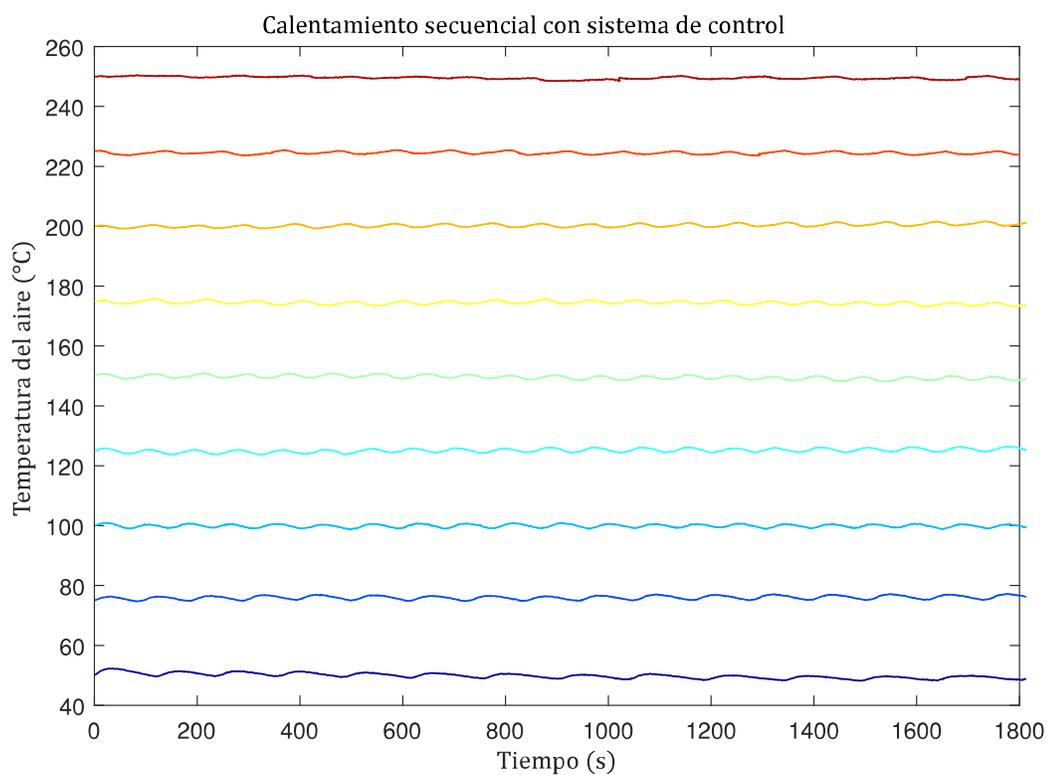


Tabla 11

Análisis estadístico de los datos mostrados en la Figura 31 en estado estable

Medidas	T_{sp1}	T_{sp2}	T_{sp3}	T_{sp4}	T_{sp5}	T_{sp6}	T_{sp7}	T_{sp8}	T_{sp9}
\bar{T}_{st}	50.73	75.6	100.3	125.09	149.85	174.7	199.7	224.55	249.67
T_{sp}	50	75	100	125	150	175	200	225	250
$T_{sp} - \bar{T}_{st}$	0.73	0.6	0.3	0.09	-0.15	-0.3	-0.3	-0.45	-0.33
sd	0.56	0.57	0.5	0.54	0.51	0.46	0.42	0.4	0.28
$Rango$	2.86	1.96	2.08	2.16	2.22	1.77	1.5	1.55	1.2

