



**Diseño, construcción y adquisición de datos de un banco de pruebas móvil de barras
cilíndricas de longitud infinita**

Collaguazo Lincango, Jesus Samael y Quiguango Arcos, Cristian Paúl

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

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

Ing. Villavicencio Poveda, Ángelo Homero MSc.

11 de agosto del 2021

Urkund Analysis Result

Analysed Document: DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS DE UN BANCO DE PRUEBAS MÓVIL DE BARRAS CILINDRICAS DE LONGITUD INFINITA..pdf (D111518342)

Submitted: 8/20/2021 7:12:00 PM

Submitted By: ahvillavicencio@espe.edu.ec

Significance: 4 %

Sources included in the report:

FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR TEORÍA Y EJERCICIOS.pdf (D78804422)

Juan Emanuele Valdivieso Ortega.pdf (D102341670)

Transferencia_de_Calor_y_Masa_-_Cengel_4.pdf (D49657807)

DISEÑO, CONSTRUCCION E IMPLEMENTACION DE UN BANCO DE PRUEBAS, EN ESTADO ESTABLE, PARA SUPERFICIES EXTENDIDAS INTERCAMBIABLES A UTILIZARSE EN EL LABORATORIO DE CONVERSION.pdf (D111322259)

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA FLUJOS PARALELO Y CRUZADO UTILIZANDO COMO FLUIDO DE TRABAJO AGUA PARA EL LAB DE CONVERSION DE LA ENERGÍA DEL DECEM.pdf (D43590040)

CAPITULOS_prb.docx (D14281169)

<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6791>

<https://procoen.com/quemaduras-durante-el-trabajo/>

<https://docplayer.es/amp/210015064-Departamento-de-ciencias-de-la-energia-y-mecanica-carrera-de-ingenieria-mecanica.html>

<https://baixardoc.com/documents/transferencia-de-calor-y-masa-4ta-ed-yunus-cengel-5d1527a547115>

Instances where selected sources appear:

23



Ing. Villavicencio Poveda, Angelo Homero MSc.
C.C.: 170933893-1



CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Diseño, construcción y adquisición de datos de un banco de pruebas móvil de barras cilíndricas de longitud infinita**” fue realizado por los señores **Collaguazo Lincango, Jesus Samael y Quiguango Arcos, Cristian Paúl**, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, 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, 20 de agosto de 2021

.....
Ing. Villavicencio Poveda, Ángel Homero MSc.
C.C.: 170933893-1



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

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Nosotros, **Collaguazo Lincango, Jesus Samael** con cédula de ciudadanía N°172250626-6 y **Quiguango Arcos, Cristian Paúl** con cédula de ciudadanía N°172364769-9, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"Diseño, construcción y adquisición de datos de un banco de pruebas móvil de barras cilíndricas de longitud infinita"** 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, 20 de agosto del 2021

Firmas

.....
Jesus Collaguazo Lincango
C.C.: 1722506266

.....
Cristian Quiguango Arcos
C.C.: 1723627699



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

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **Collaguazo Lincango, Jesus Samael** con cédula de ciudadanía N°1722506266 y **Quiguango Arcos, Cristian Paúl** con cédula de ciudadanía N°172364769-9, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación de: **"Diseño, construcción y adquisición de datos de un banco de pruebas móvil de barras cilíndricas de longitud infinita"** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 20 de agosto del 2021

Firmas

Jesus Collaguazo Lincango
C.C.: 1722506266

Cristian Quiguango Arcos
C.C.: 1723627699

Dedicatoria

Este trabajo de titulación quiero dedicar a mi madre que siempre me apoya incondicionalmente, que, aunque a la larga distancia siempre estuvo y estará ahí, haciendo lo necesario para que yo pueda lograr cumplir esta gran meta; y a mi padre, por su apoyo, consejo y motivación durante todos estos años solo me resta decir gracias.

Cristian Paúl Quiguango Arcos

Dedicatoria

Este trabajo y todo el esfuerzo realizado durante la carrera no se hubiera podido cumplir sin el apoyo de mis padres y mis hermanos, es por eso que dedico este trabajo a mi papá Pedro Collaguazo que con gran esfuerzo y dedicación me brindó su apoyo durante la carrera, a mi mama Maruja Lincango a la que quiero y admiro mucho que me ha demostrado que no existen barreras para realizar las cosas, también va dedicado a mis hermanos Cristian, Edgar y Nelly que han estado presentes apoyándome para cumplir esta meta de ser un Ingeniero Mecánico.

Jesus Samael Collaguazo Lincango

Agradecimiento

A mi querida mami Susi por haberme educado e inculcado valores necesarios para poder seguir avanzando con mi vida, darme el ejemplo, gallardía y la motivación para nunca darme por vencido.

A mi papá, Jorge, por brindarme su sabiduría a cada momento, en cada dificultad y ayudarme a formar el carácter necesario para poder vencer cualquier dificultad de este camino llamado vida.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas por haber sido el lugar y centro de formación tanto personal como profesional.

A los docentes que son parte del área de Energías por su apoyo, enseñanzas y amistad.

Y por último a mis amigos que fueron una parte fundamental de esta etapa e hicieron este camino más ameno en especial a Cobito por su amistad y todas las experiencias vividas en estos años universitarios.

Cristian Paúl Quiguango Arcos

Agradecimiento

Agraciado con dios por permitirme cumplir esta meta, dándome fuerza necesaria para sobrellevar los problemas y no decaer en el intento.

Agradecido con mis padres por siempre estar aconsejándome, guiándome, brindándome su apoyo incondicional, a mi hermano Cristian por ayudarme con herramientas que me ayudaron durante el periodo en la universidad.

Agradezco a la Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE y sus profesores por compartir sus conocimientos que me permitirán desarrollarme como profesional.

Agradezco a mis amigos, los que conocí durante este largo tiempo en la ESPE con los que se vivió anécdotas inolvidables.

Mi profundo agradecimiento a mi tutor de tesis Ing. Ángelo Villavicencio por la acogida del proyecto y guía brindada para su desarrollo, también agradezco al Lic. Roberto Buenaño por el apoyo brindado para el desarrollo del proyecto.

Jesus Samael Collaguazo Lincango

Índice General

Resultados Urkund	2
Certificado de aprobación del tutor	3
Certificado de responsabilidad de los estudiantes	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	8
Nomenclatura	20
Resumen	24
Abstract	25
Capítulo I	26
Generalidades	26
Antecedentes	26
Definición del problema	27
Justificación e importancia	28
Objetivos	28
Objetivo General	28
Objetivos Específicos	28
Alcance el proyecto	29
Capítulo II	31
Ingeniería conceptual	31

Introducción de Transferencia de calor	31
Procesos de transferencia de calor	31
Conducción.....	31
Convección.....	33
Convección Natural Sobre Superficies.....	34
Radio critico de aislamiento	35
Transferencia de calor en superficies extendidas	37
Aleta	38
Formas de aletas	38
Modelo matemático para la transferencia de calor en aletas	39
Aletas de área de sección transversal uniforme	40
Desempeño de una aleta	42
Eficiencia de la aleta.....	43
Calderas.....	43
Clasificación de las calderas	43
Según la disposición de fluidos	44
Según la presión de trabajo.....	44
Eficiencia de Combustión.....	45
Poder Calorífico.....	45
Poder Calorífico Superior	45
Poder Calorífico Inferior.....	45
Instrumentación típica usada en las calderas	45
Sistemas de adquisición de datos.....	46
Medida de magnitud física.....	46
Acondicionamiento de señal.....	48
Procesamiento de información	48
Protocolos de comunicación en serie	49
Capítulo III	51
Ingeniería Básica.....	51

Diseño Térmico	51
Cálculo de la eficiencia de la caldera	51
Cálculo del calor perdido en las paredes	53
Diseño Mecánico.....	53
Cálculo y diseño mecánico del caldero	54
Cálculo del espesor del cuerpo del recipiente	54
Cálculo del espesor de la cabeza del recipiente	55
Cálculo y diseño mecánico del reservorio	58
Análisis térmico del caldero	60
Cálculo del radio crítico	60
Cálculo del espesor para el aislante del caldero	63
Cálculo del revestimiento para el reservorio de vapor	64
Cálculo y Diseño del Bastidor	67
Descripción general	67
Cargas de Diseño	68
Análisis y diseño	70
Selección de las garruchas	73
Selección de los materiales para las barras cilíndricas.....	74
Cálculo del coeficiente de convección entre barras - ambiente	75
Determinación de la longitud óptima para las barras	77
Determinación de pérdida de calor en las barras.....	79
Pérdida de calor por convección en las barras	81
Dispositivos de control y operación del caldero	81
Sistema de encendido	81
Control de nivel del agua.....	83
Selección de instrumentos para la adquisición de datos	85
Selección del microcontrolador	85
Selección del transductor de temperatura	86
Selección de la pantalla.....	88

Capítulo IV	91
Ingeniería de detalle	91
Especificaciones del banco de pruebas	91
Especificaciones técnicas de la caldera	91
Especificaciones técnicas del Bastidor.....	93
Diagrama eléctrico de control y operación del caldero	94
Selección de materiales para la construcción reservorio de vapor	98
Requerimientos para la implementación del sistema de adquisición de datos	98
Diagramas de conexión electrónicos para la adquisición de datos.....	99
Interfaz gráfica para la adquisición de datos.....	101
Capítulo V	105
Construcción, pruebas de operación y puesta a punto del banco de pruebas.....	105
Proceso de construcción y pruebas del caldero.....	105
Proceso de construcción del bastidor e instalación de equipos.....	107
Proceso de construcción reservorio de vapor e instalación de aletas (barras de sección circular)	107
Construcción e instalación del sistema de adquisición de datos de temperatura	109
Instalación del control de operación del caldero	110
Pruebas de operación y puesta a punto	111
Elaboración de manual de operación del banco de pruebas	115
Elaboración de guía para realizar práctica de laboratorio.....	115
Capítulo VI.....	116

Análisis de Resultados	116
Recolección de datos	116
Distribución teórica de temperatura en las aletas	122
Cálculo del error relativo.....	123
Distribución de temperatura teoría versus la experimental	124
Cálculo de la eficiencia de la aleta (η_f).....	126
Capítulo VII.....	128
Análisis económico	128
Costos directos.....	128
Costos indirectos	132
Gasto total	133
Capítulo VIII.....	134
Conclusiones Y Recomendaciones.....	134
Conclusiones.....	134
Recomendaciones	135
Bibliografía.....	136
ANEXOS.....	138

Índice de Tablas

Tabla 1 Distribución de Temperatura y Pérdidas de Calor en Aletas	41
Tabla 2 Propiedades del Agua a 20°C y Agua Saturada a 121,217 °C.....	52
Tabla 3 Conductividad térmica de los materiales	75
Tabla 4 Matriz de selección del microcontrolador.....	85
Tabla 5 Matriz de selección transductor de temperatura.....	87
Tabla 6 Matriz de selección pantalla	89
Tabla 7 Especificaciones Técnicas de la Caldera de Vapor.....	91
Tabla 8 Lista de Materiales que la Caldera de Vapor.....	92
Tabla 9 Especificaciones Técnicas del Bastidor.....	94
Tabla 10 Lista de Materiales del Bastidor.....	94
Tabla 11 Equipo para la operación del caldero	95
Tabla 12 Instrumentos para operación del caldero	97
Tabla 13 Material requerido para la construcción del reservorio de vapor	98
Tabla 14 Material requerido para la implementación del sistema de adquisición de datos	99
Tabla 15 Resultados tomados de la barra de cobre.....	117
Tabla 16 Resultados tomados de la barra de acero.....	117
Tabla 17 Resultados tomados de la barra de bronce.....	118
Tabla 18 Resumen de datos de temperatura en estado estable.....	119
Tabla 19 Cálculo del factor (m) en función de las temperaturas y la distancia x.....	120
Tabla 20 Longitud infinitamente larga calculada con los valores experimentales	121
Tabla 21 Resumen de temperaturas teóricas en las aletas.....	122
Tabla 22 Cálculo de los errores relativos de la distribución de temperaturas	123
Tabla 23 Eficiencia de las aletas.	127

Tabla 24	Costos de materiales para el caldero	128
Tabla 25	Costos de materiales para el bastidor	129
Tabla 26	Costos de barra metálicas	129
Tabla 27	Costos de material para el reservorio de vapor	129
Tabla 28	Costos de material para adquisición de datos	130
Tabla 29	Costos de materiales para control y operación del caldero	130
Tabla 30	Costos varios	131
Tabla 31	Remuneración de personal técnico capacitado	131
Tabla 32	Honorarios docente	132
Tabla 33	Honorarios alumnos.....	132
Tabla 34	Gastos generales.....	132
Tabla 35	Gasto total para la construcción del banco de pruebas.....	133

Índice de Figuras

Figura 1	Equipo de superficies extendidas.	27
Figura 2	Transferencia de calor por conducción unidireccional	32
Figura 3	Transferencia de calor por convección	33
Figura 4	Tubo cilíndrico aislado	36
Figura 5	Tipos de aletas	37
Figura 6	Tipos de aletas	38
Figura 7	Sección de la aleta	39
Figura 8	Escalamiento de la información	46
Figura 9	Esquema de conexión UART	50
Figura 10	Esquema de conexión SPI	50
Figura 11	Geometría de la cabeza toriesférica	56
Figura 12	Diagrama de cuerpo libre de la analogía eléctrica	63
Figura 13	Diagrama de cuerpo libre del reservorio de vapor	65
Figura 14	Isométrico del bastidor	68
Figura 15	Análisis demanda capacidad del bastidor	71
Figura 16	Análisis de deflexión en la ubicación de la bomba periférica	72
Figura 17	Análisis de deflexión en la ubicación del reservorio de vapor	72
Figura 18	Análisis de deflexión en la ubicación de la caldera	73
Figura 19	Garruchas industriales serie 04	74
Figura 20	Representación de una barra empotrada.	76
Figura 21	Esquema de barra empotrada en la base	79
Figura 22	Control de llama Honeywell	82
Figura 23	Presostato gauge safe	82
Figura 24	Electroválvula normalmente cerrada.....	83

Figura 25	Control de nivel por vasos comunicantes y visor tipo mirilla	84
Figura 26	Interruptores de nivel	84
Figura 27	Placa microcontrolador de Arduino Mega	86
Figura 28	Cable termopar tipo K	87
Figura 29	Módulo transmisor para termocupla Max6675	88
Figura 30	Pantalla touch Nextion	89
Figura 31	Isométrico de la caldera de vapor	93
Figura 32	Diagrama eléctrico	96
Figura 33	Diagrama P&ID	97
Figura 34	Conexión SPI de los Módulos Max6675	100
Figura 35	Conexiones en la placa Arduino Mega	101
Figura 36	Ventana inicial en la pantalla	102
Figura 37	Ventana selección de datos que desea ver	102
Figura 38	Ventana muestra los datos en la barra seleccionada	103
Figura 39	Ventana de información	103
Figura 40	Ventana secundaria de información.....	104
Figura 41	Construcción del caldero.....	105
Figura 42	Prueba hidrostática en el caldero.....	106
Figura 43	Recubriendo de aislante	106
Figura 44	Construcción del bastidor.....	107
Figura 45	Construcción del reservorio de vapor	108
Figura 46	Instalación de aletas	108
Figura 47	Instalación de termocuplas	109
Figura 48	Sistema de adquisición de datos	110
Figura 49	Instalación de control de operación del caldero	110
Figura 50	Instalación de instrumentos	111

Figura 51 Equipo Instalado en el Laboratorio de Conservación de la Energía	112
Figura 52 Comprobación de temperatura superficial en los equipos con aislamiento térnico	113
Figura 53 Temperatura superficial en la base del reservorio	113
Figura 54 Temperaturas máxima y mínima en la aleta de cobre	114
Figura 55 Temperatura máxima y mínima en la aleta de acero	114
Figura 56 Temperatura máxima y mínima en la aleta de bronce	115
Figura 57 Gráfica de la distribución de temperaturas en aletas análisis experimental	121
Figura 58 Gráfica de la distribución de temperaturas experimental y teórica para el cobre	124
Figura 59 Gráfica de la distribución de temperaturas experimental y teórica para el acero	125
Figura 60 Gráfica de la distribución de temperaturas experimental y teórica para el bronce	126

Nomenclatura

α : Difusividad térmica

β : Coeficiente de expansión térmica volumétrica.

β_{th} : Ángulo utilizado en el cálculo de la cabeza toriesférica.

CA : Margen mínimo para corrosión.

C_d : Carga distribuida.

C_{dv} : Carga viva.

C_{pnt} : Carga puntual.

C_1 : Constante de ángulo utilizada en el cálculo de la altura toriesférica.

C_2 : Constante de ángulo utilizada en el cálculo de la altura toriesférica.

C_3 : Parámetro de resistencia utilizado en el cálculo de la altura toriesférica.

D : Diámetro interno del cuerpo del recipiente.

ε_f : Efectividad de una aleta.

E : Eficiencia de la junta soldada.

E_T : Módulo de elasticidad a la temperatura máxima de diseño.

G : Constante utilizada en el cálculo de la altura toriesférica.

Gr_L : Número de Grashof.

g : Gravedad.

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección.

K : Coeficiente de transferencia de calor por conducción.

LHV : Poder calorífico inferior.

L : Longitud óptima de aleta.

ΔL_{max} : Deflexión máxima permisible.

L_c : Radio de la corona.

m : Factor de corrección.

\dot{m}_{glp} : Flujo másico del combustible glp.

Nu : Número de Nusselt.

η_f : Eficiencia de una aleta.

η : Eficiencia de combustión.

ϕ_{th} : Ángulo utilizado en el cálculo de la cabeza toriesférica.

P : Presión interna de diseño.

Pr : Número de Prandtl

P_{eth} : Valor de la presión interna que se espera que produzca un pandeo elástico del nudillo en una cabeza toriesférica.

P_{ck} : Valor de la presión interna que se espera que resulte en una falla por pandeo del nudillo.

P_y : Valor de la presión interna que se espera que dé como resultado un esfuerzo máximo igual al límite elástico del material en una cabeza toriesférica.

P_{ac} : Presión interna permitida de una cabeza toriesférica basada en la ruptura de la corona.

P_a : Presión interna máxima permitida de una cabeza toriesférica.

P_d : Presión interna de diseño.

$P_{caldero}$: Peso del caldero.

$P_{reservorio}$: Peso del reservorio.

P_{bomba} : Peso de la bomba.

P_{barras} : Peso de las barras cilíndricas.

$P_{bastidor}$: Peso del bastidor.

q''_x : Flujo de calor por unidad de área.

q''_c : Flujo de calor por convección.

Q_{util} : Calor útil.

Q_{comb} : Calor de combustión.

Q_{pared} : Calor perdido por convección natural en las paredes.

Ra_D : Número de Rayleigh.

R'_{total} : Resistencia térmica total por unidad de longitud de transferencia de calor.

r_{cr} : Radio crítico de aislamiento.

r : Radio de la articulación.

R_{th} : Radio utilizado en el cálculo de la altura toriesférica.

S : Esfuerzo máximo admisible evaluado a la temperatura de diseño.

t : Espesor del recipiente.

T_s : Temperatura de la superficie.

T_∞ : Temperatura del fluido.

T_s : Temperatura de superficie.

T_b : Temperatura de base

T_{pro} : Temperatura promedio.

ν : Viscosidad cinemática.

Resumen

En el presente trabajo de titulación se desarrolló el diseño, la construcción y la adquisición de datos de un banco de pruebas móvil de barras de longitud infinita, que genera el perfil de temperatura en tres barras cilíndricas de bronce, acero y cobre. El diseño se centró en los componentes mecánicos, térmicos y de adquisición de datos que conforman el banco de pruebas. Como punto de partida se encuentra una caldera que genera vapor, enviándolo hacia un reservorio de vapor que está conectado a las barras cilíndricas, las cuales son calentadas por acción de la transferencia de calor por convección de vapor, a su vez, este calor generado viaja a lo largo de la longitud de las barras demostrando así los efectos de la transferencia de calor en barras de longitud infinita. Para tener una confiable lectura de temperaturas a lo largo de las barras se implementó un sistema de adquisición de datos, el cual cuenta con unos adecuados sensores que funcionan en conjunto con el software de programación facilitando la lectura de los mismos. Posteriormente se diseñó un bastidor que permita la movilidad y estabilidad de todos los componentes del banco de pruebas en conjunto. Por último, se realizó las pruebas de funcionamiento del equipo logrando obtener resultados concluyentes que se apegan a la teoría de transferencia de calor.

Palabras clave:

- **TRANSFERENCIA DE CALOR**
- **LONGITUD INFINITA**
- **CALDERO**
- **CONDUCCIÓN**
- **CONVECCIÓN**

Abstract

In this degree work, the design, construction and data acquisition of a mobile test bench with infinite length bars was developed, which generates the temperature profile in three cylindrical bronze, steel and copper bars. The design focused on the mechanical, thermal and data acquisition components that make up the test bed. As a starting point there is a boiler that generates steam, sending it to a steam reservoir that is connected to the cylindrical bars, which are heated by the action of heat transfer by steam convection, in turn, this generated heat travels along the length of the bars thus demonstrating the effects of heat transfer in bars of infinite length. For a reliable reading of temperatures along the bars, a data acquisition system is implemented, which has suitable sensors that work in conjunction with the programming software, facilitating their reading. Subsequently, a frame was designed that allows the mobility and stability of all the components of the test bench together. Finally, the equipment operation tests were carried out, obtaining conclusive results that adhere to the heat transfer theory.

Keywords:

- **HEAT TRANSFER**
- **INFINITE LENGTH**
- **CAULDRON**
- **CONDUCTION**
- **CONVECTION**

Capítulo I

Generalidades

Antecedentes

En las instalaciones del Laboratorio de Conversión de la Energía existe un banco de pruebas de barras cilíndricas para el estudio del fenómeno de transferencia de calor en superficies extendidas, el equipo fue adquirido como parte de los proyectos de Laboratorio, el cual incluye un bastidor donde reposan las barras de cobre, acero y bronce con un diámetro igual a $\frac{1}{2}$ pulgada cada una que a su vez están conectadas con un reservorio de vapor; en cada barra se encuentran conectados 10 termopares a un panel de sockets, de manera que se puede conectar un termómetro digital, también cuenta con un caldero para la generación de vapor alimentado con una bomba de agua de $\frac{1}{2}$ HP; con el paso del tiempo el equipo culminó su vida útil.

