



**Ingeniería inversa y optimización de un horno de vacío para los laboratorios de Ciencia de los
Materiales y Procesos de Manufactura del DCEM**

Robalino Romero, Estuardo Andrés y Romero Reyes, Kevin Mateo

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Castellanos Villa, Santiago David PhD

28 de febrero del 2022

COPYLEAKS

Tesis_HornodeVacio_Copyleaks.docx

Scanned on: 1:47 March 5, 2022 UTC



SANTIAGO DAVID
CASTELLANOS
VILLA



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	216
Words with Minor Changes	9
Paraphrased Words	443
Omitted Words	6



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de integración curricular, “**Ingeniería inversa y optimización de un horno de vacío para los laboratorios de Ciencia de los Materiales y Procesos de Manufactura del DCEM**” fue realizado por los señores **Robalino Romero, Estuardo Andrés y Romero Reyes, Kevin Mateo** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 28 de febrero de 2022



Firmado digitalmente por:
**SANTIAGO DAVID
CASTELLANOS
VILLA**

.....
Ing. Castellanos Villa, Santiago David PhD

C. C 1716962608



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Robalino Romero, Estuardo Andrés** y **Romero Reyes, Kevin Mateo**, con cédulas de ciudadanía n° 1725081242 y 1717815672, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **“Ingeniería inversa y optimización de un horno de vacío para los laboratorios de Ciencia de los Materiales y Procesos de Manufactura del DCEM”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 28 de febrero de 2022

Robalino Romero, Estuardo Andrés

C.C.: 1725081242

Romero Reyes, Kevin Mateo

C.C.: 1717815672



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **Robalino Romero, Estuardo Andrés** y **Romero Reyes, Kevin Mateo**, con cédulas de ciudadanía n° 1725081242 y 1717815672, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: “**Ingeniería inversa y optimización de un horno de vacío para los laboratorios de Ciencia de los Materiales y Procesos de Manufactura del DCEM**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 28 de febrero de 2022

Robalino Romero, Estuardo Andrés

C.C.: 1725081242

Romero Reyes, Kevin Mateo

C.C.: 1717815672

Dedicatoria

A mis padres, por haberme forjado como la persona que soy, por sus enseñanzas, por los valores que me inculcaron, por todo el apoyo y confianza que han tenido en mi durante toda mi vida; sin ustedes esto no hubiese sido posible.

A mis hermanas, que al igual que mis padres, siempre me han apoyado.

Robalino Romero, Estuardo Andrés

A mis padres, quienes con su cariño, paciencia, dedicación y esfuerzo me han permitido vivir esta etapa, gracias por ayudarme a no decaer en momentos difíciles y por estar siempre para mí. A mis hermanas, quienes han sido una motivación para seguir adelante, espero ser un buen ejemplo para ellas y enseñarles que pese a las adversidades siempre se puede continuar hasta alcanzar sus sueños.

Romero Reyes, Kevin Mateo

Agradecimiento

A Dios, por permitirme cumplir con éxito cada uno de mis objetivos.

A mis padres y hermanas, por haberme brindado su apoyo y confianza durante toda mi trayectoria académica.

A mi tutor, por la orientación, enseñanzas y conocimientos brindados a lo largo del desarrollo de este trabajo.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE y al Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica por todo el conocimiento y enseñanzas brindadas a lo largo de mi carrera universitaria.

Robalino Romero, Estuardo Andrés

Quiero agradecer a Dios por permitirme vivir la etapa universitaria con aprendizaje intelectual y crecimiento personal. A mis padres, hermanas, abuelito y tío por confiar en mí, por inculcarme valores, principios y por apoyarme incondicionalmente. A mi tutor Ing. Santiago Castellanos PhD. por la orientación y por compartir sus conocimientos para el desarrollo del proyecto. A mis amigos por acompañarme durante este proceso.

Romero Reyes, Kevin Mateo

Índice de contenidos

Resultado Copyleaks	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Índice de contenidos.....	8
Índice de tablas	14
Índice de figuras.....	17
Resumen	21
Abstract.....	22
Capítulo I Generalidades	23
Antecedentes	23
Definición del problema.....	24
Objetivos.....	25
<i>General</i>	25
<i>Específicos</i>	25
Alcance.....	25
Justificación.....	26
Capítulo II Estado del Arte.....	27
Hornos industriales	27
Hornos eléctricos de resistencias	28
<i>Clasificación de hornos de resistencias</i>	29

<i>Ventajas del calentamiento eléctrico</i>	29
<i>Partes de un horno eléctrico de resistencias</i>	30
Estructura metálica.	30
Cámara de calentamiento.	30
Fuente de calor o elemento calefactor.	31
Material aislante.	31
Sistema o controlador de temperatura.	31
Resistencias eléctricas.....	31
<i>Resistencias blindadas</i>	32
<i>Material de los elementos de calefacción</i>	33
Transferencia de calor en hornos.....	34
<i>Mecanismos de transferencia de calor en hornos</i>	35
Conducción.....	35
Convección.	35
Radiación.....	37
<i>Eficiencia y pérdidas de calor en hornos de resistencias</i>	38
Automatización de procesos.....	38
<i>Entendimiento del problema</i>	39
<i>Descripción de los equipos del sistema y tabla de asignación de registros</i>	39
<i>Selección de equipos</i>	39
<i>Programación: PLC, HMI y SCADAS</i>	39
<i>Diseño de planos y conexiones</i>	40
<i>Pre comisionamiento, comisionamiento y puesta en marcha</i>	40
Pre comisionamiento	40

	10
Comisionamiento.....	40
Puesta en marcha.....	40
Capítulo III Ingeniería inversa del equipo.....	41
Desmontaje del equipo.....	41
Análisis del estado funcional de los componentes.....	44
Establecimiento de la arquitectura del producto.....	48
Recuperación de los componentes.....	52
Capítulo IV Cálculo, dimensionamiento y selección de los elementos del sistema de calentamiento.....	57
Consideraciones para el dimensionamiento del sistema de calentamiento.....	57
<i>Temperatura del medio ambiente</i>	57
<i>Parámetros físicos de la cámara del horno</i>	57
Dimensiones de la cámara del horno.....	57
Propiedades del material de la cámara del horno.....	58
Aislamiento térmico.....	58
Diseño térmico.....	62
<i>Consideraciones para el cálculo</i>	62
<i>Cálculo de las pérdidas de calor al ambiente</i>	62
<i>Pérdidas de calor por conducción</i>	66
Pared cilíndrica compuesta.....	66
Pared plana.....	67
<i>Pérdida de calor por convección</i>	69
<i>Espesor del aislante</i>	73
<i>Pérdida de calor por radiación</i>	74

	11
<i>Estado transitorio</i>	75
<i>Calor almacenado</i>	78
<i>Potencia eléctrica</i>	79
<i>Resistencias eléctricas</i>	80
<i>Eficiencia</i>	81
<i>Simulación térmica del equipo</i>	82
Capítulo V Automatización y control.....	86
Requerimientos del sistema.....	86
Sistema de control	86
<i>Selección de los elementos constitutivos del sistema de control</i>	87
<i>Controlador</i>	88
<i>Sensor de temperatura</i>	90
<i>Controlador lógico programable PLC</i>	92
Consideraciones para la selección del PLC	92
Entradas y salidas.....	93
Características del PLC.....	94
<i>HMI</i>	94
<i>Relé de estado sólido SSR</i>	95
<i>Diseño del sistema de control</i>	95
Programacion.....	96
<i>Entorno de programación</i>	96
Software PLC.....	96
Software HMI.....	96
COMMGR.....	96

<i>Diseño de la HMI</i>	97
Variables de interés del HMI.	97
Arquitectura y navegación.	97
Distribución de pantallas.....	99
Pantalla de proceso	100
Pantalla de históricos	101
Pantalla de configuración	101
Pantalla de modo manual	103
Color y texto.....	103
Indicadores.....	105
Alarmas.	105
Variables de la programación.....	106
<i>Protocolo de comunicación</i>	107
Configuración de comunicación MODBUS por RS-485.	108
<i>Programación del PLC</i>	110
Red 1: Configuración de comunicación Modbus por RS-485.....	110
Red 2: Encendido del sistema.....	110
Red 3: Envío del valor de temperatura desde el controlador de temperatura.....	110
Red 4: Parámetros del controlador PID.....	111
Red 5: Control PID de temperatura.	112
Red 6: Envío de salida del PID a pulsos para control del SSR.....	113
Red 7: Reseteo de variables cuando se apaga el sistema.	113
Red 8: Modo manual.	113
Red 9: Animación del estatus de funcionamiento.	114

Red 10: Comparador de alarma de alta temperatura.	114
<i>Cables y elementos de protección</i>	114
Cables.....	114
Elementos de protección.	115
<i>Armado de tablero</i>	115
<i>Sintonización del equipo</i>	118
Ingreso manual de datos.	118
Modo de control automático.	118
Capítulo VI Pruebas de funcionamiento y análisis	119
Prueba de calentamiento a máxima temperatura	119
Prueba de escalón con enfriamiento	121
Prueba de calentamiento a doble escalón	122
Prueba de hermeticidad.....	124
Tratamiento térmico de envejecimiento	124
Análisis de las pruebas de funcionamiento del horno.....	127
Capítulo VII Análisis Económico y Financiero	129
Costos directos.....	129
Costos indirectos.....	130
Capítulo VIII Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros	131
Conclusiones	131
Recomendaciones	132
Trabajos futuros.....	132
Bibliografía	133
Apéndices	136

Apéndice A. Tablas de pruebas de funcionamiento	136
Apéndice B. Planos generales del horno de vacío	136
Apéndice C. Plano de conexiones del sistema de control	136
Apéndice D. Manual técnico del horno de vacío	136

Índice de tablas

Tabla 1 Ventajas del calentamiento eléctrico.	29
Tabla 2 Partes de una resistencia blindada.....	32
Tabla 3 Propiedades de algunos elementos calefactores.	34
Tabla 4 Correlaciones empíricas del número de Nusselt para la convección natural sobre superficies.....	36
Tabla 5 Números adimensionales.....	37
Tabla 6 Análisis del estado funcional inicial de los componentes del equipo.	44
Tabla 7 Módulos y criterios de agrupación.	49
Tabla 8 Recuperación y reemplazo de los componentes del equipo.	53
Tabla 9 Temperaturas ambientales en la ciudad de Sangolquí.....	57
Tabla 10 Propiedades termofísicas del acero AISI 316.....	58
Tabla 11 Valoración para las matrices de decisión.	59
Tabla 12 Criterios para la selección del aislante.	59
Tabla 13 Evaluación para el criterio de menor precio del aislante.	60
Tabla 14 Evaluación para el criterio de temperatura límite de uso continuo del aislante.	60
Tabla 15 Evaluación para el criterio de temperatura máxima del aislante.	60
Tabla 16 Selección de la alternativa más adecuada.....	61
Tabla 17 Propiedades termofísicas de la manta de fibra cerámica.....	61
Tabla 18 Parámetros geométricos de las paredes planas y cilíndricas.....	66

Tabla 19 Aproximación de las pérdidas de calor por conducción.	68
Tabla 20 Correlaciones empíricas del número de Nusselt para la convección natural sobre superficies.....	69
Tabla 21 Números adimensionales.....	70
Tabla 22 Propiedades termofísicas del aire para la temperatura de película.	71
Tabla 23 Aproximación de las pérdidas de calor por convección.....	71
Tabla 24 Iteraciones de los valores de interés.	72
Tabla 25 Pérdidas de calor por conducción.	73
Tabla 26 Pérdidas de calor por convección.....	73
Tabla 27 Pérdidas de calor por radiación.....	75
Tabla 28 Calor almacenado del tanque, aire y carga.	79
Tabla 29 Requerimientos de temperatura para la automatización.	86
Tabla 30 Valoración para las matrices de decisión.	87
Tabla 31 Criterios para la selección del controlador.....	88
Tabla 32 Evaluación para el criterio de menor precio.....	89
Tabla 33 Evaluación para el criterio de interfaz.	89
Tabla 34 Evaluación para el criterio de monitorio y recolección de datos.....	89
Tabla 35 Evaluación para el criterio Utilidad a largo plazo.	90
Tabla 36 Selección de la alternativa más adecuada.....	90
Tabla 37 Criterios para la selección del sensor de temperatura.	91
Tabla 38 Evaluación para el criterio de menor precio.....	91
Tabla 39 Evaluación para el criterio de condición de operación.	91
Tabla 40 Evaluación para el criterio de aplicación típica.....	92
Tabla 41 Selección de la alternativa más adecuada.....	92

Tabla 42 Entradas y salidas requeridas.	93
Tabla 43 Datos técnicos generales del PLC DELTA DVP24ES2.	94
Tabla 44 Variables de la HMI.	97
Tabla 45 Medidas de la plantilla de la pantalla de proceso.	100
Tabla 46 Medidas de la plantilla de la pantalla de históricos.	101
Tabla 47 Medidas de la plantilla de la pantalla de configuración.	102
Tabla 48 Medidas de la plantilla de la pantalla de modo manual.	103
Tabla 49 Colores usados y su código RGB.	104
Tabla 50 Fuente y tamaño usando.	104
Tabla 51 Variables usadas en la programación.	106
Tabla 52 Parámetros de comunicación.	108
Tabla 53 Elementos del tablero de control.	117
Tabla 54 Medidores de las termocuplas usadas en las pruebas de funcionamiento.	119
Tabla 55 Resultados de la prueba de calentamiento a máxima temperatura.	121
Tabla 56 Resultados de la prueba de escalón con enfriamiento.	122
Tabla 57 Resultados de la prueba de doble escalón.	123
Tabla 58 Resultados de la prueba de hermeticidad.	124
Tabla 59 Régimen del proceso del tratamiento térmico.	125
Tabla 60 Datos de dureza Vickers de la probeta antes del tratamiento de envejecimiento artificial.	126
Tabla 61 Datos de dureza Vickers de la probeta después del tratamiento de envejecimiento artificial.	126
Tabla 62 Costos directos.	129
Tabla 63 Costos indirectos.	130

Tabla 64 Costo total.....	130
----------------------------------	-----

Índice de figuras

Figura 1 Clasificación de los tipos de calentamiento eléctrico.....	27
Figura 2 Calentamiento indirecto por resistencias	28
Figura 3 Clasificación hornos de resistencias	29
Figura 4 Partes de un horno eléctrico de resistencias.....	31
Figura 5 Resistencia blindada.....	32
Figura 6 Vista delantera del horno de vacío – Estado inicial.....	41
Figura 7 Vista delantera del horno de vacío sin puerta – Estado inicial	42
Figura 8 Vista trasera del horno de vacío – Estado inicial	42
Figura 9 Vista lateral sin cubierta del horno de vacío – Estado inicial.....	43
Figura 10 Vista inferior del tanque – Estado inicial.....	43
Figura 11 Esquema del horno	48
Figura 12 Disposición geométrica aproximada del horno en vista isométrica	50
Figura 13 Disposición geométrica aproximada del horno en vista lateral.....	50
Figura 14 Diagrama de interacción incidental del horno	51
Figura 15 Dimensiones de la cámara del horno	58
Figura 16 Modelo y circuito térmico de resistencias para la pared cilíndrica compuesta del horno	63
Figura 17 Modelo y circuito térmico de resistencias para la pared plana trasera del horno	64
Figura 18 Modelo y circuito térmico de resistencias para la pared plana delantera del horno ...	65
Figura 19 Conservación de la energía en el volumen de control de la pared compuesta	75
Figura 20 Respuesta de escalón unitario para la función de transferencia del sistema térmico del horno	78

Figura 21 Configuración geométrica de la resistencia tubular implementada en el horno.....	80
Figura 22 Disposición de las resistencias en la pared cilíndrica del horno	81
Figura 23 Diseño CAD del horno en software Autodesk Fusion360	82
Figura 24 Gráfica de temperatura en función del tiempo obtenida de Ansys.....	83
Figura 25 Resultados obtenidos de la simulación para el horno recubierto con aislante – vista isométrica	83
Figura 26 Resultados obtenidos de la simulación para el horno recubierto con aislante – vista trasera.....	84
Figura 27 Resultados obtenidos de la simulación para el horno descubierto – vista isométrica .	84
Figura 28 Resultados obtenidos de la simulación para el horno descubierto – vista trasera.....	85
Figura 29 Diagrama de bloques del lazo de control	87
Figura 30 PLC modelo DVP24E2	93
Figura 31 HMI Delta DOP103 de 4.3 pulgadas	94
Figura 32 Relé de estado sólido	95
Figura 33 Esquema general del sistema de control.....	96
Figura 34 Arquitectura modelo de la pantalla principal.....	97
Figura 35 Diagrama de flujo de navegabilidad de la HMI.....	98
Figura 36 Diagrama de flujo de la pantalla de configuración de la HMI	98
Figura 37 Diagrama de flujo del modo manual de la HMI.....	99
Figura 38 Diagrama de Gutenberg	99
Figura 39 Plantilla para pantalla de proceso	100
Figura 40 Plantilla para pantalla de históricos	101
Figura 41 Plantilla para pantalla de configuración	102
Figura 42 Plantilla para pantalla del modo manual.....	103

Figura 43 Indicador del estatus del horno	105
Figura 44 Estatus de alarma activada	105
Figura 45 Maestro y esclavos del sistema	107
Figura 46 Parámetros de comunicación entre HMI y PLC	108
Figura 47 Comunicación entre HMI y controlador de temperatura	109
Figura 48 Parametrización del controlador de temperatura	109
Figura 49 Bloque de configuración del protocolo de comunicación Modbus RS-485	110
Figura 50 Bloque de movimiento de datos	111
Figura 51 Diagrama de bloque de la ecuación con control PID	112
Figura 52 Bloque de PID	112
Figura 53 Bloque GPWM	113
Figura 54 Bloque PWM	113
Figura 55 Tabla para la selección del cable de conexión	114
Figura 56 Tablero de control armado	116
Figura 57 Módulo de control del horno	117
Figura 58 Horno y los dispositivos de medición	120
Figura 59 Esquematación de la ubicación de los elementos de medición en el tanque del horno	120
Figura 60 Gráfica de temperatura en función del tiempo de la prueba de calentamiento a máxima temperatura	121
Figura 61 Gráfica de temperatura en función del tiempo de la prueba de un escalón con enfriamiento	122
Figura 62 Gráfica de temperatura en función del tiempo de la prueba de calentamiento a doble escalón	123

Figura 63 Régimen teórico del tratamiento térmico.....	125
Figura 64 Probeta utilizada en la prueba de tratamiento térmico	126

Resumen

El Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE dispone de un horno de vacío marca EHRET modelo VT970 de procedencia alemana, el cual se encontraba inoperante debido al mal estado de sus componentes físicos y electrónicos.

El presente proyecto consiste en analizar y recuperar dicho horno, el cual será capaz de alcanzar

temperaturas de hasta 220°C con una atmosfera controlada. El equipo será usado en la investigación de tratamientos térmicos y en el desarrollo de procedimientos de fabricación de

materiales compuestos en el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica (DCEM).

Para la ejecución del proyecto, se realizó la revisión del estado del arte de hornos y la ingeniería inversa del equipo, esto con el propósito de proporcionar información sobre su funcionamiento,

evaluar su estado, determinar su arquitectura, y de esta manera, plantear las mejoras a ser implementadas.

La recuperación e implementación de las mejoras incluyeron actividades de mantenimiento correctivo, análisis y diseño térmico, automatización y validación mediante software CAD/CAE.

Una vez recuperado el horno, se incorporó un sistema de control constituido principalmente por un PLC, un controlador de temperatura y un HMI, el cual permita controlar la variable de

temperatura y realizar el monitoreo y adquisición de datos de operación en tiempo real.

Por último, se validó el funcionamiento del equipo mediante una serie de pruebas que corroboraron su validez.

Palabras clave

- **HORNO DE VACÍO**
- **ATMÓSFERA CONTROLADA**
- **INGENIERÍA INVERSA**
- **AUTOMATIZACIÓN**

Abstract

The Laboratory of Manufacturing Processes of the University of the Armed Forces - ESPE has an EHRET VT970 vacuum furnace of German origin, which was inoperative due to the poor condition of its physical and electronic components.

This project consists of analyzing and recovering this furnace, which will be capable of reaching temperatures up to 220°C with a controlled atmosphere. The equipment will be used in heat treatment research and the development of manufacturing procedures for composite materials in the Department of Energy and Mechanical Sciences (DCEM).

To direct the project, a review of the state of the art of furnaces and reverse engineering of the equipment was carried out. It was done with the purpose of providing information on its operation, evaluating its status, determining its architecture, and in this way, proposing the improvements to be implemented.

Recovery and implementation of improvements included corrective maintenance activities, thermal analysis and design, automation and validation using CAD/CAE software.

After recovering the oven, a control system was incorporated, it is mainly formed by a PLC, a temperature controller and an HMI, the system allows to control the temperature variable and perform the monitoring and acquisition of operation data in real time.

Finally, the operation of the furnace was validated through a series of tests that corroborated its validity.

Keywords

- **VACUUM FURNACE**
- **CONTROLLED ATMOSPHERE**
- **REVERSE ENGINEERING**
- **AUTOMATION**

Capítulo I Generalidades

Antecedentes

Para mejorar las propiedades de un material se realizan tratamientos térmicos, si se ejecutan en presencia de oxígeno, este puede ocasionar degradación en la superficie del material tratado que puede ser acero o aluminio. Se puede eliminar o disminuir este problema si se realizan estos procesos en una atmósfera controlada de presión y temperatura, por lo que contar con un equipo capaz de proporcionar estas condiciones es muy útil; es por esto que (Niño & Rosas, 2018) realizaron el diseño y construcción de un horno de vacío para llevar a cabo tratamientos térmicos. Como elemento calefactor emplearon resistencias eléctricas de Khantal y comprobaron que, en los tratamientos térmicos realizados en un horno de vacío, el material disminuye el tamaño de grano y aumenta su dureza respecto a los tratamientos térmicos convencionales.

Una atmósfera controlada también es un factor vital para el secado de materiales, es así que (Hubbard, Putman, Techtmann, & Pearce, 2021) diseñaron un horno de vacío de baja temperatura para demostrar su efectividad en el secado respecto a hornos de secado convencionales. Al finalizar su diseño, construcción y pruebas llegaron a determinar que el horno de vacío presenta mayor eficacia al secar materiales y emplea un menor tiempo en relación a los hornos tradicionales que se emplean.

Además del secado de materiales, las atmósferas controladas también han tenido un auge en la industria aeronáutica para la reparación de componentes de aeronaves usualmente fabricados en materiales compuestos. (Arroba, Telenchana, Paredes, Fiallo, & Vaca, 2021) realizaron una serie de ensayos experimentales en materiales compuestos de matriz polimérica haciendo uso de atmosferas controladas. Finalmente se comprueba que los procesos realizados

en una atmósfera controlada de vacío proporcionan una mejor adherencia entre los componentes del material compuesto.

Un parámetro importante e indispensable en el diseño de equipos es la automatización ya que permite estandarizar sus operaciones a la vez que promueve su eficiencia. Es así que, (Herrera García, 2015) realizó la implementación de un sistema de automatización para dos hornos destinados a realizar tratamientos térmicos. El autor sustenta su trabajo con la implementación de un sistema de control constituido principalmente por un PLC S7-1200 de SIEMENS y un HMI con software LabVIEW que facilita la interacción humano-máquina. El sistema le permite configurar la operación de los equipos, controlar las variables y realizar la adquisición de datos de operación en tiempo real.

También, (Suárez Cañizares, 2019) realiza la automatización de un horno autoclave de secado para materiales compuestos; para esto, hace uso de un sistema de control constituido por un PLC S7-1200 de SIEMENS y un HMI programado con software ArchestrA; esto facilita el monitoreo y control de las principales variables eléctricas y no eléctricas del equipo. Como eje fundamental de la automatización el autor realizó un control PID para mantener la temperatura del horno constante en rangos de 20°C a 160°C según se requiera.

Definición del problema

El Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE dispone de un horno de vacío marca EHRET modelo VT970 de procedencia alemana, este equipo se encuentra en desuso debido al mal estado de sus componentes físicos, así como también por su déficit tecnológico relacionado con el sistema de control del proceso. Además, carece de un método eficaz de interacción humano – máquina que permita la adquisición y monitoreo de datos. Todo esto imposibilita su pleno funcionamiento en ámbitos educativos, de investigación y/o laborales.

Objetivos

General

Realizar la recuperación, optimización y automatización del horno de vacío marca EHRET modelo VT970 mediante el uso de tecnología local para la investigación en materiales compuestos por parte de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Específicos

- Realizar un proceso de ingeniería inversa del horno de vacío y definir las características técnicas de los componentes de este.
- Formular un procedimiento tecnológico para el diseño de los elementos constitutivos de los sistemas de calentamiento y control del horno de vacío.
- Desarrollar el diseño planeado y evaluar el funcionamiento del horno de vacío recuperado.
- Establecer un protocolo experimental de pruebas para la validación del horno de vacío recuperado.