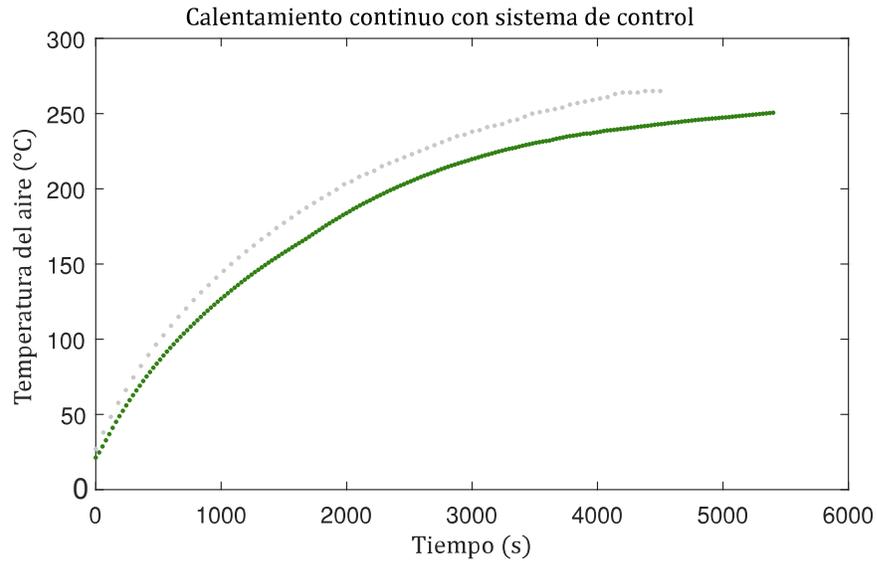
Nota: Revisar términos en la sección de nomenclatura

Análisis de la Figura 31 y la Tabla 11

- En la *Figura 31* se muestra el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo controlada por el sistema electrónico implementado.
- La media de temperatura más lejana a su set point tiene una diferencia de $0.73^{\circ}C$ correspondiente a T_{sp1} y la más cercana tiene una diferencia de $0.09^{\circ}C$ correspondiente a T_{sp4}
- Los valores correspondiente a T_{sp2} presentan la mayor dispersión de datos respecto a la media con un valor de desviación estándar de 0.56 puntos.
- Los valores correspondiente a T_{sp9} presentan la menor dispersión de datos respecto a la media con un valor de desviación estándar de 0.28 puntos.
- El sistema de control electrónico indica rangos de variación de temperatura entre $1.2^{\circ}C$ y $2.86^{\circ}C$ obteniendo una tolerancia de entre $\pm 0.6^{\circ}C$ y $\pm 1.43^{\circ}C$

Figura 32

Curva Temperatura - Tiempo para prueba de calentamiento continuo con sistema de control



Nota: Datos obtenidos con el sistema de control electrónico (verde), datos obtenidos con el sistema de termostatos (gris).

Análisis de la Figura 32

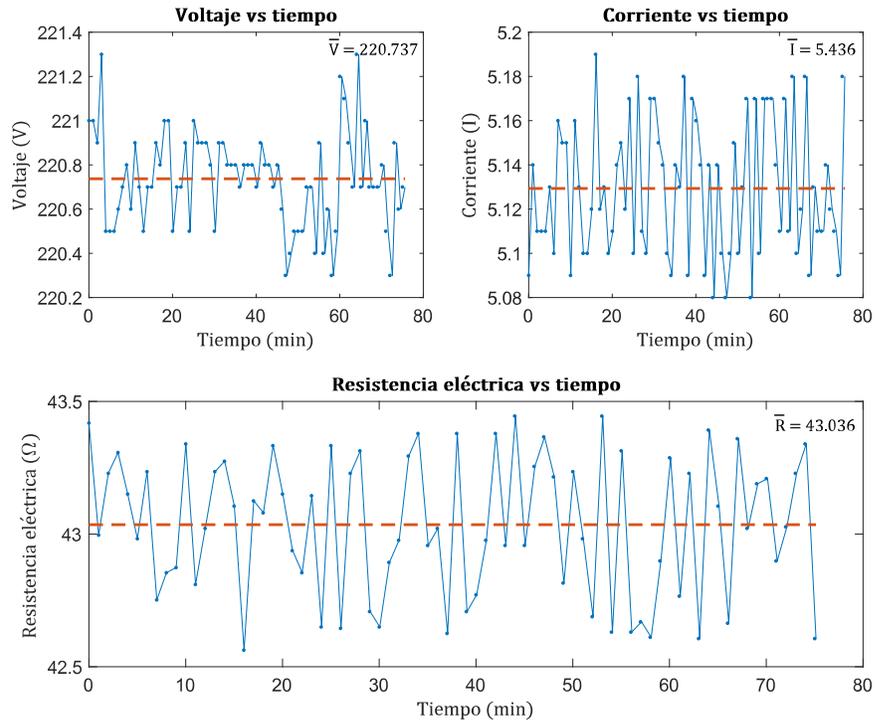
- La *Figura 32* muestra el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo cuando el sistema lo calienta hasta $250^{\circ}C$
- Los datos actuales tiene un promedio de diferencias relativas¹⁷ entre valores de temperatura de 0.2145 lo que indica que los datos actuales son 21.45 % diferentes de los datos tomados inicialmente.
- El proceso de calentamiento actual es levemente más lento que el anterior.