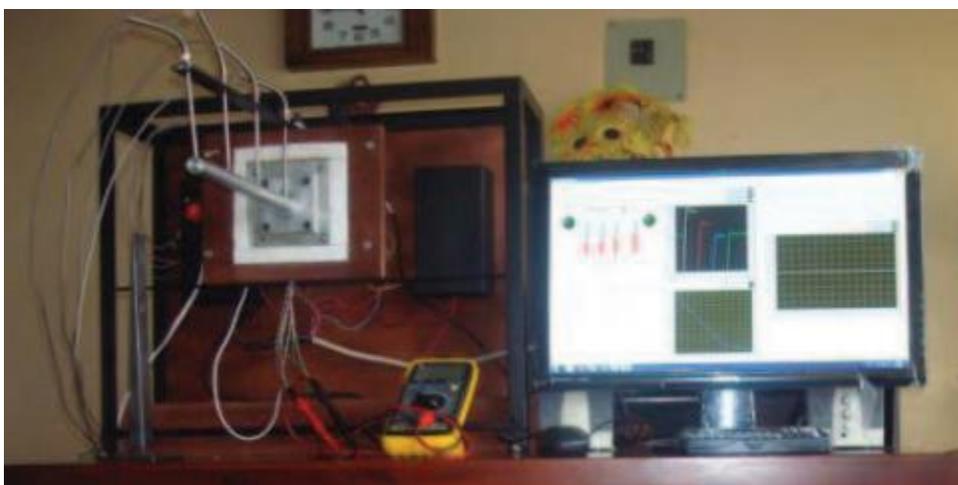
Actualmente, la Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE cuenta con equipos para la instrucción académica relacionados con la transferencia de calor en superficies extendidas como la planta de transformación energética que incluye un caldero marca York Shiple Global Serie 300 VTB con una capacidad de 30 BHP acoplado a un supercalentador, una torre de enfriamiento de tiro forzado y una turbina de capacidad 5Kw a 3000 rpm, (Çengel & Afshin, Transferencia de Calor y Masa Fundamentos y Aplicaciones, 2011). Esta planta ha sido intervenida en varias ocasiones como parte de los proyectos de titulación tal que hoy en día cuenta con sistemas de adquisición de datos digitales en varios de sus sistemas.

A nivel nacional se encontró el proyecto de titulación “Diseño y construcción de un equipo para el estudio de transferencia de calor en superficies extendidas en estado estable, destinado al laboratorio de transferencia de calor de la Escuela Politécnica

Nacional” (Almachi Nacimba & Pillaza Ormaza, 2013), en este proyecto se diseñó y construyó un equipo capaz de adquirir datos de forma digital ver figura 1, para que los estudiantes de ingeniería mecánica comprendan el fenómeno de transferencia de calor en superficies extendidas donde será de utilidad la adquisición de datos que se pretende realizar en el proyecto.

Figura 1

Equipo de superficies extendidas.



Nota. Muestra el funcionamiento del equipo de superficies extendidas totalmente operativo. Tomado de (Almachi Nacimba & Pillaza Ormaza, 2013)

Definición del problema

El Laboratorio de Conversión de Energía de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, no cuenta con un banco de pruebas móvil de barras de longitud infinita operativo para el desarrollo de prácticas de la asignatura de Transferencia de Calor. Por cual, se origina una evidente problemática durante el desarrollo de prácticas académicas que son de importante ayuda para el desarrollo del estudiante. Con lo cual, no solo recibirá conceptos teóricos, a su vez, obtendrá conocimientos de sus diferentes

efectos en la práctica, ya que son de importante ayuda para la formación de futuros profesionales y prestación de servicios a la industria.

Justificación e importancia

En el Laboratorio de Conversión de Energía el actual banco de pruebas de barras cilíndricas de longitud infinita ha culminado con su vida útil. Esto ha ocasionado que no se pueda desarrollar la práctica de transferencia de calor por conducción y convección en barras de cilíndricas. Por ende, la construcción de un nuevo equipo móvil, con adquisición de datos, es importante para que todos los estudiantes puedan llevar a la práctica los conocimientos adquiridos en la teoría sobre principios básicos de los procesos de transferencia de calor.

Con la tendencia mundial por mejorar la educación superior, hoy por hoy se necesitan equipos que tengan una adecuada tecnología. Por lo tanto, el desarrollo de este equipo es claramente generar nueva tecnología con la implementación de un nuevo sistema de adquisición de dato, con lo cual se permitirá de forma más eficiente tomar la información de datos dentro del proceso. Además, la construcción del banco de pruebas será un aporte significativo para la Educación Superior Nacional.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar, construir y adquirir datos de un banco de pruebas móvil de barras cilíndricas de longitud infinita.

Objetivos Específicos

- Realizar el cálculo y construcción del sistema de generación y almacenamiento de vapor.

- Realizar el diseño y la implementación del sistema de adquisición de datos.
- Realizar el diseño y la construcción de un bastidor para el banco de pruebas móvil.
- Efectuar pruebas de operación y funcionamiento del equipo.

Alcance el proyecto

La finalidad del proyecto es el diseño y construcción de un banco de pruebas móvil de barras cilíndricas de longitud infinita para Laboratorio de Conversión de Energía, para lo cual utilizaremos las ingenierías: conceptual, básica, de detalle y de construcción.

- Con la ingeniería conceptual se va a revisar el fundamento teórico para la construcción de calderas, la transferencia de calor superficies extendidas, las normativas y especificación de materiales.
- Con la ingeniería básica se prevé desarrollar cálculos mecánicos y térmicos para el diseño del banco de pruebas, diseño de un recipiente para almacenar vapor saturado hasta 21,5 PSI y 111 °C, diseño de una bastidor móvil y diseño del sistema adquisición de datos con el uso de una tarjeta Arduino Mega de bajo costo.
- En la ingeniería de detalle prevé suministrar toda la información técnica, lista de materiales, planos constructivos, especificaciones mecánicas y layout del banco de pruebas.
- Se realizará la construcción del banco de pruebas, pruebas de funcionamiento, un manual de operación y una guía para la práctica de laboratorio.

- Por último, se realizará las conclusiones, recomendaciones respectivas del presente proyecto de titulación.

Capítulo II

Ingeniería conceptual

Introducción de Transferencia de calor

La transferencia de calor es la energía en tránsito que se produce por la interacción de un sistema con otro, debido a la diferencia de temperaturas entre ellos. “Siempre que exista la diferencia de temperatura en un cuerpo o entre cuerpos debe ocurrir transferencia de calor, existen varios procesos de transferencia como conducción, convección y radiación” (Incropera & DeWitt, 1999).

Procesos de transferencia de calor

Conducción

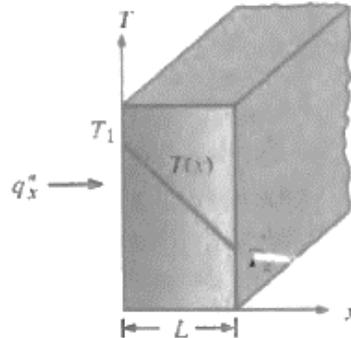
La conducción se refiere a la transferencia de calor que se produce por la diferencia de temperaturas en un medio estacionario como puede ser un sólido o un fluido. También la conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas hacia las partículas menos energéticas en una sustancia debido a la interacción entre ellas. Se puede cuantificar la transferencia de calor por medio de modelos matemáticos que sirven para determinar la cantidad de energía transferida por unidad de tiempo.

Ley de Fourier

La transferencia de calor por unidad de área q''_x (W/m^2) es la velocidad con la que se transfiere el calor por unidad de área, en dirección x y es proporcional al gradiente de temperatura $\frac{dT}{dx}$ en esa dirección.

Figura 2

Transferencia de calor por conducción unidireccional



Nota. La figura representa la transferencia unidireccional de calor por conducción.

Tomado de (Incropera & DeWitt, 1999).

La cual está representada por la siguiente ecuación (1)

$$q''_x = -K \frac{dT}{dx} \quad [\text{W/m}^2] \quad (1)$$

El signo (-) se debe a la dirección de la temperatura decreciente, K es la conductividad térmica expresada en (W/mK) propia de cada material.

Para condición en estado estable el flujo de calor se transforma en:

$$q''_x = K \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2)$$

$$q''_x = K \frac{\Delta T}{L} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3)$$

Para determinar el calor por unidad de tiempo q_x (W) a través de una pared plana de área A es.

$$q_x = q''_x A \quad (4)$$

$$q_x = K * A * \frac{T_1 - T_2}{L} \quad [\text{W}] \quad (5)$$

Convección

La convección se da por dos factores que son el movimiento molecular aleatorio y el movimiento macroscópico del fluido en un gradiente de temperatura. La convección existe cuando hay diferencia de temperatura entre un fluido en movimiento y una superficie sólida, existen dos tipos de convección puede ser forzada o natural.

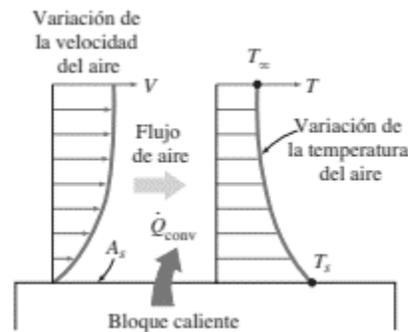
- Convección forzada. - cuando el fluido que transporta el calor es obligado a pasar con una velocidad o caudal.
- Convección natural. - cuando el fluido que transporta el calor encuentra en reposo.

Ley de enfriamiento de Newton.

Las temperaturas de la superficie de un sólido y del fluido difieren, habrá una región de fluido a través del cual la temperatura varía de T_s en la superficie y T_∞ en el flujo exterior

Figura 3

Transferencia de calor por convección



Nota. Representa la transferencia de calor de una superficie caliente hacia un flujo de aire. Tomado de (Çengel & Afshin, Transferencia de Calor y Masa Fundamentos y Aplicaciones, 2011).

La transferencia de calor por convección se representa mediante la ecuación (6).

$$q''_c = h(T_s - T_\infty) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (6)$$

Donde:

- q''_c : flujo de calor por convección
- T_s : temperatura de la superficie
- T_∞ : temperatura del fluido
- h : coeficiente de transferencia de convección

Para determinar el calor por unidad de tiempo es necesario multiplicar por el área A de convección y es representada en la ecuación (8).

$$q'' = q''_c \cdot A \quad (7)$$

$$q'' = h * A * (T_s - T_\infty) \text{ [W]} \quad (8)$$

Convección Natural Sobre Superficies

La transferencia de calor por convección natural depende de la geometría, de la orientación de la superficie, la variación de temperatura sobre la superficie y de las propiedades termofísicas del fluido que interviene. (Çengel & Afshin, 2011)

El número de los Grashof es un parámetro adimensional que representa los efectos de la convección natural.

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_{s2} - T_\infty)L^3_c}{\nu^2} \quad (9)$$

El número de Rayleigh se considera como la razón de las fuerzas de flotabilidad, los productos de las difusividades térmicas y de cantidad de movimiento, por lo cual está dado por la siguiente ecuación. (Çengel & Afshin, 2011)

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_{s2} - T_{\infty})D^3}{\alpha\nu} \quad (10)$$

Las correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies cilíndricas horizontales cuando $Ra_D \leq 10^{12}$ está definido por:

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/6}}{[1+(0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (11)$$

Las correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies cilíndricas verticales pueden tratarse como placa vertical cuando cumplen con el criterio

$$D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}} \quad (12)$$

Las correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt para placa vertical está definido por:

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (13)$$

Con el número de Nusselt, la conductividad térmica y el diámetro podemos calcular el coeficiente de convección.

$$h = \frac{kNu}{D} \quad (14)$$

Radio critico de aislamiento

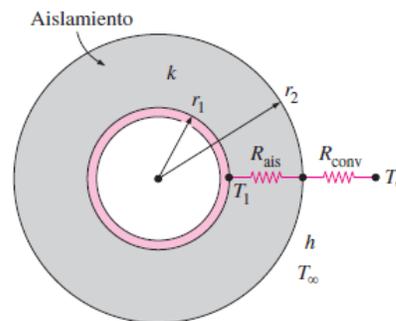
Al agregar aislamiento a un tubo cilíndrico o a una capa esférica, el aislamiento adicional incrementa la resistencia a la conducción de calor de la capa de aislamiento, pero disminuye la resistencia a la convección de la superficie debido al incremento en el área exterior. La transferencia de calor del tubo puede aumentar o disminuir, dependiendo de cuál sea el efecto que domine. (Çengel & Afshin, Transferencia de Calor y Masa Fundamentos y Aplicaciones, 2011).

La razón de la transferencia de calor del tubo cilíndrico aislado hacia el aire exterior se puede expresar como:

$$q' = \frac{T_{\infty} - T_i}{R'_{total}} \text{ [W/m]} \quad (15)$$

Figura 4

Tubo cilíndrico aislado



Nota. Tubo cilíndrico aislado expuesto a la convección desde la superficie exterior y la red de resistencias térmicas asociada con él. Tomado de (Çengel & Afshin, Transferencia de Calor y Masa Fundamentos y Aplicaciones, 2011)

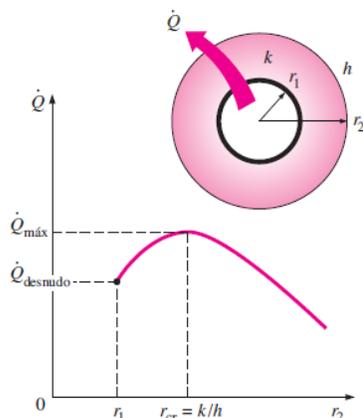
Según la Figura 4 la resistencia térmica total por unidad de longitud será igual a:

$$R'_{total} = \frac{\ln\left(\frac{r}{r_i}\right)}{2\pi k} + \frac{1}{2\pi r h} \quad (16)$$

La transferencia de calor del cilindro puede incrementar o disminuir dependiendo si el radio externo supere o no al radio crítico. Mientras mayor sea el radio externo al radio crítico la razón de transferencia de calor empezará a decrecer como indica la Figura 5. (Çengel & Afshin, 2011)

Figura 5

Tipos de aletas



Nota. El gráfico representa la variación de transferencia de calor con el radio externo del aislamiento r_2 cuando $r_1 < r_{cr}$. Tomado de (Çengel & Afshin, Transferencia de Calor y Masa Fundamentos y Aplicaciones, 2011)

El valor del radio crítico r_{cr} donde la razón de transferencia de calor alcanza su máximo valor se determina a partir del siguiente requerimiento:

$$\frac{dR'_{total}}{dr} = 0 \quad (17)$$

De aquí

$$\frac{1}{2\pi kr} - \frac{1}{2\pi r^2 h} = 0 \quad (18)$$

Se obtiene

$$r_{cr} = \frac{k}{h} \quad (19)$$

Transferencia de calor en superficies extendidas

Cuando un sólido se encuentra en un proceso de transferencia de energía por conducción dentro de sus límites y transferencia de energía por convección o radiación entre sus límites con sus alrededores se considera una superficie extendida.

Aleta

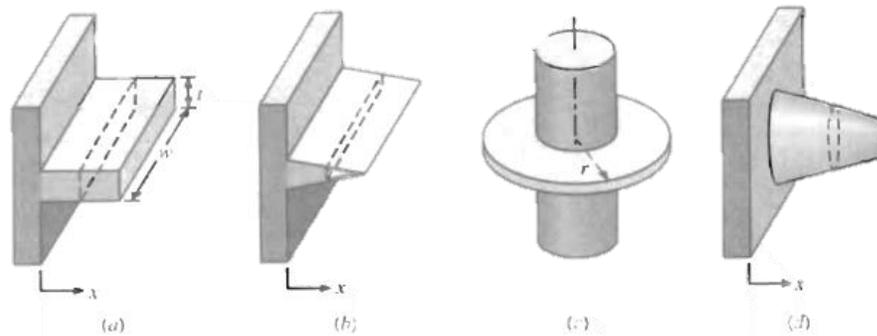
Se considera una aleta a un sólido de configuración geométrica determinada que tiene un gradiente de temperatura en una dirección determinada, internamente mantiene transferencia de energía por conducción y externamente hay una transferencia de energía por convección desde la superficie. (Incropera & DeWitt, 1999)

Formas de aletas

Para catalogar las aletas existen cuatro tipos de configuraciones geométricas que se muestran en la Figura 6.

Figura 6

Tipos de aletas



Nota. El gráfico representa los tipos de aletas según su configuración geométrica.

Tomado de (Incropera & DeWitt, 1999).

De acuerdo a su geometría son:

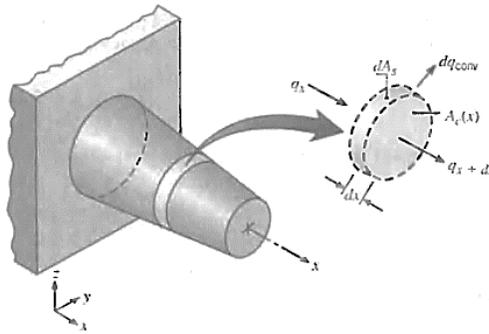
- a. Aletas de área de sección transversal uniforme
- b. Aletas de área de sección transversal no uniforme
- c. Aleta anular
- d. Aleta de aguja

Modelo matemático para la transferencia de calor en aletas

Para encontrar el modelo matemático se realiza un balance de energía a la sección diferencial mostrado en la Figura 7 obtenemos.

Figura 7

Sección de la aleta



Nota. Sección para el análisis diferencial en una aleta. Tomado de (Incropera & DeWitt, 1999).

$$q_x = q_{x+dx} + dq_{conv} \quad (20)$$

Aplicando la ecuación de Fourier a la conducción de calor en $x + dx$ es:

$$q_x = -K A_c \frac{dT}{dx} \quad (21)$$

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{dq_x}{dx} dx \quad (22)$$

$$q_{x+dx} = -K A_c \frac{dT}{dx} - K \frac{d}{dx} \left(A_c \frac{dT}{dx} \right) \quad (23)$$

Ecuación de convección respecto a dA_s .

$$dq_{conv} = h dA_s (T - T_\infty) \quad (24)$$

Sustituyendo las ecuaciones (23) y (24) en la ecuación (20).

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \left(\frac{1}{A_c} \frac{dA_c}{dx} \right) \frac{dT}{dx} - \left(\frac{1}{A_c} \frac{h A_s}{k dx} \right) (T - T_\infty) = 0 \quad (25)$$

Obtenemos el modelo matemático para la transferencia de calor en aletas.

Aletas de área de sección transversal uniforme

Las aletas deben estar unidas a una superficie base, en ese punto la temperatura de base T_b se extiende en un flujo de temperatura hacia el ambiente T_∞ .

También se considera un área constante $A_c = cte$ y $\frac{dA_s}{dx} = P$, donde A_s es el área de superficie de base y P es el perímetro.

$$\frac{dA_c}{dx} = 0 \quad y \quad \frac{dA_s}{dx} = P \quad (26)$$

Sustituyendo los diferenciales de (26) en la ecuación (27).

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \left(\frac{h P}{k A_c} \right) (T - T_\infty) = 0 \quad (27)$$

Definimos la variación de temperatura θ y transformamos la variable dependiente.

$$\theta(x) \equiv T_{(x)} - T_\infty \quad (28)$$

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{dT}{dx} ; \quad \frac{d^2\theta}{dx^2} = \frac{d^2T}{dx^2} \quad (29)$$

Reemplazamos las ecuaciones (28) y (29) en la ecuación (27).

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2 \theta = 0 \quad (30)$$

Donde:

$$m^2 = \frac{hP}{k A_c} \quad (31)$$

Al tener una ecuación diferencial (30) de segundo orden, la solución general es:

$$\theta(x) = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \quad (32)$$

Siendo C1 y C2 constantes arbitrarias, cuyos valores se calculan mediante las condiciones de frontera en la base y en la punta de la aleta.

Existen varios casos según las condiciones de frontera que se muestran en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1

Distribución de Temperatura y Pérdidas de Calor en Aletas

Caso	Condición de la aleta (x=L)	Distribución de temperatura	Transferencia de calor de la aleta
A	Transferencia de calor por convección: $h\theta(L) = -kd\theta/dx _{x=L}$	$\Delta\theta = \frac{\cosh m(L-x) + (h/mk) \sinh m(L-x)}{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL} \quad (33)$	$M \frac{\sinh mL + (h/mk) \cosh mL}{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL} \quad (34)$
B	Adiabática: $kd\theta/dx _{x=L} = 0$	$\Delta\theta = \frac{\cosh m(L-x)}{\cosh mL} \quad (35)$	$M \tanh mL \quad (36)$
C	Temperatura establecida $\theta(L) = \theta_L$	$\Delta\theta = \frac{(\theta_L/\theta_b) \sinh mx + \sinh m(L-x)}{\sinh mL} \quad (37)$	$M \frac{(\cosh mL - (\theta_L/\theta_b))}{\sinh mL} \quad (38)$
D	Aleta infinita ($L \rightarrow \infty$) $\theta(L) = 0$ $\theta_b \equiv T_b - T_\infty \quad (41)$	$\Delta\theta = e^{-mx} \quad (39)$ $m^2 = \frac{hP}{kA_c} \quad (42)$	$M \quad (40)$
		$M = \sqrt{hPkA_c} \theta_b \quad (43)$	$\Delta\theta = \frac{T_{(x)} - T_\infty}{T_b - T_\infty} \quad (44)$

Nota. Esta tabla muestra las pérdidas de calor para una aleta de sección transversal uniforme. Tomado de (Incropera & DeWitt, 1999).

El caso B de Aleta Adiabática se considera que la punta de la aleta está aislada, puesto que la transferencia de calor en la punta es una fracción despreciable.

En el caso D de Aleta de longitud infinita se considera una aleta suficientemente larga de sección uniforme, donde la temperatura al final de la aleta tenderá a la temperatura de sus alrededores.

Desempeño de una aleta

El propósito de las aletas es aumentar el área efectiva de una superficie de transferencia de calor, la aleta tiene una resistencia debido a su coeficiente de conducción, pero no garantiza que la transferencia de calor sea mayor utilizando la aleta, por tal razón es necesario evaluar la efectividad de una aleta. “La efectividad se puede encontrarla dividiendo la razón de transferencia de calor de la aleta a la razón de transferencia de calor sin aleta”, (Incropera & DeWitt, 1999).

$$\varepsilon_f = \frac{q_f}{hA_{c,b}\theta_b} \quad (45)$$

En la ecuación (45) tenemos que $A_{c,b}$ es el área de la sección transversal en la base de la aleta.

La efectividad para una aleta infinitamente larga es:

$$\varepsilon_f = \left(\frac{kP}{hA_c} \right)^{1/2} \quad (46)$$

Para el caso de una aleta con extremo adiabático, la transferencia de calor máxima posible es del 98%, razón por la cual no tiene sentido extender la longitud de una aleta más allá de $L = 2.3/m$ donde (m) es igual a la raíz cuadrada de la ecuación (42). (Incropera & DeWitt, 1999)

$$mL = 2,3 \quad (47)$$

Eficiencia de la aleta

La temperatura en una aleta desciende a lo largo de su longitud, de la misma manera ocurre con la transferencia de calor, para considerar dicho efecto se define la eficiencia de una aleta. (Incropera & DeWitt, 1999)

$$\eta_f = \frac{q_f}{q_{max}} = \frac{q_f}{h A_f \theta_b} \quad (48)$$

Donde A_f es el área de la superficie de la aleta.

Para una aleta con extremo adiabático su eficiencia será:

$$\eta_f = \frac{M \tanh mL}{h * P * L * \theta_b} = \frac{\tanh mL}{mL} \quad (49)$$

Si la longitud $L \rightarrow 0$ o $L \rightarrow \infty$ es necesario realizar una corrección en la longitud de la aleta.