Alcance

El presente proyecto consiste en analizar y recuperar un horno de vacío marca EHRET modelo VT970 para ser usado en la investigación de tratamientos térmicos y en el desarrollo de procedimientos de fabricación de materiales compuestos en el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica (DCEM). Para cumplir con este objetivo se examina el estado del arte de los hornos de vacío y se realiza la ingeniería inversa del mismo con el fin de analizar su estado. De esta manera, se implementan las mejoras según las necesidades del DCEM.

Como cúspide del proyecto, se tiene un horno de vacío funcional y operativo capaz de alcanzar temperaturas de hasta 220°C, el cual cuenta con un sistema de control que permita

controlar la variable de temperatura, realizar el monitoreo y adquisición de datos de operación en tiempo real y tenga una interfaz intuitiva que permita configurar y operar el equipo.

Asimismo, se cuenta con la documentación de respaldo de diseño y los manuales de montaje, uso y mantenimiento del horno, constituyendo la información técnica del equipo.

Justificación

El Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica DCEM, específicamente sus laboratorios de Ciencia de los Materiales y Procesos de Manufactura conjuntamente con la Fuerza Aérea Ecuatoriana se encuentran desarrollando proyectos fundamentados en el estudio de materiales compuestos. Para llevar a cabo estos proyectos resulta sumamente útil contar con un equipo capaz de controlar la atmósfera circundante de su recinto de trabajo. El laboratorio de Procesos de Manufactura dispone de un equipo con estas características, sin embargo, se encuentra en desuso.

El desuso prolongado de equipos causa deterioro de sus partes y poca o nula precisión en los procesos que realice. Esto, origina que muchas veces se pierden equipos por el hecho de no poder repararlos o ponerlos en funcionamiento. Ejecutar procesos de ingeniería inversa para la recuperación del horno de vacío, propicia una oportunidad para abstraer información técnica del equipo, y así, implementar mejoras en su diseño para darle una nueva vida útil al equipo y que sea utilizado para el desarrollo de dichos proyectos del DCEM.

Capítulo II Estado del Arte

Hornos industriales

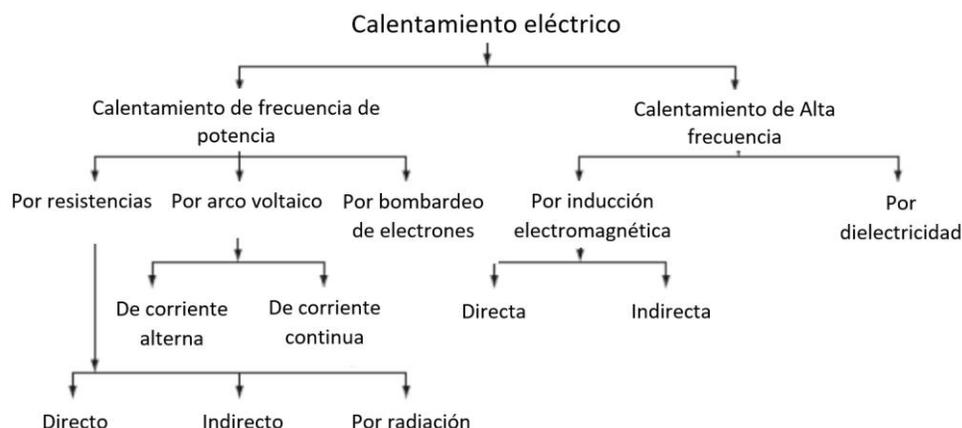
Los hornos industriales son equipos utilizados en la industria, en los que se calientan piezas o elementos colocados en su interior por encima de la temperatura ambiente (Astigarraga, 1994). Estos deben ser capaces de mantener la temperatura en su interior y a su vez, minimizar las pérdidas energéticas.

La energía calorífica requerida para el calentamiento de los hornos puede proceder de gases calientes producidos en la combustión de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos; estos calientan las piezas por contacto directo entre ambos o indirectamente a través de tubos radiantes o intercambiadores en general.

Otra fuente calorífica importantes es la energía eléctrica que puede provenir en diversas formas como: arco voltaico de corriente alterna o continua, inducción electromagnética, alta frecuencia en forma de dielectricidad o microondas, resistencia óhmica directa de las piezas y resistencias eléctricas dispuestas en el horno (Astigarraga, 1994). En la Figura 1 se muestra un esquema de la clasificación de los tipos de calentamiento eléctrico.

Figura 1

Clasificación de los tipos de calentamiento eléctrico



Nota. Tomado de (Sivanagaraju, 2010).

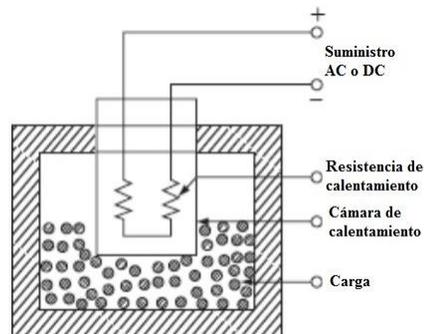
Hornos eléctricos de resistencias

A los hornos que tienen calentamiento eléctrico por resistencias se los conoce como hornos de resistencias.

Las resistencias eléctricas aportan al equipo la energía eléctrica que necesita para calentar su interior; este calentamiento se produce por efecto Joule, es decir, la energía eléctrica se transforma en calor a través de las resistencias y transfieren ese calor al horno y a su contenido a través de los tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación; a este fenómeno se le conoce como calentamiento indirecto por resistencias, esto se muestra en la *Figura 2*.

Figura 2

Calentamiento indirecto por resistencias



Nota. Tomado de (Sivanagaraju, 2010).

El objetivo del calentamiento en hornos es muy variado, para el caso, se destacan los siguientes:

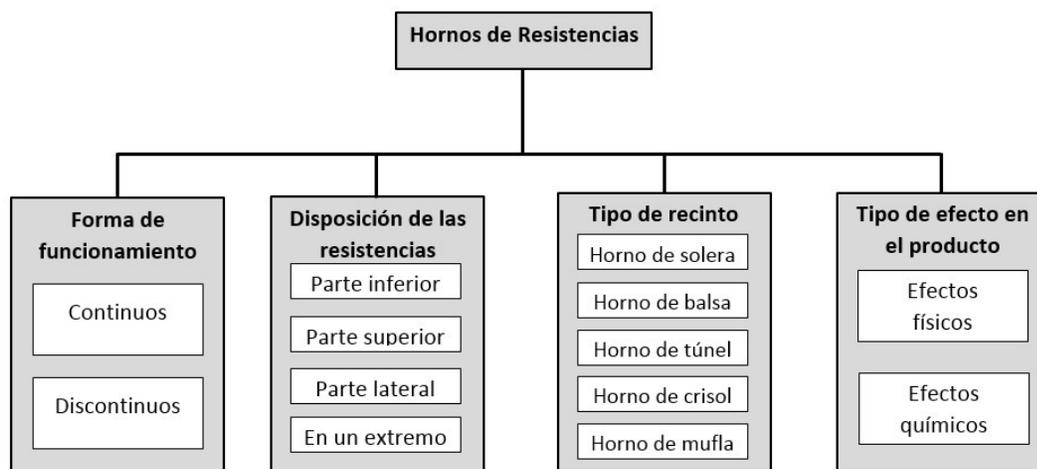
- Realizar procesos de fundición.
- Ablandar para una operación de conformado posterior.
- Tratar térmicamente para impartir determinadas propiedades.
- Recubrir las piezas con otros elementos.

Clasificación de hornos de resistencias

Según (Astigarraga, 1994), los hornos de resistencia se clasifican de acuerdo a diversos aspectos, esta clasificación se especifica en la Figura 3.

Figura 3

Clasificación hornos de resistencias



Nota. Adaptado de (Astigarraga, 1994).

Ventajas del calentamiento eléctrico

Utilizar hornos eléctricos de resistencias tiene varias ventajas con respecto a los otros tipos de hornos en relación al tipo de calentamiento que tienen. En la *Tabla 1* se muestran las más importantes.

Tabla 1

Ventajas del calentamiento eléctrico.

Ventaja	Descripción
Económico	Son más baratos ya que no requieren personal muy capacitado; por lo tanto, el costo de mantenimiento es menor.
Limpieza	No existe polvo ni cenizas de combustión, por lo que se mantiene limpio el entorno.

Ventaja	Descripción
Libre de contaminación	Como no hay gases de combustión, la atmósfera alrededor está libre de contaminación; sin necesidad de prever espacio para su salida.
Facilidad de control	La temperatura se puede controlar y regular con precisión de forma manual o automática.
Calentamiento uniforme	La sustancia se puede calentar de manera uniforme, ya sea un material conductor o no conductor.
Alta eficiencia	En el calentamiento no eléctrica, solo se utiliza del 40 al 60% del calor, pero en la calefacción eléctrica se puede utilizar con éxito del 75 al 100% del calor.
Seguridad y protección automática	Se puede proporcionar protección contra sobrecorriente y sobrecalentamiento mediante el uso de dispositivos de control rápido.
Calentamiento de materiales no conductores	Se puede calentar materiales no conductores como la madera y la porcelana.
Mejores condiciones de trabajo	No se producen ruidos irritantes, además las pérdidas por radiación son bajas.
Alta temperatura	Se pueden obtener temperaturas sumamente altas.

Nota. Adaptado de (Sivanagaraju, 2010).

Partes de un horno eléctrico de resistencias

Un horno eléctrico está compuesto por varias partes, las principales son:

Estructura metálica. Es aquella parte destinada a dar protección a los elementos internos del horno, además de ser la encargada de soportar las cargas que se generan por el propio peso de los demás elementos constitutivos y por el accionamiento propio del horno.

Cámara de calentamiento. Constituye una parte vital del horno y consiste en un recinto cerrado que puede adoptar formas cilíndricas o rectangulares; en la cámara se colocan los elementos de aislamiento, los elementos calefactores y las piezas a calentar.

Fuente de calor o elemento calefactor. Es el elemento encargado de generar la energía necesaria para calentar la cámara del horno, el tipo o disposición de la fuente de calor es dependiente de los rangos de temperatura a los cuales va a operar el horno.

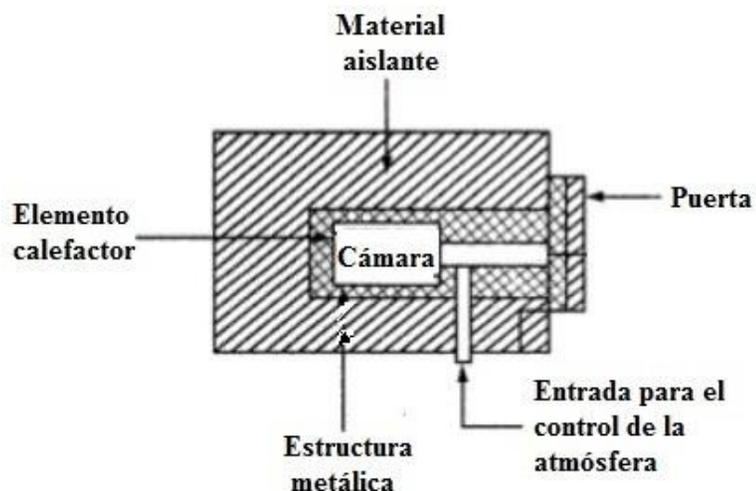
Material aislante. Es el encargado de evitar las pérdidas de calor con el ambiente, el tipo de aislante depende exclusivamente de la temperatura máxima de calentamiento.

Sistema o controlador de temperatura. Elemento destinado a ejercer acciones de control y monitoreo respecto a la variable del proceso: temperatura. Pueden ser de diversos tipos y el sistema de control se elige netamente en base al proceso.

En la *Figura 4* se muestra un horno eléctrico de resistencias y sus partes principales.

Figura 4

Partes de un horno eléctrico de resistencias



Nota. Tomado de (Sivanagaraju, 2010).

Resistencias eléctricas

Una resistencia es toda aquella pieza tangible, que por sus propiedades físicas se opone al paso de corriente. La energía eléctrica que se provee a las resistencias, al no poder circular se transforma en calor debido al efecto Joule.

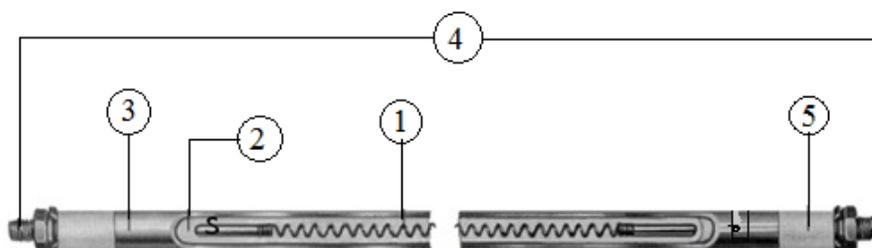
Para un horno, las resistencias eléctricas implican su parte más vital, debido a que son las responsables de aportar la energía necesaria para calentar el interior del horno y lo que se sitúe en él. El calor generado en las resistencias se transfiere al horno y a las piezas a través de dos de los tres posibles mecanismos de transferencia: convección y /o radiación (Astigarraga, 1994).

Resistencias blindadas

Ampliamente usada debido a su versatilidad de acoplarse a la forma del equipo donde vaya a ser instalada. En la Figura 5 se muestra una resistencia blindada y sus partes se detallan en la Tabla 2.

Figura 5

Resistencia blindada



Nota. Tomado de (Astigarraga, 1994).

Tabla 2

Partes de una resistencia blindada.

Identificación	Parte
1	Resistencia – elemento calefactor
2	Masa refractaria de magnesio electro fundida
3	Funda metálica
4	Terminales
5	Elementos de cierre

Según (Sivanagaraju, 2010), los materiales utilizados para la fabricación del elemento calefactor deben tener las siguientes propiedades:

- **Alta resistencia específica:** debe tener una resistencia específica alta, de modo que se requiera una pequeña longitud de cable para proporcionar una cantidad determinada de calor.
- **Alto punto de fusión:** debe tener un alto punto de fusión para que pueda soportar altas temperaturas.
- **Coefficiente de resistencia a baja temperatura:** para un control preciso de la temperatura, la variación de la resistencia con la temperatura de funcionamiento debe ser muy baja.
- **Libre de oxidación:** no debe oxidarse cuando se somete a altas temperaturas; de lo contrario, la formación de capas oxidadas acortará su vida.
- **Alta resistencia mecánica:** el material debe tener una alta resistencia mecánica y debe soportar vibraciones mecánicas.
- **Económico:** el costo del material no debe ser tan alto.

Material de los elementos de calefacción

Para seleccionar un material para el elemento calefactor es necesario tener en cuenta factores como: las condiciones de servicio, la temperatura máxima de funcionamiento y la cantidad de carga que se calentará. Los materiales que normalmente se utilizan como elementos calefactores son aleaciones de níquel-cromo, níquel-cromo-hierro, níquel-cromo-aluminio o níquel-cobre. En la Tabla 3 se muestran las propiedades relevantes de algunos elementos calefactores comunes.

Tabla 3

Propiedades de algunos elementos calefactores.

No.	Tipo de aleación	Composición	Nombre comercial	Max. Temperatura de operación	Resistividad a 20°C
1	Níquel – Cromo	80% Ni	Nichrome	1150°C	1.03 $\mu\Omega - m$
	(Ni – Cr)	20% Cr			
2	Níquel – Cromo	60% Ni	–	950°C	1.06 $\mu\Omega - m$
	– Hierro	16% Cr			
3	(Ni – Cr – Fe)	24% Fe	Eureka o constantan	400°C	0.49 $\mu\Omega - m$
	Níquel – Cobre	45% Ni			
4	(Ni – Cu)	55% Cu	Kanthal	1200°C	1.4 $\mu\Omega - m$
	Hierro – Cromo	70% Fe			
	– Aluminio	25% Cr			
	(Fe – Cr – Al)	5% Al			

Nota. Tomado de (Sivanagaraju, 2010).

Transferencia de calor en hornos

Para establecer un correcto análisis de transferencia de calor es necesario entender la termodinámica sustentada en sus principios fundamentales o leyes. Con relación a la transferencia de calor, la primera ley establece que el calor es una forma de energía, por tanto, está sujeto al principio de conservación de la energía; mientras que la segunda ley determina que el calor se transfiere en la dirección decreciente de la temperatura, siempre y cuando no se adicione energía.

Es así que, un análisis termodinámico técnicamente nos dice cuánto calor debe transferirse para que se realice un cambio de estado específico con el propósito de satisfacer el principio de conservación de la energía, mientras que la transferencia de calor basa su análisis en la determinación de las razones de la transferencia de calor hacia un sistema y desde éste (Çengel & Ghajar, 2011).

Mecanismos de transferencia de calor en hornos

En un horno, el calor se puede transmitir mediante tres mecanismos de transferencia de calor diferentes: conducción, convección y radiación. Todos los mecanismos requieren la existencia de una fuerza impulsora que es la diferencia de temperatura y pueden ser cuantificados empleando ecuaciones o modelos apropiados que describan su comportamiento físico.

Conducción. La conducción es el mecanismo de transferencia de calor en el que las partículas más energéticas de una sustancia ceden energía hacia las adyacentes menos energéticas, esto sucede a consecuencia de la interacción entre dichas partículas (Çengel & Ghajar, 2011).

En los hornos, la conducción se suscita principalmente en las paredes de la cámara de calentamiento y en el aislante térmico del mismo. Para la conducción de calor, la ecuación o modelo que describe su comportamiento se conoce como ley de Fourier, se expresa de la siguiente manera:

$$q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L} (T_1 - T_2) \quad (1)$$

Donde q_{cond} es la razón de flujo de calor que se transfiere en la dirección x , medido en (W), k es la conductividad térmica característica de cada material y se mide en $\left(\frac{W}{mK}\right)$, A es el área perpendicular a la dirección de transferencia, y $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperatura en la dirección x . El signo menos indica que el calor se transfiere en la dirección de la temperatura decreciente.

Convección. La convección es el mecanismo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el fluido adyacente que está en movimiento (Çengel & Ghajar, 2011).

En los hornos, la convección se suscita principalmente en las superficies de las paredes expuestas al medio ambiente o en contacto con algún tipo de fluido. Para la convección de calor, la ecuación o modelo que describe su comportamiento se conoce como ley de enfriamiento de Newton y se expresa de la siguiente manera:

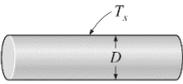
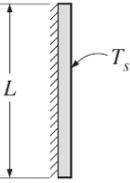
$$q_{conv} = h_c A_c (T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Donde q_{conv} es la razón de flujo de calor que se transfiere medido en (W), h_c es el coeficiente de transferencia de calor por y se mide en $\left(\frac{W}{m^2}\right)$, A es el área de la superficie de transferencia, T_s es la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del ambiente.

Para determinar el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección h_c , se utiliza una correlación empírica del número de Nusselt. Las configuraciones geométricas típicas de los hornos comprenden de manera general formas cilíndricas y rectangulares. En la Tabla 4 se muestran correlaciones útiles para las configuraciones geométricas descritas.

Tabla 4

Correlaciones empíricas del número de Nusselt para la convección natural sobre superficies.

Configuración geométrica	Longitud característica	Intervalo de Ra	Nu
	D	$Ra_D \leq 10^{12}$	$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + (0.559/Pr)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2$
	L	$10^4 - 10^9$ $10^{10} - 10^{13}$ Todo el intervalo	$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2$

Nota. Adaptada de (Çengel & Ghajar, 2011).

Para aplicar las correlaciones de Nusselt, se emplean los números adimensionales mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5

Números adimensionales.

Número adimensional	Fórmula	Significado físico
Grashof	$Gr_{Lc} = \frac{g\beta(T_{s,ais} - T_{\infty})L_c^3}{\nu^2}$	Razón entre la fuerza de flotabilidad y la fuerza viscosa que actúa sobre el fluido.
Rayleigh	$Ra_{Lc} = Gr_{Lc}Pr$	Razón de las fuerzas de flotabilidad y las difusividades térmicas y de cantidad de movimiento.

Nota. β se define como el coeficiente de expansión volumétrica ($1/T_f$). Adaptada de (Çengel & Ghajar, 2011).

Una vez hallado el número de Nusselt, el coeficiente de transferencia de calor por convección viene dado por:

$$h_c = \frac{k}{D} Nu_{Lc} \quad (3)$$

Radiación. La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas (Çengel & Ghajar, 2011).

Ocurre en paralelo a la convección, es decir, se suscita principalmente en las superficies de las paredes expuestas al medio ambiente o en contacto con algún tipo de fluido. Para la radiación de calor, la ecuación o modelo que describe su comportamiento se conoce como ley de Stefan - Boltzmann y se expresa de la siguiente manera:

$$q_{rad} = A_{rad}\epsilon\sigma F(T_s^4 - T_{\infty}^4) \quad (4)$$

Donde q_{rad} es la razón de flujo de calor que se transfiere medido en (W), A_{rad} es el área de la superficie cilíndrica del aislamiento, ε es la emisividad de la superficie radiante, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 K^4} \right)$, F es el factor de vista, T_s es la temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del ambiente.

Eficiencia y pérdidas de calor en hornos de resistencias

El calor generado por las resistencias eléctricas, no solo eleva la temperatura de la carga al valor deseado, sino que también se utiliza para superar las pérdidas que ocurren debido a:

- Calor empleado para elevar la temperatura del horno.
- Calor conducido a través de las paredes del horno.
- Pérdida de calor por la apertura de la puerta del horno.

La eficiencia del horno se define como la relación entre el calor requerido para elevar la temperatura de la carga al valor deseado y el calor requerido para elevar la carga y las pérdidas, en un horno eléctrico de resistencias, la eficiencia se encuentra entre el 60% y el 80%.

Automatización de procesos

Desde hace algunos años la industria viene sufriendo una constante evolución, por ende, cada vez requiere de dispositivos capaces de optimizar recursos y mejorar la productividad, por ello ha surgido la automatización como una alternativa para enriquecer los procesos, ya que permite la detección, control y monitoreo de las diferentes variables que se derivan del mismo proceso sin intervención humana.

Según (Castro, Padilla, & Romero, 2005) para automatizar se debe identificar una oportunidad y/o mejora del proceso, dicha oportunidad puede ser: el costo vs beneficio. Implementar autómatas suele significar costos elevados pero sus beneficios pueden ser: reducción de errores, mejor calidad en los productos terminados y aumento significativo de la productividad.

Además, el autor resalta que, si el proceso resulta apto para ser automatizado, se debe seguir una secuencia de pasos, los cuales son:

Entendimiento del problema

El primer paso y muy importante es la caracterización del proceso/equipo, es decir, su estado actual y los componentes que lo conforman. A partir de la evaluación, se procede a analizar concretamente el equipo y el por qué se lo quiere automatizar. Por consiguiente, se entenderá que se quiere medir y que se quiere mejorar. Una vez entendido el problema, se procede a decidir la solución a implementarse.

Descripción de los equipos del sistema y tabla de asignación de registros

Analizado el proceso en el paso anterior, se procede a tabular todos los componentes que tiene el proceso, en cada componente se debe saber el tipo de señal, si corresponde a una entrada o salida. Además, a cada entrada/salida se le asignará una dirección que posteriormente se la utilizará en la programación del autómata programable.

Selección de equipos

Teniendo el número de entradas y salidas requeridas y los requerimientos del cliente/usuario, se procede a la selección de los equipos que van a conformar el sistema. Los equipos que se seleccionan son: el autómata programable, el actuador, los elementos de protección, indicadores luminosos, etc. La selección se puede llevar a cabo mediante matrices de decisión.

Programación: PLC, HMI y SCADAS

Para este paso se precisa utilizar la tabla de asignación de registros del paso dos; ya que esta tabla proporciona la dirección o espacio que se asignará a cada entrada y salida. Cabe recalcar que la nomenclatura que se utilizará depende exclusivamente del autómata elegido, es

decir, su marca o procedencia. Para entradas se suele usar la letra “I” o la letra “X” mientras que para las salidas se emplea la letra “Q” o “Y”.

Antes de programar se debe tener en cuenta la comunicación entre equipos: autómatas (PLC), HMI, controladores, etc. Definido el tipo de comunicación, se debe programar en el software propio del autómata y hacer las respectivas configuraciones (protocolo de comunicación).

Diseño de planos y conexiones

Con los equipos ya seleccionados, se elaboran los planos o diagramas del diseño del tablero y los planos de conexiones.

Pre comisionamiento, comisionamiento y puesta en marcha

Una vez que se tiene programado y armado se procede a realizar las últimas actividades para considerar el proyecto terminado, estas actividades son:

Pre comisionamiento. Se realizan una serie de análisis con la particularidad de la ausencia de energía. Tienen la finalidad de garantizar que las instalaciones fueron realizadas conforme a la ingeniería hecha del proceso.

Comisionamiento. Se realizan ensayos dinámicos e inspecciones con la implementación de la energía a diferencia del pre-comisionamiento. Tiene por objetivo garantizar las condiciones necesarias para la puesta en marcha.

Puesta en marcha. Es la última fase del proyecto, en la que se realizará el arranque de todos los sistemas con el debido ajuste de los parámetros a valores nominales para la realización de pruebas concretas.