¹⁷Calculado como error relativo tomando como valor real la temperatura del proceso actual.

- Se llega a la temperatura límite de $250^{\circ}C$ en 89.1 minutos, 1.48 horas.

Figura 33

Variables eléctricas con el sistema de control

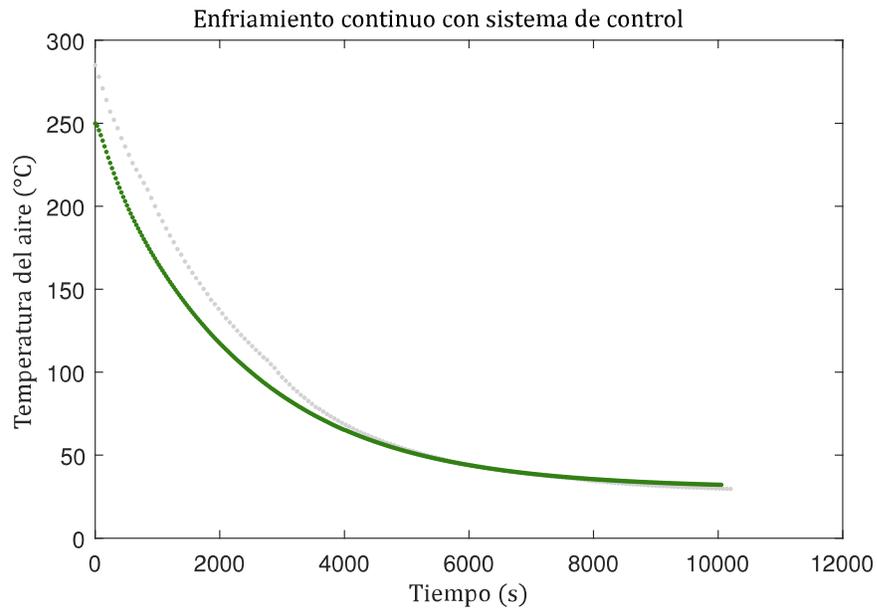


Análisis de la Figura 33

- En la *Figura 33* se muestra el comportamiento del voltaje, corriente y resistencia eléctrica calculada en el proceso de calentamiento continuo.
- Se tienen valores promedio de voltaje corriente y resistencia calculada de $220.737V$, $5.436A$ y 43.036Ω respectivamente
- La resistencia, en comparación con la *Figura 15* ha aumentado en promedio 2.786Ω

Figura 34

Curva Temperatura - Tiempo para prueba de enfriamiento continuo con sistema de control



Nota: Datos obtenidos con el sistema de control electrónico (verde), datos obtenidos con el sistema de termostatos (gris).

Análisis de la Figura 34

- En la *Figura 34* se muestra el comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo en el proceso de enfriamiento del aire desde $250^{\circ}C$.
- Los datos actuales tiene un promedio de diferencias relativas¹⁸ entre valores de temperatura de 0.0560 lo que indica que los datos actuales son 5.60 % diferentes de los datos tomados inicialmente.

¹⁸Calculado como error relativo tomando como valor real la temperatura del proceso actual.

- El proceso de enfriamiento actual llega a comportarse prácticamente igual que el proceso anterior desde los $\approx 50^{\circ}C$.
- Se llega a la temperatura límite de $300^{\circ}C$ en 167.5 minutos, 2.79 horas.