- $L_c = L + \frac{t}{2}$ para una aleta rectangular
- $L_c = L + \frac{D}{4}$ para una aleta cilíndrica

Por lo tanto, la ecuación (49) será modificada.

$$\eta_f = \frac{\tanh mL_c}{mL_c} \quad (50)$$

Calderas

Clasificación de las calderas

Existen varias formas de clasificar a las calderas que dependen de diversos factores ya sea su uso, presión de trabajo, posición, etc.

Según la Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes las calderas se pueden clasificar por la disposición de fluidos.

Según la disposición de fluidos

Esta clasificación se basa en función del paso del fluido caloportador a través de los tubos de intercambio, el cual se clasifica en:

- Calderas acuotubulares.
- Calderas pirotubulares.

Calderas Acuotubulares

Son aquellas en las que el fluido de trabajo se desplaza por el interior de tubos durante su calentamiento y los gases de combustión circulan por el exterior de los mismos. Son de aplicación cuando se requiere una presión de trabajo por encima de 22 bar. (FENERCOM, 2012).

Calderas pirotubulares

Son aquellas en las que los gases de combustión circulan por el interior de los tubos y el líquido se encuentra en un recipiente atravesado por dichos tubos. Son de aplicación cuando se requiere una presión de trabajo inferior a 22 bar. (FENERCOM, 2012).

Según la presión de trabajo

Otra característica que se toma en cuenta para la clasificación de las calderas es según su presión de trabajo y de acuerdo a la norma ASME Sección VIII División I Rules for Construction of Pressure Vessels se puede deducir la siguiente clasificación.

- Calderas miniaturas.
- Caldera de potencia.
- Calderas de calentamiento de baja presión.
- Calderas marinas.

Eficiencia de Combustión

La eficiencia de combustión se define como la relación entre el calor útil y el calor total obtenido por combustible (FENERCOM, 2012). Es decir:

$$\eta = \frac{Q_{util}}{Q_{comb}} \times 100 \quad (51)$$

Poder Calorífico

Está definido como la cantidad de calor liberado cuando se quema una unidad de combustible. (Çengel & Boles, 2012)

Poder Calorífico Superior

Es el poder calorífico que se calcula considerando que el agua resultante de la combustión se encuentra en estado líquido (condensado). (Ayala Blanco, Aparicio Ariza, & García Sánchez, 2016)

Poder Calorífico Inferior

El poder calorífico inferior LHV es el poder calorífico resultante al asumir que el agua producto de la combustión está en estado vapor. (Ayala Blanco, Aparicio Ariza, & García Sánchez, 2016)

Instrumentación típica usada en las calderas

Existen varios accesorios que deben instalarse en las calderas de vapor, todos con el objetivo de mejorar y controlar su funcionamiento, eficacia y seguridad. (FENERCOM, 2012)

Dentro de los accesorios más importantes tenemos los siguientes:

- Válvulas de alivio.

- Manómetros.
- Indicadores de nivel de agua.
- Trampas de vapor.

Sistemas de adquisición de datos

Para entender un fenómeno físico es necesario cuantificarlo, por tal motivo es importante medir las magnitudes físicas. Hoy en día el avance e innovación de la tecnología permite el desarrollo sistemas de adquisición de datos mucho más fáciles de implementar.

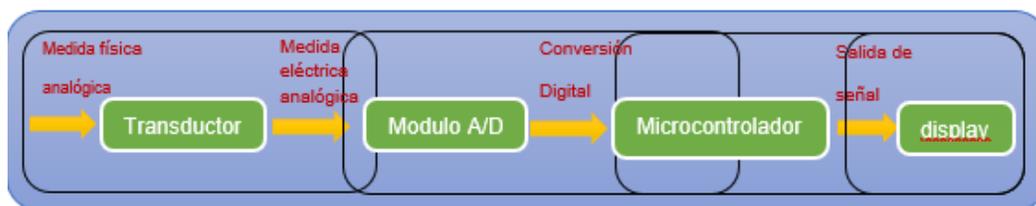
Los sistemas de adquisición de datos son un conjunto de dispositivos que permiten medir variables físicas, convertir señales analógicas en digitales, almacenarlas y posteriormente mostrarlas para su análisis.

Las fases que debe seguir la señal medida para la adquisición de datos son:

- Medida de magnitud física
- Acondicionamiento de la señal
- Procesamiento de información

Figura 8

Escalamiento de la información



Medida de magnitud física

La fase principal para la adquisición de datos es la medición de la magnitud física, para realizar la medición es indispensable utilizar sensores. Un sensor está

diseñando para receptar información de un medio exterior y transformar esta información en alguna otra magnitud que puede ser cuantificada. Los sensores pueden ser de medición directa cuando muestra el dato directamente y de medición indirecta cuando es necesario conectar otro dispositivo para que muestre el dato (Rabié Durán, 2013).

Para elegir los sensores es importante considerar aspectos que pueden marcar la diferencia, comparando un sensor con otro podemos seleccionar el más apropiado.

- Principio de funcionamiento
- Rango de medida.
- Precisión.
- Repetitividad
- Sensibilidad.
- Resolución.

Sensores de temperatura

Son instrumentos eléctricos o electrónicos que permiten medir la temperatura de un objeto o espacio físico, transformado una magnitud física en otra diferente en muchos casos una señal eléctrica.

Sensores de presión

Son instrumentos mecánicos o electrónicos que permite medir la presión de un entorno abierto, en el caso de la presión atmosférica, o de un entorno cerrado en el caso de un recipiente a presión.

Acondicionamiento de señal

El acondicionamiento de señal permite transformar la señal captada por el sensor y convertirla en una señal aceptable por un microcontrolador u ordenador. Las características principales de los acondicionadores de señal son:

- Acondicionamiento. – transforma la señal entregada por el sensor a una señal aceptada por el controlador, como ejemplo transformar una señal análoga en digital.
- Amplificación. - las señales entregadas por los sensores son muy pequeñas, por lo que se procede a amplificarla y así quede dentro un rango legible.
- Excitación. - Hay muchos sensores que necesitan alimentación para poder cuantificar con exactitud la magnitud de la señal que se está analizando.
- Filtrado. - Si se tiene señales con ruidos de alta frecuencia se procede a filtrarla, esto debido a que se puede perder mucha exactitud en la medición.

El objetivo principal de un sistema de adquisición de datos, es transportar la señal lo más limpia posible para poder obtener los datos lo más precisos. (Rabié Durán, 2013)

Procesamiento de información

Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado programable capaz de ejecutar órdenes previamente desarrolladas que pueden almacenar en su memoria, sus líneas de comunicación de entrada y salida. Tiene la capacidad de conectar sensores y actuadores, los cuales pueden realizar las tareas programadas. Una tarjeta microcontroladora posee las siguientes características:

- Temporizadores.
- Puertos análogos.
- Puertos digitales.
- Modulador de pulsos PWM.
- Puertos de comunicación: serial, I2C, SPI, CAN; USB.

Las principales ventajas que tiene un microcontrolador son:

- Eficiencia en los procesos programados.
- Reducción de espacio, consumo, costos.
- Pueden reprogramarse.
- Fiabilidad.

Hay una gran diversidad de microcontroladores, pero la clasificación principal entre microcontroladores es de 4, 8, 16, 32 bits. Siendo los de 16 y 32 bits superior a los de 4 y 8 bits, en la actualidad los microcontroladores de 16 a 32 bits dominan el mercado, son más potentes, por ende, controlan más procesos. (Ramirez Neyra, 2009)

Protocolos de comunicación en serie

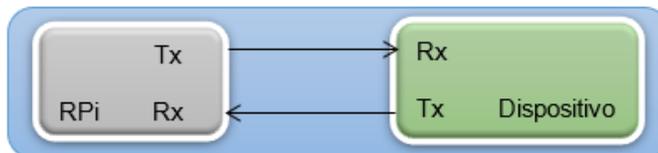
Los protocolos de comunicación en serie sirven para transmitir datos digitales seguidos uno tras otro, existen varios tipos de comunicación como SBUS, PPM, JTAG UART, CAN, I2C, SPI, MIDI y RS – 232, la comunicación en serie puede ser síncrona cuando utiliza una línea de comunicación por tiempo, para enviar los datos a una velocidad específica o asíncrona cuando no utiliza la línea de comunicación por tiempo.

UART (transmisor receptor asíncrona universal)

Este tipo de comunicación utiliza una línea de comunicación por cada conexión, el cable del transmisor se denomina Tx y el cable receptor Rx, para la transmisión de información se debe configurar la velocidad de transmisión, la longitud de datos y los bits de start y stop.

Figura 9

Esquema de conexión UART

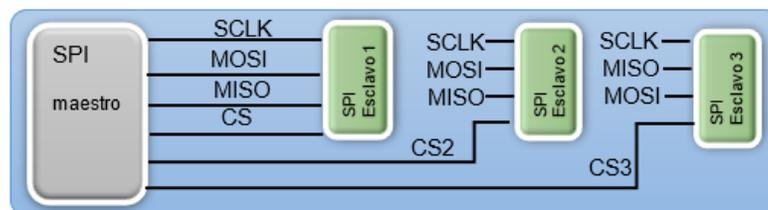


SPI (Interfaz Periférica en Serie)

Este tipo de comunicación síncrona usa cuatro líneas de comunicación SCLK (serial clock), MOSI (*Master Output Slave Input*), MISO (*Master Input Slave Output*), SS (slaves selec), más la comunicación a tierra. Funciona con un transmisor maestro y varios esclavos. Puede tener una conexión full dúplex que permite alcanzar velocidades de transmisión altas, el consumo de energía es menor, se puede establecer la cantidad de bits que se envía en el código.

Figura 10

Esquema de conexión SPI



Capítulo III

Ingeniería Básica

En este capítulo se presentan cálculos referentes al caldero, diseño mecánico y térmico del reservorio de vapor, diseño del bastidor, selección de material para las barras, selección de materiales para el sistema de adquisición de datos, equipos necesarios para el control y operación del banco de pruebas.

Diseño Térmico

Para el desarrollo del diseño térmico se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Presión de trabajo requerida en el reservorio: 22 psi.
- Flujo másico de vapor: 3,22 kg/h.
- Poder calorífico inferior LHV del combustible (GLP): 10830 kcal/kg (45312,72 kJ/kg).
- Flujo másico de combustible: 0,231 kg/h.
- Temperatura ambiente: 20°C.
- Geometría del sistema.
- Presión máxima de trabajo en la caldera: 30 psi (206,843 kPa).
- Línea de vapor con accesorios: Válvula reguladora de presión (0 a 100 psi), manómetros, válvula solenoide y válvula de seguridad.

Cálculo de la eficiencia de la caldera

Con este análisis se busca caracterizar las condiciones operacionales de la caldera de nuestro banco de pruebas, para lo cual se calcula la eficiencia de la misma.

$$\eta = \frac{Q_{maxcal}}{Q_{combustible}} \times 100 \quad (52)$$

Conociendo la temperatura de entrada de agua 20°C, la presión de trabajo 30 psi nos dirigimos a la Tabla A4 del libro Termodinámica de Çengel, y usando el método de interpolación lineal obtenemos la temperatura de salida vapor, la entalpía de vapor saturado y la entalpía de líquido saturado.

$$T_{op} = \frac{T_1 - T_0}{P_1 - P_0} (P_{op} - P_0) + T_0 \quad (53)$$

$$T_{op} = \frac{125 [^{\circ}C] - 120 [^{\circ}C]}{232,23 [kPa] - 198,67 [kPa]} (206,843 [kPa] - 198,67 [kPa]) + 120 [^{\circ}C]$$

$$T_{op} = 121,217 [^{\circ}C]$$

Tabla 2

Propiedades del Agua a 20°C y Agua Saturada a 121,217 °C

Presión [kPa]	Temperatura [°C]	Entalpía Líquido Saturado h_f [kJ/kg]	Entalpía Vapor Saturado h_g [kJ/kg]
2.3392	20	83,915	2537,4
206.843	121,217	508,929	2707,729

El calor total producido por la fuente de combustión está dado por la siguiente expresión (Çengel & Boles, 2012):

$$Q_{combustible} = \dot{m}_{glp} \cdot LHV \quad (54)$$

$$Q_{combustible} = 0,231 \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot 45312,72 \left[\frac{kJ}{kg} \right] = 10460 \frac{kJ}{h}$$

La potencia máxima en la caldera (calor útil) la obtenemos a partir de la siguiente expresión (Çengel & Afshin, 2011):

$$Q_{maxcal} = \dot{m}_{vapor} (h_{g121,217^{\circ}C} - h_{f20^{\circ}C}) \quad (55)$$

$$Q_{maxcal} = 3,22 \left[\frac{kg}{h} \right] \cdot \left(2707,709 \left[\frac{kJ}{kg} \right] - 83,915 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \right) = 8449 \left[\frac{kJ}{h} \right]$$

Donde el valor de la eficiencia será:

$$\eta = \frac{Q_{maxcal}}{Q_{combustible}} \times 100 = \frac{8449 \left[\frac{kJ}{h} \right]}{10460 \left[\frac{kJ}{h} \right]} \times 100 = 80,7\% \quad (56)$$

La eficiencia de la caldera resulto ser del 80,7 %, valor que se encuentra dentro de los valores típicos para este tipo de sistemas.

Cálculo del calor perdido en las paredes

La eficiencia de la caldera permite conocer el porcentaje de calor perdido, por lo tanto, para continuar con el proceso se asume un porcentaje del 5% en pérdidas por convección natural de las paredes de la caldera al ambiente y el resto en pérdidas por los gases de combustión (Iguarán Duarte & Martínez Barrios, 2008).

$$Q_{pared} = 5\% \cdot Q_{combustible} \quad (57)$$

$$Q_{pared} = 5\% \cdot 10460 \left[\frac{kJ}{h} \right]$$

$$Q_{pared} = 523 \left[\frac{kJ}{h} \right]$$

Diseño Mecánico

Para el diseño mecánico del recipiente de generación vapor se va a seguir los lineamientos establecidos del código ASME Sección VIII Div. 2.

Los requerimientos para el diseño del recipiente son:

- Diámetro externo de 370 mm.
- Presión máxima de operación 30 Psi (206,843 kPa).
- Material Acero SA36

Cálculo y diseño mecánico del caldero

Los componentes a calcular que conforman la caldera son los siguientes:

- Cuerpo del recipiente
- Cabezas del recipiente

Cálculo del espesor del cuerpo del recipiente

Según la norma ASME 2010 Sección VIII División II Rules for Construction of Pressure Vessels la ecuación para calcular el espesor mínimo requerido del cuerpo de recipientes sometidos a presión interna, es la siguiente:

$$t = \frac{D}{2} \left(\exp \left[\frac{P}{SE} \right] - 1 \right) + CA \quad (58)$$

D: diámetro interno del cuerpo del recipiente: 362mm.

P: Presión interna de diseño: 33 Psi (227,527 kPa).

S: Esfuerzo máximo admisible evaluado a la temperatura de diseño: 114 MPa; vea Tabla 1A (ASME, Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D Properties Materials, 2010)

E: Eficiencia de la junta se considera E=1 para material sin costuras (vea ASME SECCION VII UW-12)

CA: margen mínimo para corrosión de 1,5 mm (vea ASME SECCION VIII UG – 25)

Reemplazando parámetros establecidos obtenemos un espesor mínimo de:

$$t = \frac{362 \text{ [mm]}}{2} \left(\exp \left[\frac{227,527 \text{ [kPa]}}{114 \text{ [MPa]} \times 1} \right] - 1 \right) + 1,5 \text{ [mm]} \quad (59)$$

$$t = 1,86 \text{ mm}$$

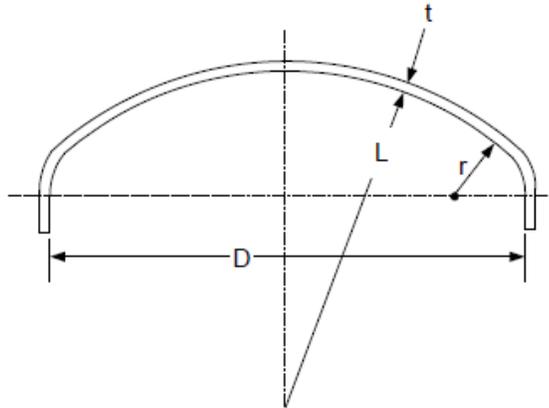
Cálculo del espesor de la cabeza del recipiente

El espesor mínimo del recipiente y cabezales utilizados en el servicio de aire comprimido, servicio de vapor y servicio de agua, fabricados con materiales de acero al carbono o de baja aleación será de 2,4 mm (0,0938 pulg.) sin incluir ningún margen de corrosión. (ASME, Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 2 Alternative Rules, 2010)

Por lo anterior descrito se asumirá un espesor de 4 mm, el cual incluye un margen de corrosión de 1,5 mm.

Según la norma ASME 2010 Sección VIII División II Rules for Construction of Pressure Vessels el cálculo de cabezas tori esféricas se lo realizará bajo el siguiente procedimiento:

1. Se determina el diámetro interior, D, y se asume valores para el radio de la corona, L, el radio de la articulación, r, y el espesor de la pared t.
 - D: Diámetro interior 362 mm.
 - L: Radio de la corona 362 mm.
 - r: Radio de la articulación 22,2 mm.
 - t: espesor de la pared 4 mm.

Figura 11*Geometría de la cabeza toriesférica*

Nota. Valores geométricos para el cálculo del espesor de la cabeza toriesférica.

Tomado de (ASME, Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 2 Alternative Rules, 2010)

2. Se calcula las relaciones geométricas de cabeza toriesférica L/D , r/D y L/t y se determina si satisfacen las siguientes ecuaciones. Si satisfacen las ecuaciones, se continua con el Paso 3; de lo contrario, la cabeza se diseñará de acuerdo con la Parte 5 del ASME Sección VIII Div. 2.

$$0,7 \leq \frac{L}{D} \leq 1,0 \quad (60)$$

$$\frac{r}{D} \geq 0,060 \quad (61)$$

$$20 \leq \frac{L}{t} \leq 2000 \quad (62)$$

- Relación $\frac{L}{D} = 1$
- Relación $\frac{r}{D} = 0.061$
- Relación $\frac{L}{D} = 90.5$

3. Se calcula las siguientes constantes geométricas:

$$\beta_{th} = \arccos \left[\frac{0.5D-r}{L-r} \right] = 1,085 \text{ rad} \quad (63)$$

$$\phi_{th} = \frac{\sqrt{Lt}}{r} = 1,714 \text{ rad} \quad (64)$$

$$\phi_{th} \geq \beta_{th} \rightarrow R_{th} = 0,5D = 181 \text{ mm} \quad (65)$$

4. Se calcula los coeficientes C1 y C2 usando las siguientes ecuaciones.

$$\frac{r}{D} \leq 0,08 \rightarrow C_1 = 9.31 \left[\frac{r}{D} \right] - 0,086 = 0.485 \quad (66)$$

$$C_2 = 1,25 \quad (67)$$

- C_1 : constante de ángulo utilizada en el cálculo de la altura toriesférica.
- C_2 : constante de ángulo utilizada en el cálculo de la altura toriesférica.

5. Se calcula el valor de la presión interna, con la cual se espera que produzca un pandeo elástico en el nudillo P_{eth} indicado en la ecuación (68).

$$P_{eth} = \frac{C_1 E_T t^2}{C_2 R_{th} \left[\frac{R_{th}}{2} - r \right]} = 97,912 \text{ MPa} \quad (68)$$

- E_T : módulo de elasticidad a la temperatura máxima de diseño 195 GPa; Tabla TM-1 (ASME, Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D Properties Materials, 2010).
- R_{th} : radio utilizado en el cálculo de la altura toriesférica 181 mm.

6. Se calcula el valor de la presión interna que resultará en un esfuerzo máximo en el nudillo igual al límite elástico del material P_y indicado en la ecuación (70).

$$C_3 = S \quad (69)$$

$$P_y = \frac{C_3 t}{C_2 R_{th} \left[\frac{R_{th}}{2r} - 1 \right]} = 0,655 \text{ MPa} \quad (70)$$

- C_3 : parámetro de resistencia utilizado en el cálculo de la altura toriesférica 114 MPa.

7. Se calcula el valor de la presión interna que se espera que resulte en una falla por pandeo del nudillo P_{ck} indicado en la ecuación (73).

$$G = \frac{P_{eth}}{P_y} = 149,461 \quad (71)$$

$$G > 1 \quad (72)$$

$$P_{ck} = \left(\frac{0,77508G - 0,20354G^2 + 0,019274G^3}{1 + 0,19014G - 0,089534G^2 + 0,0093965G^3} \right) P_y = 2.91 MPa \quad (73)$$

- G : constante utilizada en el cálculo de la altura toriesférica.

8. Se calcula la presión permitida basándose en una falla por pandeo del nudillo P_{ak} .

$$P_{ak} = \frac{P_{ck}}{1,5} = 0,89 MPa \quad (74)$$

9. Se calcula la presión permitida en función de la rotura de la corona.

$$P_{ac} = \frac{2SE}{\frac{L}{t} + 0,5} = 2,505 MPa \quad (75)$$

10. Se calcula la presión interna máxima permitida.

$$P_a = \min[P_{ac}; P_{ak}] = 0,89 MPa \quad (76)$$

11. Si la presión interna permitida calculada a partir del PASO 10 es mayor que la presión de diseño $P_d = 379,212 kPa$, entonces el diseño está completo.

Por lo tanto, el espesor del recipiente y las tapas toriesféricas, incluyendo un margen de corrosión de 1,5 mm, será de $t = 4 mm$.

Cálculo y diseño mecánico del reservorio

Los requerimientos para el diseño del reservorio son:

- Diámetro Nominal de 150 mm
- Presión de operación 22 psi (151,685 kPa).
- Material ASTM A106 de una tubería sin costura

Según la norma ASME 2010 Sección VIII División I para recipientes de baja presión interna, la fórmula para determinar el espesor del cuerpo es:

$$t = \frac{P * R}{SE - 0.6P} + CA \quad (77)$$

Para:

E: eficiencia de la junta, se considera E=1 para material sin costuras (vea ASME SECCION VII UW-12).

P: presión de trabajo admisible (vea ASME SECCION VIII UG – 21).

S: esfuerzo máximo admisible del material es 205 MPa (ASME SECCION II).

R: radio interior del cilindro 75 mm.

CA: margen mínimo para corrosión de 1,5mm (vea ASME SECCION VIII UG – 25).

Reemplazando los parámetros en la ecuación (77), obtenemos que el espesor mínimo del cuerpo es $t = 1,556 \text{ mm}$.

Para calcular el espesor de las tapas de cabeza plana utilizamos siguiente fórmula (ver en UG-34).

$$t = d\sqrt{CP/SE} \quad (78)$$

Para:

d: diámetro interno, 150 mm.

C: factor de fijación de la cabeza.

E: eficiencia de la junta, se considera $E=0.8$ para material sin costuras (vea ASME SECCION VII UW-12).

P: presión de trabajo admisible (vea ASME SECCION VIII UG – 21).

S: esfuerzo máximo admisible del material es 205 MPa (ASME SECCION II).

CA: margen mínimo para corrosión de 1,5mm (vea ASME SECCION VIII UG – 25).

Reemplazando los parámetros en la ecuación (78), se obtiene un espesor mínimo para las tapas planas de $t = 3,481 \text{ mm}$.

