



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALDERO SIMPLE PARA
EL LABORATORIO DE PROCESOS INDUSTRIALES DE LA
FACULTAD DE CIENCIAS

Trabajo de Integración Curricular:

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTORES:

SALTOS RUIZ STEVEN MARCELO
IZQUIETA QUEZADA DALTON DAVID

Riobamba - Ecuador

2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CALDERO SIMPLE PARA
EL LABORATORIO DE PROCESOS INDUSTRIALES DE LA
FACULTAD DE CIENCIAS

Trabajo de Integración Curricular:

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTORES: SALTOS RUIZ STEVEN MARCELO

IZQUIETA QUEZADA DALTON DAVID

DIRECTORA: ING. MÓNICA LILIÁN ANDRADE AVALOS

Riobamba - Ecuador

2023

© 2023, Steven Marcelo Saltos Ruiz & Dalton David Izquieta Quezada

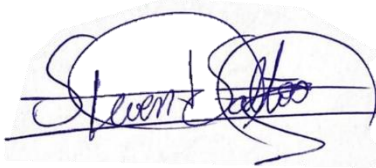
Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, Steven Marcelo Saltos Ruiz y Dalton David Izquieta Quezada, declaramos que el presente Trabajo de Integración Curricular es de nuestra autoría y los resultados de este son auténticos.

Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de integración curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica del Chimborazo.

Riobamba, 26 de junio del 2023.



Steven Marcelo Saltos Ruiz.

0201883816



Dalton David Izquieta Quezada

0706145354

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: el Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, “**DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN CALDERO SIMPLE PARA EL LABORATORIO DE PROCESOS INDUSTRIALES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS**”, realizado por el señor: **STEVEN MARCELO SALTOS RUIZ** y el señor: **DALTON DAVID IZQUIETA QUEZADA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

FIRMA

FECHA

Ing. Cesar Arturo Punte Guijarro
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL




2023-06-26

Ing. Mónica Lilian Andrade Avalos
DIRECTORA DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR



2023-06-26

Ing. Paul Gustavo Palmay Paredes
ASESOR DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR



2023-06-26

DEDICATORIA

Este logro tan importante va en primer lugar a Dios, a mis padres que han sido mi mayor pilar, mi fortaleza, me brindaron su apoyo incondicional, que aunque se encuentren lejos, siempre los he llevado en este camino del saber bien presentes, a mis abuelitos que con sus consejos no me han dejado caer, a mi abuelita que aunque no se encuentre entre nosotros, este logro es para ella, por su carácter, apoyo y amor incondicional, agradezco infinitamente a mi familia que ha estado en todo momento en este arduo y largo camino, con su apoyo incondicional, desde el primer día que comenzó este sueño hasta hoy que lo han visto materializado.

Steven

El presente trabajo se lo dedico a mi madre que siempre estuvo presente escuchando y dándome la inspiración y palabras necesarias, a mi yo del pasado que nunca se rindió; a pesar de las adversidades miró hacia delante. A George que al inicio sus enseñanzas me parecían vacías, pero con el tiempo aprendí que todo es hermoso y llega en el momento exacto.

Dalton

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme estar con vida, por permitirme haber cumplido una meta más en mi vida, a mis padres que han estado conmigo en este largo camino, han estado pendientes, llenos de preocupaciones y de orgullo, me han acompañado desde el primer día, no dejándome caer, viendo que existen muchas adversidades, pero jamás bajar los brazos, aunque a la distancia en otro lugar geográfico, nunca han dejado de apoyarme. A mis abuelos, a pesar de que mi abuela no este con nosotros en estos momentos, en todo el trayecto que me acompaño, siempre velo por mi integridad, por mi cuidado a la hora de salir de nuestro hogar en busca del sueño profesional, siempre con sus atenciones y cuidados, nunca podría haber llegado hasta donde estoy sin todo eso a donde me encuentro hoy.

Un agradecimiento muy especial a la ESPOCH, por ser participe en este gran sueño, acogerme en toda su alma mater, lleno de conocimiento y adquiriendo aptitudes que me ayudaran en la vida profesional.

Steven

Agradezco infinitamente a mi madre y hermana por sus hermosas enseñanzas y sabiduría transmitida, a mi tía Esther por el amor incondicional que me brinda, a mi tía Marianita por siempre sacarme una sonrisa y creer en mí, a varios docentes que marcaron un antes y después en mi toma de decisiones y manera de pensar, a la Ing. Mónica e Ing. Paul por impartir sus conocimientos profesionales en el desarrollo del presente proyecto.

Dalton

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
RESUMEN.....	xv
SUMMARY/ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Planteamiento del Problema.....	2
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos	3
<i>1.4.1. Objetivo General.....</i>	<i>3</i>
<i>1.4.2. Objetivos Específicos.....</i>	<i>3</i>

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Antecedentes de investigación	4
2.2. Referencias Teóricas.....	5
2.2.1. Fundamentación teórica	5
<i>2.2.1.1. Calderas</i>	<i>5</i>
<i>2.2.1.2. Transferencia de calor</i>	<i>7</i>
<i>2.2.1.3. Conducción</i>	<i>7</i>
<i>2.2.1.4. Convección.....</i>	<i>7</i>
<i>2.2.1.5. Radiación</i>	<i>7</i>
<i>2.2.1.6. Combustión</i>	<i>8</i>
<i>2.2.1.7. Partes principales de una caldera.</i>	<i>9</i>
<i>2.2.1.8. Combustible usado en las calderas.....</i>	<i>10</i>
<i>2.2.1.9. Ingeniería del Proyecto</i>	<i>12</i>

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	16
3.1.	Diseño térmico del caldero	16
3.2.	Cálculo Presión de Funcionamiento Caldera	16
3.3.	Factor de evaporación (fe)	17
3.4.	Potencia nominal del caldero (Pn)	17
3.5.	Calor total requerido (Q_{total})	18
3.6.	Caudal másico real del agua/vapor (m)	18
3.6.1.	<i>Balance de energía</i>	18
3.6.2.	<i>Volumen de agua (V_{agua})</i>	20
3.7.	Caudal másico de combustible (m_{comb})	21
3.8.	Flujo volumétrico del combustible (V_{Comb})	22
3.9.	Relación aire/combustible para mezcla estequiométrica (AC)	22
3.9.1.	<i>Masa de aire</i>	23
3.9.2.	<i>Masa de combustible</i>	24
3.10.	Relación aire/combustible para mezcla con 35% exceso de aire (AC. exceso)	24
3.10.1.	<i>Masa de aire</i>	25
3.10.2.	<i>Masa de combustible</i>	25
3.11.	Relación aire/combustible para mezcla con 50% exceso de aire (AC. exceso)	26
3.11.1.	<i>Masa de aire</i>	26
3.11.2.	<i>Masa de combustible</i>	26
3.12.	Caudal másico de los gases de combustión (m_{gas})	27
3.13.	Fracciones molares de los productos	27
3.14.	Presiones Parciales	28
3.15.	Número de Prandtl	28
3.15.1.	<i>Temperatura de llama adiabática (T_g)</i>	29
3.15.2.	<i>Temperatura máxima teórica de la llama</i>	33
3.16.	Análisis de la transferencia de calor	33
3.17.	Calcular la emisividad y absortividad de H₂O y CO₂	34
3.18.	Absortividad	36
3.19.	Emisividad y Absortividad de los gases	38
3.19.1.	<i>Valor de ϵ_g</i>	38
3.19.2.	<i>Valor final de absortividad</i>	38
3.19.3.	<i>Análisis de Prabir Basu El calor de radiación:</i>	38
3.20.	Área interna del tubo (A_{flama})	39
3.21.	Cálculo de la emisividad luminosa:	39
3.22.	Longitud de la flama	40
3.23.	Análisis de la transferencia de calor	43

3.24.	Transferencia de calor por ebullición nucleada(q)	43
3.24.1.	<i>Ebullición nucleada</i>	43
3.25.	Resistencia total	47
3.26.	Calor total liberado por la radiación de los productos de combustión dentro del tanque hogar del caldero (QTR)	48
3.27.	Área de transferencia <i>Atrans</i>	50
3.28.	Diseño mecánico	50
3.29.	Dimensionamiento geométrico	52
3.29.1.	<i>Diámetro interior del recipiente a presión (Din)</i>	52
3.29.2.	<i>Altura efectiva del cilindro (Lefec)</i>	52
3.29.3.	<i>Altura efectiva del cilindro (Ltotal)</i>	52
3.30.	Selección de materiales	53
3.30.1.	<i>Selección de materiales para el caldero que están sometidas a presión</i>	53
3.31.	Diseño de los sistemas periféricos	54
3.31.1.	<i>Selección de componentes</i>	54
3.31.1.1.	<i>Bomba de agua</i>	54
3.31.1.2.	<i>Válvula manual de bola</i>	55
3.31.1.3.	<i>Válvula Check</i>	56
3.31.1.4.	<i>Manguera flexible para GLP</i>	57
3.31.2.	<i>Sistema de control</i>	57
3.31.2.1.	<i>Válvula de seguridad</i>	57
3.31.2.2.	<i>Manómetro</i>	58
3.31.2.3.	<i>Presostato</i>	59
3.32.	Diseño de elementos sometidos a presión	60
3.32.1.	<i>Cálculo del diseño mecánico</i>	60
3.32.1.1.	<i>Condiciones de diseño mecánico</i>	60
3.32.1.2.	<i>Presión admisible en el cilindro</i>	61
3.32.1.3.	<i>Diseño de las tapas planas.</i>	62
3.32.1.4.	<i>Diseño de la cámara de combustión</i>	62
3.32.1.5.	<i>Presión externa admisible (presión máxima)</i>	63
3.32.1.6.	<i>Diseño de los tubos de humo</i>	64
3.32.1.7.	<i>La presión máxima admisible</i>	64
3.33.	Diseño mecánico	65
3.33.1.	<i>Instrumentos de control y equipos auxiliares</i>	65
3.33.2.	<i>Selección de válvula de distribución de vapor</i>	65
3.33.3.	<i>Selección de válvula de purga</i>	65
3.33.4.	<i>Selección de válvula de alivio</i>	66

3.33.5.	<i>Selección válvula de alivio</i>	66
3.33.6.	<i>Selección de control de presión</i>	66
3.33.7.	<i>Selección de control de nivel de agua</i>	66
3.33.8.	<i>Selección manómetro indicador de presión</i>	66
3.33.9.	<i>Selección de la bomba de agua para la alimentación del caldero</i>	66
3.33.10.	<i>Construcción paso a paso del equipo</i>	68
3.33.10.1.	<i>Proceso construcción cuerpo</i>	68
3.33.10.2.	<i>Proceso construcción tapas planas</i>	68
3.33.10.3.	<i>Proceso construcción del recipiente</i>	69
3.33.10.4.	<i>Proceso construcción de cubiertas</i>	69
3.33.11.	<i>Montaje del calderín</i>	70
3.33.11.1.	<i>Proceso montaje N°1</i>	70
3.33.11.2.	<i>Proceso montaje N°2</i>	70
3.33.11.3.	<i>Proceso montaje N°3</i>	71
3.33.12.	<i>Montaje sistemas periféricas</i>	71
3.33.12.1.	<i>Proceso montaje sistemas periféricos</i>	71
3.33.13.	<i>Montaje de sistema de control</i>	72
3.33.13.1.	<i>Proceso montaje sistemas periféricos</i>	72
3.33.14.	<i>Montaje final</i>	72

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	73
	CONCLUSIONES	78
	RECOMENDACIONES	79