El modelo corregido para el calentamiento es el mostrado en la *Ecuación 30*.

$$T(t) = 231.4397[1 - \exp(-5.9496 \times 10^{-4}t)] + 25 \quad (30)$$

El modelo corregido para el enfriamiento es el mostrado en la *Ecuación 31*.¹⁹

$$T(t) = 224.87[\exp(-4.3886 \times 10^{-4}t)] + 25 \quad (31)$$

La *Ecuación 30* y la *Ecuación 31* siguen la misma lógica presentada en la caracterización inicial del horno y fueron realizados computacionalmente, revisar el algoritmo y el proceso en los archivos adjuntados en el enlace del ANEXO 9.

¹⁹El coeficiente B de esta ecuación es diferente al coeficiente B de la *Ecuación 30* ya que en el análisis computacional se utilizó una velocidad de entrada y salida del aire promedio de $1m/s$ y no de $1.835m/s$ dado que se ajustaba mejor a los datos

Análisis de costos

Tabla 12

Cuadro de costos directos

Denominación	Valor (USD/u)	Cantidad (u)	Total (USD)
Desoxidante: DESOX 350 desoxidante - fosfatizante	4.15	1	4.15
Franelas: Scotch-Brite paño esponja x 3u	2.44	1	2.44
Elementos de limpieza	3	1	3
Remaches: POPP 1/8 x 1/2	0.02	32	0.64
Tornillos autoroscantes: #6 x 1/2 x 20u	1.2	1	1.2
Tornillos autoroscantes: #8 x 1/2 x 4u	0.6	1	0.6
Lana de roca: ROCK WOOL Pro Rocs SL940 x 5u	72.6	1	72.6
Sensor de temperatura: TWIDEC RTD PT100 3.3ft	12.99	1	12.99
Convertidor RTD a digital: MAX31865	13.5	1	13.5
Módulo de alimentación: MEAN WELL IRM - 20 - 5	29.99	1	29.99
Microcontrolador: Arduino MEGA 2560	32.5	1	32.5
Relé: FOTEK SSR 25 - DA	25.99	1	25.99
Pantalla: NEXTION NX8048T070	142	1	142
Placa: PCB	40	1	40
Terminales: Plano de empalme rápido	0.3	4	1.2
Terminales: Plano	0.1	2	0.2
Terminales: De horquilla	0.1	4	0.4
Pernos: M3x15mm con tuerca	0.02	4	0.08
Pernos: M4x15mm con tuerca	0.05	7	0.35

Continuación

Cable de cobre calibre 16	0.8	1	0.8
Cable de aluminio niquelado calibre 12	2.35	1	2.35
Total			386.98

Tabla 13*Remuneración a profesionales y a estudiante*

Denominación	Valor (USD/h)	Cantidad (h)	Total (USD)
Elaboración y montaje de placa PCB	20	1	20
Inspección y lubricación de motor	10	1	10
Hora de laboratorio	5	108	540
Hora de asesoría docente	16	34	544
Hora de trabajo estudiante	11	400	4400
Total			5514

Tabla 14*Costos indirectos*

Denominación	Valor (USD/semana)	Cantidad (semana)	Total (USD)
Alimentación	12.5	20	250
Transporte	7.5	9	67.5
Servicios básicos	18	20	360
Total			677.5

- En la *Tabla 12* se muestran todos los materiales utilizados en el desarrollo de este proyecto.

- Los costos de la *Tabla 13* están distribuidos de la siguiente manera:

- Hora de laboratorio: $9 \text{ semanas} \times 4 \frac{\text{días}}{\text{semana}} \times 3 \frac{\text{horas}}{\text{día}} = 108 \text{ horas}$
- Hora de asesoría docente: $17 \text{ semanas} \times 2 \frac{\text{horas}}{\text{semana}} = 34 \text{ horas}$
- Hora de trabajo estudiante: $20 \text{ semanas} \times 5 \frac{\text{días}}{\text{semana}} \times 4 \frac{\text{horas}}{\text{día}} = 400 \text{ horas}$

- Los costos de la *Tabla 14* están distribuidos de la siguiente manera:

- Alimentación: $2.5 \frac{\text{USD}}{\text{día}} \times 5 \frac{\text{días}}{\text{semana}} = 12.5 \frac{\text{USD}}{\text{semana}}$
- Transporte: $1.5 \frac{\text{USD}}{\text{día}} \times 5 \frac{\text{días}}{\text{semana}} = 7.5 \frac{\text{USD}}{\text{semana}}$
- Servicios básicos: $72 \frac{\text{USD}}{\text{mes}} / 4 \frac{\text{semanas}}{\text{mes}} = 18 \frac{\text{USD}}{\text{semana}}$

Costo total del proyecto 6578.48 USD

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Sobre la caracterización del horno

- Se consiguió un modelo con un 99.67 % de fiabilidad con respecto a los datos para el proceso de calentamiento y un 99.93 % para el enfriamiento, esto se calcula en los archivos del enlace del ANEXO 9..

- En la *Figura 19* se evidencia que existe una diferencia muy grande entre el comportamiento del modelo matemático y los datos tomados, el valor del coeficiente A^{20} siendo el límite de temperatura, con un valor de $248.773(^{\circ}C)^{21}$, la temperatura límite presenta valor muy cercano a la estimación empírica realizada en el análisis de la *Figura 14* por lo cual se puede concluir que este coeficiente es correcto.
- Las propiedades involucradas en el coeficiente B^{22} de la *Ecuación 16* y la *Ecuación 22* implican una relación entre las pérdidas por unidad de temperatura $-(\rho_{\infty}vAc_{p\infty} + U_A)(W/K)$ y la cantidad de calor sensible por unidad de temperatura $\rho_{\infty}c_{p\infty}\mathcal{V}(J/K)$, esto físicamente representa la velocidad con la que el aire entrega energía al ambiente en forma de pérdidas en función de su capacidad de almacenar calor.
- Asumir que no existe un fenómeno espacial es el principal causante de la diferencia entre el modelo y los datos mostrados en el análisis de calentamiento y enfriamiento del aire, ya que si se considera este fenómeno se debería tomar en cuenta una derivada total de la temperatura de la siguiente forma en el término de energía almacenada.

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial \hat{n}}$$

se debería analizar el proceso de convección en el espacio, el cálculo de las pérdidas se debe evaluar como un problema de conducción bidimensional y se debe analizar el comportamiento del aire en un análisis fluido dinámico en puntos de interés.

- Al ser un proceso lento, es probable que la temperatura transitoria tenga un impacto

²⁰El coeficientes A es referido y explicado en la *Ecuación 18*

²¹Si a este valor A se le aumenta la temperatura ambiente tomada por Θ , resulta en un valor de temperatura máxima de $273.773(^{\circ}C)$ para el proceso

²²El coeficientes B es referido y explicado en la *Ecuación 18*

en el tratamiento térmico ideal por lo que se puede planificar un proceso adecuado despejando el tiempo del modelo obtenido en la *Ecuación 30* y la *Ecuación 31* y calculándolo según la temperatura requerida.

Sobre el mantenimiento

- Se corrigió los problemas físicos del horno mediante la limpieza y la rectificación de defectos.
- Se cambió el aislante con el propósito de evitar grandes pérdidas térmicas y el sobrecalentamiento de la superficie de las paredes externas.
- El mantenimiento del motor eléctrico es necesario, dadas las indicaciones del fabricante, para garantizar su correcto funcionamiento.
- La implementación del nuevo sistema de control garantiza que se pueda manejar de forma más precisa el proceso del horno y definirlo para que pueda realizarse en escalones como el usuario lo requiera.
- El plan de mantenimiento y el manual de usuario del nuevo sistema garantiza un buen uso del equipo para poder preservarlo como bien suministrado por la universidad.

Sobre el sistema de control

- El nuevo sistema de control es simple pero efectivo para los requerimientos que se plantearon para su diseño.
- La toma de datos funciona únicamente con un sensor de temperatura PT100 de 2, 3

o 4 hilos, si se quisiera cambiar el método, se debe cambiar todo el sistema montado en la placa PCB además del algoritmo programado en Arduino.