Análisis térmico del caldero

Este análisis nos permite asegurar el correcto comportamiento térmico del caldero con el entorno exterior, puesto que el caldero deberá estar aislado térmicamente para minimizar las pérdidas energéticas hacia el ambiente, a su vez, evitar posibles quemaduras por contacto en la superficie.

Las temperaturas de superficie para prevenir quemaduras deben estar entre 40°C y 60°C . (PROCOEN, 2021)

Cálculo del radio crítico

Para el aislamiento térmico se utilizará lana de roca de 2 cm de espesor con un coeficiente de conducción térmico de $0,042 \text{ W/mK}$, el cual es de fácil adquisición en el mercado nacional.

Se calcula el coeficiente de convección de la superficie externa del caldero, por lo cual se necesita calcular la temperatura promedio entre T_s y T_{oo} , el valor calculado servirá para encontrar las propiedades del aire.

$$T_{pro} = \frac{T_{s2} + T_{\infty}}{2} = \frac{318 + 298}{2} = 308K$$

Con el valor calculado encontramos los parámetros necesarios mediante la interpolación lineal utilizando la Tabla A-4 de Incropera.

- α : difusividad térmica $23,684 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- ν : viscosidad cinemática $16,965 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- k : coeficiente de conducción térmica 0.042 W/mK
- Pr: número de Prandtl 0,7058
- β : coeficiente de expansión térmica volumétrica 0.003246 K^{-1}
- g : gravedad $9,8 \text{ m/s}^2$

Cálculo del número de Rayleigh.

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_s - T_{\infty})D^3}{\alpha\nu}$$

$$Ra_D = \frac{9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] (0,0032456 \text{ [K}^{-1}\text{]}) (308 \text{ [K]} - 25 \text{ [K]}) (0,476 \text{ [m]})^3}{16,965 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \times 16,965 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}$$

$$Ra_D = 2,712 \times 10^{-8}$$

Cálculo del número Grashof

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_{s2} - T_{\infty})L_c^3}{\nu^2} = 1,28 \times 10^{10}$$

$$Gr_L = \frac{9,81 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \cdot 0,0032456 \text{ [K}^{-1}\text{]} \cdot (308 \text{ [K]} - 25 \text{ [K]}) (0,546 \text{ [m]})^3}{\left(16,965 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)^2}$$

$$Gr_L = 5,8498 \times 10^8$$

Condición para tratar al cilindro vertical como placa vertical

$$D \geq \frac{35L}{Gr_L^4}$$

$$D \geq \frac{35 \times (476 \text{ [mm]})}{5,8498 \times 10^8}$$

$$476 \text{ mm} \geq 123.108 \text{ mm}$$

Por lo tanto, se puede tratar como placa vertical.

Cálculo del número Nusselt

$$Nu = \left\{ 0,85 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = \left\{ 0,85 + \frac{0.387 (2,712 \times 10^8)^{1/6}}{[1 + (0.492/0,7058)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = 82.348$$

Cálculo del coeficiente de convección natural entre el caldero y el ambiente.

$$h = \frac{kNu}{D}$$

$$h = \frac{0,042 \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \times 82,348}{0,476 m}$$

$$h = 7,27 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Cálculo del radio crítico:

$$r_{cr} = \frac{k}{h}$$

$$r_{cr} = \frac{0,042 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]}{7,27 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]}$$

$$r_{cr} = 5,78 \text{ mm}$$

En consecuencia, se puede aislar los tubos de agua caliente o de vapor con libertad, sin preocuparnos por la posibilidad de aumentar la transferencia de calor por el aislamiento. (Çengel & Afshin, 2011)

Cálculo del espesor para el aislante del caldero

Como se eligió un espesor de aislante de 2 cm vamos a utilizar el método de analogía eléctrica, el cual es la suma de las resistencias en serie, para determinar el flujo de calor desde el interior de la caldera hasta la superficie externa.

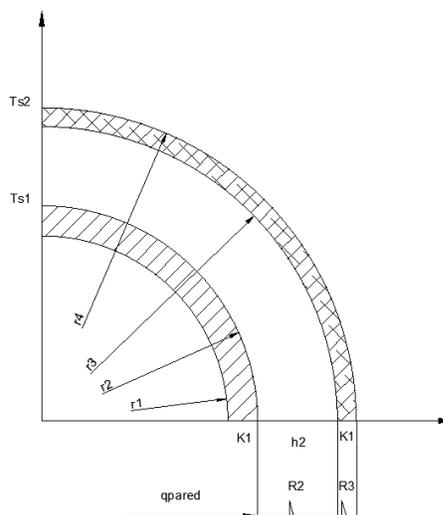
$$Q_{pared} = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{R_{total}} \quad (79)$$

Se puede deducir que:

$$T_{s2} = T_{s1} - Q_{pared} R_{total} \quad (80)$$

Figura 12

Diagrama de cuerpo libre de la analogía eléctrica



Donde:

- r_1 : radio interno del recipiente de la caldera 181 mm.

- r_2 : radio externo del recipiente de la caldera 185 mm.
- r_3 : radio externo del bafle 218 mm.
- T_{s1} : temperatura superficial exterior de la caldera 150°C o 423 K.
- h_3 : coeficiente de convección de gas $10 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$.
- k_{aislante} : coeficiente de conducción térmica de la lana de roca: $0,042 \left[\frac{W}{mK} \right]$

Resistencia total según la analogía eléctrica desde la superficie del recipiente hasta la superficie externa de la caldera.

$$R_{total} = \frac{1}{2\pi r_3 L_{cuerpo} h_2} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi L_{cuerpo} k_{\text{aislante}}} \quad (81)$$

$$R_{total} = \frac{1}{2\pi(0,185 [m])(0,546 [m]) \left(10 \left[\frac{W}{m^2K}\right]\right)} + \frac{\ln\left(\frac{0,238}{0,218}\right)}{2\pi(0,546 [m]) \left(0,042 \left[\frac{W}{mK}\right]\right)}$$

$$R_{total} = 0,742 \left[\frac{k}{W} \right] \quad (82)$$

Donde la temperatura en la superficie externa es:

$$T_{s2} = T_{s1} - Q_{pared} R_{total} \quad (83)$$

$$T_{s2} = 423 K - 290.649 W \cdot 0,742 \left[\frac{k}{W} \right] \quad (84)$$

$$T_{s2} = 315,236 [k] = 42,236^\circ\text{C}$$

La temperatura de superficie externa calculada es de $42,236^\circ\text{C}$ valor aceptable para el correcto funcionamiento térmico del caldero. Por lo tanto, el espesor del aislante térmico fue el correcto.

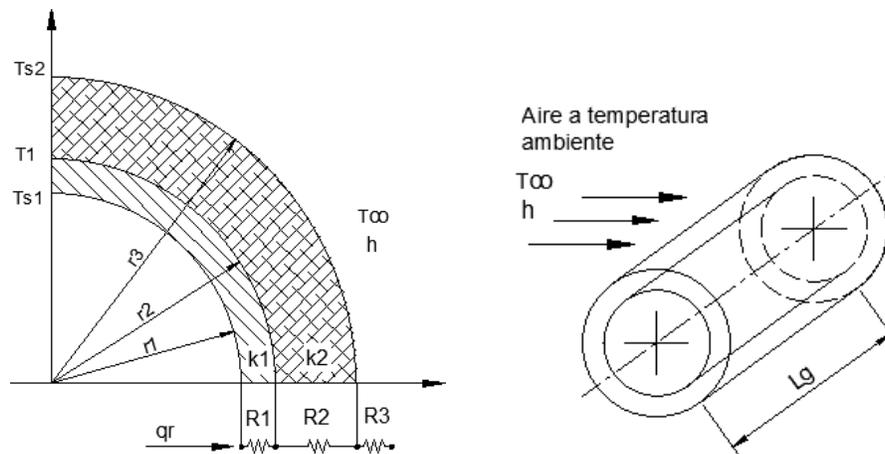
Cálculo del revestimiento para el reservorio de vapor

Para el reservorio de vapor se utilizará una tubería sin costura, la cual tiene un espesor de pared de 5,5 mm, un diámetro externo de 164 mm y un diámetro interno de 153 mm. En la Figura 13, muestra el diagrama de cuerpo libre de la sección del

reservorio de vapor que servirá para identificar los parámetros y variables que intervienen en el cálculo del espesor del revestimiento.

Figura 13

Diagrama de cuerpo libre del reservorio de vapor



Donde:

r_1 : radio interno de la tubería 0,077 m.

r_2 : radio externo de la tubería 0,084 m.

r_3 : radio externo hasta el exterior

T_{s1} : temperatura superficial interior 114°C o 387 K.

T_1 : temperatura intermedia 113°C o 387 K.

T_{s2} : temperatura superficial exterior 45°C o 318 K.

T_{∞} : temperatura ambiente de 20°C o 293 K.

K_1 : coeficiente de conducción del acero 52 [W/mK].

K_2 : coeficiente de conducción lana de roca 0,036 [W/mK]

R_1 : resistencia térmica de conducción en el acero.

R_2 : resistencia térmica de conducción en el revestimiento.

R_3 : resistencia térmica de convección entre la superficie externa y el ambiente.

L: longitud del cilindro 32 cm.

q_r : transferencia de energía del interior al exterior.

h: coeficiente de convección entre la superficie externa y el ambiente.

Conociendo que la transferencia de calor sucede desde el interior del reservorio hacia el ambiente, utilizamos siguiente ecuación.

$$q_r = \frac{(T_{s1} - T_{\infty})}{R_T} \quad (85)$$

También se conoce que el calor desde T_{s1} a T_1 va ser igual a calor desde T_1 a T_{s2} y al calor desde T_{s2} a T_{∞} .

$$Q_{T_{s1}-T_1} = Q_{T_1-T_{s2}} = Q_{T_{s2}-T_{\infty}} \quad (86)$$

Donde

$$Q_{T_{s1}-T_1} = \frac{T_{s1} - T_1}{R1}; \quad Q_{T_1-T_{s2}} = \frac{T_1 - T_{s2}}{R2}; \quad Q_{T_{s2}-T_{\infty}} = \frac{T_{s2} - T_{\infty}}{R3} \quad (87)$$

Respectivamente cada resistencia será igual a:

$$\begin{aligned} R1 &= \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi * L * k_{acero}}; \quad R2 = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi * L * k_{lanavidrio}}; \quad R3 \\ &= \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi * h * r_3 * L} \end{aligned} \quad (88)$$

Se igualan $Q_{T_{s1}-T_1} = Q_{T_1-T_{s2}}$ para despejar el valor de r_3 .

$$\frac{T_{s1} - T_1}{R1} = \frac{T_1 - T_{s2}}{R2} \quad (89)$$

$$\frac{T_{s1} - T_1}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi * L * k_{acero}}} = \frac{T_1 - T_{s2}}{\frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi * L * k_{lanavidrio}}} \quad (90)$$

$$\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) = \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) * \frac{k_{lanavidrio}}{k_{acero}} * \frac{(T_1 - T_{s2})}{(T_{s1} - T_1)} \quad (91)$$

$$\ln(r_3) = \ln(r_2) + \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) * \frac{k_{\text{lanavidrio}}}{k_{\text{acero}}} * \frac{(T_1 - T_{s2})}{(T_{s1} - T_1)} \quad (92)$$

$$r_3 = e^{\left[\ln(r_2) + \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) * \frac{k_{\text{lanavidrio}}}{k_{\text{acero}}} * \frac{(T_1 - T_{s2})}{(T_{s1} - T_1)}\right]} \quad (93)$$

Conociendo los valores de las variables de la ecuación (93) despejamos r_3 y se obtiene un valor de 100.70 mm, el cual servirá para encontrar el espesor de revestimiento, se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$e = r_3 - r_2 \quad (94)$$

$$e = (100,70 - 84) = 16,7\text{mm} \quad (95)$$

El espesor de aislamiento e requerido para obtener una temperatura en la superficie del reservorio de 45°C es 16,7mm, por fines comerciales se utilizará un espesor de 20 mm.

Cálculo y Diseño del Bastidor

La estructura del bastidor deberá ser capaz de resistir las cargas de todos los componentes del banco de pruebas, para lo cual se usarán criterios del AISC 360-10, 2010, Specification for Structural Steel Buildings.

Descripción general

El bastidor tendrá las siguientes dimensiones:

- Longitud: 2000 mm.
- Ancho: 326 mm.
- Alto: 900 mm.

El banco de pruebas está conformado por:

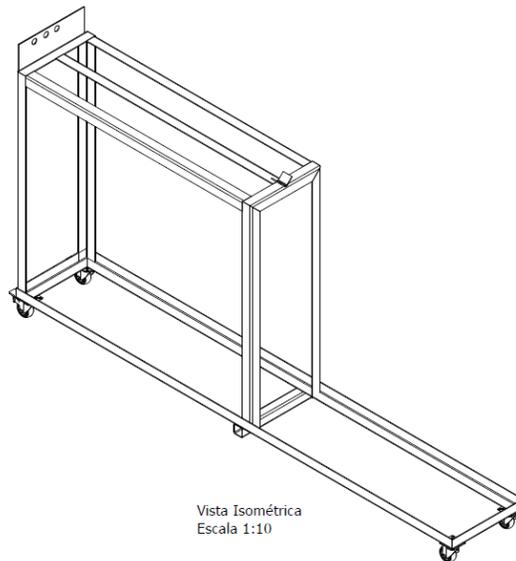
- Caldera con un peso de 80 kg.

- Reservorio de vapor 9,13 kg.
- Bomba de agua de 0,5 hp con un peso de 5,5 kg.
- Barras de bronce, acero y cobre con un peso total de 7,32kg.

Para las consideraciones de diseño se establecerá el análisis del bastidor con cargas muertas y cargas vivas.

Figura 14

Isométrico del bastidor



Nota. Elaboración propia en conjunto con AutoCAD (Autodesk Inc, 2021)

Cargas de Diseño

Cargas muertas

Además del peso propio de los perfiles que conforman el bastidor se estableció las siguientes cargas muertas:

- Caldera con un peso de 80 kg

La caldera cuenta con 4 soportes, la cual va a estar anclada al extremo del bastidor, por lo tanto se considerará 4 puntos de apoyo para el análisis, es decir:

$$C_{pnt} = \frac{80}{4} [kg] = 20 [kg]$$

C_{pnt} : Carga puntual del caldero

- Reservoirio de vapor de 9,13 kg.

El reservoirio de vapor se encuentra a lo largo de una viga de 326 mm de longitud, por lo tanto se considera como carga distribuida a lo largo de la viga.

$$C_{d1} = \frac{9,13}{326} \left[\frac{kg}{mm} \right] = 0,028 \left[\frac{Kg}{mm} \right]$$

C_{d1} : Carga distribuida reservoirio de vapor.

- Bomba de agua periférica de 0,5 hp con un peso de 5,5 kg.

La bomba periférica se encuentra a lo largo de una viga de 326 mm de longitud, por lo cual la carga distribuida a lo largo de la viga será:

$$C_{d2} = \frac{5,5}{326} \left[\frac{kg}{mm} \right] = 0,01 \left[\frac{Kg}{mm} \right]$$

C_{d2} : Carga distribuida de la bomba de agua periférica.

- Barras de bronce, acero y cobre con un peso total de 7,32kg.

$$C_{d3} = \frac{7,32}{2 \cdot 326} \left[\frac{kg}{mm} \right] = 0,01 \left[\frac{Kg}{mm} \right]$$

C_{d2} : Carga distribuida de las barras.

Cargas Vivas

- Bomba de agua periférica de 0,5 hp con un peso de 5,5 kg.

El peso de la maquinaria se deberá incrementar un 20 por ciento para maquinaria ligera accionada por motor, como es el caso de la bomba periférica presentes en el Bastidor. (ASCE, 2010, pág. 14) .

$$C_{dv2} = \frac{5,5 \cdot 1,2}{326} \left[\frac{kg}{mm} \right] = 0,02 \left[\frac{Kg}{mm} \right]$$

C_{dv2} : Carga viva distribuida de la bomba de agua periférica.

Combinaciones de carga

Para el análisis del bastidor se ha considerado las combinaciones de carga por el criterio optimista LRFD (Load Resistance and Factor Design). Donde se usará la siguiente combinación para el análisis de deflexiones.

$$1,2D + 1,6L + 0,5 \tag{96}$$

Análisis y diseño

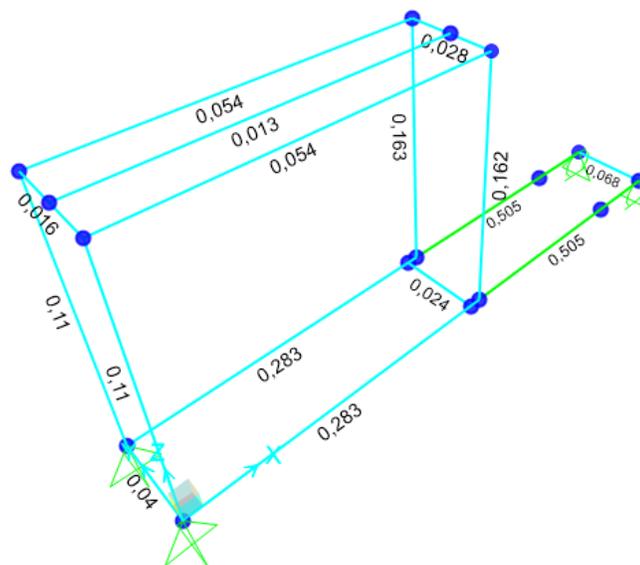
Para el análisis computacional del bastidor se ha considerado las conexiones a momento entre todos los componentes estructurales.

Análisis demanda capacidad

El análisis demanda capacidad se realizó utilizando las cargas de diseño anteriormente establecidas.

Figura 15

Análisis demanda capacidad del bastidor



Nota. Los miembros estructurales que poseen un valor mayor de relación demanda capacidad se encuentran en la ubicación del caldero.

Análisis de deflexiones

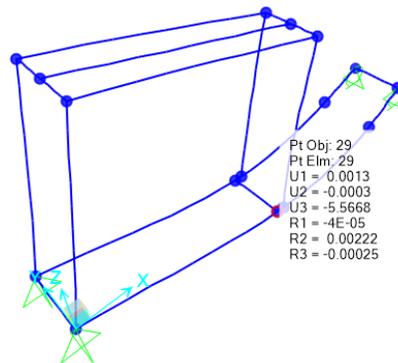
Según la norma AISC 360, 2010, Specification for Structural Steel Building la deflexión máxima permisible considerada para el bastidor deberá cumplir el siguiente criterio:

$$\Delta L_{max} = \frac{L}{360} \quad (97)$$

$$\Delta L_{max} = 5,6 \text{ mm}$$

Figura 16

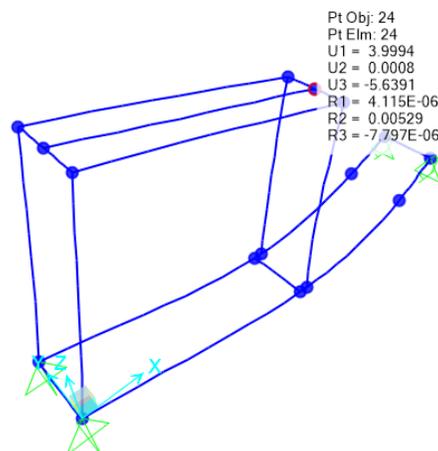
Análisis de deflexión en la ubicación de la bomba periférica



Nota. La deflexión máxima para esta localización es de 5,56 mm; se encuentra dentro de lo permitido.

Figura 17

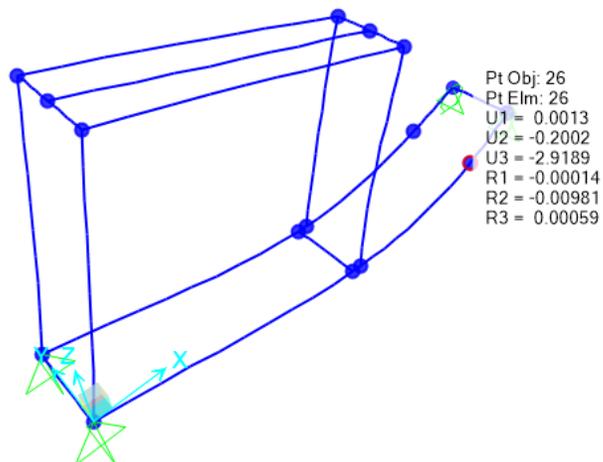
Análisis de deflexión en la ubicación del reservorio de vapor



Nota. La deflexión máxima para esta localización es de 5,6 mm; se encuentra dentro de lo permitido.

Figura 18

Análisis de deflexión en la ubicación de la caldera



Nota. La deflexión máxima para esta localización es de 2,9 mm; se encuentra dentro de lo permitido.

Selección de las garruchas

Para la selección de las garruchas se debe conocer la carga que estas van a soportar, es decir, el peso total del equipo.

Donde:

$$Peso_{total} = P_{caldero} + P_{reservorio} + P_{bomba} + P_{barras} + P_{bastidor} \quad (98)$$

$$Peso_{total} = 80 [kg] + 9,13 [kg] + 5,5 [kg] + 7,32 [kg] + 22,65 [kg]$$

$$Peso_{total} = 124,6 [kg]$$

La carga mínima que debe soportar cada garrucha será:

$$Peso_{garruchas} = \frac{Peso_{total}}{4} \quad (99)$$

$$Peso_{garruchas} = \frac{124,6 [kg]}{4} = 31,15 kg$$

Cada garrucha deberá ser capaz de soportar un peso mínimo de 31,15 kg.

Según el catálogo de ruedas y garruchas industriales seleccionamos la de 2 ½ pulgada, puesto que tiene una capacidad de carga de 70 kg.

Figura 19

Garruchas industriales serie 04



Nota. Tomado del catálogo de Ruedas y Garruchas Industriales

Selección de los materiales para las barras cilíndricas

En cuanto a la selección de los materiales para las barras cilíndricas se tendrá en cuenta la conductividad térmica propia de cada material, ya que uno de los propósitos del proyecto es determinar la distribución de temperaturas en las barras. Otros criterios son la disponibilidad en el mercado, maquinabilidad y el costo.

Para este proyecto se consideró tres metales diferentes que son: cobre electrolítico, bronce dulce (latón) y acero de transmisión AISI 1018, con conductividad térmica alta, media y baja respectivamente.

El cobre electrolítico o cobre puro tiene una excelente conductividad térmica, de fácil conformado y buena resistencia a la corrosión.

El bronce dulce más conocido como latón es una aleación entre cobre y zinc, entre sus características se encuentra la buena maquinabilidad, alta resistencia a la corrosión y buena conductividad térmica.

El acero de transmisión AISI 1018 es un acero de bajo carbono, el más común del acero, muy útil por sus características mecánicas tiene buena ductilidad, soldabilidad, maquinabilidad y posee baja conductividad térmica.

Tabla 3

Conductividad térmica de los materiales

Material	Conductividad Térmica (W/m.K)
Cobre electrolítico	401
Bronce dulce (latón)	110
Acero de transmisión 1018	52

Nota. Los datos fueron tomados de la Tabla A-3 del libro Transferencia de calor y masa de (Çengel & Afshin, Transferencia de Calor y Masa Fundamentos y Aplicaciones, 2011).