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Tipos de combustión.....	8
Tabla 2-2: Combustible usado en las calderas	11
Tabla 3-2: Variables de diseño.....	12
Tabla 4-2: Especificaciones de diseño	14
Tabla 1-3: Variables de diseño térmico del caldero.....	16
Tabla 2-3: Valores a interpolar	20
Tabla 3-3: Valores de temperatura a interpolar.....	20
Tabla 4-3: Composición del GLP y del Aire	21
Tabla 5-3: Datos para interpolación de la temperatura adiabática	32
Tabla 6-3: Datos para interpolación de calor específico	44
Tabla 7-3: Datos para interpolación de tensión superficial.....	44
Tabla 8-3: Diseño mecánico para el tanque hogar	50
Tabla 9-3: Diseño mecánico para el cilindro	51
Tabla 10-3: Diseño mecánico para los tubos	51
Tabla 11-3: Características de los Componentes	53
Tabla 12-3: Propiedades de los componentes del caldero	54
Tabla 13-3: Características bomba de agua	55
Tabla 14-3: Características válvula manual de bola	55
Tabla 15-3: Características válvula check.....	56
Tabla 16-3: Características bomba de agua	57
Tabla 17-3: Características de válvula de seguridad.....	57
Tabla 18-3: Características del manómetro.....	58
Tabla 19-3: Características bomba de agua	59
Tabla 1-4: Matriz de costos unitarios.....	75
Tabla 2-4: Materiales para el caldero.....	75
Tabla 2-4: Instrumentos y accesorios.....	76
Tabla 4-4: Costo de mano de obra	77
Tabla 5-4: Costo de investigación.....	77
Tabla 6-4: Costo de investigación.....	77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-2: Disposición general de una caldera.....	9
Ilustración 2-2: Pasos para la construcción	13
Ilustración 3-2: Análisis funcional	15
Ilustración 1-3: Balance de energía	30
Ilustración 2-3: Malla térmica	42
Ilustración 3-3: Suciedad sobre la superficie en la que se realiza transferencia de calor	45
Ilustración 4-3: bomba de agua	55
Ilustración 5-3: válvula manual de bola	56
Ilustración 6-3: válvula check	57
Ilustración 7-3: Manguera flexible para GLP.....	57
Ilustración 8-3: válvula de seguridad	58
Ilustración 9-3: manómetro	59
Ilustración 10-3: bomba de agua	60
Ilustración 11-3: construcción del cuerpo	68
Ilustración 12-3: construcción de tapas planas	69
Ilustración 13-3: construcción del recipiente	69
Ilustración 14-3: construcción de cubiertas.....	70
Ilustración 15-3: montaje del calderín.....	71
Ilustración 16-3: montaje de procesos periféricos.....	72

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** TABLA DE PRESIONES DE AGUA SATURADA
- ANEXO B:** TABLA DE TEMPERATURAS DE AGUA SATURADA
- ANEXO C:** CALOR ESPECÍFICO DEL AGUA
- ANEXO D:** CALORES ESPECÍFICOS DE GAS IDEAL DE VARIOS GASES COMUNES, EN FUNCIÓN DE TEMPERATURA
- ANEXO E:** TABLA DE TEMPERATURAS DE AGUA SATURADA
- ANEXO F:** PROPIEDADES DEL AGUA A DIFERENTES TEMPERATURAS
- ANEXO G:** ENTALPIA DE SUSTANCIAS A UNA TEMPERATURA DE 23°C
- ANEXO H:** PROPIEDADES A PRESION DE 1 ATM DE BIOXIDO DE CARBONO Y MONOXIDO DE CARBONO
- ANEXO I:** PROPIEDADES A PRESION DE 1 ATM DE NITROGENO, OXIGENO Y VAPOR DE AGUA
- ANEXO J:** ENTALPIAS ESTANDER A 2898.15 K JOULES POR MOL FORMADA DE SUSTANCIA
- ANEXO K:** PROPIEDADES DE GAS IDEAL DEL NITROGENO, N₂
- ANEXO L:** EMISIVIDADES DE LOS GASES H₂O Y CO₂ EN UNA MEZCLA DE GASES NO PARTICIPANTES A 1 ATM DE PRESION TOTAL
- ANEXO M:** LONGITUD MEDIA DEL HAZ DE L PARA VARIAS FORMAS DEL VOLUMEN DE GAS
- ANEXO N:** FACOTRES DE CORRECIÓN PARA LAS EMISIVIDADES DE LOS GASES H₂O Y CO₂ A DIFERENTES PRECIONES DE 1 ATM
- ANEXO O:** FACTOR DE CORRECCION $\Delta \epsilon$ PARA GASES DE COMBUSTIÓN
- ANEXO P:** TENSIÓN SUPERFICIAL DE LA INTERFASE LIQUIDO VAPOR (AGUA)
- ANEXO Q:** PROPIEDADES DEL AGUA
- ANEXO R:** COEFICIENTES C_{sf} n PARA CONBINACIONES FLUIDO-SUPERFICIE
- ANEXO S:** FACTORES DE INCRUSTACIÓN
- ANEXO T:** FLUIDOS
- ANEXO U:** FACTOR ADIMENSIONAL DEPENDIENTE DE FIJACIÓN DE LA TAPA
- ANEXO V:** GRAFICO GEOMÉTRICO PARA COMPONENTE BAJO CARGAR EXTERNAS O DE COMPRESIÓN
- ANEXO W:** GRÁFICO PARA DETERMINAR EL GROSOR DE LA CARCASA DE LOS COMPONENTES BAJO PRESIÓN EXTERNA DESARROLLADO PARA ACEROS DE CARBONO O DE BAJA ALEACIÓN CON UNA RESISTENCIA MÍNIMA DE RENDIMIENTO ESPECIFICADA DE 207MPA Y SUPERIOR

ANEXO X: GRAFICO GEOMÉTRICO PARA COMPONENTE BAJO CARGAR
EXTERNAS O DE COMPRESIÓN

ANEXO Y: MANUAL DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN

ANEXO Z: PLANOS DEL DISEÑO MECÁNICO

RESUMEN

El laboratorio de procesos industriales no cuenta con un equipo que satisfaga las necesidades respecto a un manejo práctico; así como, un equipo complementario para los distintos procesos y operaciones que ocurren dentro de este, ocasionando así pérdidas al conforme a tiempo, y generando un gran gasto energético. Por lo tanto, el objetivo fundamental del presente proyecto técnico fue realizar el diseño y construcción de un generador de un caldero pirotubular vertical, mismo que proporcionará vapor a una presión determinada para el funcionamiento de equipos del laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias de 3 BHP de potencia ubicado en la ciudad de Riobamba - Ecuador. Para el efecto, la metodología utilizada fue la realización de una revisión bibliográfica con la finalidad de identificar las principales características técnicas de las calderas pirotubulares, y los requerimientos constructivos establecidos por la Norma ASME para el diseño de generadores de vapor. Con esta información se procedió a realizar el diseño térmico-mecánico del caldero pirotubular. Finalmente, se determinó los costos unitarios para establecer el importe del diseño y construcción del generador. Haciendo uso de la metodología descrita se obtuvo que los resultados del proceso de diseño revelan que el flujo másico de vapor que genera la caldera es de 45.93 Kg/h y el flujo volumétrico de combustible de 6.08 L/h. Con los resultados obtenidos se concluye que el caldero construido cumplió con los requerimientos especificados en la norma aplicada, garantizando de esta manera la eficiencia y seguridad del equipo. Antes de utilizar el equipo, se recomienda leer el manual de operación y manual de mantenimiento para su correcto manejo.

Palabras clave: <CALDERO>, <PIROTUBULAR>, <LABORATORIO DE PROCESOS INDUSTRIALES>, <DISEÑO DE UN CALDERO PIROTUBULAR VERTICAL>, <CONSTRUCCIÓN DE UN CALDERO PIROTUBULAR VERTICAL>.

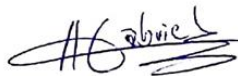
1643-DBRA-UPT-2023



SUMMARY/ABSTRACT

The laboratory of industrial processes does not have an equipment that meets the needs of a practical handling; as well as, a complementary equipment for the different processes and operations that occur within it, thus causing losses in time and generating a great energy expense. Therefore, the main objective of this technical project was to design and build a generator of a vertical pyrotubular boiler, which will provide steam at a certain pressure for the equipment operation of the Laboratory of Industrial Processes at the Science Faculty with 3 BHP of power located in the city of Riobamba - Ecuador. For this purpose, the methodology used was carried out through a bibliographic review with the purpose of identifying the main technical characteristics of the pyrotubular boilers, and the constructive requirements established by the ASME Standard for the design of steam generators. With this information, the thermal-mechanical design of the pyrotubular boiler was carried out. Finally, the unit costs were determined to establish the amount for the design and construction of the generator. Using the methodology described above, the results of the design process reveal that the mass flow of steam generated by the boiler is 45.93 kg/h and the volumetric flow of fuel is 6.08 L/h. With the results obtained, it is concluded that the constructed boiler complied with the requirements specified in the applied standard, thus guaranteeing the efficiency and safety of the equipment. Before using the equipment, it is recommended to read the operation manual and maintenance manual for its correct handling.

Key words: <BOILER>, <PYROTUBULAR, LABORATORY OF INDUSTRIAL PROCESSES>, <DESIGN OF A VERTICAL PYROTUBULAR BOILER, <CONSTRUCTION OF A VERTICAL PYROTUBULAR BOILER>.



Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.

Ced: 1103696132

INTRODUCCIÓN

En el presente documento se establece el dimensionado térmico, geométrico y mecánico de un generador de vapor piro tubular vertical de 3 BHP de potencia para el Laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias ubicado en la ciudad de Riobamba - Ecuador. Para realizar este diseño, se tomó en consideración las bases en los lineamientos y disposiciones de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) por sus siglas en inglés que establece las directrices para la construcción de calderas de potencia, especifica los materiales aceptados de construcción y establece una guía, la cual se recomienda para el diseño de recipientes a presión. Para el desarrollo de este proyecto, se dispone de toda la información técnica, información sobre manuales, prevención y la infraestructura presente en el Laboratorio de Procesos Industriales.

Este proyecto, surge de la inexistencia de un equipo de generación a vapor que se pueda utilizar dentro del laboratorio, lo cual induce a pérdidas energéticas; así como, pérdidas de tiempo, con lo cual se busca plantear una propuesta de diseño mecánico de calderas piro tubulares vertical considerando el contexto ecuatoriano, debido a que, en el medio local, existe una falta de conocimiento en el diseño ingenieril de este tipo de equipos, como las limitantes en la obtención de materiales adecuados que exige que la industria local, con lo que deba importar estos equipos incrementando el costo de adquisición y puesta en marcha.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Antecedentes

Los calderos, equipos que han pasado por las instalaciones de procesos industriales se han visto envueltos en constante nulidad debido a un incorrecto dimensionamiento, mantenimiento y funcionamiento; uno de estos calderos presente en el laboratorio de procesos industriales operaba entre temperaturas de 100-130 °C y así obtener presiones de 50 Psi como máximo, pese que en el 2018 se lo automatizó mejorando el porcentaje de consumo del combustible en un 11.1% al día, además de brindar datos reales de presión y temperatura, el no contar con un manual de mantenimiento y un uso erróneo del equipo hizo que hasta este año presente 2022 no sea favorable contar con este equipo, limitando el correcto seguimiento de las prácticas tanto en el área académica e investigativa, ya que no se cuenta con otro equipo parecido que satisfaga las operaciones que involucran.

1.2. Planteamiento del problema

Las calderas, en su generación de vapor y agua caliente, están ampliamente extendidas tanto para uso industrial, semiindustrial o doméstico, encontrándose en cometidos tales como: generación de electricidad, procesos químicos, calefacción, agua caliente sanitaria, plantas que realizan calentamiento de fluidos y aire, vaporización, aplicaciones en hospitales, industrias textiles, industria alimenticia, calentamiento de agua para hoteles, piscinas, viviendas, centros de recreación y estéticos, secadores de hojas, planchas industriales, movimiento de turbinas, etc.