Capítulo III Ingeniería inversa del equipo

Desmontaje del equipo

El desmontaje del horno de vacío incluyó actividades de desmontaje, limpieza, evaluación y adecuación. Este proceso se realizó con el objetivo de obtener información del diseño mecánico, térmico y eléctrico. De esta manera se determinó las partes constituyentes del equipo y de qué modo interactúan entre sí. Adicionalmente, se realizó la evaluación de los componentes pertenecientes a cada subconjunto.

Durante el proceso de desmontaje del equipo, se identificaron los componentes del horno ; la Figura 6 y la Figura 7 muestran dicha identificación para los componentes apreciables en la vista delantera del equipo.

Figura 6

Vista delantera del horno de vacío – Estado inicial

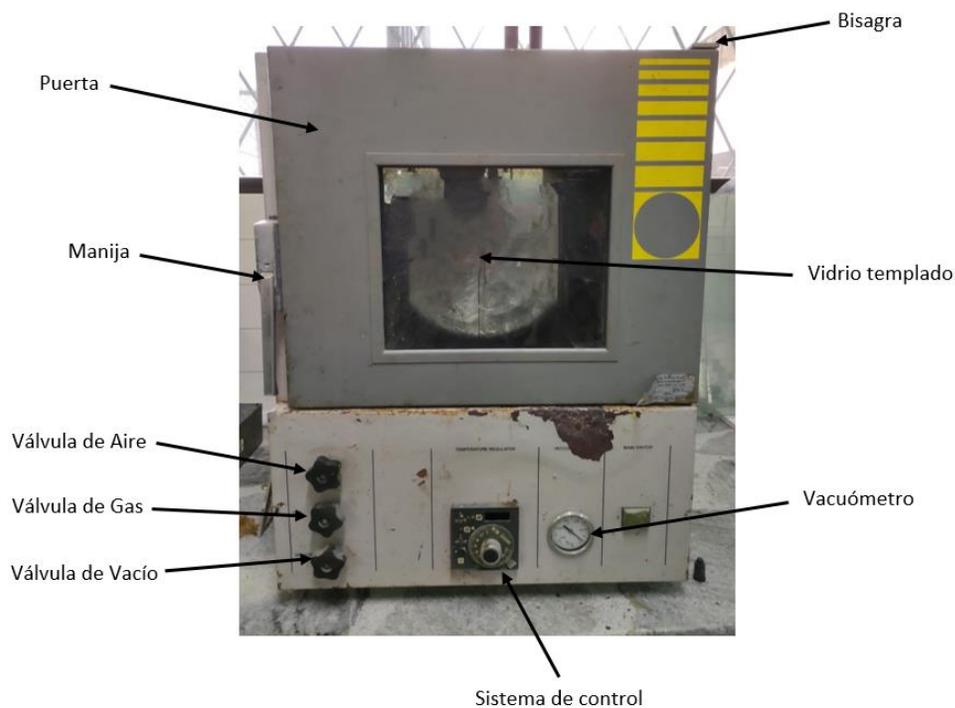


Figura 7

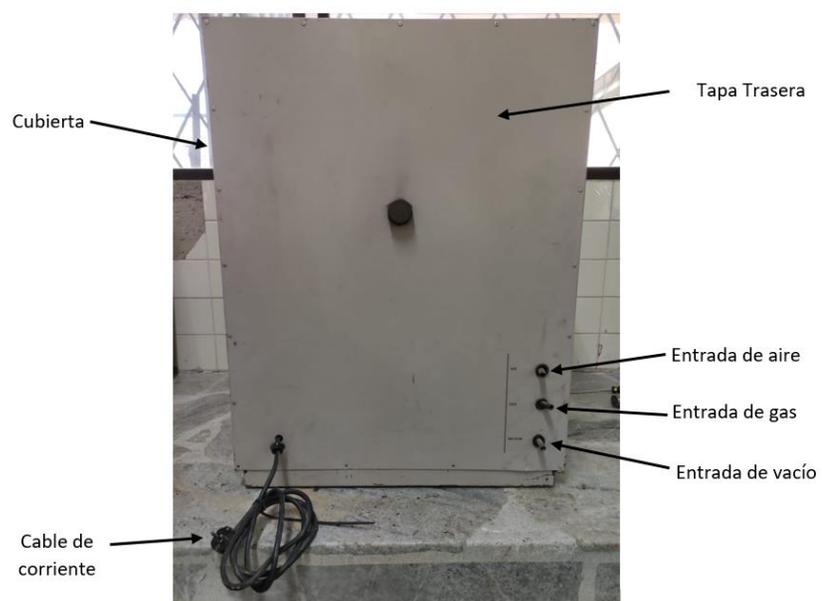
Vista delantera del horno de vacío sin puerta – Estado inicial



En la Figura 8 se muestra la identificación de los componentes visibles en la vista trasera del equipo.

Figura 8

Vista trasera del horno de vacío – Estado inicial



En la Figura 9 se muestra la identificación de los componentes en una vista lateral del equipo y sin cubierta ni tapa trasera.

Figura 9

Vista lateral sin cubierta del horno de vacío – Estado inicial



En la Figura 10 se muestra la identificación de los componentes dispuestos en el tanque.

Figura 10

Vista inferior del tanque – Estado inicial

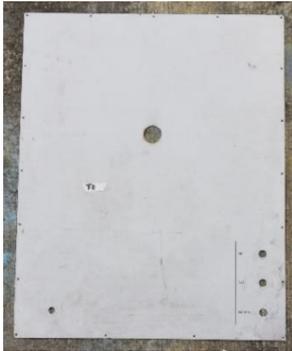


Análisis del estado funcional de los componentes

Para determinar el estado funcional de los componentes del equipo, se procedió a realizar un análisis técnico visual de cada componente; de esta manera se establecieron las acciones a ejecutarse para cada uno de los elementos. En la Tabla 6 se detalla el análisis realizado para cada componente.

Tabla 6

Análisis del estado funcional inicial de los componentes del equipo.

Componente	Figura	Función	Observaciones
Cubierta		- Proteger componentes.	- Pintura desgastada. - Presencia de óxido en todas las superficies. - Esquinas dobladas y superficies hundidas.
Tapa trasera		- Proteger componentes.	- Pintura desgastada. - Presencia de óxido en las superficies. - Esquinas dobladas.
Estructura delantera		- Proveer soporte estructural. - Alojar el sistema de control, el vacuómetro y las válvulas.	- Pintura desgastada. - Presencia de óxido en la mayoría de la superficie. - Presencia de corrosión en algunas superficies.

Componente	Figura	Función	Observaciones
Puerta		<ul style="list-style-type: none"> - Generar un sello hermético en la cámara del horno. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pintura desgastada. - Presencia de óxido en sus superficies. - Superficies con golpes y esquinas dobladas.
			
Vidrio templado		<ul style="list-style-type: none"> - Generar un sello hermético con los empaques. - Permitir la visualización del interior de la cámara del horno. 	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de suciedad superficial. - Bordes y esquinas desgastadas.
Manija		<ul style="list-style-type: none"> - Asegurar la puerta con la estructura delantera. 	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de suciedad superficial. - Presencia de óxido en algunas superficies.
Empaques		<ul style="list-style-type: none"> - Generar un sello hermético con el vidrio templado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de desgaste. - Superficies desgarradas.

Componente	Figura	Función	Observaciones
Brida de aluminio		<ul style="list-style-type: none"> - Alojar los empaques. 	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de calcificaciones en la superficie. - Suciedad superficial.
Base		<ul style="list-style-type: none"> - Proveer soporte estructural. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pintura desgastada. - Presencia de óxido en la mayoría de la superficie.
Aislante de fibra de vidrio		<ul style="list-style-type: none"> - Disminuir las pérdidas de calor al ambiente. - Mantener una temperatura de seguridad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Desgaste generalizado. - Superficie de aluminio desprendida casi en su totalidad.
Tanque		<ul style="list-style-type: none"> - Conducir y radiar calor proveniente de las resistencias eléctricas. - Alojar las piezas a calentarse. - Limitar la atmosfera de trabajo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de calcificaciones en la superficie de la cámara. - Presencia de incrustaciones en los soportes de la bandeja. - Neplos de las tuberías con obstrucciones.
			

Componente	Figura	Función	Observaciones
Resistencias de alambre de alta temperatura		<ul style="list-style-type: none"> - Calentar el tanque por conducción. 	<ul style="list-style-type: none"> - Desgaste generalizado. - Recubrimiento del alambre deteriorado y desprendido casi en su totalidad.
Tuberías de cobre		<ul style="list-style-type: none"> - Permitir la entrada y salida de fluidos a la cámara del horno. 	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de óxido superficial. - Taponamiento generalizado. - Suciedad superficial.
Vacuómetro		<ul style="list-style-type: none"> - Medir la presión de vacío en la cámara del horno. 	<ul style="list-style-type: none"> - Carátula descentrada. - Suciedad superficial. - Presencia de desgaste superficial.
Sistema de control de temperatura		<ul style="list-style-type: none"> - Permitir el control del proceso. - Permitir interacción humano – máquina. - Suministrar información del proceso. 	<ul style="list-style-type: none"> - Regulador totalmente destruido e inservible. - Relé de estado sólido con presencia de golpes. - Cableado deteriorado e inservible.

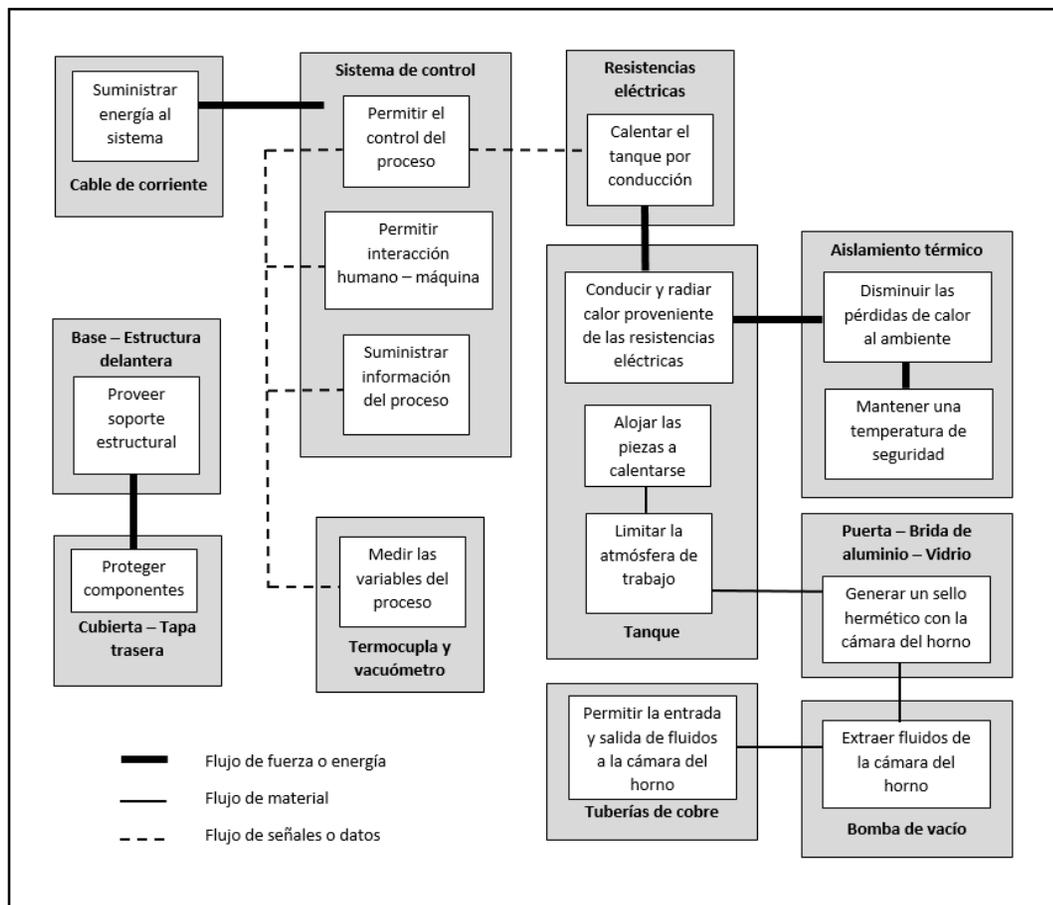
Para realizar la recuperación de los componentes, es necesario establecer la arquitectura del producto final y de esta manera determinar que componentes se encuentran en condiciones óptimas y cuales necesitan ser recuperados, modificados o reemplazados.

Establecimiento de la arquitectura del producto

Una vez determinado y entendido la disposición y el funcionamiento de los componentes del equipo, se optó por una arquitectura modular de ranura, para esto se esquemataron los módulos teniendo en cuenta criterios de agrupación, de manera que refleje la mejor idea acerca del estado funcional del producto. En la Figura 11 se muestra el esquema del horno con sus diferentes elementos funcionales y físicos.

Figura 11

Esquema del horno



En la Tabla 7 se detallan los módulos formados en la Figura 11, los componentes que los constituyen y también los criterios por los cuales fueron agrupados.

Tabla 7

Módulos y criterios de agrupación.

Módulo	Partes/componentes	Criterio de agrupación
Soporte estructural	- Base	- Integración geométrica y precisión.
	- Estructura delantera	
Protección	- Cubierta	- Integración geométrica y precisión.
	- Tapa trasera	- Localización del cambio.
Alimentación de energía	- Cable de corriente	- Localización del cambio.
		- Integración geométrica y precisión.
Sistema de control	- Se detalla en el Capítulo V.	- Localización del cambio.
		- Permitir estandarización.
Medición de parámetros	- Termocupla	- Permitir estandarización.
	- Vacuómetro	
Calentamiento	- Resistencias eléctricas	- Integración geométrica y precisión.
Tanque	- Tanque	- Integración geométrica y precisión.
Aislamiento térmico	- Se detalla en el Capítulo IV.	- Permitir estandarización.
	- Puerta	
Sellado	- Brida de aluminio	- Integración geométrica y precisión.
	- Vidrio	- Localización del cambio.
	- Empaques de caucho	
Vacío	- Bomba de vacío	- Localización del cambio.
Tuberías	- Tuberías de aire, gas y vacío.	- Integración geométrica y precisión.

Nota. Los criterios de agrupación fueron tomados de (Ulrich & Eppinger, 2013).

Después de haber realizado el esquema del horno con sus respectivos módulos, se realizó la disposición geométrica aproximada del horno. En la Figura 12 se muestra una vista isométrica de la disposición que tendrá el equipo; mientras que en la Figura 13 se muestra una vista lateral del horno en la que se muestran los módulos internos que no se aprecian en la vista isométrica.

Figura 12

Disposición geométrica aproximada del horno en vista isométrica

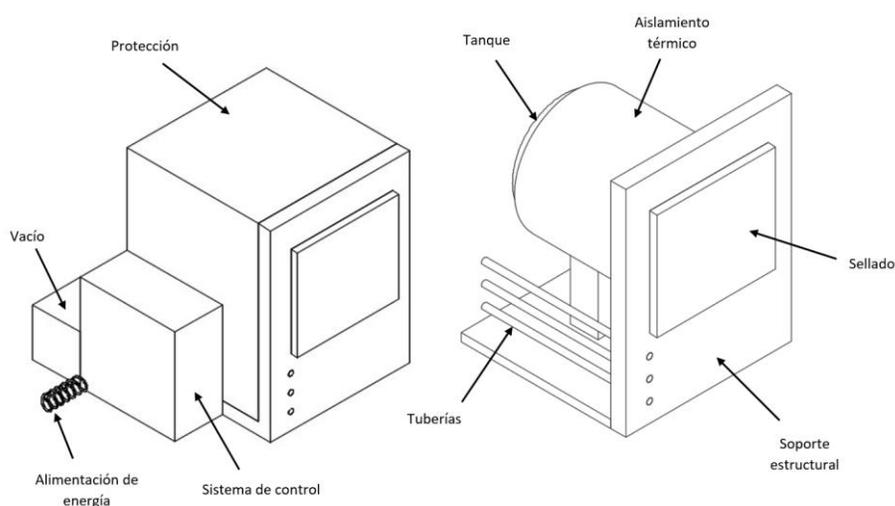
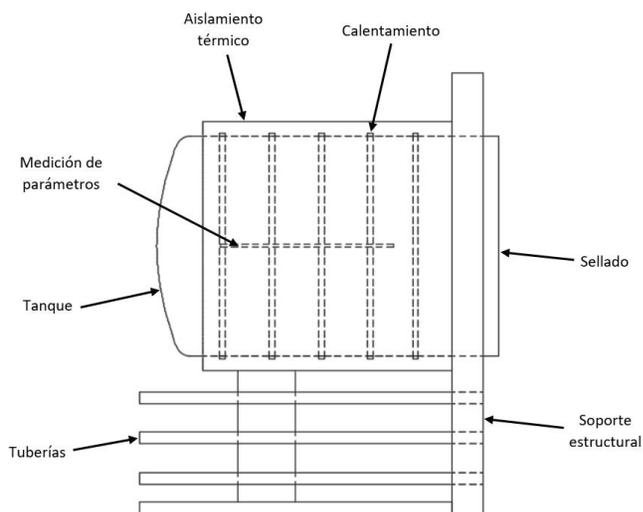


Figura 13

Disposición geométrica aproximada del horno en vista lateral



Otra interacción incidental común en el sistema es la vibración, que puede suscitarse por perturbaciones externas, movimientos de los componentes y por el propio funcionamiento de los módulos. Las vibraciones se dan entre los módulos de vacío, soporte y tanque. Al ser un horno y una de sus funciones principales es calentar, la distorsión térmica estará presente y se da entre los módulos del tanque y sellado. Además, estos módulos presentan otra interacción incidental que es la baja hermeticidad, como consecuencia del calentamiento.

Finalmente, el taponamiento entre el módulo de vacío y el módulo de tuberías representa otra interacción incidental importante. Todas estas interacciones serán tomadas en cuenta en los capítulos de diseño para eliminarlas o reducirlas al máximo.

Recuperación de los componentes

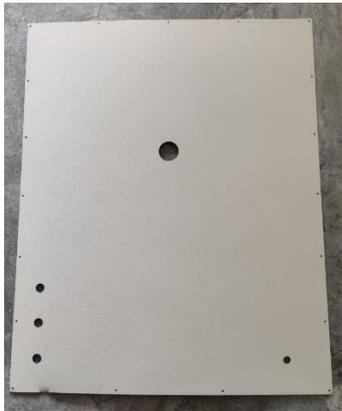
Después de establecer la arquitectura del producto, es necesario determinar que componentes pueden ser recuperados, aquellos que deben ser modificados y los que deben ser remplazados en su totalidad.

Teniendo en cuenta el análisis del estado funcional inicial, además de la nueva arquitectura modular establecida, se estableció que los componentes obsoletos fueron el aislante térmico de fibra de vidrio, las resistencias eléctricas de alambre de alta temperatura, el regulador de temperatura, el relé de estado sólido, la termocupla, el vacuómetro, los empaques y toda la tornillería en general; por lo que deben ser remplazados.

En la Tabla 8 se detallan los componentes que debieron ser recuperados y/o modificados, además de las acciones ejecutadas para llevar a cabo dichas actividades.

Tabla 8

Recuperación y reemplazo de los componentes del equipo.

Componente	Figura	Acciones ejecutadas
Cubierta		<ul style="list-style-type: none"> - Se realizó una limpieza superficial completa haciendo uso de removedor de pintura. - Se corrigieron las esquinas dobladas y las superficies hundidas. - Se preparó la superficie mediante un proceso de sandblasting. - Se realizó un proceso de pintura electrostática en un taller especializado.
Tapa trasera		<ul style="list-style-type: none"> - Se realizó una limpieza superficial completa haciendo uso de removedor de pintura. - Se enderezaron las esquinas dobladas. - Se preparó la superficie mediante un proceso de sandblasting. - Se realizó un proceso de pintura electrostática en un taller especializado.
Estructura delantera		<ul style="list-style-type: none"> - Se realizó una limpieza superficial completa haciendo uso de removedor de pintura. - Se removió óxido de ciertas superficies utilizando amoladora con grata. - Se preparó la superficie mediante un proceso de sandblasting. - Se realizó un proceso de pintura electrostática en un taller especializado.

Componente	Figura	Acciones ejecutadas
Puerta		<ul style="list-style-type: none"> - Se realizó una limpieza superficial completa haciendo uso de removedor de pintura. - Se preparó la superficie mediante un proceso de sandblasting. - Se realizó un proceso de pintura electrostática en un taller especializado.
Vidrio templado		<ul style="list-style-type: none"> - Se realizó una limpieza superficial con detergente y limpiador de vidrios.
Manija		<ul style="list-style-type: none"> - Se realizó una limpieza superficial. - Los componentes oxidados se sumergieron en líquido desoxidante para su limpieza.
Brida de aluminio		<ul style="list-style-type: none"> - Se utilizó una espátula para retirar las calcificaciones de la superficie. - Se realizó una limpieza superficial con detergente y un estropajo.

Componente	Figura	Acciones ejecutadas
<p>Base</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Se realizó una limpieza superficial completa haciendo uso de removedor de pintura. - Se removió óxido de ciertas superficies utilizando amoladora con grata. - Se preparó la superficie mediante un proceso de sandblasting. - Se realizó un proceso de pintura electrostática en un taller especializado.
<p>Tanque</p>	 	<ul style="list-style-type: none"> - Se realizó una limpieza superficial. - Se retiraron las calcificaciones e incrustaciones de la superficie de la cámara con la ayuda de lijas. - Con la ayuda de un alambre de acero se destaparon las obstrucciones de los neplós. - Se utilizó aire comprimido para expulsar los residuos restantes del interior de la cámara.
<p>Tuberías de cobre</p>	 	<ul style="list-style-type: none"> - Se calentaron las tuberías para destaparlas. - Se utilizó líquido desoxidante para retirar el óxido superficial.

Una vez concluido el proceso de ingeniería inversa que incluyó el desmontaje del horno, el análisis del estado funcional inicial de sus componentes, el establecimiento de la arquitectura del rediseño y la recuperación de los componentes útiles, es necesario diseñar los componentes que remplazaran a aquellos que fueron desechados por su obsolescencia. Como parte del levantamiento técnico del equipo, se realizaron planos de cada uno de sus elementos, estos se encuentran en el Apéndice B.

Capítulo IV Cálculo, dimensionamiento y selección de los elementos del sistema de calentamiento

Consideraciones para el dimensionamiento del sistema de calentamiento

Para realizar el dimensionamiento del sistema de calentamiento, se tienen en cuenta parámetros físicos y ambientales que influyen de manera directa en el funcionamiento del equipo. Como parámetro ambiental se tiene la temperatura del aire atmosférico en el espacio de trabajo; como parámetros físicos se tienen las dimensiones y materiales de la cámara de calentamiento del horno y de la carga.

Temperatura del medio ambiente

El horno va a operar en las instalaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, situada en la ciudad de Sangolquí de la provincia de Pichincha. En la Tabla 9 se muestran las temperaturas ambientales máxima y mínima en Sangolquí.

Tabla 9

Temperaturas ambientales en la ciudad de Sangolquí

Temperatura	Valor
Temperatura máxima	24°C
Temperatura mínima	10°C

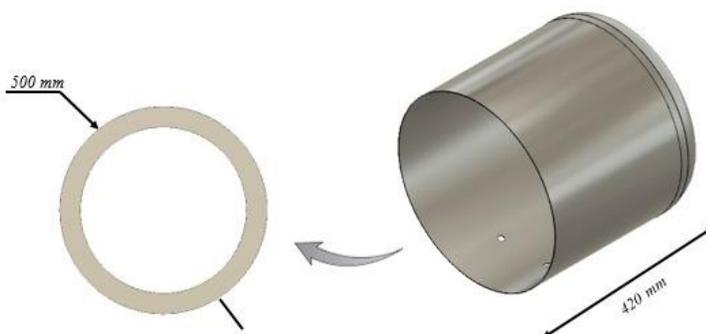
Nota. Los datos de temperatura son valores promedio para el año 2021. Adaptada de (INAMHI, 2021).

Parámetros físicos de la cámara del horno

Dimensiones de la cámara del horno. La cámara del horno es un tanque cilíndrico de acero AISI 316 de 2.15 mm de espesor. En la Figura 15 se presentan las dimensiones correspondientes para un volumen de control.

Figura 15

Dimensiones de la cámara del horno



Nota. El valor del diámetro corresponde a la medida externa de la cámara del horno.

Propiedades del material de la cámara del horno. En la Tabla 10 se muestran las propiedades termofísicas para el acero AISI 316.

Tabla 10

Propiedades termofísicas del acero AISI 316.

Conductividad térmica [W/mK]	Calor específico [J/kgK]	Densidad [kg/m ³]
15	500	8000

Nota. Las propiedades se obtuvieron de la ficha técnica de datos de (Carbone Stainless Steel , 2022).

Aislamiento térmico

Mediante la técnica de priorización por matrices de decisión se procedió a elegir la mejor opción entre los siguientes productos: aislante de fibra de vidrio y aislante de manta de fibra cerámica.

Para la evaluación de las matrices se tienen las ponderaciones detalladas en la Tabla 11.