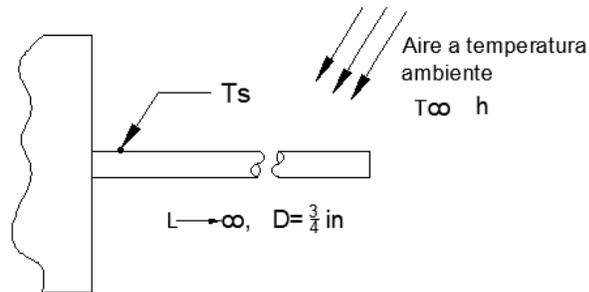
Los valores de conductividad térmica de la Tabla 3 serán utilizados para realizar los cálculos posteriores.

Cálculo del coeficiente de convección entre barras - ambiente

Se tomarán en cuenta varios parámetros mostrados en la Figura 20, previos a realizar el cálculo del coeficiente de convección.

Figura 20

Representación de una barra empotrada.



Para determinar la temperatura superficial de las barras, se realizará un promedio entre la temperatura esperada al inicio de la barra con la temperatura esperada al final de la barra en grados kelvin.

$$T_s = \frac{(384 + 293)K}{2} = 338,5 K$$

Posteriormente es necesario calcular una temperatura promedio entre T_s y T_{∞} , el valor calculado servirá para encontrar en tablas las propiedades del aire.

$$T_{pr} = \frac{(338,5 + 293)K}{2} = 315,75$$

Con el valor de temperatura promedio podemos encontrar varios parámetros mediante la interpolación lineal utilizando la Tabla A-4 de Incropera.

- α : difusividad térmica $24,83 \times 10^{-6} m^2/s$
- ν : viscosidad cinemática $17,49 \times 10^{-6} m^2/s$
- k : coeficiente de conducción térmica $27,47 \times 10^{-3} W/mK$
- Pr: número de Prandtl 0,705
- β : coeficiente de expansión térmica volumétrica $0,00316K^{-1}$
- g : gravedad $9,8 m/s^2$

Para encontrar el valor del coeficiente de convección se utilizará una correlación empírica para el número promedio de Nusselt, previamente se requiere realizar el cálculo del número de Rayleigh.

$$Ra_D = \frac{g\beta(T_S - T_\infty)D^3}{\alpha\nu} = 2,25 \times 10^4$$

Posteriormente se calcula el número promedio de Nusselt para un cilindro horizontal, el cual cumple con la restricción de $Ra_D \leq 10^{12}$.

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 = 8,896$$

Una vez calculada el número de Nusselt, despejamos la correlación empírica para encontrar el coeficiente de convección natural entre barras y ambiente (h).

$$h = \frac{kNu}{D} = 12,82 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

Determinación de la longitud óptima para las barras

Considerando el caso de una aleta sin pérdida de calor en su extremo podemos utilizar la ecuación (47) despejando (L) para determinar la longitud óptima de la aleta.

$$L = 2,3 * \left(\frac{K * D}{4 * h} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (100)$$

Reemplazando los valores de coeficiente de conducción, diámetro de la barra y coeficiente de convección calculado, obtenemos:

$$L_{Cu} = 2,3 * \left(\frac{401 \left[\frac{W}{mK} \right] * 0,019[m]}{4 * 12,82 \left[\frac{W}{m^2K} \right]} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,88m$$

$$L_{Ac} = 2,3 * \left(\frac{52 \left[\frac{W}{mK} \right] * 0,019[m]}{4 * 12,82 \left[\frac{W}{m^2K} \right]} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,32m$$

$$L_{bronce} = 2,3 * \left(\frac{110 \left[\frac{W}{mK} \right] * 0,019[m]}{4 * 12,82 \left[\frac{W}{m^2K} \right]} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,46m$$

Tomando en cuenta que no hay pérdida de calor en el extremo de una barra infinitamente larga podemos utilizar la condición de aleta adiabática para sección transversal uniforme, donde la transferencia de calor es igual a $qf = M \tanh mL$ y comparar con el caso de una barra infinita $qf = M$.

$$qf = M \tanh mL = M \quad (101)$$

$$\tanh mL = 1 \quad (102)$$

$$mL = \operatorname{arctanh}(1) \quad (103)$$

Encontramos que $\operatorname{arctanh}(1)$ es indeterminado. Por lo tanto, para encontrar un valor aproximado de mL la función deberá calcularse con números mayores que -1 y menores que 1.

$$\tanh mL \geq 0,99$$

$$mL \geq \operatorname{arctanh}(0,99)$$

$$mL \geq 2,65$$

$$L \geq \frac{2,65}{m} \quad (104)$$

Donde $m = \left(\frac{4h}{KD} \right)^{1/2}$ tenemos que

$$L_{\infty} \geq 2,65 * \left(\frac{KD}{4h} \right)^{1/2} \quad (105)$$

$$L_{\infty Cu} = 2,65 * \left(\frac{401 \left[\frac{W}{mK} \right] * 0,019[m]}{4 * 12,82 \left[\frac{W}{m^2K} \right]} \right)^{\frac{1}{2}} = 1,02m$$

$$L_{\infty Ac} = 2,65 * \left(\frac{52 \left[\frac{W}{mK} \right] * 0,019[m]}{4 * 12,82 \left[\frac{W}{m^2K} \right]} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,37m$$

$$L_{\infty bronze} = 2,65 * \left(\frac{110 \left[\frac{W}{mK} \right] * 0,019[m]}{4 * 12,82 \left[\frac{W}{m^2K} \right]} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,53m$$

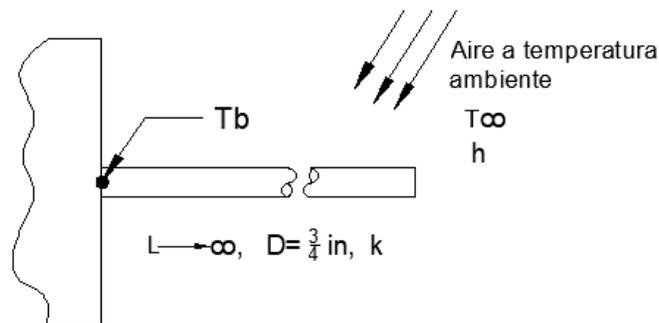
Para fines experimentales se utilizarán barras de un metro de longitud de cada material, se instalará diez termocuplas distribuidas uniformemente a lo largo de la barra.

Determinación de pérdida de calor en las barras

Para determinar la pérdida de calor en las barras cilíndricas de longitud uniforme de cobre, acero y bronce es necesario tener los parámetros mostrados en la siguiente figura:

Figura 21

Esquema de barra empotrada en la base



Donde:

D : diámetro para cada barra será de $\frac{3}{4}$ pulgadas.

T_b : temperatura de base 110°C .

T_{∞} : temperatura ambiente 20°C .

T_s : temperatura de superficie de la barra.

h_1 : coeficiente de convección aire – barras 12,82[W/m²k].

K_{cu} : coeficiente de conducción para el cobre 401 [W/mK].

K_{ac} : coeficiente de conducción para el acero 52 [W/mK].

K_{lat} : coeficiente de conducción para el bronce 110 [W/mK].

Los datos para coeficiente conducción de calor fueron tomados de las Tablas A-3 del libro transferencia de calor y masa de (Çengel & Afshin, Transferencia de Calor y Masa Fundamentos y Aplicaciones, 2011).

Considerando la condición de una aleta infinita, donde la transferencia de calor será igual a:

$$q_f = M = \sqrt{hPKA} \theta_b = \sqrt{h\pi DK \frac{\pi D^2}{4}} (T_b - T_\infty) = \frac{\pi}{2} \sqrt{hD^3K} (T_b - T_\infty) \quad (106)$$

Reemplazando los parámetros de las temperaturas, h y k para cada material en (106) obtenemos los siguientes valores:

$$q_{f_{cu}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{12,82 \left[\frac{W}{m^2K} \right] * 0,019^3 [m^3] * 401 \left[\frac{W}{mK} \right]} (110^\circ K - 25^\circ K) = 25,07 [W]$$

$$q_{f_{ac}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{12,82 \left[\frac{W}{m^2K} \right] * 0,019^3 [m^3] * 52 \left[\frac{W}{mK} \right]} (110^\circ K - 25^\circ K) = 9,03 [W]$$

$$q_{f_{bronce}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{12,82 \left[\frac{W}{m^2K} \right] * 0,019^3 [m^3] * 110 \left[\frac{W}{mK} \right]} (110^\circ K - 25^\circ K) = 13,13 [W]$$

$$q_{f_{barras}} = q_{f_{cu}} + q_{f_{ac}} + q_{f_{bronce}} = 47,23 [W] \quad (107)$$

Pérdida de calor por convección en las barras

Una vez calculadas las longitudes podemos calcular la pérdida de calor por convección natural con la siguiente ecuación (7). Reemplazando los valores correspondientes para cada barra obtenemos:

$$q_{conv_{cu}} = 12,82 \left[\frac{W}{m^2 K} \right] * \pi * 0,019 [m] * 0,93[m] * (384 - 298)K = 61,20 [W]$$

$$q_{conv_{ac}} = 12,82 \left[\frac{W}{m^2 K} \right] * \pi * 0,019 [m] * 0,37[m] * (384 - 298)K = 24,34 [W]$$

$$q_{conv_{bronce}} = 12,82 \left[\frac{W}{m^2 K} \right] * \pi * 0,019 [m] * 0,33[m] * (384 - 298)K = 21,71 [W]$$

$$Q_{conv} = q_{conv_{cu}} + q_{conv_{ac}} + q_{conv_{bronce}} = 107,25 [W]$$

Dispositivos de control y operación del caldero

Para controlar la operación y el buen funcionamiento del caldero se va implementar un sistema de instrumentación con el fin de verificar el nivel de líquido dentro del caldero, la presión de trabajo y el encendido automático del quemador.

Sistema de encendido

La operación del caldero requiere una alimentación intermitente de fuego por medio de un quemador, que deberá ser controlado tal que se pueda encender o apagar según las condiciones preestablecidas en el presostato. Para la implementación se requiere de los siguientes equipos e instrumentos.

Control piloto intermitente de ignición

Los módulos de encendido permiten generar secuencias de encendido, monitoreo de llama y apagado de seguridad en equipos de calefacción industrial. Para

el control son necesarios otros instrumentos como electrodos de ignición e ionización, presostato, transformador y electroválvula.

Figura 22

Control de llama Honeywell



Presostato diferencial

El presostato es un dispositivo de control electromecánico que da apertura o cierre a un circuito eléctrico, por medio de la presión a la que se encuentra ajustada el dispositivo.

Figura 23

Presostato gauge safe



Válvula solenoide normalmente cerrada para combustible

La válvula solenoide es un dispositivo de control que da apertura y cierre a un fluido de trabajo, funciona con un impulso electromagnético y un resorte que devuelve la válvula a su posición inicial, este dispositivo normalmente cerrado dará apertura al fluido de trabajo cuando reciba la señal del control de ignición.

Figura 24

Electroválvula normalmente cerrada



Control de nivel del agua

Es de gran importancia el control del nivel de agua dentro del caldero para garantizar el buen funcionamiento del sistema de generación de vapor. Para el control de nivel de agua se realizará una conexión por medio de vasos comunicantes al caldero con un tubo bridado, en el cual se introducirán tres electrodos que censarán el nivel de agua, a su vez, controlarán el quemador, el encendido y apagado de la bomba de agua.

Figura 25

Control de nivel por vasos comunicantes y visor tipo mirilla



Interruptor de nivel

El interruptor de nivel permite verificar el nivel de agua dentro de un recipiente por medio de electrodos conductivos, si capta un descenso o ascenso en el nivel de agua se genera una señal eléctrica que cambia de estado al contacto del interruptor, permitiendo abrir o cerrar el paso de líquido.

Figura 26

Interruptores de nivel



El interruptor de nivel C61F-GP cuenta con 8 terminales, para alimentación del mismo, una conexión de las líneas que miden el nivel de líquido y un contacto abierto o cerrado para instalar una bomba de agua.

Selección de instrumentos para la adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos permitirá mostrar los valores de temperatura a lo largo de cada barra sólida de sección constante, con la finalidad de observar y determinar la longitud óptima a la que la temperatura de la barra se estabiliza con la temperatura ambiente.

Selección del microcontrolador

En el mercado nacional existen microcontroladores de diferentes marcas, según sus características técnicas se han considerado las siguientes opciones:

- Raspberry pi
- Arduino Mega 2560
- National Instruments NI USB6210

Se implementará una matriz de selección considerando factores relevantes para la implementación de nuestro proyecto.

Tabla 4

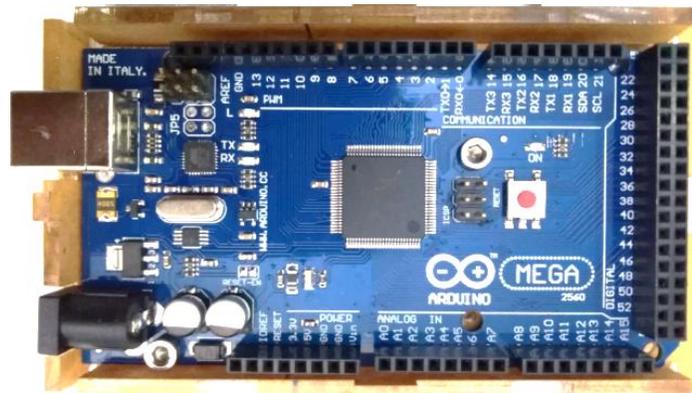
Matriz de selección del microcontrolador

Factores	Ponderación	Raspberry pi	Arduino Mega 2560	NI USB6210
Características técnicas	30%	10	9	9
Facilidad de programación	20%	7	8	7
Facilidad de conexión	20%	9	8	9
Disponibilidad comercial	10%	8	10	8
Precio	20%	6	10	8
Total	100%	8,2	8,9	8,3

De acuerdo con la matriz de selección de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se determinó al microprocesador Arduino mega como ideal para el proyecto.

Figura 27

Placa microcontrolador de Arduino Mega



El microcontrolador de Arduino es muy versátil para el control de procesos industriales de bajo costo, puede ser alimentado con voltajes entre (7-12) voltios, cuenta con 54 entradas digitales, 16 entradas análogas, una memoria flash de 256 kb y trabaja a una frecuencia de 16 MHz.

Selección del transductor de temperatura.

Un transductor permite detectar la temperatura de una superficie en contacto y transformarla en una señal eléctrica, las opciones compatibles con la placa microcontroladora Arduino y disponibles en el mercado nacional son:

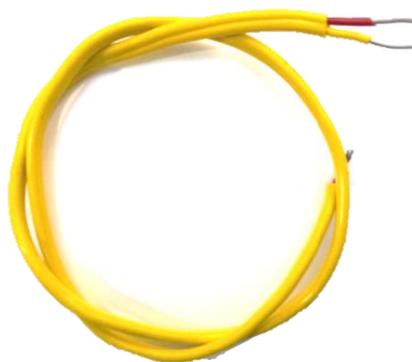
- Termopar tipo K
- Sensor LM35
- Sensor PT100

Se implementará una matriz de selección considerando factores relevantes para la implementación de nuestro proyecto.

Tabla 5*Matriz de selección transductor de temperatura*

Factores	Ponderación	Termocupla tipo K	LM 35	Pt 100
Temperatura de operación	20%	9	10	9
Precisión	30%	8	9	10
Protección, recubrimiento	30%	10	5	10
Disponibilidad comercial	10%	10	8	9
Precio	20%	10	10	7
Total	100%	9,3	8,6	9

De acuerdo con la matriz de selección, la termocupla tipo k cumple con los requerimientos necesarios.

Figura 28*Cable termopar tipo K*

Es un termopar de Cromel / Alumel, cable de una sola hebra calibre AGW 20, su precisión estándar es +/- 2.2 °C, tiene recubrimiento de PVC de acuerdo a norma ANSI

cable amarillo + y cable rojo –, la temperatura de trabajo es 105°C y su rango de medición esta entre 0 - 1260 °C.

Este sensor no tiene ningún acondicionamiento electrónico que cause gran dificultad para la adquisición de datos, ya que su señal se encuentra en la escala de micro voltios, por lo que requiere de un dispositivo de acondicionamiento. Por tal motivo se utilizará un convertidor analógico - digital como el MAX6675.

Figura 29

Módulo transmisor para termocupla Max6675



El módulo puede adaptarse a los microcontroladores Arduino mediante una conexión SPI (Serial Peripheral Interface), de bajo costo, su función es acondicionar una señal analógica de una termocupla a una señal digital, el rango de medida es de 0 a 1024 grados centígrados, tiene una resolución de 12 bits, 0,25 grados centígrados de apreciación, el tiempo de conversión máximo es de 0,22 segundos y su temperatura de trabajo se encuentra entre -20°C a 85°C.

Selección de la pantalla

Se requiere una pantalla compatible con el microcontrolador previamente seleccionado para visualizar la información de los sensores, dado la gran cantidad de sensores es necesario una pantalla con interfaz gráfica capaz de generar varias ventanas. En el mercado nacional existen pantallas que cumplen con las características ideales para el proyecto, las cuales son:

- Pantallas Tft
- Pantallas Nextion

Se implementará una matriz de selección considerando los factores relevantes para la implementación de nuestro proyecto.

Tabla 6

Matriz de selección pantalla

Factores	Ponderación	Pantalla Tft	Pantalla Nextion
Características técnicas	30%	9	10
Facilidad de montaje	10%	9	10
Diseño de interfaz gráfica	30%	7	10
Disponibilidad comercial	10%	9	9
Precio	20%	10	7
Total	100%	8,8	9,3

De acuerdo con la matriz de selección, la pantalla Nextion cumple con los requerimientos necesarios.

Figura 30

Pantalla touch Nextion



Pantalla tipo HMI para la interacción máquina – hombre, compatible con Arduino, de fácil conexión para cualquier serial TTL para Arduino, tiene una entrada para la tarjeta microSD para el ingreso del programa, funciona con alimentación de 5V y 500mA, su interfaz gráfica es de fácil programación.

Capítulo IV

Ingeniería de detalle

En este capítulo se detallará todas las especificaciones técnicas, como resultado del diseño de los componentes del banco de prueba móvil de barras cilíndricas de longitud infinita.

Especificaciones del banco de pruebas

El banco de pruebas de barras cilíndricas de longitud infinita se encuentra conformado por los siguientes componentes: la caldera de vapor, la línea de distribución de vapor con accesorios, el reservorio de vapor y el bastidor.

Especificaciones técnicas de la caldera

Las especificaciones técnicas de la caldera se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 7

Especificaciones Técnicas de la Caldera de Vapor

Componente	Característica
Capacidad:	88449 $\frac{kJ}{kg}$
Combustible:	Gas licuado de petróleo (GLP)
Presión de trabajo:	0 a 30 0 a <i>Psi</i>
Presión de diseño:	33 <i>Psi</i>
Consumo de Gas	0,213 $\frac{kg}{h}$
Peso neto	46 <i>kg</i>
Peso con agua a nivel	80 <i>kg</i>
Nivel de agua máximo	34 litros

Componente	Característica
Dimensión general	Diámetro: 478mm x longitud: 901 mm
Norma de fabricación	ASME, Boiler and Pressure Vessel Code
	Section VIII Division 2 Alternative Rules, 2010

Lista de materiales de la caldera

Tabla 8

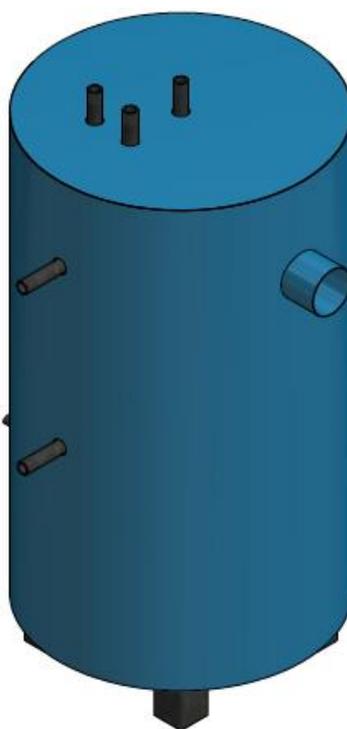
Lista de Materiales que la Caldera de Vapor

Componente	Descripción	Cantidad
Cuerpo del recipiente	Tubo, ASTM A36 Rolado en plancha de 4 mm	1
Cabeza toriesférica superior	4 mm, ASTM A36	1
Cabeza toriesférica Inferior	4 mm, ASTM A36	1
Boquilla de salida de vapor	Tubo, NPS 1/2", SCH40, ASTM A106	1
Boquilla del control de presión	Tubo, NPS 1/2", SCH40, ASTM A106	1
Boquilla de control de nivel	Tubo, NPS 1/2", SCH40, ASTM A106	2
Soporte del Recipiente	Perfil L50x3, ASTM A36	4
Boquilla de entrada de agua	Tubo, NPS 1/2", SCH40, ASTM A106	1
Baffle	Placa de 2 mm, ASTM A36	3
Anillo	Placa de 2 mm, ASTM A36	1
Boquilla de descarga del fluido	Tubo, NPS 1/4", SCH40, ASTM A106	1
Soporte del quemador	Perfil L40x3, ASTM A36	2
Recubrimiento interno	Plancha de aluminio 0,5 mm de espesor	1

Componente	Descripción	Cantidad
Recubrimiento externo	Plancha de aluminio 0,5 mm de espesor	1
Tapa del recubrimiento	Plancha de aluminio 0,5 mm de espesor	1
Aislante térmico	Lana de roca	1
Quemador	Quemador industrial, tipo hornilla	1

Figura 31

Isométrico de la caldera de vapor



Especificaciones técnicas del Bastidor

El bastidor móvil diseñado para colocar todos los dispositivos que conforman el banco de pruebas móvil.

Tabla 9*Especificaciones Técnicas del Bastidor*

Componente	Descripción
Peso neto:	22,65 kg
Dimensiones generales:	Largo: 2m - ancho: 326 mm - altura:1m
Soportes:	Garruchas 2 ½" y 70 kg de capacidad

Lista de materiales del bastidor**Tabla 10***Lista de Materiales del Bastidor*

Componente	Descripción	Cantidad
Estructura	Perfil L40x3 mm y Tubo cuadrado de 40x3mm	1
Placa de apoyo	Perfil L40x3x40mm	1
Soporte del reservorio	Perfil L40x3 mm	1
Soportes del bastidor	Garruchas 2 ½" con 70 kg de capacidad	4

El detalle de los planos y hojas de proceso para la fabricación de la caldera, reservorio de vapor, barras cilíndricas y el bastidor móvil se encontrarán en el Anexo D.

Diagrama eléctrico de control y operación del caldero

Para la operación del equipo se ha diseñado un control on/off que permite el funcionamiento autónomo mediante la conexión de relés de nivel, control de llama, electroválvula, presostato y contactores. A continuación, en la Tabla 11 se detalla los equipos e instrumentos utilizados.