- Comparando el análisis realizado de las pruebas de calentamiento secuencial antes y después de la implementación del sistema de control, se tiene que hay una mejora en la tolerancia promedio de $\pm 1.865^{\circ}C$ a $\pm 0.611^{\circ}C$.
- De la comparación mencionada en la conclusión anterior también se observa que el sistema de control antiguo no era muy estable dada las diferencias tanto en las medidas del rango como en las de la desviación estándar.
- El sistema de control electrónico implementado garantiza un control mucho más estable de la temperatura además de que en lugar de niveles, este se maneja directamente con una temperatura de set point en la cual existe una pequeña oscilación debido al sistema ON - OFF pero está dentro de los parámetros requeridos.
- El sistema de control satisface las condiciones de diseño y cumple el objetivo de modernizar el horno.

Recomendaciones

- Realizar un análisis más profundo de las pérdidas de ser necesario, ya que existen secciones del horno que se calientan porque están directamente en contacto con partes metálicas interiores y no se puede evitar el aumento de la temperatura en sectores la carcasa.
- Para poder usar efectivamente la *Ecuación 30* y la *Ecuación 31* en la predicción del tiempo de calentamiento o enfriamiento del aire, considerar que se puede hacer

un cálculo más preciso con los coeficientes de la *Ecuación 19* y la *Ecuación 24*²³ modificando la velocidad de entrada y salida del aire v y el coeficiente χ utilizando el script de procesamiento de datos presentado en el ANEXO 9.

- Para poder variar la velocidad del aire v en los orificios superiores solamente girar las tapas para permitir más o menos el paso de aire.
- Al realizar un siguiente mantenimiento que requiera desarmar el horno, registrar o fotografiar como se encuentra cada parte, sus componentes y los arreglos de cables; para desarmar el panel, primero desconectar todos los cables del interruptor principal y sacar completamente el panel con los 6 tornillos que lo sujetan a la carcasa directamente.
- Tener precaución con el sensor de temperatura y el sistema de control, el recubrimiento del sensor es metálico y si se pone en contacto con cualquier parte de la placa PCB durante su funcionamiento puede causar un corto circuito, dado esto, tener la mayor cantidad posible de cable del sensor fuera del horno, no tirar con fuerza del mismo para evitar el daño de los hilos o del acondicionador de señal.
- Seguir el plan de mantenimiento para poder alargar la vida útil del equipo y seguir el manual de usuario para tener claro como funciona el sistema implementado.

²³Contar con el coeficiente de corrección desarrollado en la *Ecuación 28*

Parte IV

Referencias

- Arduino. (2021). *What is Arduino?* Consultado el 25 de octubre de 2021, desde <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- ASTM. (s.f.). *Standard Test Method for Performance of Convection Ovens*.
- Betancour, C., Cerezo, J. & Vega, A. (1970). Diseño de un sistema de control de temperatura. *Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*. <http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/taee:congreso-2006-1116/S3F04.pdf>
- Boyer, M. A. & Eke, K. I. (1998). Convection automated logic oven control. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34(2), 258-262. <https://doi.org/10.1109/28.663464>
- CISLAB. (2022). *Tipos de hornos y sus aplicaciones*. Consultado el 15 de diciembre de 2021, desde <https://www.cislab.mx/tipos-de-hornos-de-laboratorio/>
- De La Vega Pardo, W. R. & Enríquez Lozano, S. I. (2015). *Diseño e implementación de un sistema de control automático para seis hornos del Laboratorio de Tratamientos Térmicos de la Escuela Politécnica Nacional* (Tesis de ingeniería). Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11521>
- de Andrade Martins, R. (2020). JOULE'S 1840 MANUSCRIPT ON THE PRODUCTION OF HEAT BY VOLTAIC ELECTRICITY. *The Royal Society*. <https://doi.org/10.1098/rsnr.2020.0027>