Tabla 11

Valoración para las matrices de decisión.

Cuantitativa	Cualitativa
9	Cumple mucho más
7	Cumple más
5	Cumple igual
3	Cumple menos
1	Cumple mucho menos

Los criterios de evaluación son: menor precio en el mercado; temperatura límite de uso continuo y temperatura máxima soportada.

En la Tabla 12 se evalúan los criterios para determinar cuál de ellos presenta mayor relevancia al momento de seleccionar el aislante para el equipo.

Tabla 12

Criterios para la selección del aislante.

Criterios	Menor precio	Temperatura límite	Temperatura máxima	Sumatoria	%
Menor precio		3	3	6	20
Temperatura límite	7		7	14	46.67
Temperatura máxima	7	3		10	33.33
				30	100

El criterio con mayor influencia es la temperatura límite de uso continuo, seguido por la temperatura máxima que soporta el aislante y finalmente el menor precio en el mercado. En la Tabla 13, Tabla 14 y Tabla 15 se evalúa el cumplimiento de los criterios para cada alternativa.

Tabla 13

Evaluación para el criterio de menor precio del aislante.

Menor precio	Fibra de vidrio	Manta de fibra cerámica	Sumatoria	%
Fibra de vidrio		9	9	90
Manta de fibra cerámica	1		1	10
			10	100

Tabla 14

Evaluación para el criterio de temperatura límite de uso continuo del aislante.

Temperatura límite	Fibra de vidrio	Manta de fibra cerámica	Sumatoria	%
Fibra de vidrio		1	1	10
Manta de fibra cerámica	9		9	90
			10	100

Tabla 15

Evaluación para el criterio de temperatura máxima del aislante.

Temperatura máxima	Fibra de vidrio	Manta de fibra cerámica	Sumatoria	%
Fibra de vidrio		1	1	10
Manta de fibra cerámica	9		9	90
			10	100

Una vez evaluadas las alternativas en base a los criterios expuestos, se selecciona la manta de fibra cerámica como el aislante más adecuado para el fin requerido, esto se observa en la Tabla 16.

Tabla 16

Selección de la alternativa más adecuada.

Criterios	Menor precio	Temperatura límite	Temperatura máxima	Sumatoria	Prioridad
Alternativas	0.20	0.4667	0.3333		
Fibra de vidrio	0.9	0.1	0.1	26	2
Manta de fibra cerámica	0.1	0.9	0.9	74	1

Para la manta de fibra cerámica se tienen las propiedades termofísicas detalladas en la Tabla 17.

Tabla 17

Propiedades termofísicas de la manta de fibra cerámica

Conductividad térmica [W/mK]	Calor específico [J/kgK]	Densidad [kg/m³]	Temperatura límite de uso continuo [°C]	Temperatura máxima de servicio [°C]
0.09	1070	128	1260	1482

Nota. Las propiedades se obtuvieron de la hoja técnica de datos proporcionada por el proveedor.

El producto se comercializa en rollos de 300 in (7,62 m) de largo x 24 in (0,61 m) de ancho, con espesor nominal desde ¼ in (6,35 mm) hasta 2 in (50,80 mm). Debido a la disponibilidad del producto en el mercado, se parte de un espesor de 2 in, que será verificado posteriormente en el diseño térmico.

Diseño térmico

Consideraciones para el cálculo

Se deben tomar algunas consideraciones para efectuar los cálculos del diseño térmico:

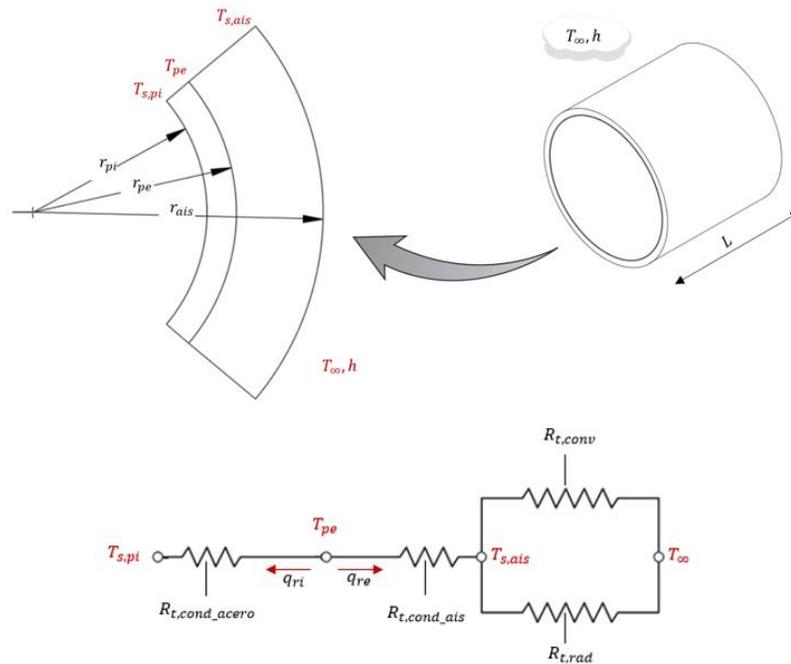
- El análisis de transferencia de calor para la determinación de la potencia requerida por el horno es unidimensional en estado estable, tanto para la pared cilíndrica compuesta como para las paredes planas.
- Se toma en cuenta un circuito térmico dispuesto de tal forma que las resistencias de conducción están en serie, mientras que las resistencias que presenta la superficie exterior del aislante y el ambiente están dispuestas en paralelo.
- Se dispone de tres flujos de calor, el primero correspondiente a la conducción en las paredes cilíndricas y planas compuestas; mientras que, los otros dos corresponden a la convección y radiación en la superficie del aislamiento.
- La transferencia de calor hacia la carga se da mayoritariamente por radiación, se desprecia la convección debido a que en el interior de la cámara del horno no recircula el aire.
- El análisis de transferencia de calor en estado transitorio proporciona el tiempo en que se alcanza la temperatura requerida.

Cálculo de las pérdidas de calor al ambiente

Se deben considerar las pérdidas de calor por conducción en las paredes de la cámara del horno y en el aislamiento; además de pérdidas por convección y radiación en los alrededores de la superficie del aislante. En la Figura 16 se esquematizan el modelo y el circuito térmico de resistencias para las pérdidas de calor en la pared cilíndrica compuesta del horno.

Figura 16

Modelo y circuito térmico de resistencias para la pared cilíndrica compuesta del horno



Donde:

$T_{s,pi}$: Temperatura superficial de la pared interna de la cámara del horno.

T_{pe} : Temperatura de la pared externa de la cámara del horno.

$T_{s,ais}$: Temperatura superficial del aislante.

$R_{t,cond_acero}$: Resistencia térmica de conducción del acero.

$R_{t,cond_ais}$: Resistencia térmica de conducción del aislante.

$R_{t,conv}$: Resistencia térmica de convección entre la superficie del aislante y el ambiente.

$R_{t,rad}$: Resistencia térmica de radiación entre la superficie del aislante y el ambiente.

T_{∞} : Temperatura exterior del ambiente.

h_c : Coeficiente de convección del ambiente circundante del cilindro.

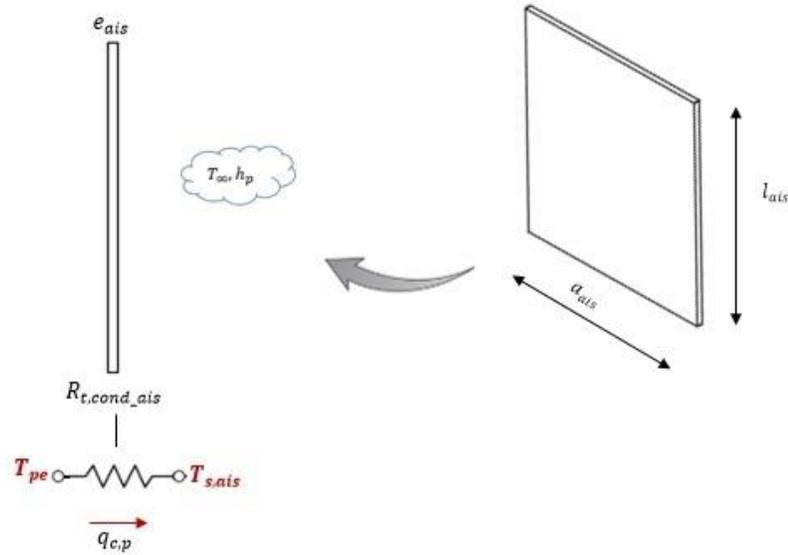
q_{ri} : Calor por conducción hacia la cámara del horno.

q_{re} : Calor perdido por conducción.

En la Figura 17 y Figura 18 se muestran los modelos y circuitos térmicos de resistencias para las pérdidas de calor en las paredes planas trasera y delantera respectivamente.

Figura 17

Modelo y circuito térmico de resistencias para la pared plana trasera del horno



Donde:

T_{pe} : Temperatura de la pared externa de la cámara del horno.

$T_{s,ais}$: Temperatura superficial del aislante.

T_{∞} : Temperatura exterior del ambiente.

h_p : Coeficiente de convección del ambiente circundante de la pared trasera.

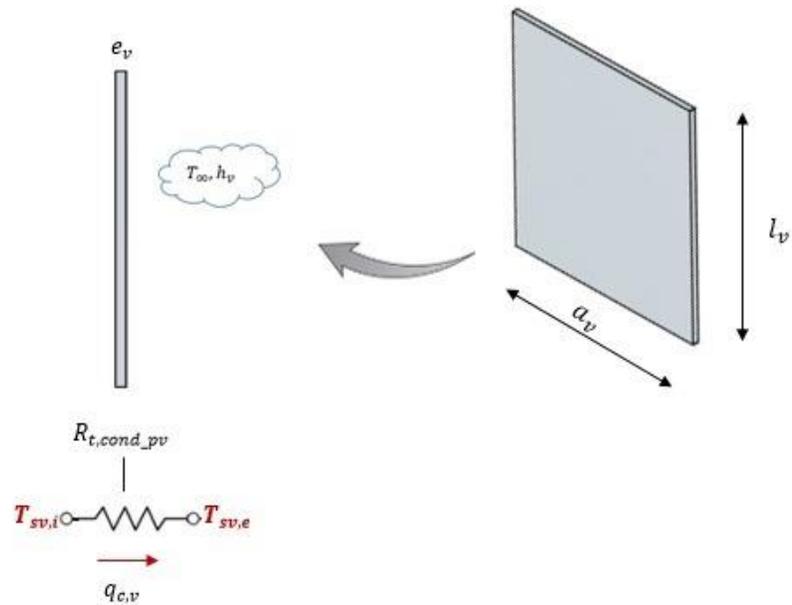
e_{ais} : Espesor de la pared trasera de aislante.

a_{ais} : Ancho de la pared trasera de aislante.

l_{ais} : Largo de la pared trasera de aislante.

Figura 18

Modelo y circuito térmico de resistencias para la pared plana delantera del horno



Donde:

- $T_{sv,i}$: Temperatura de la superficie interna de la pared plana delantera.
- $T_{sv,e}$: Temperatura de la superficie externa de la pared plana delantera.
- T_{∞} : Temperatura exterior del ambiente.
- h_v : Coeficiente de convección del ambiente circundante de la pared delantera.
- e_v : Espesor de la pared delantera de borosilicato.
- a_v : Ancho de la pared delantera de borosilicato.
- l_v : Largo de la pared delantera de borosilicato.

En la Tabla 18 se presentan los valores de los parámetros geométricos de las paredes planas y cilíndricas necesarios para efectuar el análisis de transferencia de calor .

Tabla 18

Parámetros geométricos de las paredes planas y cilíndricas.

	Parámetro	Valor
Pared cilíndrica compuesta	r_{pi}	0.248 [m]
	r_{pe}	0.250 [m]
	r_{ais}	0.301 [m]
Tanque	L	0.420 [m]
	$V_{tanque,acero}$	$1.938 \times 10^{-3} [m^3]$
Pared delantera de borosilicato	e_v	0.012 [m]
	l_v	0.405 [m]
	a_v	0.472 [m]
Pared trasera de aislante	e_{ais}	0.0508 [m]
	l_{ais}	0.600 [m]
	a_{ais}	0.600 [m]

Nota. $V_{tanque,acero}$ hace referencia al volumen de la masa del tanque.

Pérdidas de calor por conducción

Pared cilíndrica compuesta. Para la pared cilíndrica compuesta, el calor perdido por conducción está determinado por la siguiente expresión:

$$q_{re} = \frac{T_{pe} - T_{s,ais}}{R_{t,cond_ais}} \quad (5)$$

La resistencia por conducción para la pared cilíndrica del aislamiento térmico viene dada por la siguiente expresión:

$$R_{t,cond_ais} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ais}}{r_{pe}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{ais}} \quad (6)$$

Donde:

r_{ais} : Radio de la pared externa del aislante.

r_{pe} : Radio de la pared externa de la cámara del horno.

- L : Longitud de la cámara del horno.
- k_{acero} : Conductividad térmica del acero inoxidable.
- k_{ais} : Conductividad térmica del aislante.

Entonces el calor perdido por conducción es:

$$q_{re} = \frac{T_{pe} - T_{s,ais}}{\frac{\ln\left(\frac{r_{ais}}{r_{pe}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{ais}}} \quad (7)$$

Pared plana. La configuración del horno presenta dos paredes planas, la primera correspondiente a la tapa trasera de aislante y la segunda a la tapa delantera de borosilicato. El calor perdido por conducción en estas paredes se determina por las siguientes expresiones.

Para la pared trasera se tiene:

$$q_{c,p} = \frac{T_{pe} - T_{s,ais}}{R_{t,cond_p}} \quad (8)$$

La resistencia por conducción para la pared plana trasera del aislamiento térmico viene dada por la siguiente expresión:

$$R_{t,cond_p} = \frac{e_{ais}}{k_{ais} \cdot A_{ais}} \quad (9)$$

Donde:

- e_{ais} : Espesor de la pared del aislante.
- A_{ais} : Área transversal del asilante.
- k_{ais} : Conductividad térmica del aislante.

Para la pared delantera se tiene:

$$q_{c,v} = \frac{T_{sv,i} - T_{sv,e}}{R_{t,cond_{pv}}} \quad (10)$$

La resistencia por conducción para la pared plana trasera del aislamiento térmico viene dada por la siguiente expresión:

$$R_{t,cond_{pv}} = \frac{e_v}{k_v * A_v} \quad (11)$$

Donde:

e_v : Espesor de la pared de la ventana.

A_v : Área transversal de la ventana.

k_v : Conductividad térmica de la ventana.

Entonces el calor perdido por conducción es:

$$q_{cond} = q_{re} + q_{c,p} + q_{c,v} \quad (12)$$

Partiendo de una temperatura deseada en la pared externa de la cámara del horno $T_{p,e} = 220^{\circ}C$ y suponiendo una temperatura $T_{s,ais} = 80^{\circ}C$ en la su superficial del aislante, además de una temperatura $T_{sv,i} = 130^{\circ}C$ y un gradiente de temperatura de $10^{\circ}C$ en la pared delantera de borosilicato, se realiza un primer cálculo de las pérdidas por conducción.

Aplicando las fórmulas correspondientes, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 19.

Tabla 19

Aproximación de las pérdidas de calor por conducción.

Pared cilíndrica		Pared plana trasera		Pared plana delantera		Total
$R_{t,cond_{ais}}$	q_{re}	$R_{t,cond_p}$	$q_{c,p}$	$R_{t,cond_{pv}}$	$q_{c,v}$	q_{cond}
[K/W]	[W]	[K/W]	[W]	[K/W]	[W]	[W]
0.696	201.147	1.568	89.291	0.052	191.16	481.60

Pérdida de calor por convección

La transferencia de calor se da por convección natural, es dependiente de la configuración geométrica de la superficie y su orientación, así como también de la variación de la temperatura sobre la superficie y de las propiedades termofísicas del fluido que interviene.

Para hallar dichas propiedades es necesario utilizar la temperatura media entre la temperatura superficial del aislante y la temperatura exterior del ambiente; esta se denomina temperatura de película T_f .

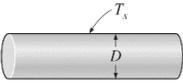
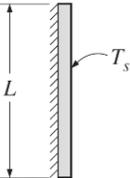
El calor perdido por convección en la superficie cilíndrica correspondiente a la superficie del aislante, está determinada por la siguiente expresión:

$$q_{conv,c} = h_c A_c (T_{s,ais} - T_\infty) \quad (13)$$

Para encontrar el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección h_c se precisa utilizar una correlación empírica del número de Nusselt. En la Tabla 20 se muestran dichas correlaciones para las configuraciones geométricas requeridas.

Tabla 20

Correlaciones empíricas del número de Nusselt para la convección natural sobre superficies.

Configuración geométrica	Longitud característica	Intervalo de Ra	Nu
	D	$Ra_D \leq 10^{12}$	$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + (0.559/Pr)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2$
	L	$10^4 - 10^9$ $10^{10} - 10^{13}$ Todo el intervalo	$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2$

Nota. Adaptada de (Çengel & Ghajar, 2011).

Para aplicar las correlaciones de Nusselt, se emplean los números adimensionales mostrados en la Tabla 21.

Tabla 21

Números adimensionales.

Número adimensional	Fórmula	Significado físico
Grashof	$Gr_{Lc} = \frac{g\beta(T_{s,ais} - T_{\infty})L_c^3}{\nu^2}$	Razón entre la fuerza de flotabilidad y la fuerza viscosa que actúa sobre el fluido.
Rayleigh	$Ra_{Lc} = Gr_{Lc}Pr$	Razón de las fuerzas de flotabilidad y las difusividades térmicas y de cantidad de movimiento.

Nota. β se define como el coeficiente de expansión volumétrica ($1/T_f$). Adaptada de (Çengel & Ghajar, 2011).

Una vez hallado el número de Nusselt, el coeficiente de transferencia de calor por convección viene dado por:

$$h_c = \frac{k}{D} Nu_{Lc} \quad (14)$$

Entonces el calor total perdido por convección es:

$$q_{conv} = q_{conv,c} + q_{conv,t} + q_{conv,v} \quad (15)$$

Donde:

$q_{conv,c}$: Calor perdido por convección en la pared cilíndrica compuesta.

$q_{conv,t}$: Calor perdido por convección en la pared trasera.

$q_{conv,v}$: Calor perdido por convección en la pared delantera.

Para las temperaturas de película en las superficies del aislamiento y de la ventana de borosilicato se tienen las propiedades termofísicas del aire que se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22

Propiedades termofísicas del aire para la temperatura de película.

Superficie	T_f [K]	β 1/[K]	ν [m ² /s]	Pr	k [W/mK]
Aislante	321.50	0.00311	1.78×10^{-5}	0.723	0.027
Borosilicato	343.5	0.002911	2×10^{-5}	0.717	0.029

Nota. Las propiedades para la temperatura de película se obtuvieron mediante interpolación, teniendo como base la Tabla A-15 de (Çengel & Ghajar, 2011).

Considerando una longitud del aislante $L_{ais} = 0.470 \text{ m}$ para el recubrimiento de la superficie cilíndrica, una temperatura en la pared externa de la cámara del horno $T_{p,e} = 220^\circ\text{C}$ y suponiendo temperaturas de $T_{s,ais} = 80^\circ\text{C}$ y $T_{sv,i} = 130^\circ\text{C}$ en la su superficial del aislante y en la superficie interna de la pared delantera respectivamente, además de un gradiente de temperatura de 10°C en la pared delantera de borosilicato, se realiza un primer cálculo de las pérdidas por convección. Los resultados se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23

Aproximación de las pérdidas de calor por convección.

Superficie	Gr_{Lc}	Ra_{Lc}	Nu	hc [W/m ² K]	q_{conv} [W]
Pared cilíndrica	1.316×10^9	9.515×10^8	114.281	5.175	289.602
Pared plana trasera	1.305×10^9	9.439×10^8	120.996	5.494	124.596
Pared plana delantera	5.074×10^8	3.638×10^8	90.241	6.427	131.467
				Total	545.974

Los valores obtenidos tanto para las pérdidas de calor por conducción como para las pérdidas por convección son resultado de una primera aproximación utilizando temperaturas supuestas. Por ello se realiza un proceso iterativo para hallar los valores adecuados.

Para esto se requiere de un balance de energía en la superficie de la pared cilíndrica compuesta. El balance se expresa de la siguiente manera:

$$q_{cond} - q_{conv} - q_{rad} = 0 \quad (16)$$

Reemplazando las ecuaciones correspondientes y despejando la variable $T_{s,ais}$, se obtiene la siguiente expresión:

$$T_{s,ais} = T_{\infty} + \frac{q_{cond}}{A_{conv,rad}(h_c + h_{rad})} \quad (17)$$

En la Tabla 24 se muestran las iteraciones realizadas, la convergencia se dio en la octava iteración.

Tabla 24

Iteraciones de los valores de interés.

$T_{s,ais}$ [K]	ν [m ² /s] [x10 ⁻⁵]	Pr	k [$\frac{W}{mK}$]	Gr_{Lc} [x10 ⁸]	Ra_{Lc} [x10 ⁸]	Nu	h_c [$\frac{W}{m^2K}$]	h_{rad} [$\frac{W}{m^2K}$]	q_{cond} [W]
353	1.78	0.723	0.027	13.2	9.53	114.32	5.1274	6.5439	201.15
309.41	1.58	0.729	0.026	5.57	4.06	87.600	3.7834	5.2562	263.78
322.86	1.64	0.727	0.026	8.53	6.20	99.996	4.3187	5.6284	244.45
317.67	1.62	0.728	0.026	7.46	5.43	95.954	4.1442	5.4823	251.90
319.47	1.62	0.728	0.026	7.85	5.71	97.466	4.2095	5.5325	249.33
318.82	1.62	0.728	0.026	7.71	5.61	96.936	4.1866	5.5143	250.26
319.05	1.62	0.728	0.026	7.76	5.65	97.128	4.1949	5.5208	249.93
318.97	1.62	0.728	0.026	7.74	5.63	97.046	4.1913	5.5185	250.05
319.00	1.62	0.728	0.026	7.75	5.64	97.077	4.1927	5.5193	250.00

El valor de la temperatura superficial del aislante convergió en $T_{s,ais} = 46^{\circ}C$. Con este nuevo valor de temperatura se procede a realizar nuevamente los cálculos de las pérdidas de calor por conducción y convección. Los resultados se resumen en la Tabla 25 y Tabla 26 respectivamente.

Tabla 25

Pérdidas de calor por conducción.

Pared cilíndrica		Pared plana trasera		Pared plana delantera		Total
$R_{t,cond_ais}$	q_{re}	$R_{t,cond_p}$	$q_{c,p}$	$R_{t,cond_pv}$	$q_{c,v}$	q_{cond}
[K/W]	[W]	[K/W]	[W]	[K/W]	[W]	[W]
0.696	249.996	1.568	110.976	0.052	191.16	552.133

Tabla 26

Pérdidas de calor por convección.

Superficie	Gr_{Lc}	Ra_{Lc}	Nu	hc [W/m ² K]	q_{conv} [W]
Pared cilíndrica	7.731x10 ⁸	5.627x10 ⁸	96.999	4.191	107.954
Pared plana trasera	7.67x10 ⁸	5.582x10 ⁸	103.047	4.464	46.602
Pared plana delantera	5.013x10 ⁸	3.597x10 ⁸	89.937	6.373	125.489
Total					280.045

Espesor del aislante

Inicialmente se tomó como valor del espesor del aislante $e_{ais} = 2$ in por su disponibilidad en el mercado. A partir de la determinación de los valores de las pérdidas de calor

por conducción y convección, se determina el espesor del aislante de manera más adecuada, mediante la siguiente expresión:

$$r_{ais} = \exp \left[\frac{(T_{pe} - T_{s,ais}) 2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{ais}}{q_{re}} \right] r_{pe} \quad (18)$$

Reemplazando los valores en la expresión anterior, da como resultado un radio del aislante de $r_{ais} = 0.3008 \text{ mm}$ al cual se le resta el radio exterior de la cámara del horno para obtener el espesor del aislante $e_{ais} = 0.0508 \text{ m}$ equivalente a 2 pulgadas.

Pérdida de calor por radiación

En paralelo a la convección, ocurre la transferencia de calor por radiación, la cual está determinada por la siguiente expresión:

$$q_{radc} = A_{radc} h_{rad} (T_{s,ais} - T_{\infty}) \quad (19)$$

Donde A_{radc} es el área de la superficie cilíndrica del aislamiento y h_{rad} es el coeficiente de transferencia de calor por radiación y viene dado por:

$$h_{rad,ais} = \varepsilon_{ais} \sigma F (T_{s,ais} + T_{\infty}) (T_{s,ais}^2 + T_{\infty}^2) \quad (20)$$

Entonces, el calor total perdido por radiación se expresa como:

$$q_{rad} = q_{radc} + q_{radt} + q_{radv} \quad (21)$$

Donde:

q_{radt} : Calor perdido por radiación en la pared trasera.

q_{radv} : Calor perdido por radiación en la pared delantera.

A partir de las ecuaciones presentadas, se obtiene las pérdidas de calor por radiación, las cuales se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27

Pérdidas de calor por radiación.