Tabla 11*Equipo para la operación del caldero*

Equipo	Cantidad	Detalle
Control de llama	1	Permite el control de electroválvula y encendido de llama
Electroválvula	2	Electroválvulas normalmente cerradas permiten el paso de fluido siempre y cuando se energicen
Bomba de agua	1	Alimentación de agua hacia el caldero
Interruptores Relés de nivel	2	Controla el nivel de agua y encendido de bomba
Presostato	1	Permite el encendido y apagado de control de llama
Contactador	1	Permite contactos de potencia y de llama

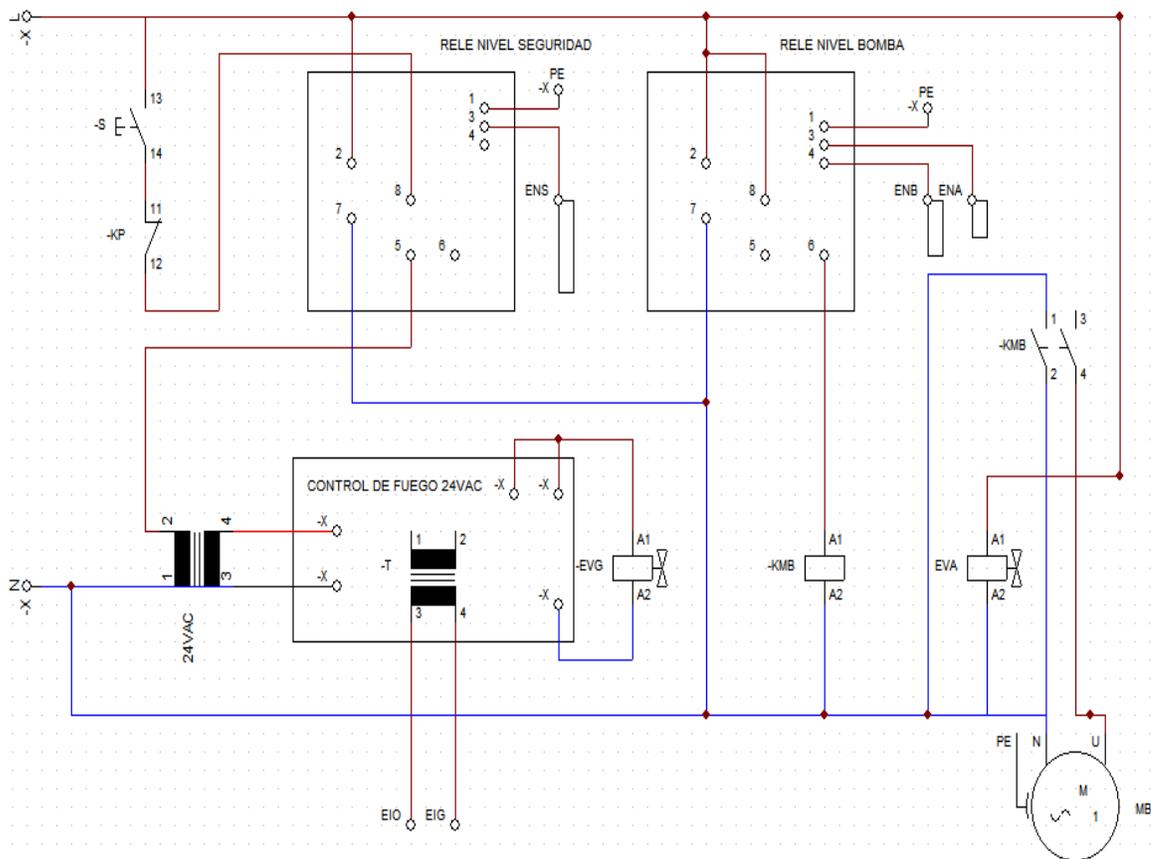
El control de nivel esta comandado por un electrodo seguridad, mediante el cual, un electrodo conductor (ENS) verifica el nivel en la cámara del vaso comunicante, si no existe líquido en la cámara se activa el relé de nivel de la bomba, activando la bomba y dando apertura a la electroválvula (EVA), con lo cual se llena el recipiente hasta recibir la señal del electrodo de nivel alta (ENA), a su vez, se desconecta el relé y se activa el control de fuego, dando apertura a la válvula solenoide de gas (EVG) y activando los electrodo de ignición e ionización (EIO).

Cuando el caldero llega a la presión de control de 30 psi en el presostato, se desconecta el control de fuego y se reactiva cuando la presión en el caldero descienda hasta 22 psi en el presostato.

Mientras el caldero este en operación, la bomba se activará siempre y cuando el nivel del fluido baje hasta el electrodo de nivel de baja (ENB).

Figura 32

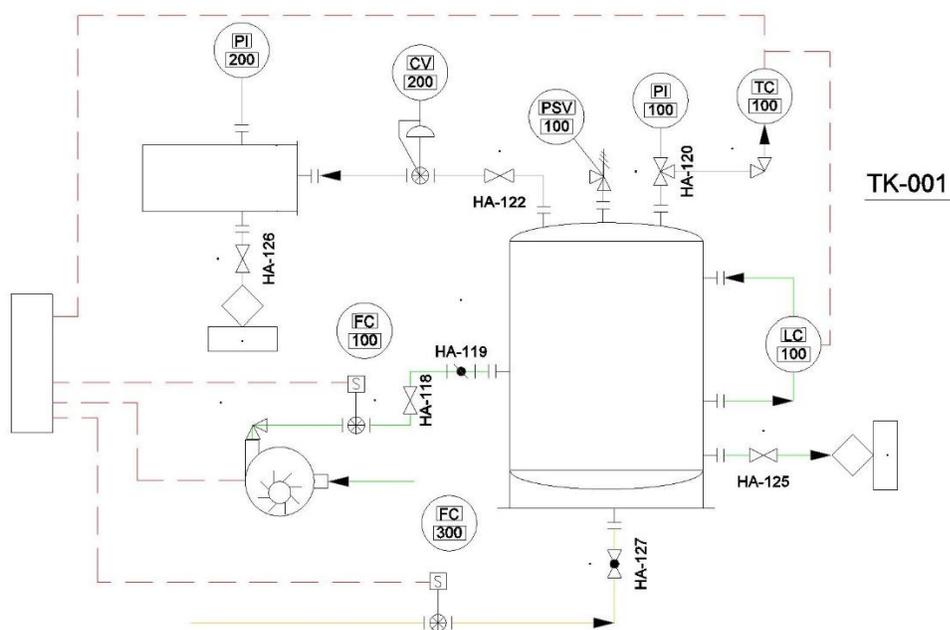
Diagrama eléctrico



Para la operación del caldero es necesario considerar algunos instrumentos como válvulas de seguridad, válvulas de apertura y de cierre de fluido entre otros, los cuales se detallan en la Tabla 12.

Tabla 12*Instrumentos para operación del caldero*

Instrumento	Cantidad	Detalles
Válvula de seguridad	1	Alivia la presión cuando el fluido supere un límite previamente establecido
Válvula reductora de presión	1	Regula el ingreso de vapor a la presión que se requiera
Manómetros	3	Permite visualizar la presión interna del caldero y reservorio
Válvula check		Permite el paso de flujo unidimensional de alimentación de agua
Mirilla de nivel	1	Permite ver el nivel de agua del recipiente
Válvula de bola	5	Válvula de apertura y cierre de flujo
Trampa de vapor	1	Válvula automática que filtra el condensado

Figura 33*Diagrama P&ID*

En la Figura 33 se observa el diagrama P&ID del banco de pruebas, donde se representa los distintos instrumentos utilizados para el control, operación del caldero y del reservorio de vapor.

Selección de materiales para la construcción reservorio de vapor

Para la construcción del reservorio de vapor se tomará en cuenta materiales de calibre estándar posterior al cálculo de espesores, realizado en la sección de diseño mecánico, los cuales deben ser fáciles de conseguir en nuestro país.

Tabla 13

Material requerido para la construcción del reservorio de vapor

Denominación	Cantidad	Detalles
Tubería	1	Material A106, Ø 150mm y espesor 5,5 mm
Tapas circulares	2	Material A36, Ø 160mm y espesor 10 mm
Neplos 1/4	2	Acero galvanizado
Neplo 1/2	1	Acero galvanizado
Fibra de vidrio	1	Aislante térmico

Requerimientos para la implementación del sistema de adquisición de datos

Se realizará un listado de los módulos electrónicos, instrumentos y materiales necesarios para la implementación de la adquisición de datos de temperatura en las barras cilíndricas, describiendo las características de cada uno.

Tabla 14

Material requerido para la implementación del sistema de adquisición de datos

Denominación	Cantidad	Detalles
Arduino Mega	1	Placa microcontroladora y protector
Módulo Max 6675	32	Convertidores de señal analógica a digital
Termocuplas	32	Termocuplas tipo K
Cajetín	1	Cajetín de metal
Pantalla	1	Display Nextion touch 4.3in
Cables	5	Paquetes de cables para conexión
Switch on-off	1	Botón de encendido y apagado
Led piloto	1	Led señal de encendido y apagado

En la Tabla 14 se muestra los materiales y la cantidad que se requiere para la implementación del sistema de adquisición de datos, tomando en cuenta que se necesita diez termocuplas distribuidas a lo largo de cada barra y se tiene tres barras de diferentes materiales.

Además, se requiere medir las temperaturas de la base de placa en el reservorio de vapor y la temperatura ambiente, por lo tanto se requieren un total de treinta y dos termocuplas. Todos estos sensores se conectarán en un Arduino Mega, incluyendo una pantalla touch que muestre los datos de temperatura.

Diagramas de conexión electrónicos para la adquisición de datos

La conexión de los módulos Max6675 y la placa Arduino Mega 2560 se realizará mediante el protocolo de comunicación SPI. La placa Arduino funcionará como un

dispositivo maestro, encargado de controlar otros dispositivos y los módulos Max6675 como dispositivos esclavos encargados de enviar información al dispositivo maestro.

Debido a la gran cantidad de módulos requeridos en nuestro proyecto, se realizará dos conexiones con diez módulos y una conexión con doce módulos, en la Figura 34 se muestra la conexión de diez módulos, en el Anexo A, se mostrará la conexión completa.

Figura 34

Conexión SPI de los Módulos Max6675

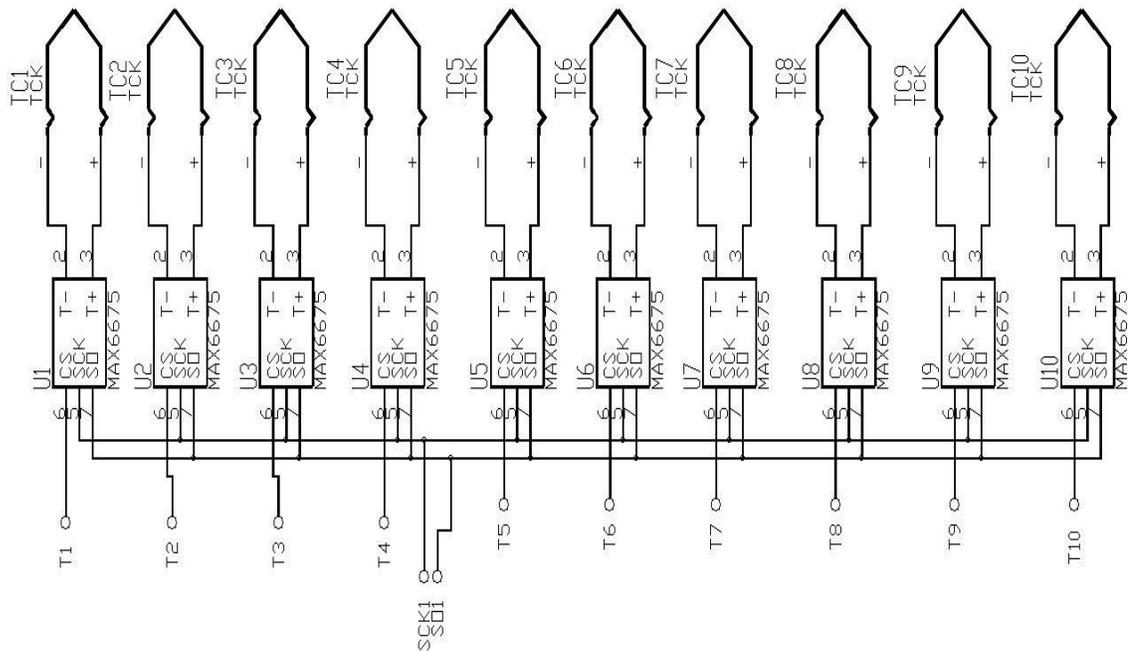
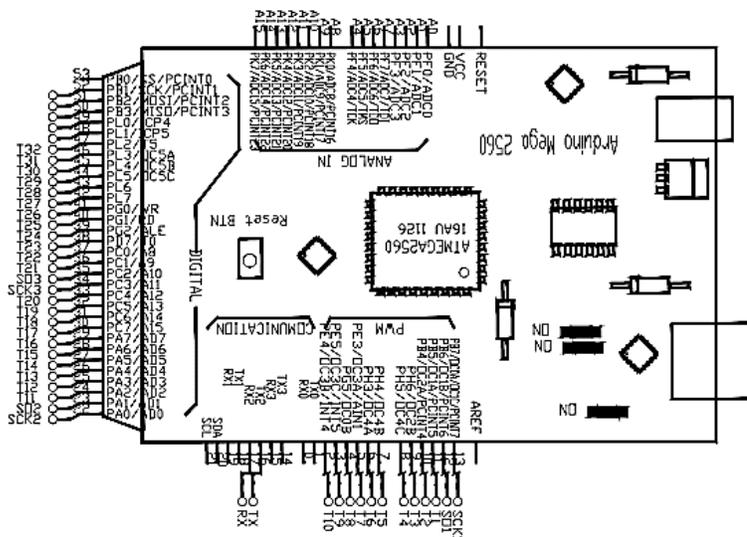


Figura 35

Conexiones en la placa Arduino Mega



En la Figura 35 se muestra la distribución de pines en la placa Arduino, para la conexión de los primeros diez módulos se utilizará el pin 13 (SCK1), 12 (SO1) para la señal de reloj y señal de datos de entrada respectivamente, los pines 11 al 2 (SS) son líneas de activación de cada dispositivo esclavo. Los siguientes diez módulos se conectarán a los pines 22 (SCK2), 23 (SO2) y los pines 24 al 32 serán (SS).

Por último, se conectarán 12 módulos a los pines 33 (SCK2), 34 (SO2) y los pines del 35 al 47 serán (SS). Para conectar la pantalla se utilizará los pines 16 (TX) y 17 (RX) del puerto de comunicación serial.

La programación para la placa Arduino utilizada en este proyecto se mostrará completamente en el Anexo B.

Interfaz gráfica para la adquisición de datos

Para el registro de datos se utilizará una pantalla touch Nextion de 4,3 pulgadas, la cual permite desarrollar GUI interfaces graficas de usuario, mediante la utilización del

software libre Nextion Editor. Se puede crear GUI simplemente arrastrando componentes como: textos, gráficos, botones, controles, entradas numéricas entre otros. A continuación, se describirá le desarrollo de la interfaz gráfica a ser utilizada en el proyecto.

Figura 36

Ventana inicial en la pantalla



En la Figura 36 se muestra la pantalla de inicio, en la cual se puede seleccionar entre dos alternativas, al presionar el primer botón se abrirá la ventana de información, el segundo botón abrirá la ventana de datos de temperatura.

Figura 37

Ventana selección de datos que desea ver



En la Figura 37 indica la ventana de datos de temperaturas, a su vez, se encuentran tres botones que abren las ventanas e indican las temperaturas de cada material. También se encuentra un botón de regreso a la ventana principal.

Figura 38

Ventana muestra los datos en la barra seleccionada

T1	00.00	T6	00.00	TEMPERATURA AMBIENTE
T2	00.00	T7	00.00	
T3	00.00	T8	00.00	TEMPERATURA DE BASE
T4	00.00	T9	00.00	
T5	00.00	T10	00.00	DATOS

En la Figura 38 indica la estructura que tiene cada ventana, donde aparecen los datos de temperaturas a lo largo de cada barra, también muestra la temperatura ambiente y la temperatura de la base, para regresar al menú simplemente se selecciona el botón (DATOS).

Figura 39

Ventana de información

CARACTERISTICAS DE LOS MATERIAL



Cobre electrolítico



Acero AISI 1018



Bronce Dulce (latón)

Coeficiente de conducción Acero: 52 [W/m*K]
 Coeficiente de conducción Cobre: 401 [W/m*K]
 Coeficiente de conducción Bronce: 110 [W/m*K]
 Diámetro de las barras: 3/4 [in]
 Longitud nominal: 1 [m]
 Coeficiente de convección entre ambiente - barras: 00.00 [W/m2*K]



En la Figura 39 indica la ventana de información, donde se encuentra las características de los materiales utilizados y datos relevantes para realizar los análisis correspondientes a la práctica de laboratorio.

Figura 40

Ventana secundaria de información



La Figura 40 indica la longitud medida desde la base del reservorio hasta cada termocupla.

Capítulo V

Construcción, pruebas de operación y puesta a punto del banco de pruebas

La construcción del banco de pruebas se realizó siguiendo los parámetros prestablecidos en la Ingeniería Básica y en la Ingeniería de Detalle, además se mostrará el funcionamiento del equipo y los procesos de instalación.

Proceso de construcción y pruebas del caldero

Posteriormente al diseño y la adquisición del material necesario para la construcción del caldero, se requirió la asistencia de personal capacitado para realizar la soldadura de las distintas partes metálicas del caldero.

Figura 41

Construcción del caldero



Concluido el proceso de soldadura se realizó una prueba hidrostática para detectar posibles fugas de presión, la prueba hidrostática se realizó a una presión de 80 psi muy superior a la presión de funcionamiento del caldero de 30 psi.

Figura 42

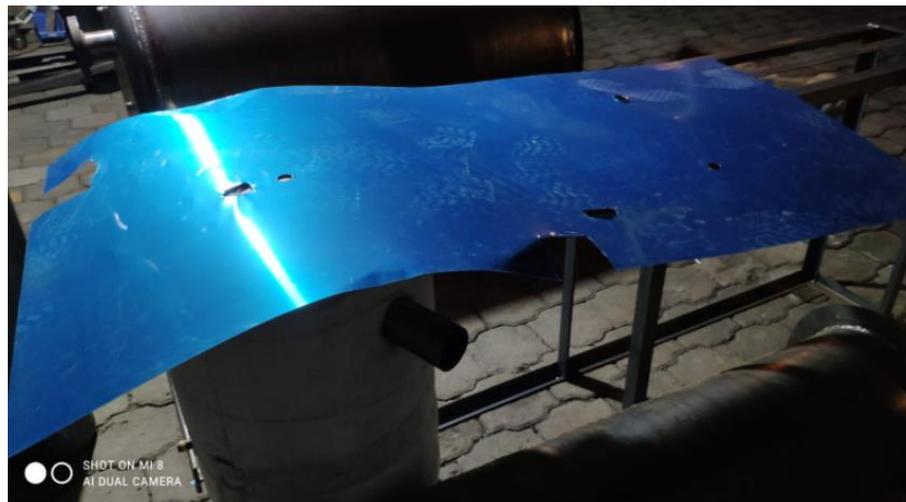
Prueba hidrostática en el caldero



Concluida la prueba hidrostática, al no tener fugas de presión, se procedio a soldadar los soportes del aislante térmico y se instaló una carcasa externa de aluminio.

Figura 43

Recubriendo de aislante



Proceso de construcción del bastidor e instalación de equipos

Para la construcción del bastidor se consideró los parámetros de diseño mecánico establecidos en la Ingeniería de Detalle. Con el perfil L40x3 mm de acero ASTM A36 se fabricó el bastidor, posteriormente se instaló sobre el mismo la caja para la adquisición de datos, la caja para los dispositivos de control, las termocuplas, la bomba de agua, el caldero y el reservorio de vapor junto con las barras cilíndricas.

Figura 44

Construcción del bastidor



Proceso de construcción reservorio de vapor e instalación de aletas (barras de sección circular)

Para la construcción del reservorio de vapor se utilizó una tubería sin costura de 16 cm de diámetro externo y 5,5 mm de espesor, en cada extremo se soldaron tapas circulares del mismo diámetro interno que la tubería y 10 mm de espesor.

La tapa frontal cuenta con tres perforaciones roscadas para la inserción de las barras cilíndricas y en la tapa posterior se soldó un nepló de ½ pulgada para el acople

con el caldero. Así mismo se soldaron neoplos de $\frac{1}{4}$ de pulgada sobre la tubería para insertar un manómetro y otro opuesto para purgar del reservorio, como se muestra en la Figura 45.

Figura 45

Construcción del reservorio de vapor



Las barras de sección circular fueron roscadas en la punta, para introducirlas dentro del reservorio de vapor, posteriormente, se realizó perforaciones de 2 mm de diámetro para insertar las termocuplas.

Figura 46

Instalación de aletas



Construcción e instalación del sistema de adquisición de datos de temperatura

Para la instalación del sistema de adquisición de datos se modificó un cajetín metálico, en el cual se instalaron los módulos Max6675 y un Arduino mega. Para la alimentación eléctrica de los dispositivos se modificó una fuente de poder de computador, de tal forma que se pueda alimentar con 5v y 12v de corriente continua.

En cada aleta se insertaron diez termocuplas distribuidas uniformemente en las perforaciones realizadas previamente.

Figura 47

Instalación de termocuplas



Para mostrar los datos de temperatura se programó una pantalla Nextion de 4.3 pulgadas, la cual se encuentra colocada en la parte superior de la caja metálica, también cuenta con un foco led que indica la activación del sistema. Este sistema se activa con un simple swich on/off.

Figura 48

Sistema de adquisición de datos

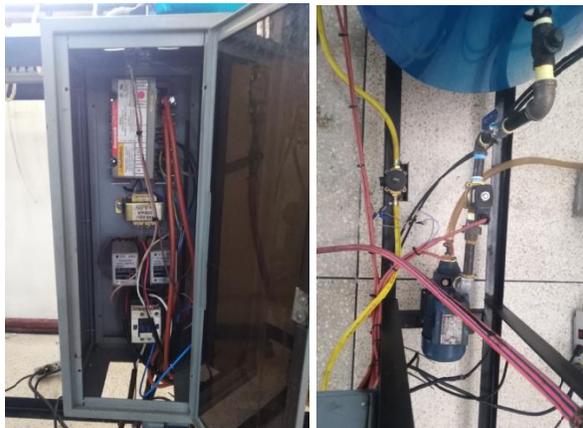


Instalación del control de operación del caldero

Los equipos e instrumentos necesarios para la operación y buen funcionamiento del caldero se instalaron dentro de una caja metálica como se puede observar en la Figura 49, siguiendo el esquema eléctrico mostrado en la Ingeniería de Detalle.

Figura 49

Instalación de control de operación del caldero



Otros instrumentos como los manómetros, el presostato, el control de nivel por medio de vasos comunicantes y la válvula de alivio se instalaron una vez montado el caldero de vapor.