El Laboratorio de Procesos Industriales de la carrera de Ingeniería Química se ve en la necesidad de implementar herramientas que ayuden de manera didácticas y prácticas para el enriquecimiento intelectual de los estudiantes de la carrera. Al momento un punto a destacar es no contar con un caldero que satisfaga las necesidades presentadas en torno al manejo práctico y en la complementación de los distintos procesos y operaciones que puedan llegar a ser usadas cuando se requiera una práctica en este laboratorio, llegando así a un problema de limitantes y de pérdidas ocasionales de tiempo y energéticas que suponen un gasto al momento de realizar un experimento sin la aparente utilización de este.

1.3. Justificación

El presente proyecto está orientado a facilitar la apertura de nuevas fuentes de investigación. Además, la implementación de este caldero incentivará a los estudiantes a elaborar prácticas académicas y comprender de una mejor manera el funcionamiento y accionamiento de estos. Es decir, se pretende elevar el interés de los estudiantes en cuanto a la importancia de los equipos dentro del laboratorio.

Al implementar el caldero en el laboratorio de procesos industriales se aprovechará al máximo la energía generada, no solo se de sus vapores, también de los residuos de combustible, en consecuencia, ayudando a la aceleración de los procesos, lo que genera una enorme ganancia de tiempo y disminución de gasto energético, de esta manera el laboratorio contará con el equipo necesario para prácticas académicas estudiantiles y como equipo auxiliar en los diversos procesos que se realizan dentro del mismo.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar y construir un caldero para el laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar variables y parámetros necesarios para el diseño y construcción del caldero.
- Efectuar los cálculos de ingeniería óptimos para el diseño de una caldera y su respectivo dimensionamiento.
- Realizar el diseño y construcción del caldero, tomando como referencia las variables de diseño.
- Realizar validación técnica y económica del proyecto.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

Alejandro Sebastián Sánchez Mendoza 2018 realizó una tesis sobre “análisis térmico para evaluar eficiencia en un calderín piro tubular de 2 BHP del laboratorio de la carrera de ingeniería mecánica.” En la cual se utilizaron varias técnicas de termografía sin contacto se constató una distribución de temperatura uniforme, luego de varias pruebas se obtuvo temperaturas máximas en la tapa superior del cilindro con un aproximado de 135 °C y las más bajas en el cilindro con 35°C aproximadamente, dando así una gran cantidad de pérdidas por transferencia de calor, dando valores de 12,3% equivalente a 1,36 kW. Esto se debió a las altas temperaturas que estas traían al momento de la salida de gases, ya que no se realizó un aislamiento térmico al abarcar una gran cantidad de área de trabajo.

Además, Jonathan Gabriel y Leonardo 2021 realizaron como tema de tesis “diseño de un sistema de combustible dual diésel-bunker para una red de alimentación de combustible a un grupo de calderas con capacidades entre 300 y 1700 BHP”, en donde identificaron que el medio en cual aplicaron se va a llevar a cabo en 3 tanques tipo vertical soldado. De los cuales 2 tanques son principales, en el cual 1 es usado para el almacenamiento del combustible diésel y el otro para el combustible bunker; las capacidades de almacenamiento individual de dichos tanques son de 12550 gal; ambos tanques tendrán una altura de 4 m, con un diámetro exterior de 4 m y un espesor de 8 mm. El tercer tanque es el tanque diario, donde se mezclarán ambos combustibles cuya capacidad de almacenamiento es de 1725 gal; este tanque tendrá una altura de 3.25 m, un diámetro exterior de 1.65 m y un espesor de 8 mm.

En la Universidad Nacional del Santa los autores Pinedo Alvarrán y Ruiz Custodio 2017 realizaron la tesis “análisis del diseño, construcción y evaluación de un caldero piro tubular con fines académicos en la escuela académica profesional de ingeniería en energía” en el cual, luego de diversos estudios determinaron los parámetros de diseño para un caldero piro tubular de 6 BHP, cuyas condiciones nominales de operación son 6 bar de presión, 79.3 kg/h de producción de vapor y 2.42 kg/m³ de consumo de combustible GLP para un 85% de rendimiento térmico del caldero.

Fritzon Manuel Castillo Quintero y Freddy Roberto Chimbo Bonilla 2018 realizaron una tesis acerca de “desarrollo de un sistema automático implementado sobre un caldero piro tubular en el

laboratorio de Procesos Industriales en la Facultad de Ciencias-ESPOCH” concluyen que la función de transferencia radica en que se puede obtener un modelo del proceso y así determinar su comportamiento, su eficiencia y por lo tanto se puede utilizar en procesos tales como la destilación, la evaporación, entre otros usados en las diversas prácticas. además de que el uso combustible disminuyó en un 11.7 %.

2.2. Referencias teóricas

2.2.1. Fundamentación teórica

2.2.1.1. Calderas

Es un equipo que utiliza energía térmica, la cual está conformada por un recipiente metálico, cerrado, hermético, que tiene el fin de producir vapor o calentar agua u otro fluido mediante un proceso isobárico, adición a esto, es una fuente de energía primaria, en la cual se libera el calor, que el fluido aprovecha de manera indirecta (Cázares-Ayala et al. 2014).

La clasificación general de las calderas, de acuerdo al mayor uso en nuestro país, sería la siguiente:

En función a la presión de trabajo:

- Calderas de calefacción de baja presión:
- calderas de agua caliente hasta 1.23 atm y hasta 125 °C, y calderas de vapor hasta 1.48 atm.
- Calderas de vapor de baja presión: Hasta 4 a 5 atm.
- Calderas de vapor de media presión: hasta 20 atm.
- Calderas de vapor de alta presión: 20 atm a presiones críticas.
- Calderas supercríticas: más de 225 atm y 374 °C (Pinedo y Ruiz 2017).

En función al contenido de los tubos:

➤ Calderas Acetabulares

En este tipo de calderos se caracteriza por el hecho que el agua fluye a través de tubos, que están siendo rodeados por gases calientes que producen combustión en el interior del mismo. Usualmente, su capacidad se expresa en libras de vapor por hora y varía en un rango entre 2000 lb/h (907 kg/h) hasta 10 millones de lb/h (4.4 millones de kg/h) de producción de vapor. Según depende el tamaño del caldero está puede tener una o dos quemadores, así mismo, posee sus

correspondientes rampas de combustible. Estos calderos dependen de su configuración y diseño, estas permiten alcanzar presiones altas, ya que de otro modo no sería accesible conseguir por la legislación vigente según el diseño de caldera, éstas pueden alcanzar los 45 kg/cm² (Castillo 2015).

○ **Características**

Estos equipos están compuestos por una o varias superficies que producen transferencia de calor; economizadores, sobre calentadores, evaporadores, recalentadores de aire, calentadores de agua. Se utiliza vapor sobrecalentado a una alta presión. Operan con el ciclo Rankine con sobrecalentamiento, recalentamiento, regenerativo o recuperativo para la generación de energía eléctrica en centrales termoeléctricas de carbón, petróleo. Su rendimiento oscila entre 85 %. El circuito de agua está compuesto por un banco de tubos y domos de vapor (Mezu 2012).

○ **Ventajas**

- Menor peso por unidad de potencia generada.
- Mayor eficiencia.
- Mayor seguridad para altas presiones.

○ **Desventajas**

- Su costo es elevado, tanto en el momento de su inversión como al operarla, también representa un gran gasto en su mantenimiento.
- Deben ser alimentadas con agua de elevada pureza, ya que las incrustaciones en sus instalaciones internas presentes en los tubos son, a veces inaccesibles y pueden provocar roturas dentro de ellos (Mezu 2012).

➤ **Calderas piro-tubulares**

Son aquellos calderos de tipo paquete que su característica principal es que los gases calientes presentes en la combustión están fluyendo por los tubos, pero el agua está dentro del depósito que contienen los tubos, por esta razón se produce la transferencia de calor desde dentro de los tubos hacia fuera. El agua absorbe el calor necesario de los tubos radiantes para posterior a ello, generar vapor saturado. Su rendimiento es alto, sin complicaciones constructivas, alrededor del 87% (Pinedo y Ruiz 2017).

○ **Ventajas**

- Posee un menor costo inicial, debido a su simple diseño en comparación con los calderos acuotubulares que poseen la misma capacidad.
- Facilidad a la hora de realizar inspección, reparación y limpieza.

- Posee una menor exigencia de pureza de fluido, en este caso agua al momento de su alimentación, ya que las incrustaciones presentes en el exterior de los tubos son más fáciles de atacar y pueden ser eliminadas por medio de las purgas.

- **Desventajas**

- Mayor tamaño y peso que las acuotubulares que poseen igual capacidad.
- Mayor tiempo para elevar la presión y que el equipo proceda a funcionar.
- No se usan para altas presiones (Pinedo y Ruiz 2017).

2.2.1.2. Transferencia de calor

Al momento en que se produce la combustión en este caso del combustible, los gases que resultan de este proceso, se encuentran a muy alta temperatura, así mismo, entregan energía al agua para producir calor. Los principales mecanismos en los cuales existe transmisión de calor se dan mediante radiación y convección. Las pérdidas de carga son inevitables por el hecho que la circulación que está presente entre el fluido y las paredes principalmente del agua (Sánchez 2018).

2.2.1.3. Conducción

Es una propiedad que poseen los materiales de transferir calor, el cual se produce entre moléculas adyacentes, transfiriendo calor desde las moléculas más calientes hacia las moléculas más frías. (Villar y Dzul 2009).

2.2.1.4. Convección

Es la transferencia de energía calorífica que se produce entre un fluido que se encuentra en movimiento y una superficie, los líquidos y gases son aquellos que intercambian calor mediante convección debido a que son malos conductores. La convección se clasifica en dos tipos: natural es aquella que se da cuando el movimiento produce un cambio en las densidades o temperaturas. La forzada ocurre cuando es producida por algún tipo de mecanismo (León y Solano 2016).

2.2.1.5. Radiación

Se produce en todo cuerpo con una temperatura mayor a 0°K se produce mediante emisión de energía que se transporta en forma de ondas electromagnéticas que se propagan a la velocidad de la luz. La radiación no toma en cuenta la materia o medio para propagarse ya que se transmite

mejor en el vacío. Un cuerpo que absorbe radiación también es un buen emisor cabe recalcar que las superficies pulidas emiten y reciben poca radiación (Pérez -Reyes y Sosa -Morales 2013).

2.2.1.6. Combustión

Este proceso que se produce en las calderas ocurre cuando se genera un estado térmico a partir de los gases, los mismos que pasan por los tubos para calentar en agua y por consecuencia generar vapor, por lo general el caudal y la presión es constante, suelen estar por debajo de la presión atmosférica; esto depende del diseño y tamaño del caldero que se esté utilizando (Alagumalai 2014). Si el combustible usado es gaseoso o líquido se ira consumiendo según se vaya inyectando en el quemador, mientras que si el combustible es sólido este se introducirá polvorizado en una parrilla. La combustión en cualquiera de los casos antes mencionados se genera con un rango que oscile por exceso de aire de 100% a 200% este es un parámetro a tomar muy en cuenta ya que depende de ello el desperdicio de calor que se pierde a través de la chimenea y con ello el desperdicio de energía del sistema (Bae y Kim 2017).

Tabla 1-2: Tipos de combustión

Tipos de combustión	Descripción
Combustión completa	Los combustibles se queman hasta el máximo grado de combustión
Combustión incompleta	El combustible no se oxida completamente, se forma sustancias que todavía puede seguir oxidándose
Combustión teórica o estequiometria	Se realiza con la cantidad teórica de oxígeno estrictamente necesario para producir total del combustible sin que se produzca los inquemados.
Combustión con exceso de aire	Se lleva a cabo con una cantidad de aire superior a la estequiométrica. Esta combustión tiende a no producir inquemados.
Combustión con falta de aire	El aire disponible es menor que el necesario para que se produzca la oxidación total del combustible, por lo tanto, se generan los inquemados.