Pared cilíndrica		Pared plana trasera		Pared plana delantera		Total
$h_{rad,ais}$	q_{radc}	$h_{rad,ais}$	q_{radt}	$h_{rad.v}$	q_{radv}	q_{rad}
[W/m ² K]	[W]	[W/m ² K]	[W]	[W/m ² K]	[W]	[W]
5.519	142.181	5.519	57.622	8.13	160.066	359.868

Entonces, el calor total perdido por los tres mecanismos de transferencia de calor viene dado por:

$$q_{perdidas} = q_{cond} + q_{conv} + q_{rad} \quad (22)$$

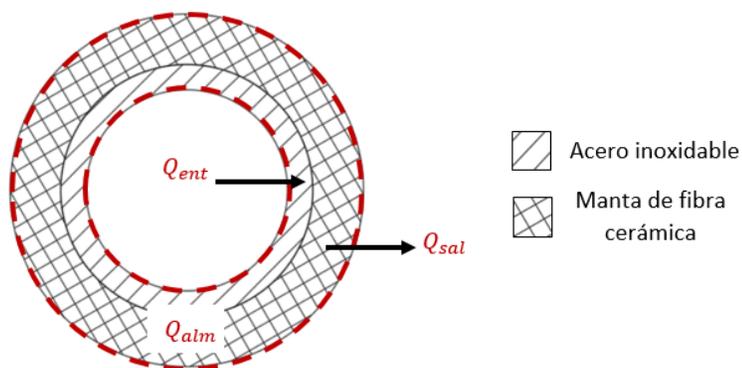
De esta manera se obtiene una pérdida total de $q_{perdidas} = 1192 [W]$.

Estado transitorio

Para el análisis del estado transitorio se realiza un balance de energía en la pared cilíndrica compuesta del horno, para este análisis se utiliza el concepto de la primera ley de la termodinámica o principio de conservación de la energía. En la Figura 19 se muestra el volumen de control en el que se realiza el balance.

Figura 19

Conservación de la energía en el volumen de control de la pared compuesta



De acuerdo con la primera ley, la formulación del balance de energía se expresa como se muestra:

$$Q_{ent} + Q_{gen} - Q_{sal} = Q_{alm} \quad (23)$$

La relación indica que el calor de entrada y generación de calor actúan de modo que incrementan la cantidad de calor almacenado dentro del volumen de control, mientras que el calor de salida actúa para disminuir el calor almacenado.

El calor de entrada corresponde a la conversión de la potencia eléctrica generada por las resistencias eléctricas en calor debido al efecto Joule, el calor de salida corresponde a las pérdidas de calor por convección y radiación en la superficie externa del volumen de control, y el calor almacenado concierne al calor útil necesario para calentar la masa del tanque. De esta manera la expresión del balance de energía se expresa como sigue:

$$Q_{ent} - h_c A_c (T_{pe} - T_{\infty}) - A_{radc} \varepsilon_{ais} \sigma F (T_{pe}^4 - T_{\infty}^4) = m_a c_{pa} \frac{dT_{pe}}{dt} \quad (24)$$

En el punto de equilibrio no existe variación de temperatura, por tanto, la derivada es cero. De esta manera se obtiene la siguiente expresión:

$$(A_{radc} \varepsilon_{ais} \sigma F) T_{pe,s}^4 + (h_c A_c) T_{pe,s} - (Q_{ent,s} + h_c A_c T_{\infty,s} + A_{radc} \varepsilon_{ais} \sigma F T_{\infty,s}^4) = 0 \quad (25)$$

El subíndice "s" en las variables de la función hace alusión al estado estacionario del modelo.

La expresión obtenida es no lineal debido al término T_{pe}^4 asociado con la ecuación concerniente a la radiación; por tanto, se linealiza el modelo en un punto de equilibrio haciendo uso de expansiones por series de Taylor. La expresión del balance de energía se define como una función de la siguiente manera:

$$f(T_{pe}, Q_{ent}) = \frac{dT_{pe}}{dt} = \frac{1}{m_a c_{pa}} Q_{ent} - \frac{h_c A_c}{m_a c_{pa}} (T_{pe} - T_{\infty}) - \frac{A_{radc} \varepsilon_{ais} \sigma F}{m_a c_{pa}} (T_{pe}^4 - T_{\infty}^4) \quad (26)$$

Aplicando expansiones por series de Taylor en la función del modelo se tiene:

$$\frac{dT_{pe}}{dt} = \left. \frac{\partial f}{\partial T_{pe}} \right|_{T_{pe,s}, Q_{ent,s}} (T_{pe} - T_{pe,s}) + \left. \frac{\partial f}{\partial Q_{ent}} \right|_{T_{pe,s}, Q_{ent,s}} (Q_{ent} - Q_{ent,s}) + f(T_{pe,s}, Q_{ent,s}) \quad (27)$$

Al desarrollar la expresión anterior y evaluarla en los puntos de equilibrio, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{d \Delta T}{dt} = \left(-\frac{h_c A_c}{m_a c_{pa}} - \frac{4A_{radc} \varepsilon_{ais} \sigma F}{m_a c_{pa}} T_{pe}^3 \right) \Delta T + \left(\frac{1}{m_a c_{pa}} \right) \Delta Q \quad (28)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación anterior y ordenando los términos, se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$\frac{\Delta T(s)}{\Delta Q(s)} = \frac{\left(\frac{1}{m_a c_{pa}} \right)}{s + \left(\frac{h_c A_c}{m_a c_{pa}} + \frac{4A_{radc} \varepsilon_{ais} \sigma F}{m_a c_{pa}} T_{pe}^3 \right)} \quad (29)$$

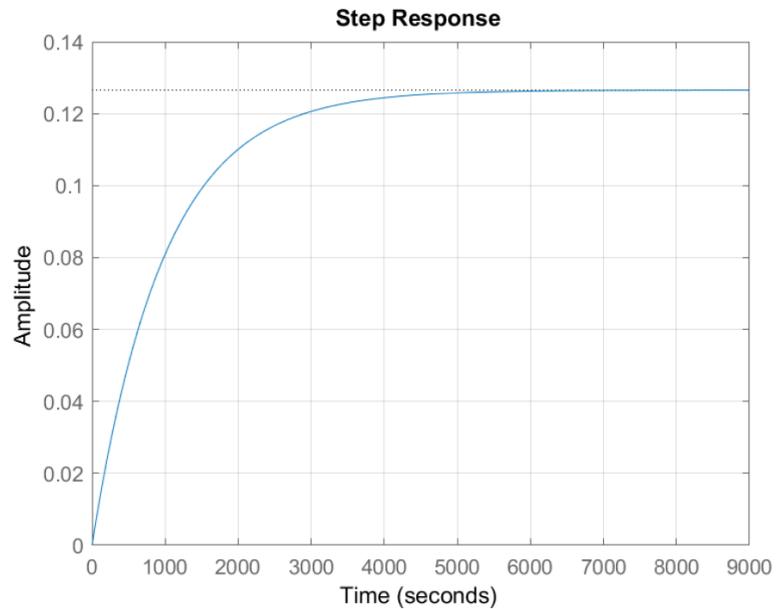
Sustituyendo los valores de cada constante y tomando como punto de equilibrio el momento cuando no se entrega potencia por parte de las resistencias, es decir $Q_{ent} = 0$, encontramos la temperatura en equilibrio de $T_{pe,s} = 17^{\circ}C$. Entonces la función de transferencia es:

$$\frac{\Delta T(s)}{\Delta Q(s)} = G(s) = \frac{0.000129}{s + 0.001019} \quad (30)$$

En la Figura 20 se muestra la respuesta de escalón unitario para la función de transferencia obtenida, se observa que el tiempo necesario aproximado para llegar a la temperatura $T_{pe} = 220^{\circ}C$ es de $t = 6000$ segundos o 1 hora con 40 minutos.

Figura 20

Respuesta de escalón unitario para la función de transferencia del sistema térmico del horno



Calor almacenado

Para calentar la masa del tanque, del aire y de la carga desde la temperatura ambiente hasta una temperatura deseada, se requiere de un calor útil que se determina con las siguientes expresiones respectivamente:

$$Q_{alm,acero} = m_a c_{pa} (T_{pe} - T_{\infty}) \quad (31)$$

$$Q_{alm,aire} = m_{air} c_{pair} (T_{cam} - T_{\infty}) \quad (32)$$

$$Q_{alm,carga} = m_{all} c_{pall} (T_{s,pi} - T_{\infty}) \quad (33)$$

Donde:

m : Masa de acero(a), aire(air) y de la carga(all).

c_p : Calor específico del acero(a), aire(air) y de la carga(all).

T_{pe} : Temperatura de la pared externa de la cámara del horno.

T_{∞} : Temperatura del ambiente.

T_{cam} : Temperatura del ambiente en la cámara del horno.

Los resultados obtenidos en el cálculo del calor almacenado para el tanque, el aire y la carga se presentan en la Tabla 28.

Tabla 28

Calor almacenado del tanque, aire y carga.

	ρ [kg/m ³]	V [m ³]	c_p [J/kgK]	Q_{alm} [J]
Tanque	8000	0.0019	500	1.573 x10 ⁶
Aire	1.2081	0.091	1006.8	1.922 x10 ⁴
Carga	2700	0.046	500	2.281 x10 ⁷
			Q_{almT}	2.44 x10 ⁷

Con el tiempo obtenido en el análisis del estado transitorio $t = 6000$ s, se determina el calor almacenado en watts.

$$Q_{almT} = \frac{Q_{almT}}{t} \quad (34)$$

De esta manera, el calor acumulado es $Q_{almT} = 4066.67$ [W].

Potencia eléctrica

Para determinar la potencia de las resistencias eléctricas se toma en cuenta el calor útil necesario para calentar el tanque, la atmósfera y la carga; además del calor perdido en la superficie por convección y radiación. Por lo tanto:

$$P = Q_{almT} + q_{perdidas} \quad (35)$$

De esta manera se tiene una potencia eléctrica requerida de $P = 5259$ [W].

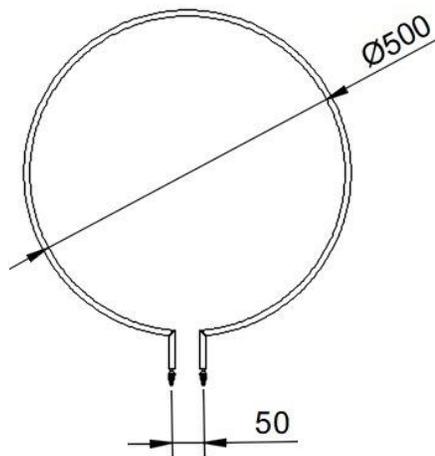
Resistencias eléctricas

En base a la potencia eléctrica requerida de $P = 5259 [W]$, se opta por implementar resistencias tubulares o blindadas. Este tipo de resistencias son muy versátiles en cuanto a su fabricación, por lo que sus formas se pueden adaptar en función del equipo en el que serán instaladas. Las resistencias se instalan alrededor de la pared cilíndrica del tanque, por lo que deben tomar una forma circular, el diámetro interno de las resistencias corresponde al diámetro exterior de la cámara el horno, es decir 500 mm, además se consideran dos terminales para la conexión eléctrica de 50 mm cada uno.

En la Figura 21 se muestra la configuración geométrica de la resistencia tubular implementada en el horno.

Figura 21

Configuración geométrica de la resistencia tubular implementada en el horno



De esta manera se determina el largo total de la resistencia:

$$L_{res} = \pi D_{res} + 100 \quad (36)$$

Entonces, el largo de la resistencia es $L_{res} = 1670.8 \text{ mm}$. Según el fabricante, la resistencia provee $10 \frac{W}{cm}$; la superficie útil de la resistencia es de 1570 mm, por lo que cada

resistencia genera 1500 W aproximadamente. Además, se recomienda trabajar con el 80% de la potencia máxima, por tanto, la potencia útil de una resistencia es de 1200 W .

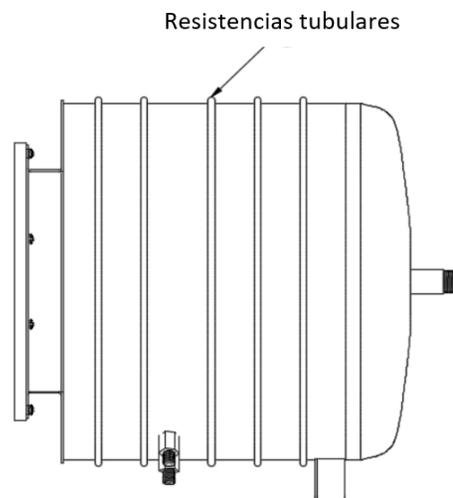
Para suplir con la potencia eléctrica requerida se requiere de 5 resistencias que generaran una potencia total de 6000 W .

La resistencia de alambre níquelina nickrome está embebida en una masa refractaria de óxido de magnesio que asegura el aislamiento dieléctrico entre el tubo de acero inoxidable 304 y el terminal de la conexión.

En la Figura 22 se muestra la disposición de las 5 resistencias a lo largo de la pared cilíndrica del horno.

Figura 22

Disposición de las resistencias en la pared cilíndrica del horno



Eficiencia

Para determinar la eficiencia del horno se emplea la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{Q_{almT}}{P} \quad (37)$$

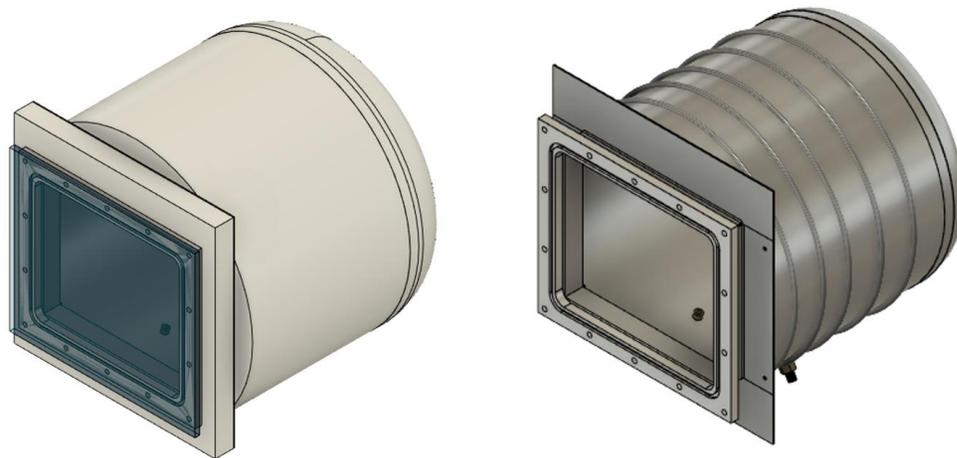
Con una potencia eléctrica de 6000 [W] y un calor almacenado de 4066.67[W], la eficiencia es de 67.77%.

Simulación térmica del equipo

Para realizar el diseño CAD del horno se utiliza el software Autodesk Fusion360, y para la simulación térmica del mismo, se hace uso del software Ansys R18.1. En la Figura 23 se presenta el diseño CAD del horno totalmente aislado y sin aislamiento.

Figura 23

Diseño CAD del horno en software Autodesk Fusion360

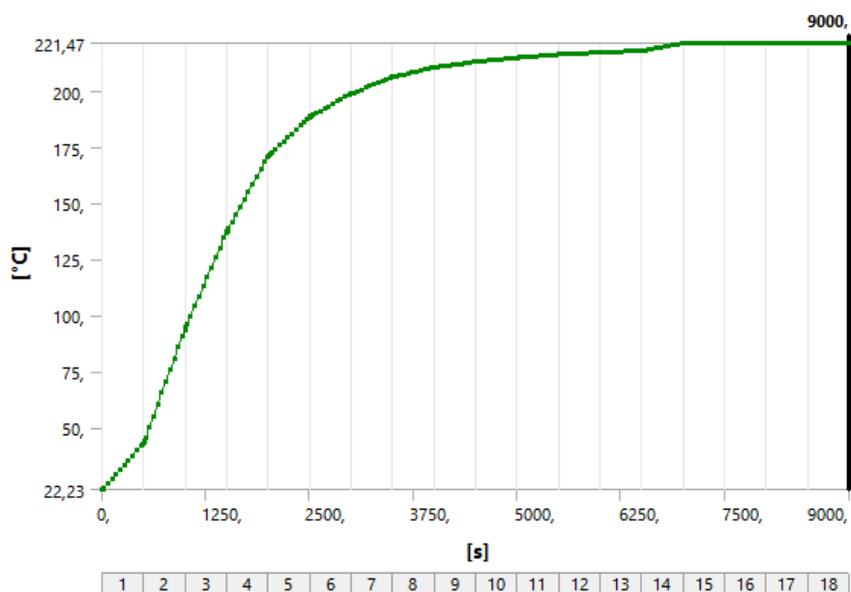


La simulación permite determinar la distribución de temperatura en los elementos constituyentes del horno, las condiciones de frontera utilizadas provienen del análisis desarrollado previamente.

El entorno que permite la simulación térmica en función del tiempo es Transient Thermal, el tiempo establecido es de 9000 segundos. En la Figura 24 se muestra la gráfica de temperatura en función del tiempo obtenida en el reporte de la simulación para la zona de máxima temperatura que corresponde a la pared cilíndrica del tanque. Se observa que la temperatura máxima de 220°C se alcanza cuando ha transcurrido aproximadamente 6000 segundos, lo cual tiene concordancia con el resultado obtenido en el análisis del estado transitorio.

Figura 24

Gráfica de temperatura en función del tiempo obtenida de Ansys



En la Figura 25 y Figura 26, se muestran los resultados obtenidos para el horno cerrado y recubierto con aislante.

Figura 25

Resultados obtenidos de la simulación para el horno recubierto con aislante – vista isométrica

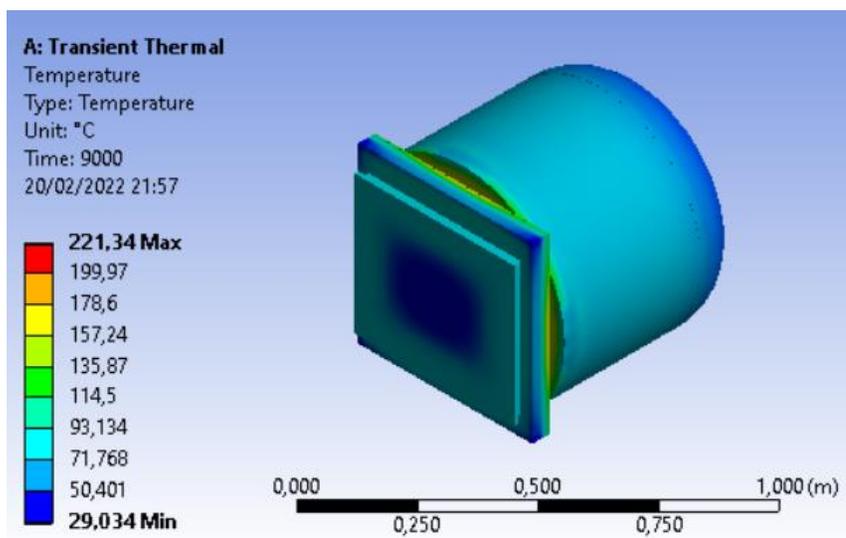
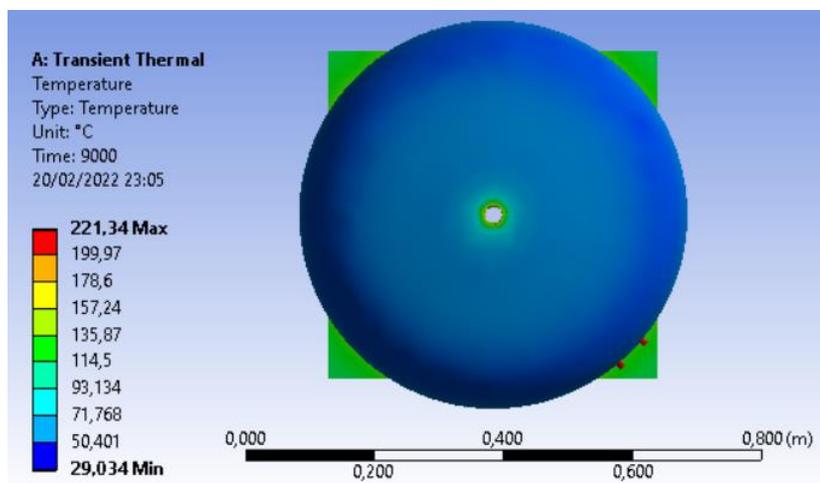


Figura 26

Resultados obtenidos de la simulación para el horno recubierto con aislante – vista trasera



La temperatura máxima alcanzada en el aislante es de 71.768°C en la parte cilíndrica y la temperatura mínima es de 50.401°C en la tapa trasera. La superficie exterior del vidrio alcanza temperaturas de 114.5°C en la periferia y va disminuyendo a medida que se aproxima al centro.

En la Figura 27 y Figura 28, se muestran los resultados obtenidos para el horno sin tapa delantera y sin aislante.

Figura 27

Resultados obtenidos de la simulación para el horno descubierto – vista isométrica

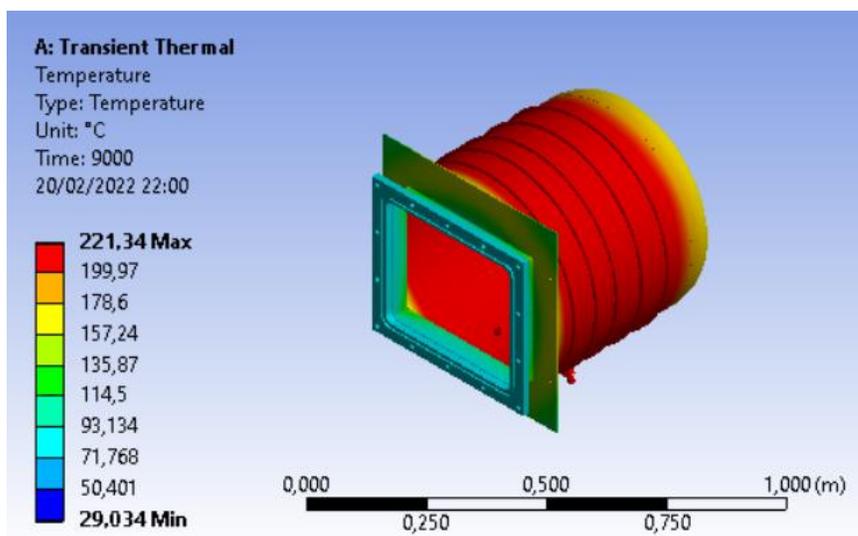
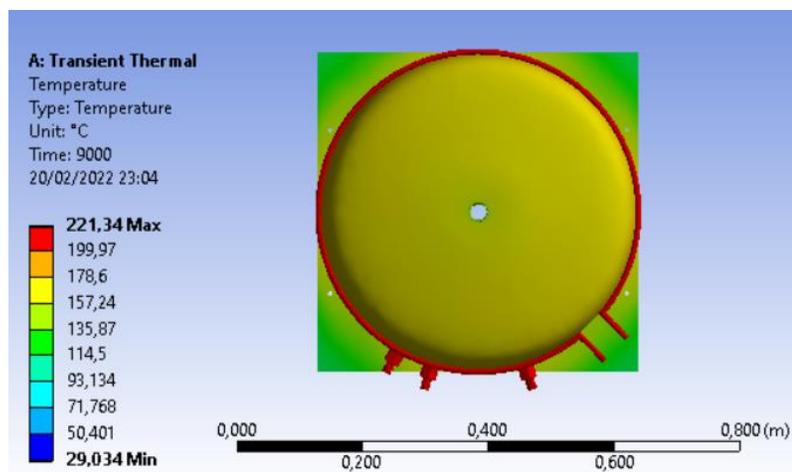


Figura 28

Resultados obtenidos de la simulación para el horno descubierto – vista trasera



La temperatura máxima alcanzada en la pared cilíndrica del tanque es de 221.34°C y va disminuyendo a medida que se produce conducción hacia la tapa trasera, llegando a un valor de 178.6°C. La brida de aluminio se calienta a una temperatura máxima de 93.134°C.

Capítulo V Automatización y control

Requerimientos del sistema

El sistema debe ser capaz de controlar de manera automática la temperatura que el usuario requiera, para lograr esto se requiere la instalación, conexión, y configuración de los dispositivos de control, instrumentación, presentación y toma de datos. Además, el tablero de control será independiente, es decir, no estará unido al horno como tal. También debe tener una alarma que indique al usuario una falla o un valor de temperatura que exceda lo permitido, tener un botón de paro de emergencia que detenga el proceso, además de luces indicadoras de operación.

Los requerimientos de temperatura establecidos en la automatización se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29

Requerimientos de temperatura para la automatización.