Figura 50

Instalación de instrumentos



Pruebas de operación y puesta a punto

Una vez concluida la instalación del equipo de generación de vapor, del sistema de adquisición de datos, del control de operación y de la instalación de la acometida del fluido de trabajo se procedió a las pruebas de funcionamiento y puesta a punto del banco de pruebas.

Figura 51

Equipo Instalado en el Laboratorio de Conservación de la Energía



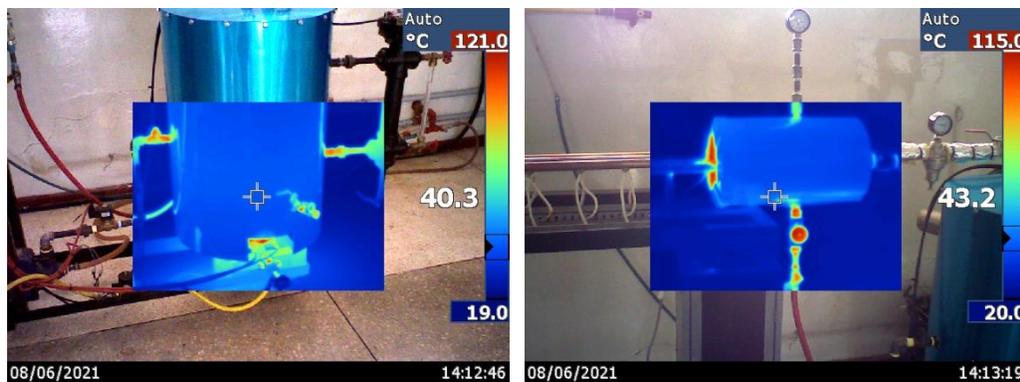
Para la puesta a punto del banco de pruebas, se llevó a cabo el cumplimiento de los siguientes criterios:

- Acometida de agua libre de fugas.
- Ajuste de la válvula de alimentación de gas.
- Ajuste del rango de presión en el presostato (22 a 30 psi) para encendido y apagado del quemador.
- Ajuste de la válvula de reductora de presión en el ingreso del reservorio a 22 psi.

Una vez efectuado los cambios necesarios, se procedió a realizar una prueba de funcionamiento continuo del caldero hasta alcanzar su máxima presión de trabajo, posteriormente, se verificó la temperatura superficial de los equipos de tal forma que no puedan causar lesiones al tacto.

Figura 52

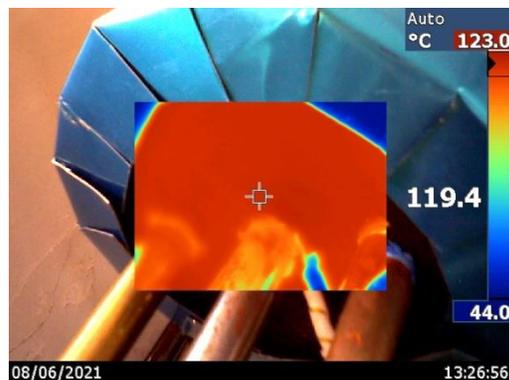
Comprobación de temperatura superficial en los equipos con aislamiento térmico



En la Figura 52 se comprueba que la temperatura está en el rango permitido de 40°C a 60°C, por lo cual no causaría lesiones al contacto.

Figura 53

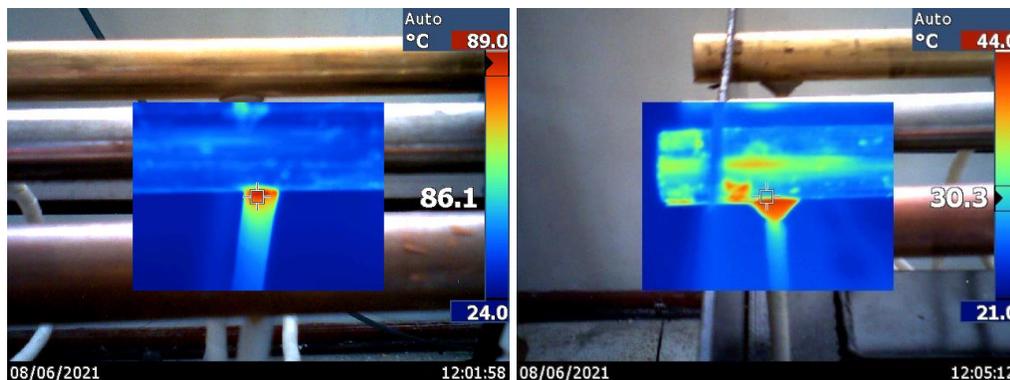
Temperatura superficial en la base del reservorio



En la Figura 53, con la ayuda de un pirómetro digital, se comprueba que la temperatura base de las barras cilíndricas tiene un valor máximo de 119,4 °C.

Figura 54

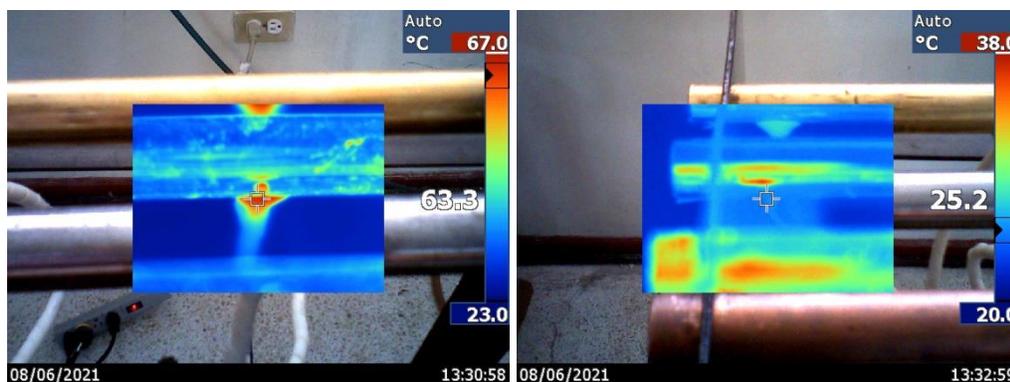
Temperaturas máxima y mínima en la aleta de cobre



En la Figura 54 se comprueba que, en el punto más cercano al reservorio de vapor ubicado a 9,5 cm de distancia, se tiene la temperatura máxima a 86,1°C, y en el punto más lejano ubicado a 95 cm de distancia del mismo, se tiene la temperatura mínima a 30,3°C.

Figura 55

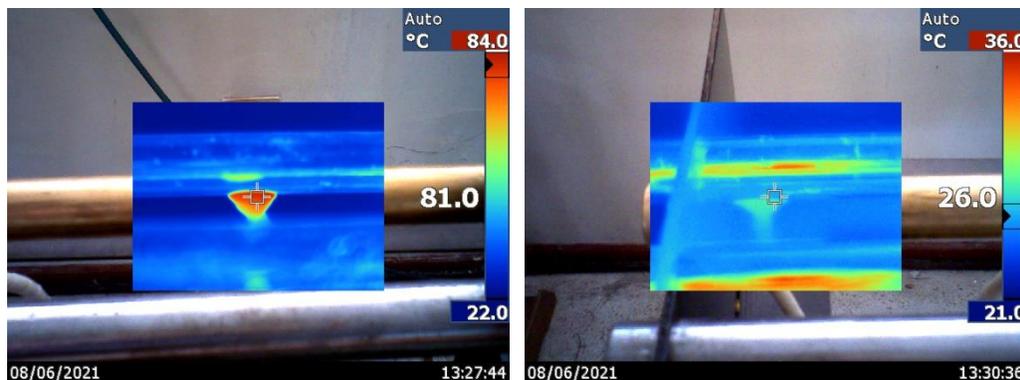
Temperatura máxima y mínima en la aleta de acero



En la Figura 55 se comprueba que, en el punto más cercano al reservorio de vapor ubicado a 9,5 cm de distancia, se tiene la temperatura máxima a 63,3°C y en el punto más lejano ubicado a 95 cm de distancia del mismo, se tiene la temperatura mínima a 25,2°C.

Figura 56

Temperatura máxima y mínima en la aleta de bronce



En la figura 56 se comprueba que, en el punto más cercano al reservorio de vapor ubicado a 9,5 cm de distancia, se tiene la temperatura máxima a 81°C y en el punto más lejano ubicado a 95 cm de distancia del mismo tiene la temperatura mínima a 26°C.

Elaboración de manual de operación del banco de pruebas

Considerando el uso que se va dar por parte de los estudiantes, es necesario elaborar un manual de operación para el equipo, el cual se detalla en el Anexo E.

Elaboración de guía para realizar práctica de laboratorio

Se requiere una guía para realizar la práctica, donde se indique el posterior análisis que deberán realizar con los datos tomados en el banco de pruebas, esta guía se detalla en el Anexo F.

Capítulo VI

Análisis de Resultados

Los datos de temperatura se muestran en una pantalla touch, en la cual se puede ingresar a varias ventanas por medio de una interfaz gráfica que contiene una serie de botones etiquetados para cada barra, donde se muestran las temperaturas numeradas desde T1 a T10, la temperatura ambiente y la temperatura base. La presión del reservorio se toma visualmente del manómetro conectado en la parte superior del mismo.

Recolección de datos

Se analizará los datos tomados cuando el equipo ha alcanzado el estado estable previo a la calibración y ajustes necesarios en el mismo, por lo cual se ajustó el presostato para que se funcione en un rango de 22 a 30 psi de presión de vapor y se ajustó el ingreso de vapor al reservorio por medio de una válvula reguladora de presión a 22 psi. En la apertura de la purga se colocó una trampa termodinámica de vapor con el objetivo de liberar condensado.

Los datos mostrados en la Tabla 15 son tomados a partir de que la caldera alcanza los 22 psi hasta que la temperatura en las barras llega a un estado estable, a su vez, se tomaron en un intervalo de 15 minutos a partir de la hora indicada.

La nomenclatura utilizada en las tablas es:

T1 a T10 temperaturas a lo largo de la barra medidas en °C.

Tamb: temperatura ambiente medida en °C.

Tbas: temperatura de base en el reservorio medida en °C.

Pres: presión manométrica del reservorio medida en psi.

Tabla 15*Resultados tomados de la barra de cobre*

HORA	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tamb	Tbas	PRES
10:30	20	19,8	20,1	20	20	18,5	19,5	19,7	19,6	19,8	20,2	21	0
10:45	77,69	63,1	49,6	38,9	31,7	26,9	22,1	21	20	20	21	114	18
11:00	83,4	71	58,5	49	41,7	36	30	25,5	23	20,8	21	110	20
11:15	85,7	74	62,4	53	45,8	40	34,2	30	27	24,9	22	116	20
11:30	86,9	74,9	64,3	54,6	47,8	42,1	36,4	32,59	29,6	27,6	21,7	115	20
11:45	87,6	76,3	65,3	55,7	49	43,2	37,6	13,8	30,1	28,8	21,9	115	20
12:00	86,8	74	63,6	55,1	48,9	43,2	38	34,3	30,9	29,3	22	106	14
12:15	85,9	73,9	63,1	54,2	47,9	42,9	37,2	34	30,6	29,09	22	111	16
12:30	87,5	74,9	63,69	55	48,2	43,1	37,5	33,9	30,6	29	22,3	114	18
12:45	87,9	75,19	64,4	55,2	48,5	43,1	37,9	33,8	30,9	28,9	22,2	114	18
13:00	90	76,9	65,19	56	49	43,9	38	34,1	31	29,4	22,4	115	22
13:15	90,7	77,69	66,3	56,8	49,6	44,1	38,1	34,1	31	29	23,1	115	22
13:30	90,2	77,69	66,4	57	50	44,6	38,7	34,8	31,8	29,4	22,5	115	22
13:45	91	77,9	66,3	56,8	50	44,4	39	35	32	31	22,8	115	22
14:00	90,6	78	66,5	57,1	50,5	45	39	35,9	32,6	31	22,8	115	22
14:15	90,9	77,69	66,19	56,9	50	44,9	39	35,8	32,5	31,9	23	115	22
14:30	91,2	78,9	67,19	57,6	50,8	45,2	39,4	36,5	32,8	31,5	22,9	113	22
14:45	91	78,1	67,3	57,9	50,9	45,6	39,8	36,2	32,7	32	22,9	115	22
15:00	89,9	77,8	66,5	57,3	50,8	45,1	39,8	36	32,5	32	22,7	114	22
15:15	89,1	77	66,1	57,1	50,7	45,2	39,7	36	32,8	32	22,7	115	22
15:30	87	75,1	65	56	49,9	44,7	39,1	35,8	32	31,59	22,5	110	16

Tabla 16*Resultados tomados de la barra de acero*

HORA	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tamb	Tbas	PRES
10:30	20,3	20,4	19,8	19,79	20,14	20,3	19,8	20,3	20,1	19,9	20,2	21	0
10:45	50,1	31,5	24,5	20	20,2	20,3	20	20,3	20	19,9	21	114	18
11:00	57,6	38,7	30	22,8	22	20,5	20,7	20,8	20,5	20	21	110	20
11:15	61	42,6	33,9	25,2	23	21,2	21	21,6	21,6	21,3	22	116	20
11:30	62,5	44,8	34,9	27	24	21,5	21,7	23,4	22,8	22,2	21,7	115	20
11:45	62,9	44,9	36,5	27,9	25	22,2	22,2	23,4	23,2	22,5	21,9	115	20
12:00	61,6	44,4	36,9	28,7	25	22,6	22,7	23,4	23	22,6	22	106	14
12:15	61,2	44,9	36,9	28,6	25,09	23,3	22,7	23,4	23,1	22,6	22	111	16
12:30	62,4	46	37	29	25,4	23,5	23,5	23,4	23,3	23,2	22,3	114	18
12:45	62,8	45,1	37	29	26	23,5	23,2	23,4	23,8	23,2	22,2	114	18
13:00	64	46	37,9	29,1	26	23,5	23,6	23,4	23,5	23,6	22,4	115	22

HORA	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tamb	Tbas	PRES
13:15	64,2	46	37,3	29,1	26	23,5	23,6	23,4	23,7	23,5	23,1	115	22
13:30	64,4	46,5	38	29,4	26,09	23,5	23,5	23,4	23,3	23,6	22,5	115	22
13:45	63,6	45,2	37	29,7	25,7	23,9	23,6	23,4	23,3	23,2	22,8	115	22
14:00	63,7	45,8	37	29,3	25,8	24,3	23,7	23,3	23,3	23,3	22,8	115	22
14:15	63,5	45,8	37,1	29,8	25,9	24	23,7	23,5	23,39	23,4	22,9	115	22
14:30	64	45,9	37,3	29,9	25,8	24,5	23,8	23,4	23,5	23,4	22,9	113	22
14:45	64,1	45,8	37,8	29,9	25,8	24,7	23,7	23,1	23,3	23,4	22,9	115	22
15:00	63,9	45,9	37,7	30,2	25,8	24,5	23,5	22,9	22,7	22,9	22,7	114	22
15:15	63,5	45,8	37,3	30,5	25,9	24,6	23,7	23,1	22,7	22,9	22,7	115	22
15:30	62,3	44,9	37,1	30,2	25,8	24,6	23,7	22,5	22,7	22,9	22,5	110	16

Tabla 17

Resultados tomados de la barra de bronce

HORA	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	Tamb	Tbas	PRES
10:30	20,2	19,8	20	20,1	19,9	20,2	20,2	20,2	19,79	19,8	20,2	21	0
10:45	63,2	38,7	32,5	24	23	22,5	21	22,4	20,7	20,2	21	114	18
11:00	69,4	46,9	41,5	31,7	28,8	25	22,5	23,5	21,8	21,7	21	110	20
11:15	71,9	49,2	44,9	35	32	27,9	24,7	25,4	23	22,9	22	116	20
11:30	73,1	59	46,6	37	33,8	29,9	26,5	26,5	24,6	23,9	21,7	115	20
11:45	73,3	59,1	47,2	37,9	34,6	30,9	27,3	27,4	25,3	24,9	21,9	115	20
12:00	75	58,7	47,8	38	35	31	28,2	27,5	26	25,4	22	106	14
12:15	75,3	58,1	47	37,7	34,9	31,1	28,3	28,1	26,3	25,9	22	111	16
12:30	76,5	58,9	47,4	38,2	35,1	31,7	28,4	28,5	26,4	25,8	22,3	114	18
12:45	76,8	58,3	48	38,5	35,5	31,9	28,4	28,4	26,4	25,5	22,2	114	18
13:00	78,5	59	48	38,8	35,8	32	28,5	28,5	26,9	26	22,4	115	22
13:15	79	60,8	48,7	38,9	35,8	31,9	28,5	28,6	26,8	26,4	23,1	115	22
13:30	79	60,1	49	39,9	36,2	32,3	29,2	28,6	27	26	22,5	115	22
13:45	78,9	59,4	48	38,8	35,7	31,5	28,6	28,3	27	25,8	22,8	115	22
14:00	78,8	60	48,5	39,6	36	31,7	28,6	28,3	27	26	22,8	115	22
14:15	78,3	59,2	48	39,09	36,3	31,4	29	28,5	27,2	26,3	22,9	115	22
14:30	79	60,8	48,8	39,7	36,3	32	28,9	28,6	27,6	26,5	22,9	113	22
14:45	78,4	61,4	49	40,8	37	32	29,5	29,1	28	25,5	22,9	115	22
15:00	79	61	48,4	40,2	37	32,09	29,5	28,7	28	25,6	22,7	114	22
15:15	78,3	69,6	48,6	40	36,9	32	29,6	28,8	27,9	25,8	22,7	115	22
15:30	76,5	68,4	48	40	36,9	32	29,6	29,1	28,1	25,6	22,5	110	16

Como se puede observar en las Tablas 15, 16 y 17 la distribución de temperaturas en las barras se estabiliza a partir de 13h15, con estos datos se realizará su respectivo análisis.

Tabla 18

Resumen de datos de temperatura en estado estable

Temperaturas en estado estable			
	Cobre	Acero	Bronce
T1	90,7	64,2	79
T2	77,69	46	60,8
T3	66,3	37,3	48,7
T4	56,8	29,1	38,9
T5	49,6	26	35,8
T6	44,1	23,5	31,9
T7	38,1	23,6	28,5
T8	34,1	23,4	28,6
T9	31	23,7	26,8
T10	29	23,5	26,4
Tamb	23,1	23,1	23,1
Tbas	115	115	115

La Tabla 18 muestra las temperaturas en estado estable a la 13h15 para cada barra en cada termocupla, a su vez, muestra la temperatura en la base y la temperatura ambiente.

Para utilizar los datos de la Tabla 18, se reemplaza la ecuación (44) en la ecuación (39), obteniendo:

$$\frac{T_{(x)} - T_{\infty}}{T_b - T_{\infty}} = e^{-mx} \quad (108)$$

Donde podemos despejar (m) el factor de corrección y posteriormente recalculamos $T(x)$ para encontrar la longitud infinitamente larga de la aleta. En la ecuación (111), donde, T_b es la temperatura de la base entre las barras y el reservorio, T_{∞} es la

temperatura ambiente, x es la separación desde la base del reservorio hasta cada termocupla.

$$-mx \ln(e) = \ln\left(\frac{T(x) - T_{\infty}}{T_b - T_{\infty}}\right) \quad (109)$$

$$m = \frac{-\ln\left(\frac{T(x) - T_{\infty}}{T_b - T_{\infty}}\right)}{x} \quad (110)$$

Tabla 19

Cálculo del factor (m) en función de las temperaturas y la distancia x

	Distancia x en (m)	Factor para cobre	Factor para acero	Factor para bronce
T1	0,095	3,23	8,47	5,23
T2	0,190	2,74	7,31	4,69
T3	0,285	2,65	6,55	4,48
T4	0,380	2,64	7,18	4,63
T5	0,475	2,62	7,28	4,17
T6	0,570	2,59	9,54	4,12
T7	0,665	2,73	7,84	4,26
T8	0,760	2,79	7,53	3,71
T9	0,855	2,87	5,88	3,76
T10	0,950	2,89	5,72	3,50
	Promedio	2,77	7,33	4,25

Con el promedio de los factores de corrección calculados, se despeja y se reemplaza en la ecuación (111) para encontrar $T(x)$, que es la temperatura en función de la distancia.

$$T(x) = T_{\infty} + (T_b - T_{\infty}) \cdot e^{-mx} \quad (111)$$

Las ecuaciones son:

Para el cobre $T(x) = T_{\infty} + (T_b - T_{\infty}) * e^{-2,77*X}$

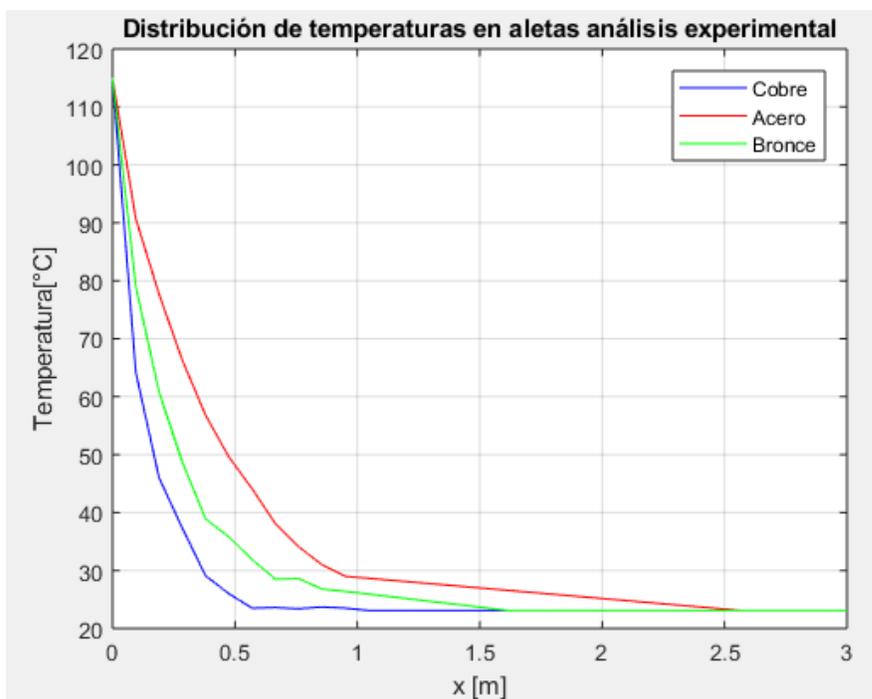
Para el acero $T(x) = T_{\infty} + (T_b - T_{\infty}) * e^{-7,33*X}$

Para el bronce $T(x) = T_{\infty} + (T_b - T_{\infty}) * e^{-4,25*X}$

Remplazando valores de (x) en las ecuaciones anteriores se encontró la longitud a la que la temperatura de la barra se iguala a la temperatura ambiente.

Figura 57

Gráfica de la distribución de temperaturas en aletas análisis experimental



Como se observa en la Figura 57, la curva generada con las ecuaciones previamente desarrolladas de los datos experimentales, demuestran que la aleta de cobre se estabiliza a mayor longitud en comparación con la curva de bronce y acero.