- Dick, E. (2015). *Fundamentals of turbomachines* (Vol. 109). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9627-9>
- Dunn, W. C. (2005). *Fundamentals of industrial instrumentation and process control*. McGraw - Hill.
- Dután Rodríguez, P. M. (2000). *Diseño y reconstrucción del control de temperatura de un horno con calentamiento eléctrico* (Tesis de ingeniería). Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11755>
- Filipiuk, M. (s.f.). *UI Design Principles*.
- Floyd, T. L. (2007). *Principios de Circuitos Eléctricos*. PRENTICE HALL.
- Gutiérrez Pulido, H. & de la Vara Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos* (3ra Ed.). McGraw - Hill.
- Hägglund, T. & Åström, K. J. (1995). *PID controllers: theory, design, and tuning* (2da Ed.). Instrumentation Society of America.
- Herrera García, M. V. (2015). *Diseño e Implementación de un Sistema para Automatización de Dos Hornos para Tratamiento Térmico pertenecientes al Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla del Departamento de Materiales de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional* (Tesis de ingeniería). Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10535>
- Incropera, F. P., Bergman, T. L., Dewitt, D. P. & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer* (7ma). Jhon Wiley & Sons, Inc.

- Jurado Robayo, A. S. & Mosquera Gavilánez, J. L. (2021). *Diseño, construcción e implementación de un sistema de control digital para el secado de bloques prensados y otros derivados de bambú, mediante la automatización de un horno para BIG-BAMBOO S.A.* (Tesis de ingeniería). Universidad de las Fuerzas Armadas Espe. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/6317>
- Kreith, F., Manglik, R. M. & Bohn, M. S. (2011). *Principles of heat and mass transfer* (7ma). CENGAGE Learning.
- Lamb, F. (2013). *Industrial Automation Hands-On*. McGraw - Hill.
- Manesis, S. & Nikolakopoulos, G. (2018). *Introduction to industrial automation*. CRC Press.
- maxim-integrated. (2010). *Signal integrity products*. Consultado el 23 de octubre de 2021, desde <https://www.maximintegrated.com/en/products/interface/signal-integrity>
- McMillan, G. K. (2011). *Advanced temperature measurement and control* (2nd Ed.). International Society of Automation.
- Medrano Márquez, J. Á., Gonzáles Ajuech, V. L. & Díaz de león Santiago, V. (2017). *Mantenimiento Técnicas y aplicaciones industriales* (1ra). FRUPO EDITORIAL PATRIA.
- Muñoz Abella, M. B. *MANTENIMIENTO INDUSTRIAL*. Universidad Carlos III de Madrid. 2020.
- Nilsson, J. W. & Riedel, S. A. (2005). *Circuitos Eléctricos*. PRENTICE HALL.
- O'Dwyer, A. (2006). *Handbook of PI and PID controller tuning rules* (2da). Imperial Collague Press.

- Peñafiel Pérez, R. J. (2021). *Automatización del horno autoclave para pruebas y ensayos de materiales compuestos empleados en reparaciones estructurales del avión A-29B Super Tucano de la Fuerza Aérea Ecuatoriana* (Tesis de ingeniería). Universidad de las Fuerzas Armadas Espe. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/25631>
- Suárez Cañizares, M. A. (2019). *Automatización del horno autoclave de secado de materiales compuestos del Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana-CIDFAE* (Tesis de ingeniería). Universidad de las Fuerzas Armadas Espe. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/20837>
- Tempco. (1972). *PRODUCTS / Electric Heaters and Elements*. Consultado el 12 de octubre de 2021, desde <https://www.tempco.com/Tempco/Products/Electric-Heaters-and-Elements.htm>
- Tormec. (2002). *CORPORATE / PRODUCTION-QUALITY-NEWS*. Consultado el 12 de octubre de 2021, desde <https://balcikheatingelements.com>
- USBR. (s.f.). *Procedure for Calibrating Ovens*.
- Valdivia Miranda, C. (2012). *Sistemas de control continuos y discretos* (1ra). Paraninfo.
- Visioli, A. (2006). *Practical PID Control*. Springer.
- WEG. *GUÍA PRÁCTICA DE CAPACITACIÓN TÉCNICO/COMERCIAL: MOTOR ELÉCTRICO MODULO I*. 2020.

Parte V

Anexos