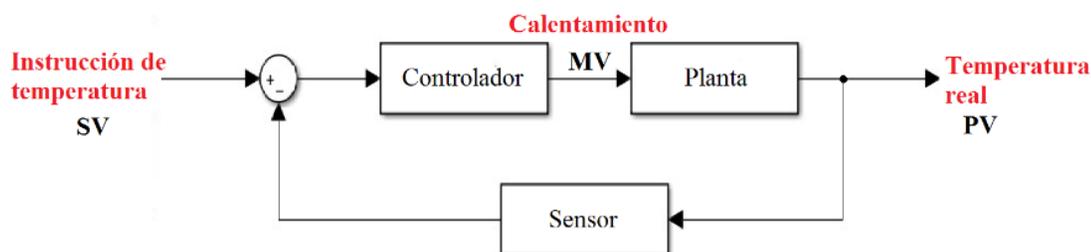
Descripción	Requerimiento
Setpoint de temperatura	El valor debe ser ingresado por el usuario
Temperatura mínima	17°C
Temperatura máxima	220°C
Variación de temperatura	±3°C

Sistema de control

El sistema de control se utiliza para controlar la variable del proceso con un valor específico, en este caso, la temperatura deseada. En la Figura 29 se muestra el lazo de control del sistema.

Figura 29

Diagrama de bloques del lazo de control



El lazo de control es cerrado debido a la retroalimentación que ejerce el sensor de temperatura para poder controlar el proceso.

Selección de los elementos constitutivos del sistema de control

Los principales elementos constitutivos del sistema de control son:

- Controlador
- HMI
- Sensor de temperatura
- Relé de estado sólido

Mediante la técnica de priorización de matrices de decisión, se procede a elegir la mejor opción para los elementos mencionados.

Para la evaluación de las matrices se tienen las ponderaciones detalladas en la Tabla 30.

Tabla 30

Valoración para las matrices de decisión.

Cuantitativa	Cualitativa
9	Cumple mucho más
7	Cumple más
5	Cumple igual
3	Cumple menos
1	Cumple mucho menos

Controlador

Se tienen tres opciones:

- Controlador de temperatura
- PLC con HMI
- Arduino con HMI

Los criterios de evaluación son: menor precio en el mercado; una interfaz para visualización y manejo del usuario; capacidad de recolectar datos y presentarlos en tiempo real y la utilidad que puede tener a largo plazo.

En la Tabla 31 se evalúan los criterios para determinar cual de ellos presenta mayor relevancia al momento de seleccionar el controlador del sistema.

Tabla 31

Criterios para la selección del controlador.

	Menor Precio	Interfaz	Monitoreo de datos	Utilidad a largo plazo	Sumatoria	%
Menor Precio		5	5	3	13	21.67
Interfaz	5		5	1	11	18.33
Monitoreo de datos	5	5		1	11	18.33
Utilidad a largo plazo	7	9	9		25	41.67
				Total	60	100

El criterio con mayor influencia es la utilidad que puede tener a largo plazo el controlador, seguido por el menor precio, la interfaz y el monitoreo de datos. En la Tabla 32, Tabla 33, Tabla 34 y Tabla 35 se evalúan el cumplimiento de los criterios para cada alternativa.

Tabla 32

Evaluación para el criterio de menor precio.

Menor Precio	Controlador de temperatura	PLC con HMI	Arduino con HMI	Sumatoria	%
Controlador de temperatura		9	7	16	53.33
PLC con HMI	1		3	4	13.34
Arduino con HMI	3	7		10	33.33
			Total	30	100

Tabla 33

Evaluación para el criterio de interfaz.

Interfaz	Controlador de temperatura	PLC con HMI	Arduino con HMI	Sumatoria	%
Controlador de temperatura		1	1	2	6.66
PLC con HMI	9		5	14	46.67
Arduino con HMI	9	5		14	46.67
			Total	30	100

Tabla 34

Evaluación para el criterio de monitorio y recolección de datos.

Monitoreo y recolección de datos	Controlador de temperatura	PLC con HMI	Arduino con HMI	Sumatoria	%
Controlador de temperatura		1	3	4	13.33
PLC con HMI	9		7	16	53.34
Arduino con HMI	7	3		10	33.33
			Total	30	100

Tabla 35

Evaluación para el criterio Utilidad a largo plazo.

Utilidad a largo plazo	Controlador de temperatura	PLC con HMI	Arduino con HMI	Sumatoria	%
Controlador de temperatura		1	3	4	13.33
PLC con HMI	9		9	18	60
Arduino con HMI	7	1		8	26.67
Total				30	100

Una vez evaluadas las alternativas en base a los criterios expuestos, se selecciona el PLC con HMI como controlador más adecuado para el fin requerido, esto se observa en la Tabla 36.

Tabla 36

Selección de la alternativa más adecuada.

Criterios	Menor precio	Interfaz	Monitorio de datos	Utilidad a largo plazo	Sumatoria	Prioridad
Alternativas	0.2167	0.1833	0.1833	0.4167		
Controlador de temperatura	0.5333	0.066	0.1333	0.1333	20.77	3
PLC con HMI	0.1334	0.4667	0.5334	0.60	46.23	1
Arduino con HMI	0.3333	0.4667	0.3333	0.2667	33	2

Sensor de temperatura

Se tienen dos opciones: termocupla y termorresistencia. Los criterios de evaluación son: menor precio en el mercado; condición de operación y aplicación típica.

En la Tabla 37 se evalúan los criterios para determinar cuál de ellos presenta mayor relevancia al momento de seleccionar el sensor de temperatura.

Tabla 37

Criterios para la selección del sensor de temperatura.

	Menor precio	Condición de operación	Aplicación típica	Sumatoria	%
Menor precio		3	3	6	20
Condición de operación	7		5	12	40
Aplicación típica	7	5		12	40
			Total	30	100

Los criterios con mayor influencia son la aplicación típica de los sensores y la condición de operación, seguido por el menor precio. En la Tabla 38, Tabla 39 y Tabla 40 se evalúa el cumplimiento de los criterios para cada alternativa.

Tabla 38

Evaluación para el criterio de menor precio.

Menor precio	Termocupla	Termorresistencia	Sumatoria	%
Termocupla		5	5	50
Termorresistencia	5		5	50
		Total	10	100

Tabla 39

Evaluación para el criterio de condición de operación.

Condición de operación	Termocupla	Termorresistencia	Sumatoria	%
Termocupla		7	7	70
Termorresistencia	3		3	30
		Total	10	100

Tabla 40

Evaluación para el criterio de aplicación típica.

Aplicación típica	Termocupla	Termorresistencia	Sumatoria	%
Termocupla		9	9	90
Termorresistencia	1		1	10
			10	100

Una vez evaluadas las alternativas en base a los criterios expuestos como se observa en la Tabla 41, se selecciona como sensor de temperatura una termocupla.

Tabla 41

Selección de la alternativa más adecuada.

Criterios	Menor precio	Condición de operación	Aplicación típica	Sumatoria final	Prioridad
Alternativas	0.20	0.40	0.40		
Termocupla	0.50	0.70	0.90	74	1
Termorresistencia	0.50	0.30	0.10	26	2

La termocupla para el fin requerido es una termocupla tipo K, ya que la misma es uno de los sensores de temperatura de uso industrial mas común en hornos de tratamientos térmicos y en hornos de fundición cuyas temperaturas son menores a 1350°C. Además, son económicas, rígidas y fáciles de remplazar.

Controlador lógico programable PLC

Consideraciones para la selección del PLC. Para la selección del PLC se tomó en cuenta:

- Condiciones de operación.
- Requerimientos del sistema de control.
- Número de entradas y salidas requeridas.

- Entradas/salidas para posibles trabajos futuros.
- Disponibilidad del mercado local
- Costo.

Entradas y salidas. Las entradas y salidas requeridas se detallan en la Tabla 42.

Tabla 42

Entradas y salidas requeridas.

No.	Entradas/Salidas	Elemento
1	Entrada analógica	Termocupla
2	Entrada digital	Paro de emergencia
3		Indicador/luz verde: marcha
4	Salidas digitales	Indicador/luz roja: alarma
5		Relé de estado sólido (Salida PWM)

Una vez conocidas las entradas/salidas requeridas y las demás consideraciones, se selecciona un PLC DELTA DVP24ES2 que cumple con los requerimientos demandados. En la Figura 30 se muestra el PLC seleccionado.

Figura 30

PLC modelo DVP24E2



Nota. Tomado de (DELTA, 2011).

Características del PLC. Las principales características del PLC DELTA DVP24E2 están resumidas en la Tabla 43.

Tabla 43

Datos técnicos generales del PLC DELTA DVP24ES2.

Especificaciones	
	Cuenta con 3 puertos
Puertos de comunicación	- COM1: RS-232 - COM2 y COM3: RS-485
Entradas y salidas	Cuenta con 16 DI / 8DO
Método de control	Programa almacenado, sistema de exploración cíclica
Lenguaje de programa	Lista de instrucción + Escalera + SFC

Nota. Las especificaciones se obtuvieron de (DELTA, 2011)

HMI

La interfaz humano-máquina es un HMI DELTA de la serie DOP103 de 4.3 pulgadas, tiene varios controladores de protocolo de comunicación, dispone de puertos COM y Ethernet, compatible con visor VNC de acceso remoto, entrada USB, grado de protección IP65. En la Figura 31 se muestra la HMI seleccionada.

Figura 31

HMI Delta DOP103 de 4.3 pulgadas



Nota. Tomado de (DELTA, 2017)

Relé de estado sólido SSR

El relé de estado sólido está conectado a la salida PWM del PLC y se encarga de encender o apagar las resistencias dependiendo de la señal que le llegue. El relé de estado sólido elegido tiene una entrada de 4-30 VDC y una salida de 24-240 VAC, 50/60 Hz y 40A de corriente de carga nominal. En la Figura 32 se muestra el relé seleccionada.

Figura 32

Relé de estado sólido



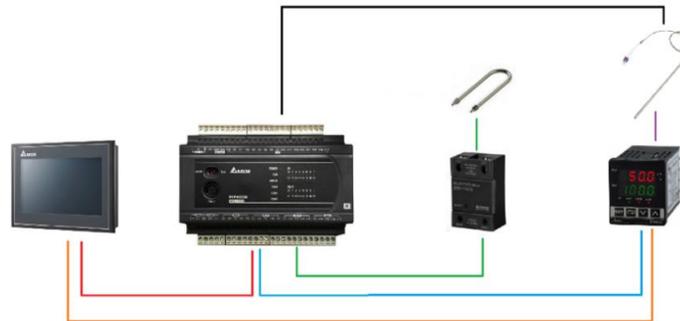
Nota. Tomado de (Autonics USA, s.f.).

Diseño del sistema de control

En base a los requerimientos mencionados, el sistema de control consta de un PLC, el cual actúa de dispositivo de control, se coloca una termocupla tipo K como sensor de temperatura, un relé de estado sólido conectado a la salida PWM para regular los pulsos enviados a las resistencias eléctricas, un controlador de temperatura que funciona como lector del valor de la termocupla. Además, incorpora una pantalla HMI para la visualización, monitoreo del proceso de calentamiento y para el ingreso de la instrucción de temperatura. En la Figura 33 se ilustra el esquema del sistema de control.

Figura 33

Esquema general del sistema de control



Programacion

Entorno de programación

Software PLC. El software que emplea para su programación es ISPSOft, el cual posee una interfaz de edición modular, y además ofrece 5 diferentes lenguajes de programación. Para el caso del sistema de control del horno, se empleó el lenguaje de programación ladder o también conocido como lógica de contactos.

La denominación que utiliza el programa es:

- Entradas: X
- Salidas: Y
- Marcas/Registros: M (no son físicos, pero se ejecutan en la programación)
- Datos: D se almacenan datos en esta variable.

Software HMI. El software empleado para la programación del HMI es DOPSOft, su interfaz posee ventanas y barras de tarea que permiten crear las diferentes pantallas a proyectarse. Se pueden insertar botones, indicadores numéricos, entrada de datos, gráficos de históricos, etc.

COMMGR. Es un software que permite la creación y la gestión de comunicación entre computadora y PLC de la marca Delta.

Diseño de la HMI

VARIABLES DE INTERÉS DEL HMI. El HMI controla las variables mostradas en la Tabla 44.

Tabla 44

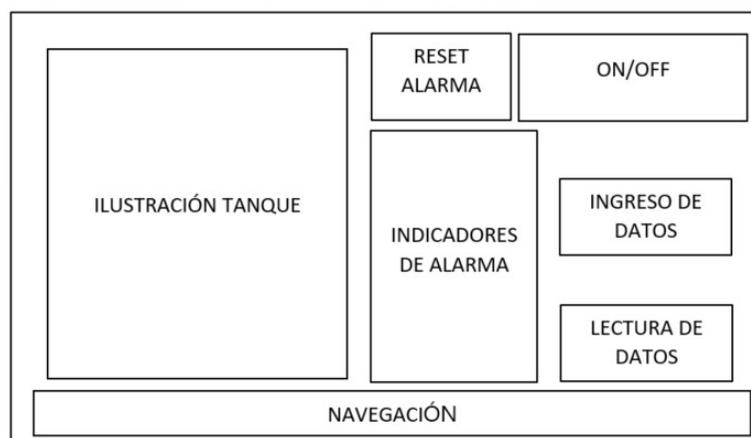
VARIABLES DE LA HMI.

Variables	
Variable a monitorear	Temperatura pared
	Temperatura pared
Variables a controlar	Parámetros PID
	Tiempo de muestreo

Arquitectura y navegación. Para iniciar con el proceso de diseño se establecen las pantallas a desarrollarse, estas son: pantalla de proceso, pantalla de históricos, pantalla de configuración y pantalla de modo manual. En la Figura 34 se muestra la arquitectura modelo que se utilizará en la pantalla principal.

Figura 34

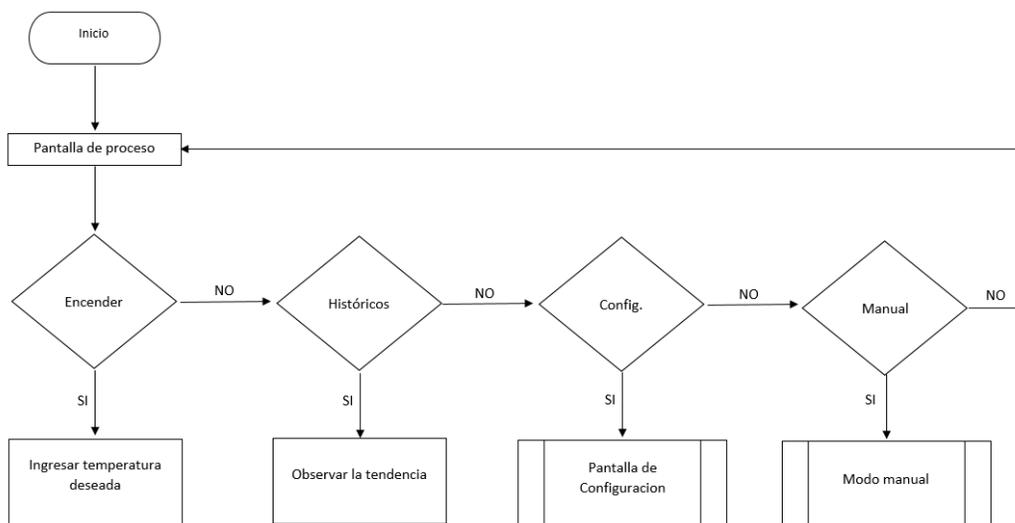
Arquitectura modelo de la pantalla principal



Una vez definidas la arquitectura, se establece un diagrama de flujo que indique de manera general la navegabilidad que tendrá la interfaz. En la Figura 35 se detalla dicho diagrama.

Figura 35

Diagrama de flujo de navegabilidad de la HMI



En la Figura 36 y Figura 37 se detallan los procesos pre definidos derivados del diagrama de flujo para la pantalla de configuración y para la pantalla de modo manual respectivamente.

Figura 36

Diagrama de flujo de la pantalla de configuración de la HMI

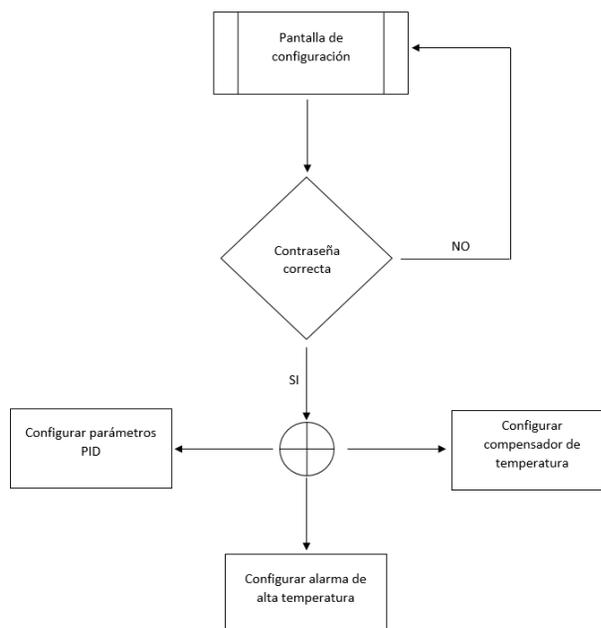
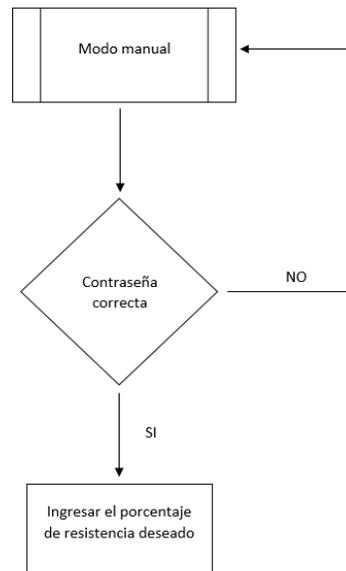


Figura 37

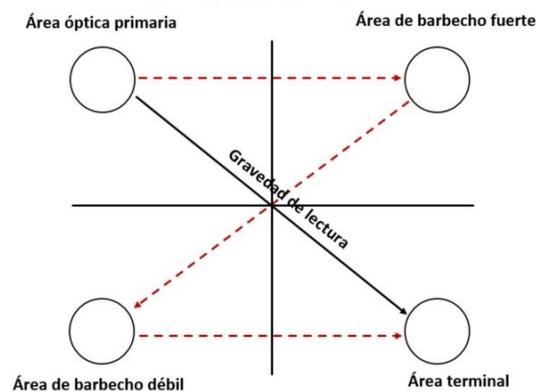
Diagrama de flujo del modo manual de la HMI



Distribución de pantallas. Se desarrollan las plantillas que registrarán la interfaz de cada una de las pantallas. Para garantizar una correcta distribución visual en las pantallas se emplea el diagrama de Gutenberg mostrado en la Figura 38, el cual describe el patrón general de visualización del usuario; también conocido como patrón “Z”, debido a que describe una trayectoria similar a una zeta, empezando por la esquina superior izquierda.

Figura 38

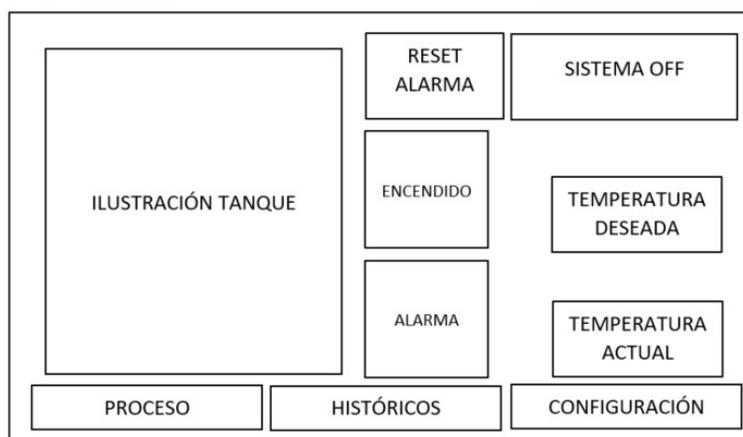
Diagrama de Gutenberg



Pantalla de proceso. La plantilla que rige la pantalla de proceso tiene la distribución mostrada en la Figura 39.

Figura 39

Plantilla para pantalla de proceso



En la Tabla 45 se detallan las medidas correspondientes al largo y al ancho de los elementos de la plantilla de la pantalla de proceso.

Tabla 45

Medidas de la plantilla de la pantalla de proceso.

Elemento	Medida	
	Largo [px]	Ancho [px]
Ilustracion Tanque	212	195
Reset Alarma	62	96
Sistema ON/OFF	62	157
Indicador de encendido	64	119
Temperatura deseada	45	100
Indicador de alarma	64	119
Temperatura actual	39	100
Pantalla de proceso	35	161
Pantalla históricos	35	161
Pantalla de configuración	35	161

Pantalla de históricos. La plantilla que rige la pantalla de históricos tiene la distribución mostrada en la Figura 40.

Figura 40

Plantilla para pantalla de históricos



En la Tabla 46 se detallan las medidas correspondientes al largo y al ancho de los elementos de la plantilla de la pantalla de históricos.

Tabla 46

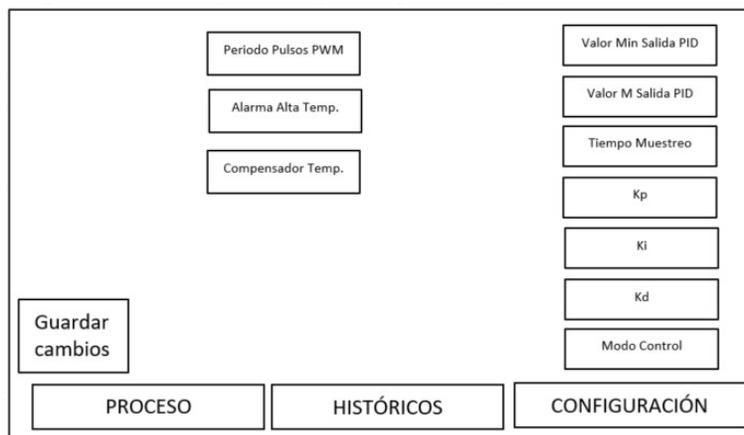
Medidas de la plantilla de la pantalla de históricos.

Elemento	Medida	
	Largo [px]	Ancho [px]
Temperatura actual	29	204
Gráfico de históricos	194	474
Pantalla de proceso	35	161
Pantalla históricos	35	161
Pantalla de configuración	35	161

Pantalla de configuración. La plantilla que regirá la pantalla de configuración tiene la distribución mostrada en la Figura 41.

Figura 41

Plantilla para pantalla de configuración



En la Tabla 47 se detallan las medidas correspondientes al largo y al ancho de los elementos de la plantilla de la pantalla de configuración.

Tabla 47

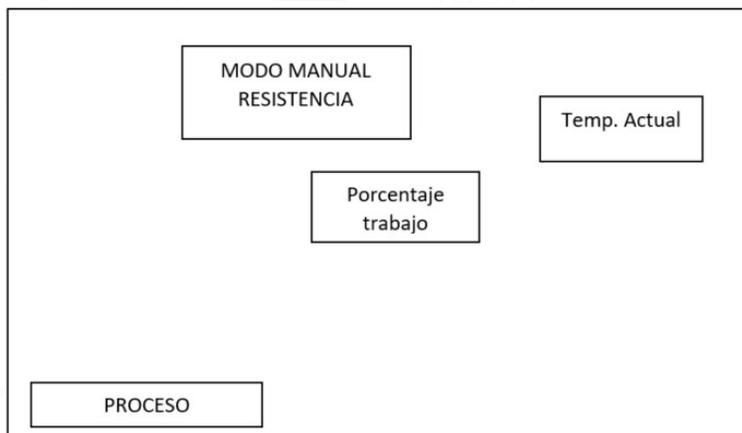
Medidas de la plantilla de la pantalla de configuración.

Elemento	Medida	
	Largo [px]	Ancho [px]
Período de pulsos PWM	28	100
Alarma alta temperatura	28	100
Compensador de temperatura	28	100
Valor mínimo salida PWM	30	100
Valor máximo salida PWM	30	100
Tiempo de muestreo	30	100
Kp / Ki / Kd	30	100
Modo de control	30	100
Guardar cambios	42	74
Pantalla de proceso	35	161
Pantalla históricos	35	161
Pantalla de configuración	35	161

Pantalla de modo manual. La plantilla que regirá la pantalla de modo manual tiene la distribución mostrada en la Figura 42.

Figura 42

Plantilla para pantalla del modo manual



En la Tabla 48 se detallan las medidas correspondientes al largo y al ancho de los elementos de la plantilla de la pantalla de modo manual.

Tabla 48

Medidas de la plantilla de la pantalla de modo manual.

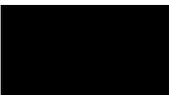
Elemento	Medida	
	Largo [px]	Ancho [px]
Modo manual resistencia	38	140
Temperatura actual	40	100
Porcentaje de trabajo	40	100
Pantalla de proceso	35	161

Color y texto. Es importante definir los colores que se usan para cada función, botón o indicador. Al definir estos colores es importante que tengan congruencia entre sí y que no supongan contradicciones, por tanto, es importante no usar más de 7 colores por pantalla y

asegurar que sean totalmente diferenciables unos con otros. En la Tabla 49 se muestran los colores usados en las pantallas.