Tabla 20

Longitud infinitamente larga calculada con los valores experimentales

Experimental	Longitud (m)	mL	tanh
Cobre	2,565	7,11	0,999999
Acero	1,045	7,65	0,999999
Bronce	1,615	6,86	0,999999

Como indica la Tabla 20 la longitud infinitamente larga del cobre es 2,565 (m), la longitud infinitamente larga del acero es 1,045 (m) y la longitud infinitamente larga del bronce es 1,615 (m). En la tercera y cuarta columna se calculó la relación mL mostrada en la ecuación (103) y la relación $\tanh(mL)$ que se aproxima a 1.

Distribución teórica de temperatura en las aletas

Para el cálculo teórico de la distribución de temperaturas en las aletas se tiene como datos base la temperatura ambiente 23,1°C y la temperatura en la base 115°C, por lo cual el cálculo se realizará a partir de la siguiente expresión:

$$T_{(x)} = T_{\infty} + (T_{\infty} - T_b) \cdot e^{-mx}$$

Donde el valor del factor de corrección (m) ya está preestablecido para cada material (ver Tabla 19), obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 21

Resumen de temperaturas teóricas en las aletas

	Temperaturas en las aletas		
	Cobre	Acero	Bronce
T1	93,70	68,90	84,44
T2	77,34	45,92	64,05
T3	64,77	34,47	50,43
T4	55,12	28,77	41,34
T5	47,70	25,92	35,28
T6	42,00	24,51	31,23
T7	37,62	23,80	28,53
T8	34,25	23,45	26,72
T9	31,67	23,27	25,52
T10	29,68	23,19	24,71
Tamb	23,1	23,1	23,1
Tbas	115	115	115

Cálculo del error relativo

Para verificar el comportamiento del sistema de adquisición de datos se va a realizar el cálculo del error relativo de la distribución de temperaturas, donde se compara los datos teóricos con los experimentales, para lo cual se tiene la siguiente expresión:

$$Error_R = \frac{|T_{teórico} - T_{experimental}|}{T_{teórico}} \quad (112)$$

Donde obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 22

Cálculo de los errores relativos de la distribución de temperaturas

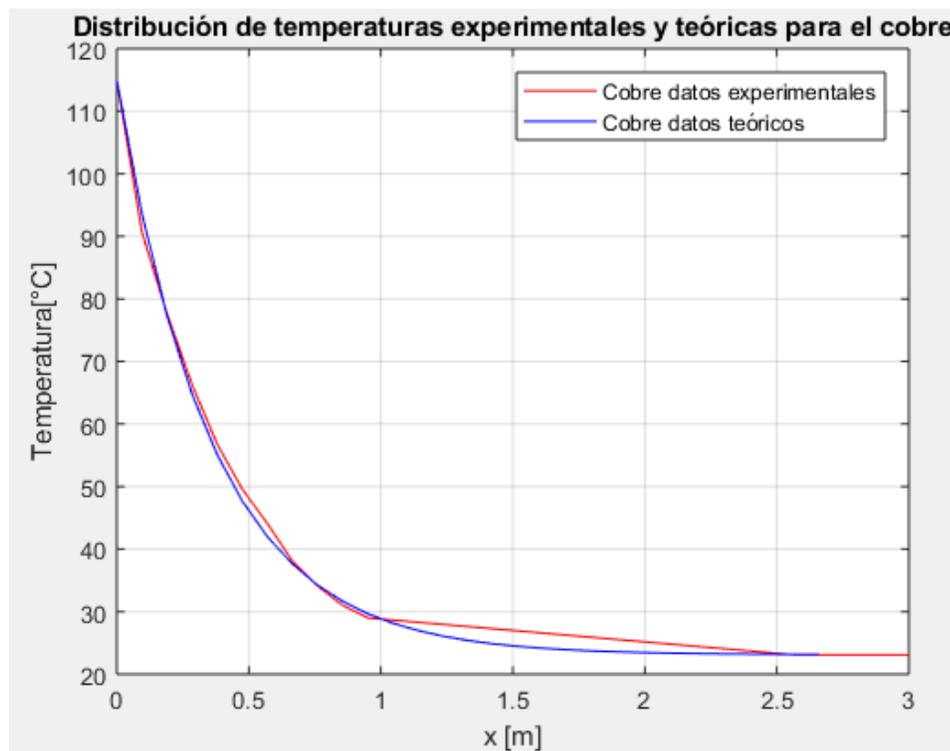
Posición	Errores relativos		
	Cobre	Acero	Bronce
T1	3,21	6,82	6,45
T2	0,45	0,17	5,07
T3	2,36	8,20	3,43
T4	3,06	1,15	5,91
T5	3,99	0,29	1,48
T6	5,01	4,11	2,15
T7	1,28	0,85	0,09
T8	0,45	0,21	7,03
T9	2,11	1,83	5,03
T10	2,30	1,35	6,82
Promedio	2,42	2,50	4,35

Como se observa en la Tabla 22 el promedio del total de los errores relativos para la barra de cobre es 2,42%, para la barra de acero es 2,5% y para la barra bronce es 4,35%, los cuales son aceptables para la realización de las prácticas de laboratorio.

Distribución de temperatura teoría versus la experimental

Figura 58

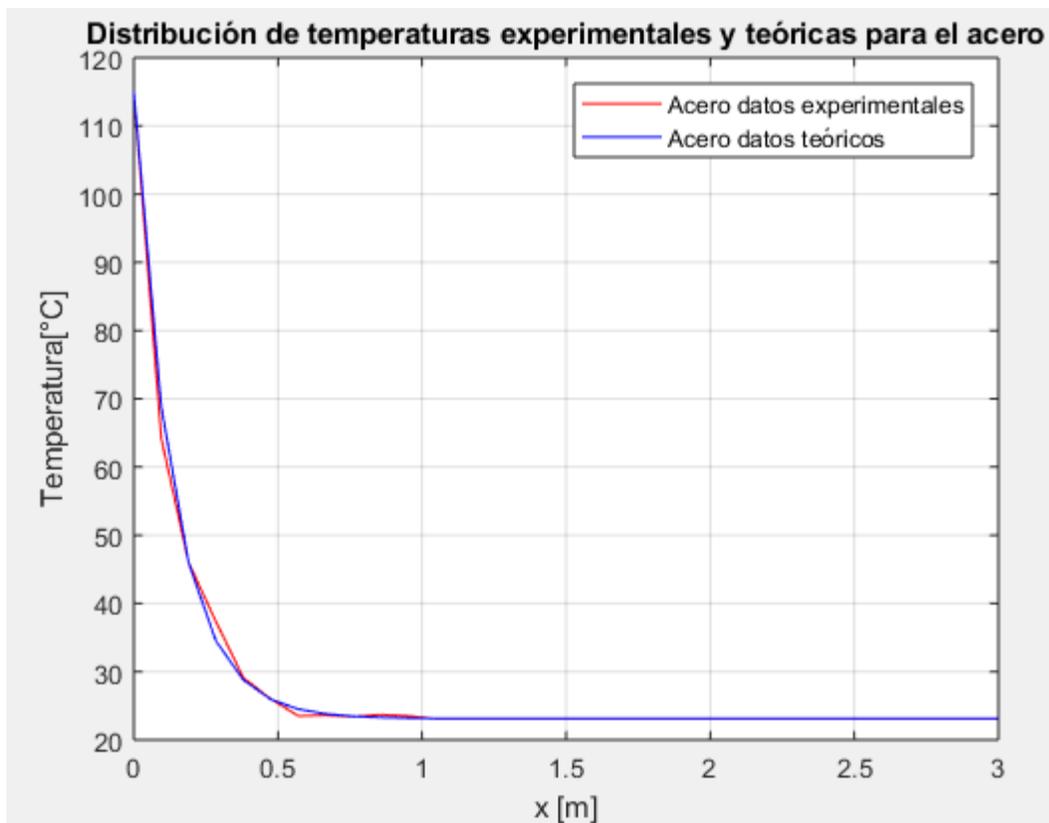
Gráfica de la distribución de temperaturas experimental y teórica para el cobre



Como se observa en la Figura 58, tanto la curva de temperatura teórica como la experimental, a lo largo de la barra de cobre, poseen una distribución semejante entre sí.

Figura 59

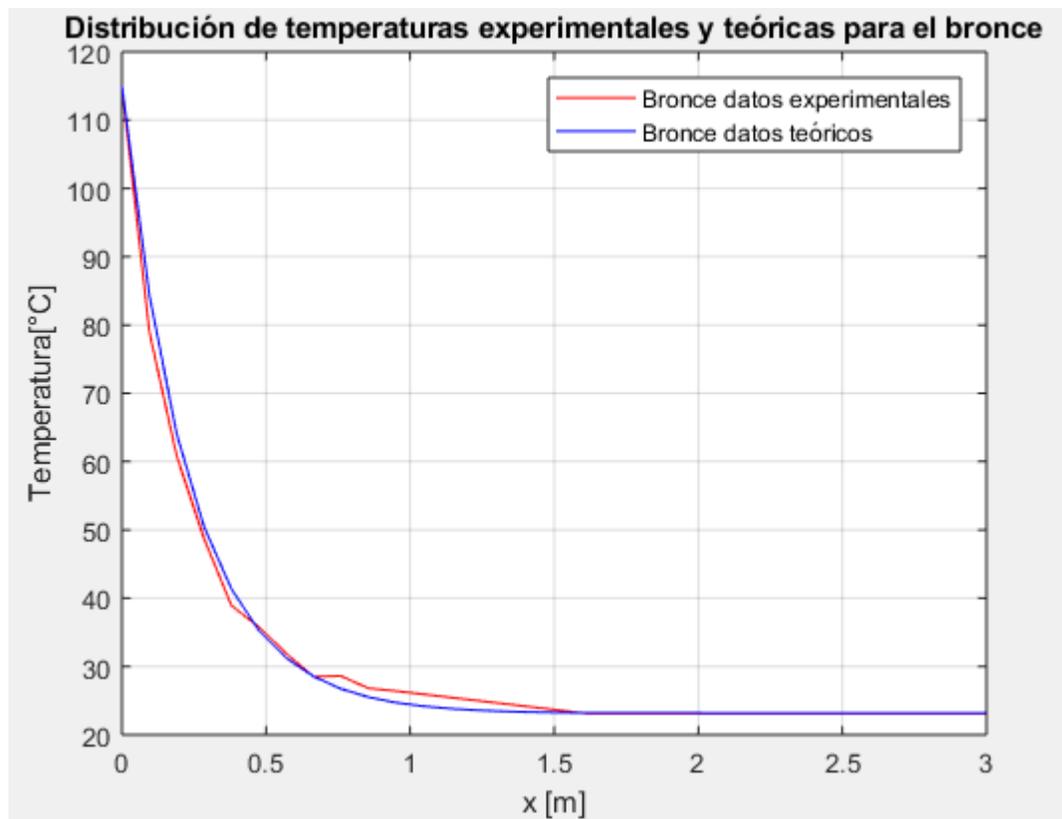
Gráfica de la distribución de temperaturas experimental y teórica para el acero



Como se observa en la Figura 59, tanto la curva de temperatura teórica como la experimental, a lo largo de la barra de acero, poseen una distribución semejante entre sí.

Figura 60

Gráfica de la distribución de temperaturas experimental y teórica para el bronce



Como se observa en la Figura 60, tanto la curva de temperatura teórica como la curva experimental, a lo largo de la barra de bronce, poseen una distribución semejante entre sí.

Cálculo de la eficiencia de la aleta (η_f)

Previo al cálculo de la eficiencia de aleta es necesario realizar una corrección en la longitud de la aleta, por lo cual se utilizará la ecuación $L_c = L + \frac{D}{4}$ para una aleta cilíndrica, la eficiencia se calculará utilizando la ecuación (50), que se encuentra en la sección eficiencia de la aleta.

Tabla 23*Eficiencia de las aletas.*

	Longitud corregida Lc (m)	m Lc	tanh mLc	Eficiencia (η_f)
Cobre	2,570	7,131	0,9999987	14,02%
Acero	1,045	7,661	0,9999996	13,05%
Bronce	1,615	6,872	0,9999979	14,55%

Como indica la Tabla 23 la eficiencia de todas las aletas cobre, acero y bronce del banco de pruebas está alrededor del 14%.

Capítulo VII

Análisis económico

A continuación, se detalla la inversión monetaria que realizo para la construcción del banco de pruebas de barras cilíndricas de longitud infinita con el fin de determinar el costo total invertido en el trabajo de titulación, los costos se dividen en costos directos e indirectos.

Costos directos

En esta sección se detallan los costos que se relacionan directamente con la construcción del banco de pruebas tales como: costos de materiales de construcción, costos de dispositivos adquiridos, costos de mano de obra que intervino en el proyecto, entre otros. Se detallan a continuación.

Tabla 24

Costos de materiales para el caldero

Denominación	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Cuerpo del recipiente	1	145	145
Tapas toriesférica superior	2	30	30
Boquilla de salida de vapor	7	1,5	10,5
Soporte del Recipiente	1	20	20
Baffle	3	7	21
Quemador	1	80	80
Recubrimiento externo e interno aluminio	1	40	40
Tapa del recubrimiento aluminio	1	15	15
Aislante térmico	1	35	35
		Costo total	396,5

Tabla 25*Costos de materiales para el bastidor*

Denominación	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Tubo cuadrado de 40x3mm	0,2	16,3	3,26
Perfil L40x3x40mm	2	12	24
Platina 40x3 mm	0,2	8	1,6
Garruchas 2 ½" con 70 kg de capacidad	4	5	20
Costo total			48,86

Tabla 26*Costos de barra metálicas*

Denominación	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Barra de cobre 1m	1	63,1	63,1
Barra de acero 1m	1	5,19	5,19
Barra de bronce 1m	1	36,74	36,74
Costo total			105,03

Tabla 27*Costos de material para el reservorio de vapor*

Denominación	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Tubería Ø16cm, e=6mm	1	8	8
Tapas metálicas circulares e=10mm	2	8	16
Neplos 1/4, 10 cm	2	1,65	3,3
Neplos 1/2, 10 cm	1	1,10	1,1
Costo total			28,4

Tabla 28*Costos de material para adquisición de datos*

Denominación	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Arduino mega y case protector	1	25	25
Módulos max6674	32	7	224
Placas perforadas para diseñar circuitos (galletas)	3	0,5	1,5
Pantalla touch Nextion 4,3 y protector	1	90	90
Cables para conexión 10cm	2	2	4
Cables para conexión 20cm	1	2,50	2,5
Bornera	3	0,3	0,9
Fuente de poder 5v, 9v	1	15	15
Caja metálica	1	20	20
Cable de termocupla tipo k	1	60	60
Costo total			442,9

Tabla 29*Costos de materiales para control y operación del caldero*

Denominación	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Válvula de alivio 1/2	1	51	51
Válvula reductora de vapor 1/2	1	41	41
Válvula check de bronce 1/2	1	16	16
Llave de globo 1/4	1	3,53	3,53
Manómetros 100 psi	2	3,3	6,6
Control de encendido	1	121	121
Electrodos de encendido	1	10	10
Electroválvula	1	63	63
Transformador 12 v	1	5	5
Termostato 60 psi	1	47	47
Bomba 1/2 hp	1	52	52

Denominación	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Relés de nivel	2	20	40
Protección contactor válvula solenoide	1	32	32
normalmente cerrada para agua	1	28,99	28,99
Llave de globo 1/2	2	3,95	3,5
Costo total			520,62

Tabla 30*Costos varios*

Denominación	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Brocas, teflón, masilla epóxica, herramientas, cinchos, uniones, codos metálicos, etc.	1	100	100
Costo total			100

Tabla 31*Remuneración de personal técnico capacitado*

Cargo	Tiempo hr	Valor hora USD/hr	Costo total
Metalmecánico	4	20	80
Soldador, construcción del tanque, y bastidor	20	20	400
Ayudante	15	15	225
Costo total			705

Costos indirectos

En esta sección se detallan los costos que se relacionan indirectamente con la construcción del banco de pruebas, denominados como gastos generales que no van incluidos en los costos directos, se detallan a continuación.

Tabla 32

Honorarios docente

Nombre	Cargo	Tiempo hr	Valor hora USD/hr	Costo total
Ángelo Villavicencio	Director de tesis	50	20	1000
Costo total				1000

Tabla 33

Honorarios alumnos

Nombre	Cargo	Tiempo hr	Valor hora USD/hr	Costo total
Jesus Collaguazo	Responsable del proyecto	420	2,5	1050
Cristian Quiguango	Responsable del proyecto	420	2,5	1050
Costo total				2100

Tabla 34

Gastos generales

Denominación	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Transporte	2	45	90
Servicios básicos	1	60	60
Internet	1	50	50

Denominación	Cantidad	Costo unitario	Costo total
Telefonía celular	1	40	40
Costo total			240

Gasto total

Tabla 35

Gasto total para la construcción del banco de pruebas

Costos directos e indirectos	
Costos de materiales para el caldero	396,5
Costos de materiales para el bastidor	48,86
Costos de barra metálicas	105,03
Costos de material para el reservorio de vapor	28,4
Costos de material para adquisición de datos	442,9
Costos de materiales para control y operación del caldero	520,62
Costos varios	100
Remuneración de personal técnico capacitado	705
Honorarios docentes	1000
Honorarios alumno	2100
Gastos generales	240
TOTAL	5687,31

En la Tabla 35 se calculó la inversión total del proyecto entre costos directos e indirectos dando un total de 5687,31 dólares americanos, de esta cantidad reconocemos el aporte por parte del Laboratorio de Conversión de la Energía con el apoyo de equipos e instrumentos para el control y operación del banco de pruebas con un total de 520,62 dólares americanos.

Capítulo VIII

Conclusiones Y Recomendaciones.

Conclusiones

Se cumplió el objetivo de construir un banco de pruebas, en el cual consta de un caldero, un reservorio de vapor y un sistema de adquisición de datos los cuales están operativos y funcionales.

Se logró obtener una presión de operación para el caldero de 22 a 30 psi y para el reservorio de 22 psi, obteniendo así, un sistema de generación de vapor que brinda buenos resultados al momento de la toma de datos.

Se pudo verificar la distribución de temperatura sobre las aletas, observando como la aleta de cobre, siendo la más conductora transfiere más energía que a la aleta de acero y la aleta de bronce.

Se lograron realizar las pruebas de operación y funcionamiento, con lo cual se determinó que los factores de corrección de transferencia de calor de las barras de longitud infinita del banco de pruebas en estado estable resultaron ser de 2,77 para el cobre, 7,33 para el acero y 4,25 para el bronce.

Como consecuencia de los cálculos a partir de los datos experimentales se determinó que la longitud a la que la temperatura del material iguala a la temperatura ambiente para la barra de cobre es 2,565 metros, para la barra de acero es 1,045 metros y para la barra de bronce es 1,615 metros.

Se logró cumplir con el diseño y la construcción de un bastidor operativo, que cumple con los criterios de diseño establecidos, en donde ninguna viga supera los 5,6

mm de deflexión permitida, además para su viga más crítica el valor demanda capacidad fue de 0,505.

La construcción del banco de pruebas móvil de barras cilíndricas de longitud infinita, es un aporte significativo para desarrollo de las prácticas de los estudiantes de en las carreras de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica.

Con el uso de este equipo los estudiantes, además de conocer los efectos de la transferencia de calor sobre barras de longitud infinita, podrán conocer los procesos termodinámicos de generación y distribución de vapor.

Recomendaciones

Considerando que la práctica utiliza combustible (gas licuado de petróleo) para su funcionamiento, es importante una inducción por parte del encargado de laboratorio con el fin de evitar accidentes.

Previo al encendido del equipo es importante que lea el manual de usuario donde podrá informarse del funcionamiento del equipo.

No tocar las partes desprotegidas del banco de pruebas como tuberías sin aislamiento o inclusive las aletas con el fin de evitar quemaduras.

Si se va a dar alguna actividad de mantenimiento al equipo se recomienda tener cuidado con muchos de los componentes del banco de pruebas, puesto que una mala colocación de los sensores (por ejemplo los sensores de nivel), ocasionarían un mal funcionamiento del mismo.

Bibliografía

- Almachi Nacimba, J. C., & Pillaza Ormaza, J. A. (2013). *Diseño y construcción de un equipo para el estudio de transferencia de calor en superficies extendidas en estado estable, destinado al laboratorio de transferencia de calor de la Escuela Politécnica Nacional*. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6791>
- ANSI/AISC 360-10. (2010). *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago: AISC.
- ASCE. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE 7-10)*. Reston, Virginia: ASCE.
- ASME. (2010). *Boiler and Pressure Vessel Code Section II Part D Properties Materials*. New York.
- ASME. (2010). *Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 2 Alternative Rules*.
- Ayala Blanco, E., Aparicio Ariza, A. A., & García Sánchez, C. E. (2016). Revisión del cálculo de poder calorífico y punto de rocío del gas natural, y de la estimación de sus incertidumbres. *Revista ION*, 29, 87-88.
- Çengel , Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica*. México DF: McGraw-Hill.
- Çengel, Y. A., & Afshin, G. (2011). *Transferencia de Calor y Masa Fundamentos y Aplicaciones* (cuarta edición ed.). México D.F., Mexico: McGraw Hill.
- FENERCOM. (2012). *Guiá Básica Calderas Industriales Eficientes*. Obtenido de www.fenercom.com: www.madrid.org

- Iguarán Duarte, O. A., & Martínez Barrios, D. M. (2008). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CALDERA PIROTUBULAR PARA EL LABORATORIO DE TRANSFERENCIA DE CALOR (Tesis de grado)*. Bucaramanga.
- Incropera, F., & DeWitt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. PRETINCE HALL. Mexico: PEARSON Educación.
- Maxim Integrated Products*. (2002). Retrieved from 120 San Gabriel Drive, Sunnyvale, CA : <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MAX6675.pdf>
- PROCOEN. (8 de Julio de 2021). *PROCOEN Proyectos de conservacion de Energía*. (Zarza) Obtenido de PROCOEN Proyectos de conservacion de Energía: <https://procoen.com/quemaduras-durante-el-trabajo/>
- Rabié Durán, R. S. (2013). *Diseño e implemetacion de un sistema de aduicion de datos para pruebas de carga y descarga de baterias*. Universidad de Chile, Departamento de Ingenieria Electrica, Santiago de Chile. Obtenido de http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114563/cf-rabie_rd.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ramirez Neyra, F. G. (2009). *Sistema de adquisición de datos de sensores analógicos y digitales*. Intituto politecnico Nacional, Ingeniría en Control y Automatización, Mexico D.F. Obtenido de <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/6296/SISTEMADQUISICION.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ANEXOS

ANEXO A: ESQUEMA DE CONEXIÓN PARA ADQUISICIÓN DE DATOS.

ANEXO B: CÓDIGO DE LA PROGRAMACION UTILIZADO PARA LA ADQUISICION DE DATOS UTILIZANDO EL SOFTWARE LIBRE DE ARDUINO.

ANEXO C: DATOS TEÓRICOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA PARA LAS BARRAS CILINDRICAS DE LONGUITUD.

ANEXO D: PLANOS Y HOJAS DE PROCESO.

ANEXO E: MANUAL DE OPERACIÓN.

ANEXO F: GUÍA PARA LA PRÁCTICA DE LABORATORIO.