Fuente: elaboración propia

2.2.1.7. Partes principales de una caldera.

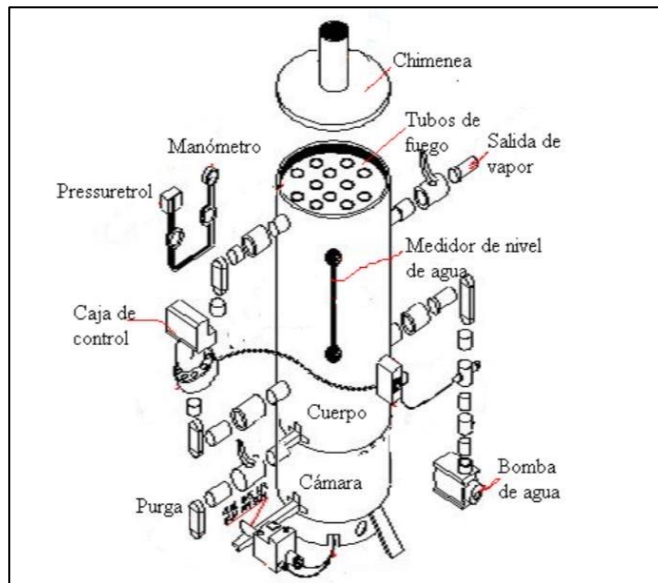


Ilustración 1-2: Disposición general de una caldera

Fuente: (Herrera y Betancourt 2018).

- **Hogar o cámara de combustión:** es en esta parte del caldero es donde se realiza la reacción química que en este caso es la combustión.
- **Tambor de vapor o domo principal:** es una pieza de forma cilíndrica, su función principal es producir vapor, el mismo que en su interior aloja en los elementos necesarios para llevar a cabo un control químico adecuado del agua y verificar la calidad del vapor.
- **Puerta hogar o quemador:** es una pieza metálica, revestida generalmente en su interior está cubierta con ladrillo refractario o de doble pared, por donde ingresa el combustible sólido al hogar y se hacen las operaciones en las que interviene el fuego. El quemador por su parte es el dispositivo del caldero que se encarga de generar la llama que provocará la liberación de energía del combustible atomizado.
- **Haz de tubos:** está compuesto por múltiples tubos de un diámetro muy pequeño en que el hogar, por donde circulara todo el fluido correspondiente, esto se realizará en base al tipo de caldera que se trate.
- **Chimenea:** es el conjunto de salidas en los cuales intervienen los gases y humos de la combustión a la hora que entran para la atmósfera. Además, tiene como función producir el tiro necesario para obtener una adecuada combustión (Restrepo 2021).

2.2.1.8. Combustible usado en las calderas

En las calderas pirotubulares en las cuales se pueden usar distintos combustibles ya sean en estado sólido, líquidos y gaseosos, se describen a continuación los combustibles más usados:

Tabla 2-2: Combustible usado en las calderas

Combustible	Características físico-químicas	Descripción
Carbón	Composición	75-80% carbón, 5-10% cenizas, 60% oxígeno, 0,5% hidrógeno
	Estructura	Orgánico no homogéneo
	Poder calorífico	27.900-30.200 KJ/Kg
	Estado	Sólido
	Densidad	0,2-0,75 g/cm ³
	Punto de inflamación	330 °C
	Viscosidad	N/A
Diésel N 2	Composición	C ₁₂ H ₂₆
	Estructura	Hidrocarburo
	Poder calorífico	41.800 kJ/kg
	Estado	Líquido
	Densidad	0,87-0,95 g/cm ³
	Punto de inflamación	52 °C
	Temperatura de auto ignición	254-285 °C
	Límites de explosividad (% volumen de aire)	0,6-0,65
Bunker (diésel N°6)	Composición	Mezcla indeterminada de C ₁₂ H ₂₆ , azufre y sedimentos derivados de la refinación de petróleo
	Estructura	Hidrocarburo
	Poder calorífico	39.700 KJ/Kg
	Estado	Líquido
	Densidad	0,96 g/cm ³
	Punto de inflamación	62-174 °C
	Temperatura de auto ignición	407 °C
	Coefficiente de reparto octano/agua	2,7-7,1 aproximadamente
Gas licuado de petróleo (GLP)	Composición	Mezclas propanos y butanos
	Estructura	Hidrocarburo
	Poder calorífico	50.625 KJ/Kg
	Estado	Gas
	Densidad	0,560 g/cm ³
	Densidad de vapor	1,5-2 (aire:1)
	Punto de inflamación	-96,8 a -75,9 °C
	Temperatura de auto ignición	400 °C
	Punto inicial de ebullición	-26,48 a -0,34 °C

Fuente: (Herrera y Betancourt 2018).

2.2.1.9. Ingeniería del proyecto

➤ Variables de diseño

Las principales partes constituyentes de una caldera son: suministro de energía, combustible, aire y agua; quemador, electrodo de chispa, ventilador, chimenea, tubos o fluxes, válvulas de seguridad (Agua o vapor), bomba de agua, medidor de presión, nivel de agua, corta fuego, válvulas de alivio, medidor temperatura de gases y tablero de control (Pineda y Rangel 2017).

Tabla 3-2: Variables de diseño

Selección	Tipo de combustible
	Calidad de vapor a servir
	Condición por calidad del agua en la alimentación
Operación	Presión y temperatura de operación
	Capacidad de generación de vapor
	Flujo másico y volumétrico
	Seguridad y confiabilidad de operación
Servicios	Costo de instalación y operación
	Periodicidad de Mantenimiento
	Acceso a sus partes para una posible reparación y en su caso reposición

Fuente: (Herrera y Betancourt 2018).

Una vez identificada las variables de diseño, con base a los requisitos básicos, se procede a realizar la construcción con base a sus partes internas y externas presentes en el equipo a construir (Arroyo 2016). Además, se debe tener en cuenta los siguientes parámetros, además de los mencionados anteriormente:

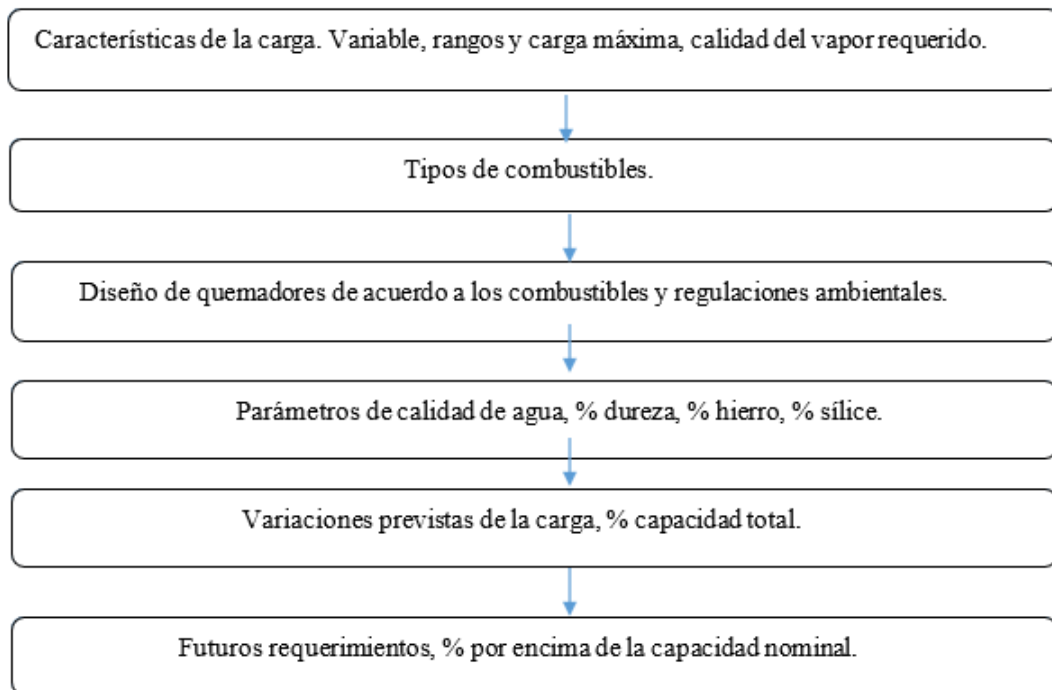


Ilustración 2-2: Pasos para la construcción

Fuente: (Pineda y Rangel 2017).

➤ **Especificaciones de diseño**

Gracias al conocimiento de los equipos desarrollados, además de la revisión de estado de arte podemos obtener una tabla completa de especificaciones que uno requiere. Dónde: (Rf) requisito fijo (o de obligatorio cumplimiento), (Rm) requisito mínimo (o de cumplimiento entre ciertos límites), y (D) deseo (o lujo). La construcción de esta tabla está basada en la revisión del estado del arte, y en el conocimiento de los equipos que compiten con este desarrollo (Guiot y Ramos 2018).

Tabla 4-2: Especificaciones de diseño

ESPECIFICACIONES				
Tipo	Requerimiento		Intervalos	Criterio
Rm	Geometría	El caldero no ocupa mucho espacio	$\leq 1.3 \text{ m}^2$	Calderas de biomasa comerciales
Rf	Masa	El caldero no es pesado	$\leq 400\text{kg}$	Calderas de biomasa comerciales
Rm	Energía	Es una caldera de baja potencia	$\leq 5\text{kW}$	Calderas comerciales
Rf		El caldero es eficiente térmicamente	$\geq 50\%$	Calderas de biomasa comerciales
D		El caldero no necesita energía eléctrica	-	Uso doméstico y ZNI
Rf	Material	Los materiales del caldero son adecuados	Cobre-Acero	Calderas comerciales
Rf	Señal	El caldero tiene control de nivel de agua	-	Calderas comerciales
Rf		El caldero tiene control de presión de vapor	-	Calderas comerciales
Rm		El caldero tiene control de nivel de temperatura de gases calientes	-	Calderas comerciales
Rf		Funcionamiento confiable	-	Uso doméstico
Rm	Ergonomía	Los controles de operación del caldero son fáciles y cómodos de manejar	-	Uso doméstico
Rf		El caldero tiene un sistema motriz para trasladarse fácilmente	-	Uso doméstico
Rf	Fabricación control de producción	El caldero es desarrollado siguiendo los estándares de calidad establecidos para estos Equipos	-	Calderas comerciales
Rf	Montaje	El caldero es fácil de ensamblar y montar	-	Uso doméstico y ZNI
D		Fácil de almacenar	-	Uso doméstico y ZNI

Fuente: (Pineda y Rangel 2017).

- **Análisis funcional**

Una vez identificadas nuestras necesidades en ingeniería se empieza con la identificación de la función principal del equipo (caja negra) su balance de energía y masa respectivamente (Osejo 2017).

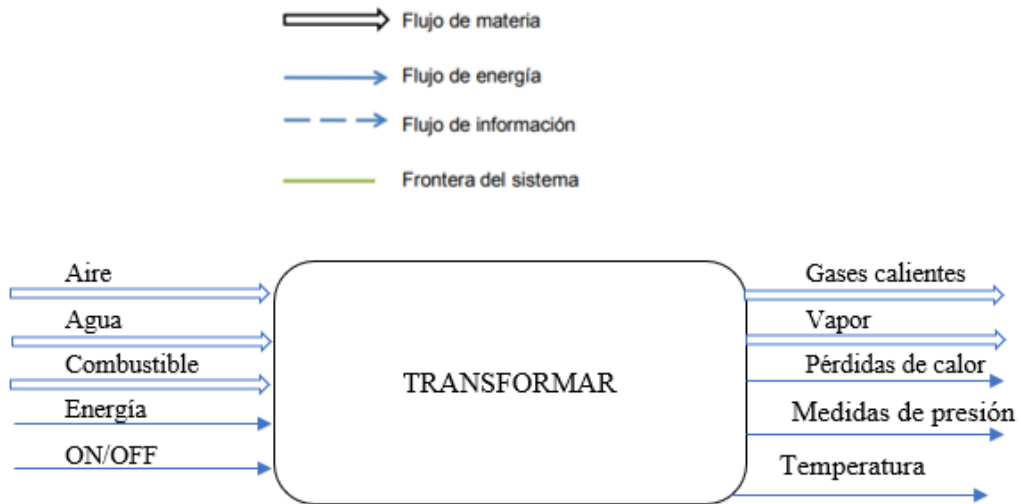


Ilustración 3-2: Análisis funcional

Fuente: elaboración propia.

CAPITULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Diseño térmico del caldero

Diseño técnico elaborado a partir de normas ASME y con ayuda de un software considerando las propiedades del agua y del vapor.

Tabla 1-3: Variables de diseño térmico del caldero

Presión diseño	Pd	150Psi—10.34bar—103.4 KPa
Presión a trabajar	Pw	50Psi--- 3.44bar—344.74 KPa
Presión de Riobamba laboratorio	Pa	10.622Psi—73.2361 KPa-0.722atm
Presión total a trabajar	PTw	344.74+73.23=417.97 KPa
Temperatura de vapor a trabajar o temperatura saturada a(417.97KPa)	Tsat	145.15 °C—418.30 K
Temperatura agua en Riobamba	Tinwater	18°C+273.15=291.15k
Temperatura hierve el agua (Riobamba)	Tbwater	90.93 °C

Fuente: Elaboración propia

Con base en la presión de operación se procederá a calcular la presión de funcionamiento del caldero con la ecuación 1.

3.2. Cálculo de la presión de funcionamiento de la caldera

El caldero se instala en la ciudad de RIOBAMBA (10,62 Psi), la cual funciona a una presión:

$$P = 50 \text{ Psi}$$

$$P_{Tw} = P_{abs}$$

$$P_{Tw} = P_w + P_a$$

$$P_{Tw} = 344.74 + 73.23$$

$$P_{Tw} = 417.97 \text{ KPa}$$

(Ecuación 1)

Con la presión de funcionamiento en la cual se calculó, se determina la temperatura de saturación o temperatura de salida de vapor mediante la ecuación 2.

Utilizando la tabla de vapor 5 del libro de Cengel (anexo 1), realizamos una interpolación de valores y obtenemos:

$$T_{\text{sat}} = 145.15 \text{ }^{\circ}\text{C} = 418.30 \text{ K}$$

3.3. Factor de evaporación (fe)

$$F. e. = \frac{h_{fg}}{h_g - h_f}$$

(Ecuación 2)

h_{fg} : Entalpia del fluido (mezcla) a presión atmosférica

h_g : entalpia del fluido (vapor) a presión de operación

h_f : entalpia del fluido (líquido) a temperatura de alimentación

Con los valores utilizados anteriormente se procedió a encontrar la entalpia en función a la presión utilizada en el caldero (anexo 2).

Interpolamos para cada uno y tenemos:

$$h_{fg@73.23\text{kPa}} = 2279.89036 \text{ kJ/kg}$$

$$h_g@417.97\text{kPa} = 2740.00 \text{ kJ/kg}$$

$$h_f@18^{\circ}\text{C} = 75.54 \text{ kJ/kg}$$

$$F. e. = \frac{2279.89}{2740 - 75.54}$$

$$F. e. = 0.85$$

3.4. Potencia nominal del caldero (Pn)

$$P_n = \frac{P_r}{F. e.}$$

(Ecuación 3)

P_r : Potencia real del caldero en BHP = 3

$$P_n = \frac{3\text{BHP}}{0.85}$$

$$P_n = 3.5\text{BHP}$$

3.5. Calor total requerido (\dot{Q}_{total})

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{util} + \dot{Q}_{perdidas}$$

(Ecuación 4)

$$\dot{Q}_{total} = \frac{\dot{Q}_{util}}{\eta}$$

(Ecuación 5)

\dot{Q}_{util} : Calor util

$\dot{Q}_{perdida}$: Calor perdida del proceso

η : eficiencia del calderín

El calor útil será la potencia nominal (kJ/h)

$$\dot{Q}_{util} = 3.5 \text{BHP} * \frac{9.8095 \text{kJ}}{1} * \frac{3600 \text{s}}{1 \text{h}} = 123599.7 \text{kJ/h}$$

Además, asumiremos una eficiencia del 80%.

$$\dot{Q}_{total} = \frac{123599.7 \text{ kJ}}{0.80} \frac{1}{\text{h}}$$
$$\dot{Q}_{total} = 154499.62 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

3.6. Caudal másico real del agua/vapor (\dot{m})

3.6.1. Balance de energía

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema}$$

(Ecuación 6)

$$E_{entrada} = E_{salida}$$

$$\dot{Q}_{sensible(\text{agua})} + \dot{Q}_{latente} + \dot{Q}_{sensible \text{ vapor}} = \dot{Q}_{salida}$$

$$(\dot{m} * c_{p_{\text{agua}}} * \Delta T) + \dot{m} h_{fg} + (\dot{m} * c_{p_{\text{vapor agua}}} * \Delta T) = \dot{Q}_{util}$$

(Ecuación 7)

Donde:

\dot{m} : Flujo másico del vapor (kg /h)

$c_{p_{\text{agua}}}$: calor específico del agua (kJ/ kg °C)

$c_{p_{\text{vapor agua}}}$: calor específico de vapor agua (kJ/ kg °C)

ΔT : Variación de temperatura del agua de suministro ($^{\circ}\text{C}$)

h_{fg} : Entalpia de evaporación del agua (kJ/kg)

\dot{Q}_{util} : Potencia térmica del caldero (kJ/h)

Con los valores previamente obtenidos, con base a la temperatura en la que hierve el agua en Riobamba calculamos el calor específico (anexo 3)

$$c_{p_{\text{agua}(18^{\circ}\text{C})}} = 4.183 \frac{\text{KJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

En función a la temperatura calculada se obtiene el calor específico del gas ideal de todos los gases que se encuentran en la reacción (Anexo 4).

$$T_{\text{sat}} = 418.3 \text{ K}$$

$$c_{p_{\text{vapor agua}}} = a + bT + cT^2 + dT^3 \frac{\text{KJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$$

(Ecuación 8)

$$c_{p_{\text{vapor agua}}} = 32.24 + 0.1923 * 10^{-2}T + 1.055 * 10^{-5}T^2 - 3.595 * 10^{-9}T^3 \frac{\text{KJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$$

$$c_{p_{\text{vapor agua}}} = 32.24 + 0.8043 + 1.846 - 0.2631 \frac{\text{KJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$$

$$c_{p_{\text{vapor agua}}} = 34.62 \frac{\text{KJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \frac{\text{Kmol}}{18\text{kg}}$$

$$c_{p_{\text{vapor agua}}} = 1.923 \frac{\text{KJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta T_{\text{agua}} = (90.93 - 18)^{\circ}\text{C} = 72.93 \text{ }^{\circ}\text{C o K}$$

$$\Delta T_{\text{vapor de agua}} = (145.15 - 90.93)^{\circ}\text{C} = 54.58 \text{ }^{\circ}\text{C o K}$$

En función a la temperatura de saturación de operación del caldero, procedemos a encontrar las entalpías (anexo 5)

Se realiza una interpolación

Tabla 2-3: Valores a interpolar

T	Cp
90	2282.5
90.93	2280.10059999
95	2269.6

Fuente: Cengel, 2010

$$h_{fg(90.93^{\circ}\text{C})} = 2280.10 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{m} * (c_{p\text{agua}} * \Delta T_{\text{agua}} + h_{fg} + c_{p\text{vapor agua}} * \Delta T_{\text{vapor de agua}}) = \dot{Q}_{\text{util}}$$

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{\text{util}}}{(c_{p\text{agua}} * \Delta T + h_{fg+} + c_{p\text{vapor agua}} * \Delta T)}$$

$$\dot{m} = \frac{123599.7 \frac{\text{KJ}}{\text{h}}}{\left(4.183 \frac{\text{KJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * 72.93\text{K} + 2280.3586 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} + 1.93 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} * 54.58 \text{K}\right)}$$

$$\dot{m} = 45.93 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

3.6.2. Volumen de agua (\dot{V}_{agua})

$$\dot{V}_{\text{agua}} = \frac{\dot{m}}{\rho_{\text{agua}}} \text{ (Ecuación 9)}$$

A la temperatura dada luego de interpolacion, calculamos las propiedades del agua (anexo 6)

Tabla 3-3: Valores de temperatura a interpolar

80	971.8
90.93	964.4769
100	958.4

Fuente: Cengel, 2010.

Donde:

\dot{m} : Flujo másico del vapor (kg /h)

ρ_{agua} : densidad de agua (kg /m³)

\dot{V}_{agua} : volumen másico de agua (m³/h)

Temperatura del agua en el laboratorio de Procesos Industriales ESPOCH: 18 °C

$$\dot{V}_{agua} = \frac{45.93 \frac{kg}{h}}{\frac{964.47kg}{m^3}}$$

$$\dot{V}_{agua} = 0.0476 \frac{m^3}{h}$$

$$\dot{V}_{agua} = 47.6 \frac{l}{h}$$

3.7. Caudal másico de combustible (\dot{m}_{comb})

Sabiendo que en Ecuador el GLP tiene las siguientes composiciones y propiedades además de algunas propiedades y composición del aire

Tabla 4-3: Composición del GLP y del Aire

GLP				
Composición	Fórmula	Masa molar	Propiedades	Valor
70% propano	(C3H8)	44.1kg/kmol	Poder calórico inferior (PCI o LVH)	45343.04kJ/kg
30% butano	(C4H10)	58.12kg/kmol		
AIRE				
21% oxígeno	O2	28.97kg/kmol		
79% nitrógeno	N2			

Fuente: (Muñoz y Lagos 2013).

$$\dot{m}_{comb} = \frac{\dot{Q}_{total}}{PCI}$$

(Ecuación 10)

PCI: poder calorico inferior del GLP

$$\dot{m}_{comb} = \frac{154499.62 \frac{kJ}{h}}{45343.04kJ/kg}$$

$$\dot{m}_{comb} = \frac{3.4kg}{h}$$

3.8. Flujo volumétrico del combustible (\dot{V}_{comb})

Con el flujo másico de combustible calculado, se calcula el flujo volumétrico necesario para el funcionamiento del caldero.

$$\dot{V}_{comb} = \frac{\dot{m}_{comb}}{\rho_{comb}} \text{ (Ecuación 11)}$$

Donde:

\dot{V}_{comb} : Volumen masico del gas licuado de petróleo (m^3/h)

\dot{m}_{comb} : Flujo másico del gas licuado de petróleo (kg /h)

ρ_{comb} : Densidad de GLP (kg / m^3)

$$\dot{V}_{comb} = \frac{3.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{560 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\dot{V}_{GLP} = 6.08 * 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{1000\text{l}}{1\text{m}^3} = 6.08 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

3.9. Relación aire/combustible para mezcla estequiométrica (AC)

$$AC = \frac{m_{aire}}{m_{comb}}$$

(Ecuación 12)

Calculamos para una reacción de combustión ideal de GLP, con aire seco:



Donde:

C_3H_8 =Propano

C_4H_{10} = Butano

O_2 = Oxigeno

N_2 = Nitrógeno

CO_2 = Dióxido de carbono

H_2O = Agua

C → Carbono

$$2.1 + 1.2 = B$$

$$B = 3.3$$

H → Hidrogeno

$$5.6 + 3 = 2C$$

$$C = \frac{8.6}{2}$$

$$C = 4.3$$

O₂ → Oxigeno

$$0.21 A = B + \frac{1}{2} C$$

$$0.21A = 3.3 + \frac{4.3}{2}$$

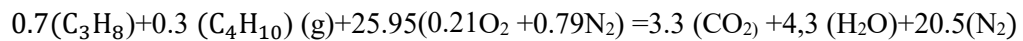
$$0.21A = 5.45$$

$$A = 25.95$$

N₂ → Nitrógeno

$$0.79A = D$$

$$D = 20.5$$



3.9.1. Masa de aire

$$\text{maire} = \text{Naire} * \text{Maire}$$

(Ecuación 14)

Donde

Naire: moles de aire

Maire: masa molar de aire

$$\text{maire} = 25.95 \text{ kmol} * \frac{28,97 \text{ kg}}{\text{kmol}}$$

$$\text{maire} = 751.77 \text{ kg}$$

3.9.2. Masa de combustible

$$m_{\text{comb}} = N_{\text{C}_3\text{H}_8} * M_{\text{C}_3\text{H}_8} + N_{\text{C}_4\text{H}_{10}} M_{\text{C}_4\text{H}_{10}}$$

(Ecuación 15)

Donde

$N_{\text{C}_3\text{H}_8}$: moles de propano

$M_{\text{C}_3\text{H}_8}$: masa molar de propano

$N_{\text{C}_4\text{H}_{10}}$: moles de butano

$M_{\text{C}_4\text{H}_{10}}$: masa molar de butano

$$m_{\text{comb}} = 0.7 \text{ kmol} * \frac{44.1 \text{ kg}}{\text{kmol}} + 0.3 \text{ kmol} * \frac{58.12 \text{ kg}}{\text{kmol}}$$

$$m_{\text{comb}} = 48.31 \text{ kg}$$

$$AC = \frac{751.77 \text{ kg}}{48.31 \text{ kg}}$$

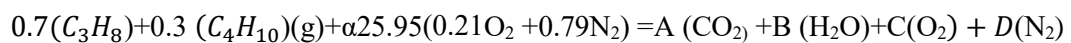
$$AC = 15.56 \text{ kg aire/kg combustible}$$

3.10. Relación aire/combustible para mezcla con 35% exceso de aire (AC. exceso)

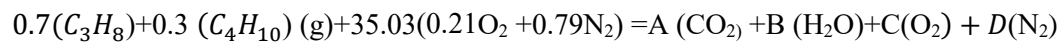
$$AC_{\text{exceso}} = \frac{m_{\text{aire}}}{m_{\text{comb}}}$$

(Ecuación 16)

Calculamos para una reacción de combustión ideal de GLP, con un 35% de exceso de aire:



$$\alpha = \text{aire } 1.35$$



C → Carbono

$$2.1 + 1.2 = A$$

$$A = 3.3$$

H → Hidrogeno

$$5.6 + 3 = 2B$$

$$B = \frac{8.6}{2}$$

$$B = 4.3$$

$O_2 \rightarrow$ Oxígeno

$$0.21 * 35.03 = A + \frac{1}{2}B + C$$

$$7.35 = 3.3 + \frac{4.3}{2} + C$$

$$C = 7.35 - 5.45$$

$$C = 1.9$$

$N_2 \rightarrow$ Nitrógeno

$$0.79 * 35.03 = D$$

$$D = 27.673$$

$$0.7(C_3H_8) + 0.3(C_4H_{10}) + 35.03(0.21O_2 + 0.79N_2) = 3.3(CO_2) + 4.3(H_2O) + 1.9O_2 + 27.67N_2$$

3.10.1. Masa de aire

$$m_{aire} = N_{aire} * M_{aire}$$

N_{aire} : moles de aire

M_{aire} : masa molar de aire

$$m_{aire} = 35.03 \text{ kmol} * \frac{28,97 \text{ kg}}{\text{kmol}}$$

$$m_{aire} = 1014.82 \text{ kg}$$

3.10.2. Masa de combustible

$$m_{comb} = N_{C_3H_8} * M_{C_3H_8} + N_{C_4H_{10}} * M_{C_4H_{10}}$$

$N_{C_3H_8}$: moles de propano

$M_{C_3H_8}$: masa molar de propano

$N_{C_4H_{10}}$: moles de butano

$M_{C_4H_{10}}$: masa molar de butano

$$m_{comb} = 0.7 \text{ kmol} * \frac{44.1 \text{ kg}}{\text{kmol}} + 0.3 \text{ kmol} * \frac{58.12 \text{ kg}}{\text{kmol}}$$

$$m_{comb} = 48.31 \text{ kg}$$

$$AC_{exceso} = \frac{m_{aire}}{m_{comb}}$$

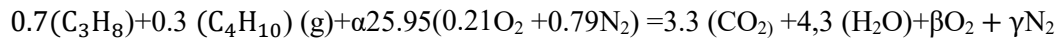
$$AC_{exceso} = \frac{1014.82 \text{ kg}}{48.31 \text{ kg}}$$

$$AC_{exceso} = 21.00 \text{ kg aire/kg combustible}$$

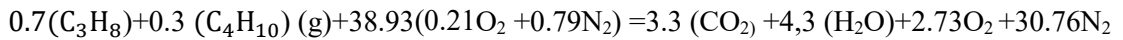
3.11. Relación aire/combustible para mezcla con 50% exceso de aire (AC. exceso)

$$AC_{\text{exceso}} = \frac{m_{\text{aire}}}{m_{\text{comb}}}$$

Calculamos para una reacción de combustión ideal de GLP, con 50% de exceso de aire



$$\alpha = \text{Exceso de aire } 1.5$$



3.11.1. Masa de aire

$$m_{\text{aire}} = N_{\text{aire}} * M_{\text{aire}}$$

N_{aire}: moles de aire

M_{aire}: masa molar de aire

$$m_{\text{aire}} = 38.93 \text{ kmol} * \frac{28.97 \text{ kg}}{\text{kmol}}$$

$$m_{\text{aire}} = 1127.65 \text{ kg}$$

3.11.2. Masa de combustible

$$m_{\text{comb}} = N_{\text{C}_3\text{H}_8} * M_{\text{C}_3\text{H}_8} + N_{\text{C}_4\text{H}_{10}} * M_{\text{C}_4\text{H}_{10}}$$

N_{C₃H₈}: moles de propano

M_{C₃H₈}: masa molar de propano

N_{C₄H₁₀}: moles de butano

M_{C₄H₁₀}: masa molar de butano

$$m_{\text{comb}} = 0.7 \text{ kmol} * \frac{44.1 \text{ kg}}{\text{kmol}} + 0.3 \text{ kmol} * \frac{58.12 \text{ kg}}{\text{kmol}}$$

$$m_{\text{comb}} = 48.31 \text{ kg}$$

$$AC_{\text{exceso}} = \frac{1127.65 \text{ kg}}{48.31 \text{ kg}}$$

$$AC_{\text{exceso}} = 23.34 \text{ kg aire/kg combustible}$$

3.12. Caudal másico de los gases de combustión (\dot{m}_{gas})

$$\dot{m}_{gas} = \dot{m}_{aire} + \dot{m}_{comb}$$

(Ecuación 17)

$$\dot{m}_{aire} = AC_{exceso} * \dot{m}_{comb}$$

(Ecuación 18)

\dot{m}_{aire} : caudal másico de aire necesario para combustión

AC_{exceso} : relación aire/combustible de combustión de GLP con 35% de exceso de aire

$$\dot{m}_{gas} = \dot{m}_{aire} + \dot{m}_{comb}$$

$$\dot{m}_{aire} = 21 * \frac{3.4\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{aire} = 71.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{aire} = AC_{exceso} * \dot{m}_{comb}$$

$$\dot{m}_{gas} = \frac{3.4\text{kg}}{\text{h}} + 71.4 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{gas} = \frac{74.8\text{kg}}{\text{h}}$$

3.13. Fracciones molares de los productos

Se calcula las Fracciones molares de los gases producto de la combustión con las ecuaciones.

$$n_T = 3.3(\text{CO}_2) + 4.5(\text{H}_2\text{O}) + 27.67(\text{N}_2) + 1.9(\text{O}_2)$$

$$n_T = 37.17$$

Donde:

n_T : moles totales

$$\text{fraccion de molar } x = \frac{\text{moles de } x}{\text{moles totales}}$$

(Ecuación 19)

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{3.3}{37.17}$$

$$X_{\text{CO}_2} = 0.089$$

$$X_{\text{H}_2\text{O}} = 0.115$$

$$X_{\text{N}_2} = 0.744$$

$$X_{\text{O}_2} = 0.052$$

3.14. Presiones parciales.

Se calcula las presiones parciales de los gases producto de la combustión con las ecuaciones

$$P_{CO_2} = X_{CO_2} * P_{atm}$$

(Ecuación 20)

P_{atm} → presión atmosférica en Riobamba = 73.2361 kPa

$$P_{CO_2} = 6.51$$

$$P_{H_2O} = 8.422$$

$$P_{N_2} = 54.488$$

$$P_{O_2} = 3.808$$

3.15. Número de Prandtl

$$Pr_{gasprod} = \sum X_i * Pr_i$$

(Ecuación 21)

$$Pr_{gasprod} = X_{CO_2} * Pr_{CO_2} + X_{H_2O} * Pr_{H_2O} + X_{N_2} * Pr_{N_2} + X_{O_2} * Pr_{O_2}$$

$$Pr_{gasprod} = 0.089 * 0.7446 + 0.115 * 0.9723 + 0.744 * 0.7028 + 0.052 * 0.7019$$

$$Pr_{gasprod} = 0.7374$$

Se calcula el número de Prandtl de los gases producto de la combustión con la ecuación:

$$Cp_{gasprod} = \sum X_i * Cp_i$$

(Ecuación 22)

$$Cp_{gasprod} = X_{CO_2} * Cp_{CO_2} + X_{H_2O} * Cp_{H_2O} + X_{N_2} * Cp_{N_2} + X_{O_2} * Cp_{O_2}$$

$$Cp_{gasprod} = 0.089 * 953.2678 + 0.115 * 1905.9 + 0.744 * 1042.8 + 0.052 * 946.0674$$

$$Cp_{gasprod} = 1129.057 \frac{J}{Kg * K} * \frac{1KJ}{1000J} = 1.129 \frac{KJ}{Kg * K}$$

Se calcula la viscosidad dinámica de los gases producto de la combustión con la siguiente ecuación:

$$\mu_{gasprod} = \sum X_i * \mu_i$$

(Ecuación 23)

$$\mu_{gasprod} = X_{CO_2} * \mu_{CO_2} + X_{H_2O} * \mu_{H_2O} + X_{N_2} * \mu_{N_2} + X_{O_2} * \mu_{O_2}$$

$$\mu_{\text{gasprodc}} = 0.089 * 2.04 * 10^{-5} + 0.115 * 1.437 * 10^{-5} + 0.744 * 2.28 * 10^{-5} + 0.052 * 2.67 * 10^{-5}$$

$$\mu_{\text{gasprodc}} = 2.18 * 10^{-5} \frac{\text{Kg}}{\text{m} * \text{s}} = \text{Ns/m}^2$$

Se calcula la conductividad térmica de los gases producto de la combustión con la siguiente ecuación:

$$k_{\text{gasprodc}} \sum X_i * k_i$$

(Ecuación 23)

$$k_{\text{gasprodc}} = X_{\text{CO}_2} * k_{\text{CO}_2} + X_{\text{H}_2\text{O}} * k_{\text{H}_2\text{O}} + X_{\text{N}_2} * k_{\text{N}_2} + X_{\text{O}_2} * k_{\text{O}_2}$$

$$k_{\text{gasprodc}} = 0.089 * 0.02613685 + 0.115 * 0.0282 + 0.744 * 0.0338 + 0.052 * 0.0359$$

$$k_{\text{gasprodc}} = \frac{0.032\text{W}}{\text{m} * \text{K}}$$

Se calcula la densidad de los gases producto de la combustión con la ecuación 24.

$$\rho_{\text{gasprodc}} \sum X_i * \rho_i$$

(Ecuación 24)

$$\rho_{\text{gasprodc}} = X_{\text{CO}_2} * \rho_{\text{CO}_2} + X_{\text{H}_2\text{O}} * \rho_{\text{H}_2\text{O}} + X_{\text{N}_2} * \rho_{\text{N}_2} + X_{\text{O}_2} * \rho_{\text{O}_2}$$

$$\rho_{\text{gasprodc}} = 0.089 * 1.284 + 0.115 * 0.525 + 0.744 * 0.817 + 0.052 * 0.933$$

$$\rho_{\text{gasprodc}} = 0.8310 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \text{ a } 1\text{atm}$$

$$\rho_{\text{gasprodc}} = 0.8310 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * \frac{0.723\text{atm}}{1\text{atm}}$$

$$\rho_{\text{gasprodc}} = 0.6 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \text{ a presión de riobamba}$$

Con el fin de calcular el número de Prandtl, viscosidad, dinámica, calor específico y densidad se determinó en función a las Propiedades de bióxido de carbono, óxido de carbono, nitrógeno, oxígeno y vapor de agua a una presión de 1 atm (anexo 8 y 9)

3.15.1. Temperatura de llama adiabática (Tg)

Se inicia desde el balance de energía del proceso de combustión.