Tabla 49

Colores usados y su código RGB.

Ítem	Color	Código RGB
Botones de navegación		R:0 G:128 B:192
Alarma y animación de calentamiento		R:255 G:0 B:0
Fondo Texto		R:252 G:252 B:252
Fondo		R:192 G:192 B:192
Texto		R:0 G:0 B:0
Estatus encendido		R:0 G:255 B:0

La fuente y el tamaño usado para el texto de las pantallas se detalla en la Tabla 50.

Tabla 50

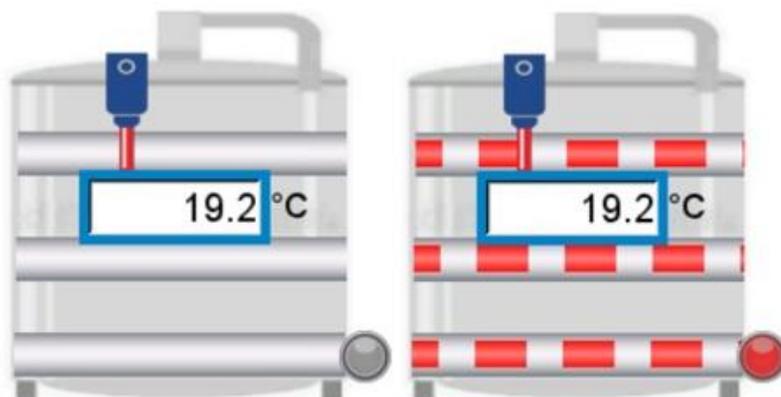
Fuente y tamaño usando.

Texto	Fuente y tamaño
Texto de información	Arial 12pts.
Texto de navegación	Arial 14 pts.
Texto de estatus	Arial 16pts.
Texto de datos ingresados por el usuario	Arial 20pts.

Indicadores. Para identificar el estatus del equipo se implementó el indicador mostrado en la Figura 43; se muestra el estatus en reposo y en funcionamiento del equipo. El indicador cumple con ser un diseño simple, no ambiguo y con un tamaño adecuado para su correcta visualización.

Figura 43

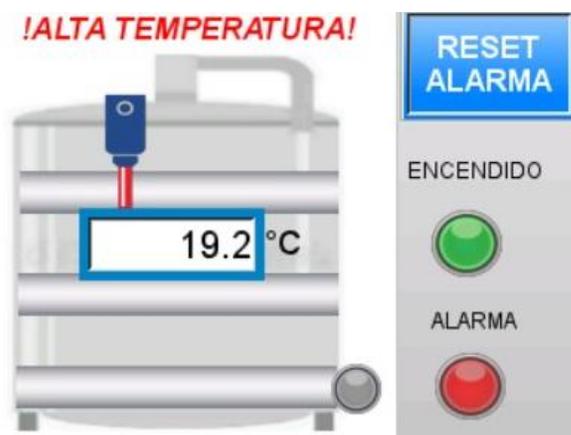
Indicador del estatus del horno



Alarmas. Se dispone de una alarma crítica, la cual se activa cuando se supera un límite definido de temperatura y es fácil detección para el usuario. En la Figura 44 se indica el estatus cuando la alarma se activa.

Figura 44

Estatus de alarma activada



VARIABLES DE LA PROGRAMACIÓN

Las variables consideradas en la programación se detallan en la Tabla 51.

Tabla 51

Variables usadas en la programación.

Función	Variable	Denominación	
Entrada	Paro de emergencia	X0	
Salidas	Relé de estado sólido SSR	Y0	
	Indicador rojo	Y1	
	Indicador verde	Y2	
Marcas o Registros internos del PLC	Sistema ON/OFF para calentamiento	M20	
	Indicador luz de encendido	M30	
	Reset de la Alarma	M72	
	Enclavamiento	M1000	
	Habilitación de un pulso cuando se inicie el PLC	M1002	
	Datos	Temperatura termocupla	D100
		Temperatura actual	D104
		Temperatura deseada	D200
		Número de pulsos	D300
		Animación cuando está calentando	D320
Porcentaje trabajo modo manual		D360	
Tiempo de muestreo		D2000	
Ganancia proporcional		D2001	
Ganancia integral		D2002	
Ganancia derivativa		D2003	
Modo de control	D2004		
	Valor máximo de salida PID	D2006	

Función	Variable	Denominación
Datos	Valor mínimo de salida PID	D2007
	Valor máximo de temperatura permitido (Alarma alta temperatura)	D2090
	Compensador	D2100
	Periodo de pulsos	D2120

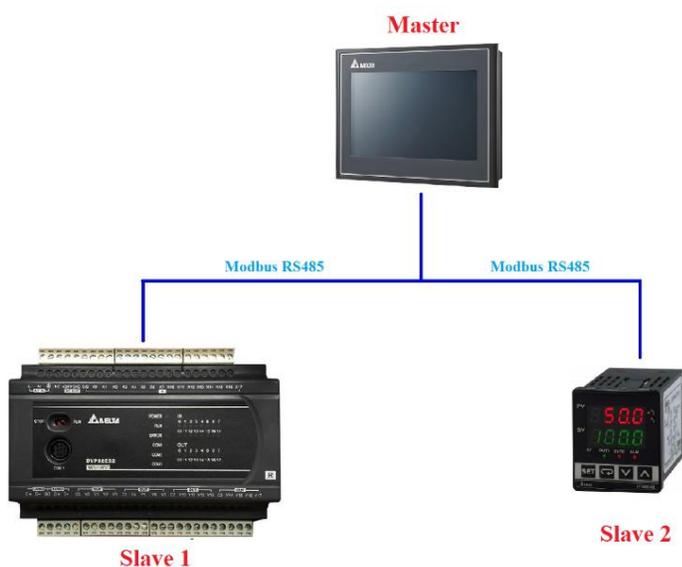
Protocolo de comunicación

Se utiliza un protocolo MODBUS con interfaz RS-485 que utiliza un mecanismo de solicitud-respuesta entre un maestro y un esclavo. En la Figura 45 se muestra la arquitectura maestro-esclavo implementada, la cual consiste en:

- Maestro: HMI.
- Esclavo 1: PLC.
- Esclavo 2: controlador de temperatura.

Figura 45

Maestro y esclavos del sistema



Configuración de comunicación MODBUS por RS-485. Para la comunicación entre equipos se establecen los parámetros como se muestra en la Tabla 52.

Tabla 52

Parámetros de comunicación.

Parámetro	Valor/Tipo
Velocidad de transmisión de datos	9600 bps
Número de bits	7
Bits de paridad	Even
Bits de parada	1
Formato	ASCII
	Master 0: HMI
Dirección de la estación	Slave 1: PLC
	Slave 2: controlador

Una vez establecidos los valores, se procede a comunicar entre el maestro y los esclavos. Para comunicar el HMI con el PLC se configura en el software DOPSoft (programa del HMI) los parámetros de comunicación como se muestra en la Figura 46.

Figura 46

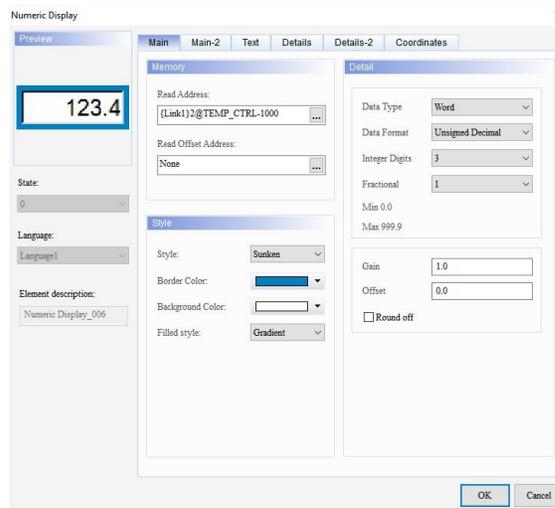
Parámetros de comunicación entre HMI y PLC

The screenshot shows the 'Main' window of the DOPSoft software. It is divided into two main sections: 'Communication Parameters' and 'Controller'.
 Under 'Communication Parameters':
 - HMI Station: 0
 - Interface: RS485
 - Data Bits: 7 Bits
 - Stop Bits: 1 Bits
 - Baud Rate: 9600
 - Parity Bits: Even
 Under 'Controller':
 - PLC Station: 1
 - Password: (empty field)
 - Comm. Delay: 5
 - Timeout(ms): 1000
 - Retry Count: 2

Para comunicar el HMI con el controlador se configura usando el mismo software, se direcciona el controlador como lo especifica su hoja técnica y se coloca el número de estación asignada al controlador, en este caso, 2. En la Figura 47 se muestra dicha configuración.

Figura 47

Comunicación entre HMI y controlador de temperatura



Para garantizar una correcta comunicación entre HMI y controlador de temperatura se debe parametrizar de manera manual el controlador. Dentro del controlador hay tres modos de operación: funcionamiento, regulación y ajuste inicial. Cuando se energiza, el controlador entra en el modo de operación. Para configurar el controlador se deben seguir las indicaciones detalladas en la Figura 48.

Figura 48

Parametrización del controlador de temperatura



- Press the **SET** key to switch to regulation mode.
- If the **SET** key is pressed for more than 3 seconds, controller will switch to the initial setting mode.
- Pressing the **SET** key while in the regulation mode or initial setting mode, forces the controller to return to the operation mode.
- PV/SV: Sets the temperature set point and displays the temperature process value. Use **▲** **▼** keys to set the temperature set point.
- Setting method: While in any function mode, press the **ESC** key to select the desired function and use the **▲** **▼** keys to change settings.

Initial Setting Mode	
C-no	Communication address setting Press ESC ↓
bPS	Communication baud rate setting Press ESC ↓
tEn	Data length setting Press ESC ↓
Prty	Parity bit setting Press ESC ↓
StoP	Stop bit setting Press ESC to return input type setting

Nota. Tomado de (DELTA, 2020)

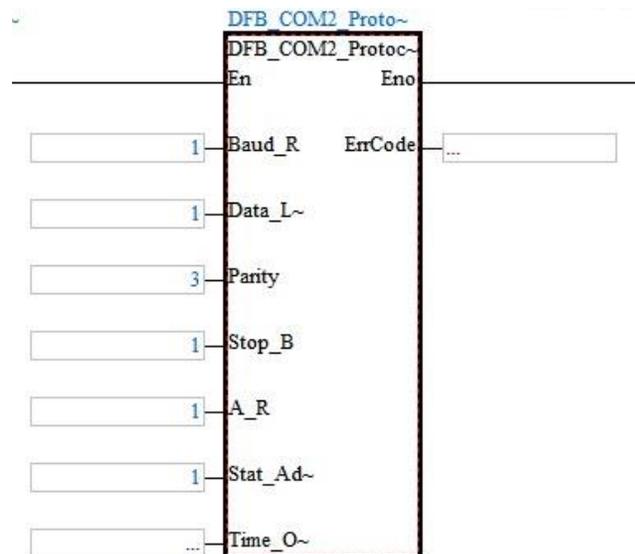
Programación del PLC

Para estructurar la programación de manera secuencial se realizaron varias redes, en cada una de ellas se usaron diferentes bloques de programación de acuerdo al objetivo de cada red.

Red 1: Configuración de comunicación Modbus por RS-485. Como primera red se parametriza el PLC para la comunicación maestro/esclavo. En la Figura 49 se muestra el bloque de parámetros y su configuración en base a la Tabla 52.

Figura 49

Bloque de configuración del protocolo de comunicación Modbus RS-485



Red 2: Encendido del sistema. Programación con contactos correspondientes al encendido del relé y del indicador luminoso.

Red 3: Envío del valor de temperatura desde el controlador de temperatura. En esta red se asigna el dato de temperatura desde el controlador a una variable del PLC con un bloque de movimiento de datos indicado en la Figura 50.

Figura 50

Bloque de movimiento de datos



El funcionamiento del bloque es el siguiente:

- En S: dato de entrada
- En D: variable a la que se mueve el dato de entrada

Red 4: Parámetros del controlador PID. Para realizar el control PID se usa siguiente

ecuación:

$$MV = \frac{1}{K_p} \left[E(t) + \frac{1}{K_I} \left(E(t) \frac{1}{S} \right) + K_D * E(t)S \right]$$

$$E(t) = PV(t) - SV(t)$$

Donde:

MV : Valor de salida.

K_p : Ganancia proporcional.

$E(t)$: Valor de error.

$PV(t)$: Valor presente medido.

$SV(t)$: Valor meta.

K_D : Ganancia derivativa.

$PV(t)S$: Valor derivativo de $PV(t)$.

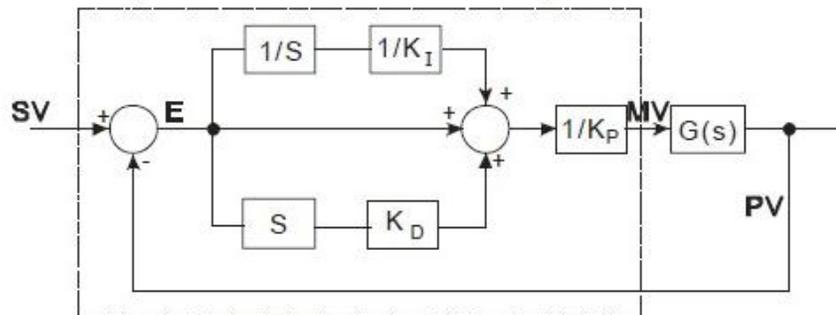
K_I : Ganancia integral.

$E(t) * \frac{1}{S}$: Valor integral de $E(t)$.

Según (DELTA, 2011) dicha ecuación es exclusiva para el control de temperatura y permite tener un mayor rango. El diagrama de bloque de la ecuación se muestra en la Figura 51 y el área punteada corresponde al control PID.

Figura 51

Diagrama de bloque de la ecuación con control PID



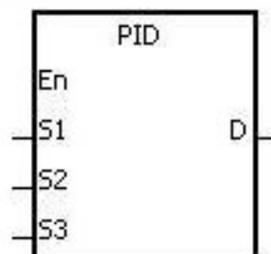
Nota. Tomado de (DELTA, 2011)

Se realizan una serie de movimiento de datos con el fin de obtener una configuración adecuada. Los datos que se asignan son tiempo de muestreo y valores máximo y mínimo de salida de PWM.

Red 5: Control PID de temperatura. En esta red se usa un bloque de PID mostrado en la Figura 52. La entrada S1 corresponde al valor deseado de temperatura, S2 es el valor actual de temperatura y S3 es la configuración establecida en la red 4. La salida D corresponde al número de pulsos.

Figura 52

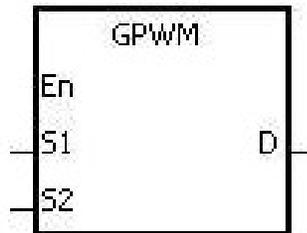
Bloque de PID



Red 6: Envío de salida del PID a pulsos para control del SSR. En esta red se usa un bloque GPWM mostrado en la Figura 53, donde S1 corresponde número de pulsos y S2 es el periodo de pulsos; mientras que D es la salida al relé de estado sólido.

Figura 53

Bloque GPWM

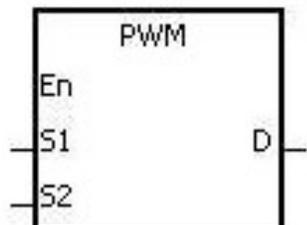


Red 7: Reseteo de variables cuando se apaga el sistema. En esta red se hace un movimiento de datos, el fin es resetear la variable del ingreso de temperatura deseado al apagar el sistema.

Red 8: Modo manual. En esta red se utiliza un bloque PWM, mostrado en la Figura 54, para controlar el porcentaje de trabajo de la resistencia, es decir, los pulsos enviados al relé de estado sólido. Las entradas y salidas de este bloque son las mismas detalladas para el bloque GPWM.

Figura 54

Bloque PWM



Red 9: Animación del estatus de funcionamiento. Realiza una comparación de datos entre el número de pulsos y 0. Si el número de pulsos es mayor a 0 se ejecuta la animación, caso contrario no lo hace.

Red 10: Comparador de alarma de alta temperatura. Realiza una comparación de datos entre el valor actual de temperatura y un valor preestablecido por el usuario. Si el valor actual supera el valor preestablecido se activa una alarma (indicador rojo) y para el sistema.

Cables y elementos de protección

Cables. Se considera la corriente de trabajo de acuerdo a la carga ocupada. Al ser 5 resistencias de 1200W cada una y una tensión de 220V, se tiene una corriente de 27,27A.

Para elegir el cable adecuado, se usa la norma NFPA 70 NEC, tabla B. 310.1 mostrada en la *Figura 55* . Para soportar la corriente de trabajo y la temperatura, se debe usar un cable AWG 10.

Figura 55

Tabla para la selección del cable de conexión

Tabla B.310.1 Ampacidades de dos o tres conductores aislados, de 0 a 2000 volts nominales, con un recubrimiento general (cable multiconductor) en una canalización al aire libre, con base en una temperatura ambiente de 30° C (86° F).

Calibre (AWG o kcmil)	Temperatura nominal del conductor (véase la Tabla 310.13)						Calibre (AWG o kcmil)
	60° C (140° F)	75° C (167° F)	90° C (194° F)	60° C (140° F)	75° C (167° F)	90° C (194° F)	
	COBRE			ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE			
	Tipos THHN, THHW, THW-2, THWN-2, RHH, RWH-2, USE-2, XHHW, XHHW-2, ZW-2			Tipos THHN, THHW, THW-2, THWN-2, RHH, RWH-2, USE-2, XHHW, XHHW-2, ZW-2			
	Tipos RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, ZW			Tipos RHW, THHW, THW, THWN, XHHW			
	Tipos TW, UF			Tipo TW			
14	16*	18*	21*	--	--	--	14
12	20*	24*	27*	16*	18*	21*	12
10	27*	33*	36*	21*	25*	28*	10
8	36	43	48	28	33	37	8
6	48	58	65	38	45	51	6
4	66	79	89	51	61	69	4
2	76	90	102	59	70	79	3
3	88	105	119	69	83	93	2
1	102	121	137	80	95	106	1
1/0	121	145	163	94	113	127	1/0
2/0	138	166	186	108	129	146	2/0
3/0	158	189	214	124	147	167	3/0
4/0	187	223	253	147	176	197	4/0

Nota. Tomado de la norma NFPA 70 NEC, tabla B. 310.1.

Para la conexión del protocolo de comunicación Modbus RS-485 se emplea cable UTP categoría 6 de par trenzado, que se encuentra descrito en el estándar TIA/EIA 568B.2-1. El cable de par trenzado ayuda a anular el ruido eléctrico.

Elementos de protección. Para asegurar los elementos de sobrecargas y cortocircuitos que puedan suscitarse, se debe usar interruptores termomagnéticos que abran el circuito cuando se sobrepasen los límites de corrientes. Se debe tener un interruptor general que proteja todo el tablero, además de un interruptor adicional por cada circuito particular. Para este caso, a parte del interruptor principal, se deben tener dos interruptores más, correspondientes a los circuitos de control y de calentamiento.

Para la selección del interruptor principal se toma como referencia el conductor. Conocida la capacidad del conductor (amperios) se elige un interruptor termomagnético de igual capacidad o inmediatamente superior a la capacidad del mismo.

El conductor usado para las conexiones será un AWG 10 cuya capacidad es 36A, por lo que se elige un interruptor termomagnético de 40A.

Armado de tablero

El tablero de control está compuesto por elementos que garantizan el control, monitoreo y adquisición de datos, además de brindar seguridad ante cortocircuitos y sobrecargas. Los elementos son: PLC, controlador de temperatura, HMI, luces indicadoras, interruptores termomagnéticos, fusible, paro de emergencia y relé de estado sólido.

Una vez seleccionados todos los componentes, se procede a armar el tablero de control teniendo en cuenta:

- Distribución uniforme y optimización de espacios
- Facilidad de mantenimiento cuando sea requerido
- Versatilidad y fácil montaje/desmontaje

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se usan rieles DIN, borneras y canaletas para conectar los elementos que forman el tablero. Los rieles DIN permiten un montaje rápido y sencillo ya que los elementos vienen con una adaptación para dichos rieles. Se eligen borneras porque dan seguridad, permiten dar claridad y orden al cuadro y facilitan el montaje, desmontaje y futuro mantenimiento de los elementos.

Un gabinete metálico de 400x400x200 mm es el que alojará los componentes tales como: PLC, controlador de temperatura, relé de estado sólido, canaletas, interruptores termomagnéticos, selector ON/OFF, fusible y borneras. Además, se utiliza un gabinete metálico de 200x200x100 para que aloje la HMI, el paro de emergencia y los indicadores luminosos.

Ambos gabinetes estarán unidos mediante un brazo metálico regulable, y los cables que comparten están dispuestos en una manguera bx metálica.

En la Figura 56 se muestra el tablero armado y en la Tabla 53 se detallan las partes constituyentes del tablero. En la Figura 57 se muestra el modulo completo de control del horno.

Figura 56

Tablero de control armado

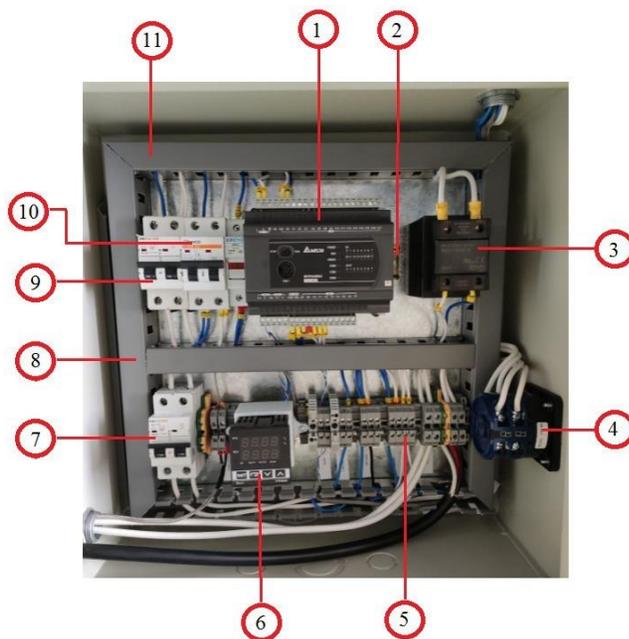


Tabla 53*Elementos del tablero de control.*

Identificación	Componente
1	PLC
2	Riel DIN
3	Relé de estado sólido
4	Selector ON/OFF
5	Borneras
6	Controlador de temperatura
7	Interruptor termomagnético principal
8	Interruptor termomagnético de resistencias
9	Interruptor termomagnético de control
10	Fusible
11	Canaletas

Figura 57*Módulo de control del horno*

Los planos de conexiones del tablero del sistema de control se encuentran en el Apéndice C.

Sintonización del equipo

Para realizar la sintonización del equipo, se deben establecer los valores de las variables K_p , K_i y K_d ; para ajustar estos valores hay dos opciones: el usuario ingresa manualmente los valores o el ajuste automático.

Ingreso manual de datos. La función de transferencia del horno ya controlado es una función de primer orden y para ajustar los parámetros de PID de esta función se debe seguir una secuencia de pasos, los cuales son:

- **Paso 1:** establecer K_i y K_d a 0 y K_p a 5, 10, 20 y 40 y registrar los valores de temperatura con las diferentes configuraciones. Se elige el valor de K_p con el que mejor se haya comportado.
- **Paso 2:** con el valor elegido de K_p , se empieza a variar K_i de forma gradual desde 1 hasta un valor que no supere a K_p y se elige el valor más adecuado. Luego incrementar K_d desde 0.01 hasta un valor máximo de $0.1K_p$.

Si los valores de K_p , K_i y K_d elegidos hacen que la planta se comporte de manera estable, el equipo estaría sintonizado. Si no se consigue un adecuado comportamiento, se pasa al modo de control automático.

Modo de control automático. Para que el PLC ajuste de manera automática los valores de K_p , K_i y K_d se elige el modo de control automático. En la HMI se debe seleccionar la pantalla de configuración y en el modo de control ingresar el número 3. Luego proceder a ingresar una temperatura deseada y esperar que el equipo se sintonice. Si en el modo de control está el número 4 significa que el proceso ha concluido y se observan los valores de K_p , K_i y K_d bajo los cuales la planta va a funcionar correctamente.

Capítulo VI Pruebas de funcionamiento y análisis

Finalizada la implementación del equipo, se realizaron varias pruebas para validar el funcionamiento del mismo. Los datos tomados para realizar cada una de las pruebas de calentamiento se encuentran en el Apéndice A.

Prueba de calentamiento a máxima temperatura

Para la realización de esta prueba se usaron los siguientes parámetros: temperatura ambiente de 17°C, temperatura requerida de 220°C en el equipo, el tiempo de permanencia fue de 1 hora a partir de haber alcanzado la temperatura requerida. Para verificar el correcto funcionamiento del sensor de temperatura del equipo, en esta prueba se colocaron dos termocuplas tipo K con medidores detallados en la Tabla 54, en la Figura 58 se muestra el horno y los dispositivos de medición.

Tabla 54

Medidores de las termocuplas usadas en las pruebas de funcionamiento.

	Rango de la termocupla	Precisión	Ubicación en el equipo	Imagen referencial
Pinza amperimétrica Uni-T UT208A	-40°C a 1000°C	$\pm(1.0\%+3)$	Ambiente de la cámara	
Multímetro digital Fluke 179	-40°C a 400°C	$\pm(1.0\%+10)$	Resistencias	

Figura 58

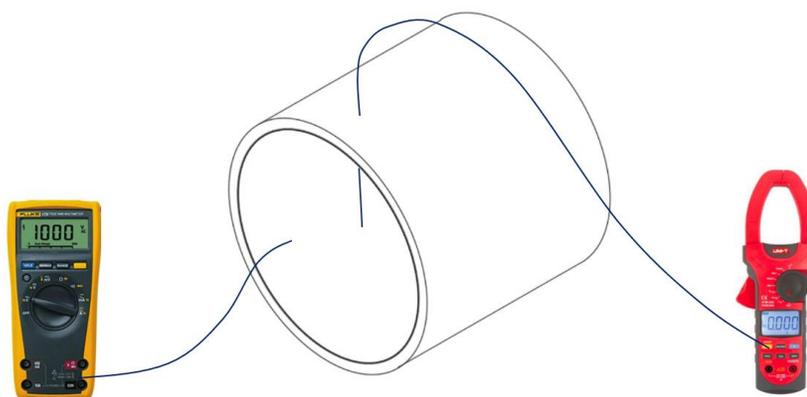
Horno y los dispositivos de medición



En la *Figura 59* se observa la ubicación de las termocuplas empleadas en la realización de las pruebas de funcionamiento.

Figura 59

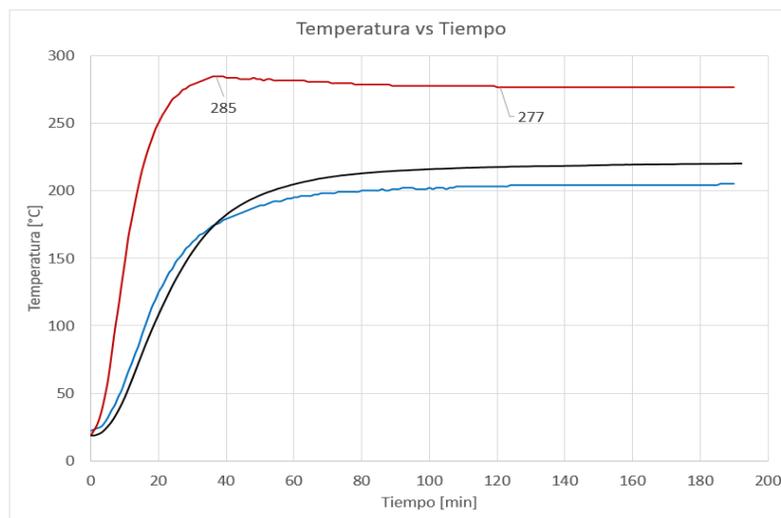
Esquematización de la ubicación de los elementos de medición en el tanque del horno



En la *Figura 60* se observa la curva temperatura en función del tiempo para cada una de las termocuplas en la prueba de calentamiento máxima temperatura.

Figura 60

Gráfica de temperatura en función del tiempo de la prueba de calentamiento a máxima temperatura



En la Tabla 55 se observa los resultados obtenidos en la prueba de calentamiento a máxima temperatura.

Tabla 55

Resultados de la prueba de calentamiento a máxima temperatura.

	Temperatura a la que se estabiliza [°C]	Tiempo en el que se estabiliza [min]
Resistencias	288	120
Tanque	220	120
Ambiente	203	120

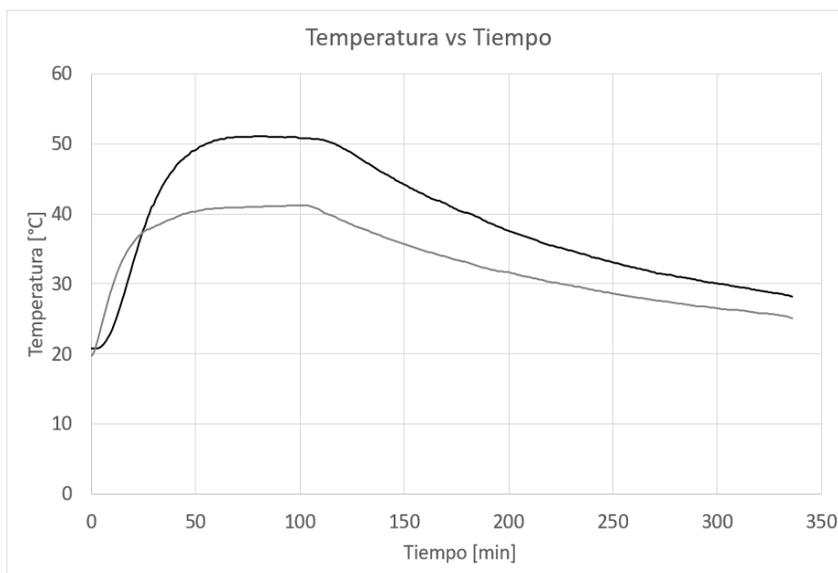
Prueba de escalón con enfriamiento

Para la realización de esta prueba se usaron los siguientes parámetros: temperatura ambiente de 17°C, temperatura requerida de escalón 50°C en el equipo, el tiempo de permanencia fue de 1 hora a partir de haber alcanzado la temperatura requerida, y el enfriamiento natural. En esta prueba se usó una termocupla en la pared interna de la cámara.

En la Figura 61 se observa la curva temperatura en función del tiempo de la prueba de escalón con enfriamiento.

Figura 61

Gráfica de temperatura en función del tiempo de la prueba de un escalón con enfriamiento



En la Tabla 56 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 56

Resultados de la prueba de escalón con enfriamiento.

	Temperatura a la que se estabiliza [°C]	Tiempo en el que llega al escalón [min]	Tiempo de permanencia [min]	Tasa de enfriamiento [°C/min]
Tanque	50	55	60	0.1
Pared interna	41	64	60	0.1

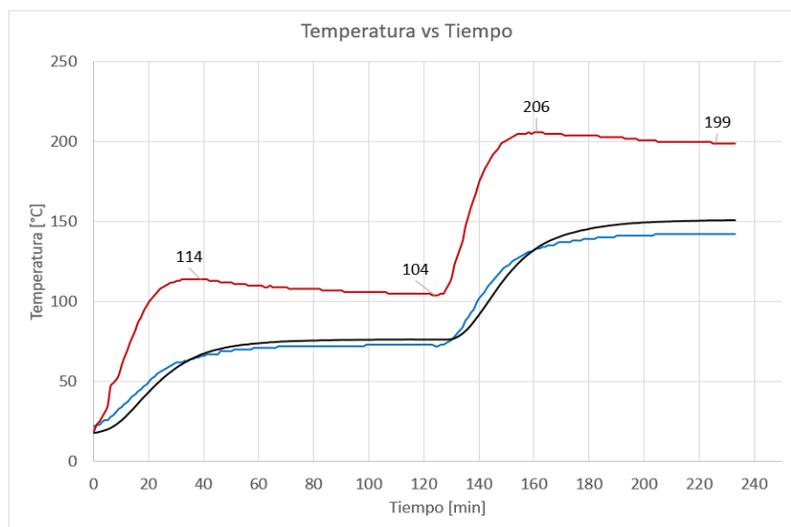
Prueba de calentamiento a doble escalón

Para la realización de esta prueba se usaron los siguientes parámetros: temperatura ambiente de 17°C, temperatura requerida del primer escalón de 75°C en el equipo, el tiempo de permanencia del primer escalón de 1 hora, temperatura requerida del segundo escalón de

150°C en el equipo y el tiempo de permanencia del segundo escalón de 1 hora. En esta prueba se usaron los mismos dispositivos de la Tabla 54. En la Figura 62 se observa la curva temperatura en función del tiempo para la prueba de doble escalón.

Figura 62

Gráfica de temperatura en función del tiempo de la prueba de calentamiento a doble escalón



En la Tabla 57 se observa los resultados obtenidos en la prueba de calentamiento a doble escalón.

Tabla 57

Resultados de la prueba de doble escalón.

	Temperatura primer escalón [°C]	Tiempo en llegar al primer escalón [min]	Temperatura segundo escalón [°C]	Tiempo en llegar del primer a segundo escalón [min]
Resistencias	109	62	205	26
Tanque	75	68	150	82
Ambiente	72	67	140	55

Prueba de hermeticidad

Para la realización de esta prueba se usaron los siguientes parámetros: temperatura ambiente de 17°C, una bomba de vacío de ¼ hp y 2.5 CFM, el manómetro colocado en la tubería de presión. Se abrió la válvula hasta tener una presión de -0.48 bar y se midió el tiempo hasta el cual llegó a 0 bar. En la Tabla 58 se muestran los resultados de la prueba de hermeticidad.

Tabla 58

Resultados de la prueba de hermeticidad.

	Presión alcanzada [bar]	Tiempo de pérdida del vacío [min]	Tasa de pérdida [mbar/min]
Prueba 1	0.40	82	4.87
Prueba 2	0.48	98	4.89

Tratamiento térmico de envejecimiento

Para validar el funcionamiento continuo del horno en tiempos prolongados, se realizó un tratamiento térmico de envejecimiento en una probeta de dimensiones 80x25x14 [mm] de aluminio serie 6000.

(Cavazos García, 1998), recomienda la temperatura a la cual se debe efectuar la secuencia del tratamiento térmico y el tiempo requerido en aleaciones de la serie 6000, además se encuentran estipuladas en la norma ASTM 597. El tratamiento térmico involucró los siguientes pasos:

- **Tratamiento de solubilización:** se realiza a una temperatura relativamente alta para obtener una solubilidad completa de los elementos de aleación.
- **Enfriamiento rápido:** se enfría usualmente hasta temperatura ambiente, para obtener una solución sólida sobresaturada (SSSS) de los elementos de aleación en el aluminio.

- **Tratamiento de envejecido o endurecimiento por precipitación:** se mantiene la muestra a cierta temperatura durante un tiempo para que precipiten los elementos de aleación.

En la *Figura 63* se muestra el régimen teórico del tratamiento térmico; mientras que en la *Tabla 59* se indica una breve descripción de cada etapa involucrada.

Figura 63

Régimen teórico del tratamiento térmico

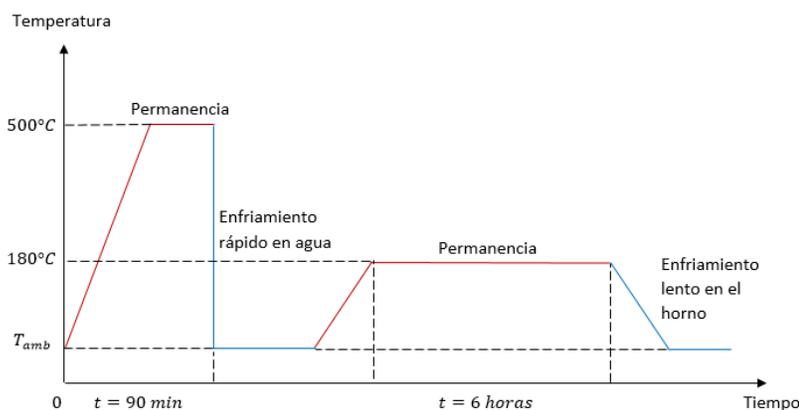


Tabla 59

Régimen del proceso del tratamiento térmico.

Etapa	Descripción
Solubilización	Temperatura de 500°C durante 90 minutos
Enfriamiento	Rápido en agua
Envejecimiento artificial	Temperatura de 180°C durante 6 horas

Nota. Adaptado de (Cavazos García, 1998).

La etapa de solubilización se realizó en un horno de las instalaciones del Laboratorio de Ciencia de Materiales, el cual es capaz de alcanzar temperaturas mayores a 500°C , una vez terminada esta etapa y realizado el enfriamiento, se tomaron datos de dureza Vickers en la probeta. Los resultados se muestran en la *Tabla 60*.

Tabla 60

Datos de dureza Vickers de la probeta antes del tratamiento de envejecimiento artificial.

Probeta	Dureza Vickers			Promedio
1	95.2	93.5	95.2	94.65

Como siguiente paso, se realizó el tratamiento de envejecimiento artificial en el horno de vacío, la temperatura y el tiempo empleados se describen en la *Tabla 59*. Una vez terminada esta etapa, se realizó un enfriamiento lento dentro del horno. Se tomaron datos de dureza Vickers en la probeta. Los resultados se muestran en la *Tabla 61*.

Tabla 61

Datos de dureza Vickers de la probeta después del tratamiento de envejecimiento artificial.

Probeta	Dureza Vickers			Promedio
1	136.6	117.1	162.1	138.6

En la figura 7 se muestra la probeta antes y después del tratamiento térmico.

Figura 64

Probeta utilizada en la prueba de tratamiento térmico



Análisis de las pruebas de funcionamiento del horno

El proceso de calentamiento en el horno se caracteriza por ser lento; en la planta, para alcanzar la temperatura máxima de 220 °C transcurrieron 120 minutos. La temperatura de las resistencias es mayor teniendo un pico en 285°C y llegando a estabilizarse en 277 °C, esto se debe a que la resistencia es el elemento calefactor; entre la pared del tanque y el ambiente existe un gradiente de temperatura de 17°C en el punto de estado estable tal como se observa en la Figura 60. Las temperaturas de la pared y del ambiente no tuvieron picos como en las resistencias.

El horno puede trabajar a diferentes escalones de temperatura dependiendo de la necesidad y/o requerimientos que se tengan.

En la prueba de escalón con enfriamiento se realizó a un escalón de 50°C en el tanque, alcanzando dicha temperatura en 55 minutos, luego se mantuvo esa temperatura por un tiempo de 60 minutos y se apagó el sistema. A partir del apagado del sistema, el horno empezó a perder calor a un ritmo constante y sumamente lento como se observa en la Figura 61, entonces se determinó que la tasa de enfriamiento es de 0.1 °C/min, lo cual indica que el equipo está bien aislado y no pierde calor de manera significativa.

Para la prueba de doble escalón, se estableció el primer escalón en 75°C y el segundo en 150°C. Para el primer escalón, la resistencia llegó a una temperatura máxima de 114°C y estabilizándose en 104°C, con lo cual, el tanque alcanzó la temperatura de 75°C en un tiempo de 68 minutos y el ambiente alcanzó los 72°C. Después de permanecer una hora en esa temperatura, inició el calentamiento a l segundo escalón; la resistencia llegó a 206°C y estabilizándose en 199°C, haciendo que el tanque se caliente a 150°C en un tiempo de 82 minutos. El ambiente alcanzó 140°C en 55 minutos, existiendo un gradiente de 10°C en el estado

estable. La Figura 62 muestra estos resultados. La temperatura de la pared y del ambiente no presentaron variaciones considerables como las resistencias.

En la prueba de hermeticidad se determinó que el horno tiene una tasa de pérdida de 4.87 [mbar/min] en la primera prueba y 4.89 [mbar/min] en la segunda. Las pruebas indican que las pérdidas de vacío se dan siempre a una velocidad constante.

Realizando el tratamiento térmico, se pudo comprobar que el horno trabaja de manera óptima en tiempos prolongados, ya que durante las 6 horas que duró la etapa de envejecimiento, la temperatura se mantuvo estable. Además, los resultados de dureza obtenida corroboran el funcionamiento, de manera que, antes de realizar el envejecimiento, la dureza Vickers promedio de la probeta fue de 94.65, mientras que al terminar el tratamiento la dureza Vickers promedio fue de 138.6.

Capítulo VII Análisis Económico y Financiero

Costos directos

Se detallan los costos relacionados directamente con la realización del proyecto. En la Tabla 62 se describen los materiales, la instrumentación y los servicios empleados en el proyecto.

Tabla 62

Costos directos.

Ítem	Descripción	Costo total
1	Gabinete 40x40x20	\$41.80
2	Caja 20x20x10	\$5.20
3	Soporte LCD/LED/PLASMA	\$17.85
4	Sistema de canalización del tablero de control	\$17.89
5	Interruptores termomagnéticos y fusible	\$20.07
6	HMI Delta DOP100 4.3"	\$247.88
7	Controlador de temperatura DELTA 48x48	\$90.72
8	PLC DELTA DVP ES2	\$162.42
9	Interruptor de encendido	\$15.12
10	Termocupla tipo K	\$90.72
11	Vacuómetro	\$34.81
12	Relé de estado sólido	\$29.19
13	Cableado del tablero de control	\$38.05
14	Conectores 220V	\$24.44
15	Resistencias tubulares de acero inoxidable	\$270.00
16	Servicio de pintura electrostática	\$135.59
17	Manta de fibra cerámica	\$100.00
18	Acoples rápidos y mangueras	\$25.00
19	Tornillería y elementos de fijación	\$35.00
20	Capacitaciones	\$300.00
Total		\$1701.75

Costos indirectos

Se detallan los costos no relacionados de manera directa con la realización del proyecto.

En la *Tabla 63* se describen dichos costos.

Tabla 63

Costos indirectos.

Ítem	Descripción	Costo total
1	Movilización	\$200.00
2	Servicios básicos	\$200.00
3	Otros	\$50.00
Total		\$450.00

En la *Tabla 64* se muestra el costo total del proyecto.

Tabla 64

Costo total.

Ítem	Descripción	Costo total
1	Costos directos	\$1701.75
2	Costos indirectos	\$450.00
Total		\$2151.75

Capítulo VIII Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

Conclusiones

- La ejecución de la ingeniería inversa del horno de vacío permitió abstraer de manera eficaz y eficiente la información de diseño del mismo. Es así que, se realizó un levantamiento técnico de sus partes constituyentes, además, se determinó el modo en que estas interactúan entre sí, así como también, su estado físico y su funcionamiento en general. De esta manera, se establecieron que componentes deben ser recuperados, modificados y/o reemplazados.
- Se generó un documento referencial con información técnica para el diseño y selección de elementos calefactores y dispositivos de automatización para hornos. También, se incluyen manuales de funcionamiento, montaje y mantenimiento del equipo, necesarios para su correcta operación.
- Para evaluar el funcionamiento del horno, se realizaron 5 pruebas experimentales, 4 de ellas relacionadas con los sistemas de calentamiento y control del equipo; la prueba restante se enfocó en valorar la hermeticidad de la cámara del horno. En las pruebas de calentamiento y control se comprobó que cuando la planta se estabiliza en la temperatura deseada, lo hace con un error de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ y que la tasa de enfriamiento es de $0.1[^{\circ}\text{C}/\text{min}]$; además se determinó que el horno trabaja de manera adecuada en tiempos prolongados de funcionamiento. La prueba de hermeticidad arrojó que las pérdidas de vacío en la cámara se dan a una velocidad de $4 [\text{mbar}/\text{min}]$.
- Para validar el funcionamiento del horno de vacío se realizaron pruebas de calentamiento sin carga que permitieron conocer la capacidad máxima de trabajo del equipo, de esta manera, se pudo determinar su pendiente máxima de operación y también, se verificó su comportamiento en los procesos de rampa y escalón.

Recomendaciones

- Para seleccionar de manera correcta las resistencias a implementarse en un sistema de calentamiento eléctrico, se recomienda tener en cuenta factores como condiciones de servicio, temperatura máxima requerida y la cantidad de carga que será calentada.
- Si se desea implementar un sistema de control automatizado para las variables del proceso de un horno, se recomienda utilizar un PLC con HMI, ya que proporcionan un método intuitivo y eficaz para el desarrollo de la programación, además, son dispositivos escalables.
- Se recomienda revisar los manuales técnicos del horno de vacío antes de: utilizarlo, darle mantenimiento y/o desmontarlo; esto con el propósito de evitar manipularlo de manera inadecuada e insegura, alargando así su vida útil.
- En el montaje de tableros de control se recomienda utilizar rieles DIN y borneras, de esta manera se prioriza el orden, además que se facilitan los procesos de mantenimiento futuro.

Trabajos futuros

La escalabilidad del sistema de control permite acoplar módulos de expansión al PLC.

Bajo esta consideración, se propone el siguiente trabajo:

- Implementación de un sistema automatizado de control de presión, usando un transductor de presión y adecuando el sistema de tuberías con electroválvulas.

El horno de vacío tiene la capacidad de alcanzar temperaturas de hasta 220°C. Teniendo en cuenta esta consideración, se propone el siguiente trabajo:

- Estudio y desarrollo de una metodología para tratamientos térmicos en aleaciones de aluminio.

Bibliografía

- Arroba, C., Telenchana, M., Paredes, J., Fiallo, S., & Vaca, H. (2021). Ensayos experimentales y análisis numérico de la estructura del material compuesto alternativo para la reparación de superficies de veulo en aeronaves. *Enfoque*. Obtenido de <https://redalyc.org/journal/5722/572266265003/html/>
- Astigarraga, J. (1994). *Hornos industriales de resistencias*. Madrid: McGraw-Hill.
- Autonics USA. (s.f.). *Solid state relay SR1-1240-N*. Obtenido de Autonics USA: <https://www.autoniconline.com/image/pdf/SR1.pdf>
- Carbone Stainless Steel . (2022). *Ficha técnica del acero inoxidable* . Obtenido de Empresas Carbone : <https://www.empresascarbhone.com/pdf/ficha-tecnica-del-acero-inoxidable.pdf>
- Castro, J., Padilla, J., & Romero, E. (6 de Julio de 2005). Metodología para realizar una automatización utilizando PLC. *Impulso, Revista de electrónica, eléctrica y sistemas computacionales*. Obtenido de https://www.itson.mx/publicaciones/rieeyc/documents/v1/v1_art4.pdf
- Cavazos García, J. L. (Junio de 1998). *Repositorio Académico Digital UANL*. Obtenido de Tratamiento térmico de una aleación de aluminio 6063: <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/552>
- Çengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de Calor y Masa* (Cuarta ed.). México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores.
- De la Vega, J., Cañarejo, M., & Pinto, N. (26 de Septiembre de 2016). *Avances en Tecnología de atmósferas controladas y sus aplicaciones en la industria*. Obtenido de Universidad Técnica del Norte: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v28n3/art09.pdf>

- DELTA. (30 de Junio de 2011). *Download Center*. Obtenido de DELTA IA PLC DVP ES2:
https://filecenter.deltaww.com/Products/download/06/060301/Manual/DELTA_IA-PLC_DVP-ES2-EX2-SS2-SA2-SX2_PM_SP_20110630.pdf
- DELTA. (10 de Noviembre de 2017). *Download center*. Obtenido de DELTA IA HMI DOP100:
https://filecenter.deltaww.com/Products/download/06/060302/Manual/DELTA_IA-HMI_DOP-100_I_EN_20171110.pdf
- DELTA. (2 de Diciembre de 2020). *Download Center*. Obtenido de DELTA IA TC DTB:
https://filecenter.deltaww.com/Products/download/06/060405/Manual/DELTA_IA-TC_DTB_OM_EN_20201202.pdf
- Herrera García, M. V. (2 de Marzo de 2015). *Repositorio Digital - EPN*. Obtenido de 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: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10535>
- Hubbard, B., Putman, L., Techtmann, S., & Pearce, J. (20 de Mayo de 2021). *MDPI*. Obtenido de Open Source Vacuum Oven Design for Low-Temperature Drying: Performance Evaluation for Recycled PET and Biomass: <https://doi.org/10.3390/jmmp5020052>
- INAMHI. (2021). *Pronóstico*. Obtenido de INAMHI: <http://186.42.174.241/InamhiPronostico/>
- Incropera, F. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor* (Cuarta ed.). México, D.F.: Prentice Hall.
- Niño, J., & Rosas, J. (2018). *Repositorio UPTC*. Obtenido de Diseño y construcción de un horno de vacío para tratamientos térmicos:
https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/3039/1/TGT_1623.pdf

Picas, J. (Mayo de 2000). *Caracterización y optimización de la aleación Ti-0,2Pd para aplicaciones clínicas*. Obtenido de Tesis Doctorals en Xarxa:

<https://www.tesisenred.net/handle/10803/6041>

Sivanagaraju, S. (2010). *Generation and Utilization of Electrical Energy*. Nueva Delhi: Pearson Educación India.

Suárez Cañizares, M. A. (2019). *Repositorio Institucional de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE*. Obtenido de Automatización del horno autoclave de secado de materiales compuestos del Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea Ecuatoriana-CIDFAE: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/20837>

Tirira, P. (2014). *Secado al vacío mediante espumación del sistema de pulpa de mora con albúmina de huevo*. Obtenido de Universidad Central del Ecuador:

<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/3777/1/T-uce-0017-96.pdf>

Ulrich, K., & Eppinger, S. (2013). *Diseño y desarrollo de productos* (Quinta ed.). México, D.F.: McGraw-Hill.

Apéndices

Apéndice A. Tablas de pruebas de funcionamiento

Apéndice B. Planos generales del horno de vacío

Apéndice C. Plano de conexiones del sistema de control

Apéndice D. Manual técnico del horno de vacío