La temperatura máxima es, la temperatura a la cual salen los productos. Se alcanza en un sistema que no existe pérdida de calor hacia los alrededores (Mercader, Cánovas y Baños 2019).

La temperatura de flama adiabática de un proceso de combustión de flujo estacionario se determina al establecer $Q = 0$ y $W = 0$, entonces.



Ilustración 1-3: Balance de energía

Fuente: Elaboración propia

$$\Delta \hat{H} = \sum_{\text{productos}} n_i \hat{h}_i - \sum_{\text{reactivos}} n_i \hat{h}_i = Q = 0$$

(Ecuación 25)

$$\hat{H}_{\text{reactivos}} = \hat{H}_{\text{productos}}$$

Para encontrar las entalpias de formación en estado de referencia (1 atm, 25°C) nos basamos en Entalpias de sustancias a una temperatura de 25 °C (Anexo 7).

Para encontrar las entalpias sensibles en estado especificado nos basamos en Entalpias de sustancias a una temperatura de 25 °C. (Anexo 10).

$$\sum_{\text{productos}} n_p H_p = \sum_{\text{reactivos}} n_r H_r$$

$$\hat{H}_{\text{reactivos}} = \hat{H}_{\text{productos}}$$

$$\sum_{\text{productos}} n_p (\bar{h}_F^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_p = \sum_{\text{reactivos}} n_r (\bar{h}_F^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_r$$

(Ecuación 26)

Donde:

n_p, n_r : número de moles del producto y reactivo respectivamente

\bar{h}_F° : entalpia de formación en estado de referencia

\bar{h} : entalpia sensible en el estado especificado

\bar{h}° : entalpia de formación en estado de referencia(1atm, 25°C)

Una vez que se especifican los reactivos y sus estados, resulta fácil determinar la entalpia de los reactivos H_{reac} . Sin embargo, debido a que la temperatura de los productos no se conoce antes de los cálculos, el cálculo de la entalpia de los productos H_{prod} no es directo. Por consiguiente,

la determinación de la temperatura de flama adiabática requiere el uso de una técnica iterativa. Se supone una temperatura para los gases producto, y la H_{prod} se determina para esta temperatura. Si esta no es igual a H_{reac} , los cálculos se repiten con otra temperatura. Cuando el oxidante es aire, los gases producto se componen principalmente de N_2 y una buena suposición para la temperatura de flama adiabática se obtiene tratando todos los gases producto como N_2 (Rodríguez 2019).

$$\sum_{\text{productos}} np(\bar{h}_F^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_p = \sum_{\text{reactivos}} nr(\bar{h}_F^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_r$$

(Ecuación 27)

$$\sum_{\text{reactivos}} nr(\bar{h}_F^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_r = n_{C_3H_8}(\bar{h}_F^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{C_3H_8} + n_{C_4H_{10}}(\bar{h}_F^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{C_4H_{10}} + 0$$

$$\sum_{\text{reactivos}} nr(\bar{h}_F^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_r$$

$$= 0.7 \text{ mol} \left(-118910 \frac{\text{J}}{\text{mol}} + 0 - 0 \right) + 0.3 \text{ mol} \left(-125790 \frac{\text{J}}{\text{mol}} + 0 - 0 \right) + 0$$

$$\sum_{\text{reactivos}} nr(\bar{h}_F^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_r = -120974 \text{ J}$$

$$\sum_{\text{productos}} np(\bar{h}_F^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_p =$$

$$n_{CO_2}(\bar{h}_F^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{CO_2} + n_{H_2O}(\bar{h}_F^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{H_2O} + n_{N_2}(\bar{h}_F^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{N_2} \\ + n_{O_2}(\bar{h}_F^{\circ} + \bar{h} - \bar{h}^{\circ})_{O_2}$$

$$= 3.3 \text{ mol} \left(-393520 \frac{\text{J}}{\text{mol}} + \bar{h}_{CO_2} - 9904 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \right)$$

$$+ 4.3 \text{ mol} \left(-241820 \frac{\text{J}}{\text{mol}} + \bar{h}_{H_2O} - 9364 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \right)$$

$$+ 27.67 \text{ mol} \left(0 + \bar{h}_{N_2} - 8669 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \right) + 1.9 \left(0 + \bar{h}_{O_2} - 8682 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \right)$$

$$-1298616 \text{ J} + 3.3\bar{h}_{CO_2} - 32683.2 \text{ J} - 1039826 \text{ J} + 4.3\bar{h}_{H_2O} - 40265.2 \text{ J} + 27.67\bar{h}_{N_2}$$

$$- 239871.23 \text{ J} + 1.9\bar{h}_{O_2} - 16495.8 \text{ J}$$

$$3.3\bar{h}_{CO_2} + 4.3\bar{h}_{H_2O} + 27.67\bar{h}_{N_2} + 1.9\bar{h}_{O_2} = 2667757.43 \text{ J} - 120974 \text{ J}$$

Asumimos que todo es nitrógeno ya que este representa una cantidad considerable en la mezcla

$$3.3\bar{h}_{N_2} + 4.3\bar{h}_{N_2} + 27.67\bar{h}_{N_2} + 1.9\bar{h}_{N_2} = 2546783.43 \text{ J}$$

$$37.17\bar{h}_{N_2} = 2546783.43 \text{ J}$$

$$\bar{h}_{N_2} = 68517.176 \text{ J}$$

Para calcular la temperatura de la llama adiabática, interpolamos tomando como principio el valor de la entalpía (Anexo 11)

Tabla 5-3: Datos para interpolación de la temperatura adiabática

68417	2100
68517.176	2102.768822553
70226	2150

Fuente: Cengel, 2010.

$$T = 2102.769\text{K} = 1829.619\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Debido a que la temperatura real siempre va hacer inferior a la temperatura de flama adiabática calculada.

Podemos tomar como valor aproximado 1800 K con ese valor se obtiene:

$$\begin{aligned} 3.3\bar{h}_{\text{CO}_2} + 4.3\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} + 27.67\bar{h}_{\text{N}_2} + 1.9\bar{h}_{\text{O}_2} \\ = 3.3 * 88806 + 4.3 * 72513 + 27.67 * 57651 + 1.9 * 60371 = \\ 3.3\bar{h}_{\text{CO}_2} + 4.3\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} + 27.67\bar{h}_{\text{N}_2} + 1.9\bar{h}_{\text{O}_2} = 2314773.77 \text{ J} \end{aligned}$$

Podemos tomar como valor aproximado 1900 K con ese valor se obtiene:

$$\begin{aligned} 3.3\bar{h}_{\text{CO}_2} + 4.3\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} + 27.67\bar{h}_{\text{N}_2} + 1.9\bar{h}_{\text{O}_2} \\ = 3.3 * 94,793 + 4.3 * 77,517 + 27.67 * 61,220 + 1.9 * 64,116 \\ 3.3\bar{h}_{\text{CO}_2} + 4.3\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} + 27.67\bar{h}_{\text{N}_2} + 1.9\bar{h}_{\text{O}_2} = 2461917.8 \text{ J} \end{aligned}$$

Podemos tomar como valor aproximado 1920 K con ese valor se obtiene:

$$\begin{aligned} 3.3\bar{h}_{\text{CO}_2} + 4.3\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} + 27.67\bar{h}_{\text{N}_2} + 1.9\bar{h}_{\text{O}_2} \\ = 3.3 * 95995 + 4.3 * 78527 + 27.67 * 61936 + 1.9 * 64868 \\ 3.3\bar{h}_{\text{CO}_2} + 4.3\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} + 27.67\bar{h}_{\text{N}_2} + 1.9\bar{h}_{\text{O}_2} = 2491467.92 \text{ J} \end{aligned}$$

Podemos tomar como valor aproximado 1980 K con ese valor se obtiene:

$$\begin{aligned} 3.3\bar{h}_{\text{CO}_2} + 4.3\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} + 27.67\bar{h}_{\text{N}_2} + 1.9\bar{h}_{\text{O}_2} \\ = 3.3 * 99,606 + 4.3 * 81,573 + 27.67 * 64,090 + 1.9 * 67,127 \end{aligned}$$

$$3.3\bar{h}_{\text{CO}_2} + 4.3\bar{h}_{\text{H}_2\text{O}} + 27.67\bar{h}_{\text{N}_2} + 1.9\bar{h}_{\text{O}_2} = 2580375.3 \text{ J}$$

Una vez realizadas las interacciones buscamos un valor que se aproxime a la entalpía tanto por la izquierda o derecha. Así interpolamos y obtenemos el valor verdadero de la temperatura de la flama

$$T_g \text{ ideal} = 1957.33\text{K} = 1684.18 \text{ }^\circ\text{C}$$

3.15.2. Temperatura máxima teórica de la llama

Es la temperatura que se alcanza cuando la cantidad de aire empleada en la combustión es la cantidad estequiométrica necesaria para ello. Se trata de un valor ideal, ya que las condiciones estequiométricas son imposibles de conseguir en la realidad. Las temperaturas máximas de la llama son 200-300 °C inferiores a la temperatura máxima teórica de la llama (Molina y Núñez 2021).

$$\text{Temperatura de la llama máx} = T_g \text{ ideal} = 1684.18 \text{ }^\circ\text{C} - 250^\circ\text{C}$$

$$\text{Temperatura de la llama máx } T_g \text{ real} = 1434.18^\circ\text{C} = 1707.33\text{K}$$

3.16. Análisis de la transferencia de calor

Se determina el factor de forma con la ecuación, de esta manera indicar a que distancia se coloca el quemador a utilizar:

$$F_{ij} = \frac{D^2}{D^2 + 4L^2}$$

(Ecuación 28)

Donde:

Fij: factor de forma integral

D: diametro de superfie circular del hogar(cm)

L: Distancia entre la superficie del quemador y la del hogar(cm)

$$F_{ij} = \frac{(44\text{cm})^2}{(44\text{cm})^2 + 4L^2}$$

Por método iterativo hasta que el factor tome un valor de uno determinamos el valor de L

Asumimos que el diámetro es 44cm (Andrés y Uquillas 2017)

$$0.998 = \frac{44\text{cm}^2}{44\text{cm}^2 + 4L^2}$$

$$L = 1$$

3.17. Calcular la emisividad y absorptividad de H₂O y CO₂

Para determinar las emisividades de los gases H₂O y CO₂, se utilizaron las cartas de Hottel, Además de determinar las fracciones molares de las misma para obtener las presiones parciales de los gases de combustión, para ello se utilizó las siguientes fórmulas:

Para calcular las diferentes emisividades de los gases presentes en la reacción (Agua, dióxido de carbono) tomando como referencia la temperatura 1707. 33 K. (Anexo 12)

$$P_{CO_2} = y_{CO_2} \cdot P \text{ (Ecuación 29)}$$

$$P_{H_2O} = y_{H_2O} \cdot P \text{ (Ecuación 30)}$$

P_{H_2O} : Presión del agua

P_{CO_2} : Presión del dióxido de carbono

P: presión total

y_{H_2O} : fracción molar del agua

y_{CO_2} : fracción molar del dióxido de carbono

Para calcular las fracciones molares de cada gas de combustión utilizamos:

$$y_{gas} = \frac{n_{moles \text{ del gas}}}{n_{moles \text{ totales}}} \text{ (Ecuación 31)}$$

$$n_{moles \text{ totales}} = n_{CO_2} + n_{H_2O} \text{ (Ecuación 32)}$$

n_{CO_2} : moles de dióxido de carbono (4mol)

n_{H_2O} : moles del agua(5mol)

$$n_{moles \text{ totales}} = (3.3 + 4.3) \text{ mol}$$

$$n_{moles \text{ totales}} = 7.6 \text{ moles}$$

$$y_{CO_2} = \frac{3.3}{9}$$

$$y_{CO_2} = 0.43$$

$$y_{H_2O} = \frac{4.3}{9}$$

$$y_{H_2O} = 0.565$$

Considerando que estamos trabajando a 0.7227 atm (Riobamba)

$$P_{CO_2} = 0.43 * 0.7227 \text{ atm}$$

$$P_{CO_2} = 0.31 \text{ atm}$$

$$P_{H_2O} = 0.565 * 0.7227 \text{ atm}$$

$$P_{H_2O} = 0.408 \text{ atm}$$

Para calcular la longitud media del haz de la cámara, se puede determinar a través del anexo 13 para obtener la longitud media acorde a la forma geométrica del volumen de los gases de combustión. Para este caso, se utiliza el factor de 0.65D, puesto que en el tanque hogar, el calor es irradiado hacia la superficie curva del mismo (Pérez, Cordovés y Román 2016).

$$L = 0.65 * D \text{ (Ecuación 33)}$$

$$L = 0.65 * 0.26 \text{ m}$$

$$L = 0.169 \text{ m}$$

$$P_{CO_2} * L = 0.31 \text{ atm} * 0.169 \text{ m}$$

$$\text{(Ecuación 34)}$$

$$P_{CO_2} * L = 0.0523 \text{ atm} * \text{ m}$$

$$P_{CO_2} * L = 172 \text{ ft} * \text{ atm}$$

$$P_{H_2O} * L = 0.408 \text{ atm} * 0.169 \text{ m} \text{ (Ecuación 35)}$$

$$P_{H_2O} * L = 0.068 \text{ atm} * \text{ m}$$

$$P_{H_2O} * L = 0.226 \text{ ft} * \text{ atm}$$

Para calcular las emisividades de los gases presentes en la reacción (agua, dióxido de carbono) tomando como referencia la temperatura 1707.33 K. (Anexo 12)

$$E_{H_2O} = 0.055$$

$$E_{CO_2} = 0.055$$

Debido a que nos encontramos en la región interandina, provincia Chimborazo, ciudad de Riobamba estamos a una presión de 0.72 atm; corregimos para esa presión:

$$\frac{P_{H_2O} + P}{2} = \frac{0.55 + 0.7227}{2}$$

$$\frac{P_{H_2O} + P}{2} = 0.625 \text{ atm}$$

Utilizando el Anexo 14 con el fin de calcular los factores de corrección de los gases, tanto para el agua y el dióxido de carbono, debido a que la presión en la cual se trabaja no se encuentra a 1 atm.

$$C_w = 1.1$$

$$C_w = 0.9$$

$$P_{CO_2} * L + P_{H_2O} * L \text{ (Ecuación 36)}$$

$$0.172 \text{ ft} * \text{atm} + 0.226 \text{ ft} * \text{atm}$$

$$0.398 \text{ ft} * \text{atm}$$

$$\frac{P_{H_2O} * L}{P_{CO_2} * L + P_{H_2O} * L} \text{ (Ecuación 37)}$$

$$\frac{0.226 \text{ ft} * \text{atm}}{0.398 \text{ ft} * \text{atm}}$$

$$0.567 \text{ atm} * \text{ft}$$

Utilizando el Anexo 15 se procede a calcular el factor de corrección para la diferencia de emisividades de los gases de combustión a una temperatura de 1707.33 K.

$$\Delta \varepsilon = 0.015$$

3.18. Absortividad

Se calcula la absorbida de los gases de acuerdo a Hottel donde $\Delta \alpha = \Delta \varepsilon$ con ayuda de las tablas:

$$\alpha_g = \alpha_{H_2O} + \alpha_{CO_2} - \Delta \alpha$$

$$\text{(Ecuación 38)}$$

$$\alpha_{CO_2} = C_{CO_2} * \left(\frac{T_s}{T_g}\right)^{0.65} * \varepsilon_{CO_2} \text{ (Ecuación 39)}$$

$$\alpha_{H_2O} = C_{H_2O} * \left(\frac{T_s}{T_g}\right)^{0.45} * \varepsilon_{H_2O} \text{ (Ecuación 40)}$$

Teniendo en cuenta T_s como un valor a calcular, y de referencia 800 k

$$P_{CO_2} * L * \frac{T_s}{T_g} \text{ (Ecuación 41)}$$

$$0.172 \text{ ft} * \text{atm} * \frac{800\text{K}}{1707.33\text{K}}$$

$$0.172 \text{ ft} * \text{atm} * \frac{800\text{K}}{1707.33\text{K}}$$

$$P_{H_2O} * L * \frac{T_s}{T_g} \text{ (Ecuación 42)}$$

$$0.226 \text{ ft} * \text{atm} * \frac{800\text{K}}{1707.33\text{K}}$$

$$0.105 \text{ ft} * \text{ atm}$$

Para calcular las diferentes emisividades de los gases presentes en la reacción (Agua, dióxido de carbono) tomando como referencia la temperatura 800 K. (Anexo 12)

$$E_{H_2O} = 0.08$$

$$E_{CO_2} = 0.07$$

En el método de Hottel, 1954 para poder evaluar la emisividad para presiones totales diferentes de 1 atm, la emisividad de los gases radiantes (vapor de agua y dióxido de carbono) se debe multiplicar por un factor de corrección C_w y CC .

Además, los factores de corrección son $C_c = 0.99$ y $C_w = 1.1$ no cambian con la temperatura de las superficies.

Cuando la superficie es negra se puede suponer que esta absorberá toda la radiación emitida por los gases, por lo tanto, se puede asumir que los factores de corrección de la mezcla $\Delta\alpha$ y $\Delta\epsilon$ son iguales, es decir $\Delta\alpha = \Delta\epsilon$ (Alderetes 2015).

$$\begin{aligned}\alpha_{CO_2} &= C_{CO_2} * \left(\frac{T_s}{T_g}\right)^{0.65} * \epsilon_{CO_2} \\ \alpha_{CO_2} &= 0.99 * \left(\frac{800K}{1707.33K}\right)^{0.65} * 0.07 \\ \alpha_{CO_2} &= 0.042 \\ \alpha_{H_2O} &= C_{H_2O} * \left(\frac{T_s}{T_g}\right)^{0.45} * \epsilon_{H_2O} \\ \alpha_{H_2O} &= 1.1 * \left(\frac{800K}{1707.33K}\right)^{0.45} * 0.08 \\ \alpha_{H_2O} &= 0.0625\end{aligned}$$

Utilizando el Anexo 15 se procede a calcular el factor de corrección para la diferencia de emisividades de los gases de combustión a una temperatura de 800 K como referencia.

$$\Delta\alpha = 0.005$$

3.19. Emisividad y absorptividad de los gases

3.19.1. Valor de ε_g

$$\varepsilon_g = C_w * \varepsilon_{H_2O} + C_c * \varepsilon_{CO_2} - \Delta\varepsilon \text{ (Ecuación 43)}$$

$$\varepsilon_g = 1.1 * 0.055 + 0.99 * 0.055 - 0.028$$

$$\varepsilon_g = 0.087$$

3.19.2. Valor final de absorptividad

$$\alpha_g = \alpha_{H_2O} + \alpha_{CO_2} - \Delta\alpha \text{ (Ecuación 44)}$$

$$\alpha_g = 0.0625 + 0.042 - 0.005$$

$$\alpha_g = 0.0995$$

Se calcula el calor por radiación luminosa en el hogar con la ecuación 45

3.19.3. Análisis de Prabir Basu El calor de radiación:

$$Q_{radL} = \Psi * A_{flama} * \sigma \varepsilon_L (T_G^4 - T_S^4) \text{ (Ecuación 45)}$$

El parámetro ψ es el factor de eficiencia térmica de la pared del hogar

$$\Psi = m * F_{12} \text{ (Ecuación 46)}$$

Donde m es el grado de luminiscencia de la llama, en este caso, para combustibles líquidos, m = 0,55. F es el factor de forma que representa la fracción de la radiación que sale de la superficie 1, que es interceptada por la superficie 2. En el caso de las calderas, los gases de combustión (1) están contenidos en el cilindro principal (2), por ello $F_{12}=1$.

$$\Psi = 0.8 * 1$$

$$Q_L = 0.8 * A_{flama} * \sigma \varepsilon_L (T_G^4 - T_S^4) \text{ (Ecuación 47)}$$

Donde:

A_{flama} : Área superficial interna del tubo de la flama de los productos de combustión.

σ : Constante de Stefan - Boltzmann $5.6704 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2K}$

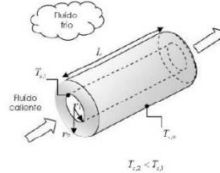
ε_L : Emisividad luminosa.

T_g : Temperatura de los gases de combustión (K).

T_s : Temperatura de la superficie interna del tanque hogar del caldero (K).

3.20. Área interna del tubo (A_{flama})

Para encontrar la resistencia térmica de conducción en paredes cilíndricas se considera el cilindro hueco de la siguiente figura, cuyas superficies, externa e interna, están expuestas a fluidos con diferentes temperaturas (Soriano Martínez 2019).



La Ley de Fourier en coordenadas cilíndricas para condiciones de estado estacionario, sin generación interna de calor, se expresa como:

$$Qr = -kAr * \frac{dT}{dr} \text{ (Ecuación 48)}$$

Siendo Qr una constante en la dirección radial. Si se considera también la forma del área de transferencia para esta geometría, nos queda:

$$Qr = -k(2\pi rL) * \frac{dT}{dr} \text{ (Ecuación 49)}$$

$$A_{flama} = 2\pi * r * l \text{ (Ecuación 50)}$$

$$A_{flama} = 2\pi * \frac{0.26}{2} * 0.65 \text{ cm}$$

$$A_{flama} = 0.53 \text{ m}^2$$

3.21. Cálculo de la emisividad luminosa:

$$\epsilon_L = m (1 - e^{-(ky*\Gamma+kc)*P*L}) \text{ (Ecuación 51)}$$

Donde:

m: Factor de luminiscencia, para combustibles gaseosos = 0.80 a 1 líquidos 0.55

ky, kc: Coeficientes de absorción radiante debido a los gases triatómicos

r: Es la sumatoria de las fracciones molares de los gases triatómicos = 1

L: Longitud media efectiva del haz(m)

P: Presión del sistema = 0.101 bar (presión atmosférica) MPa

Para calcular los valores de los coeficientes

$$ky = \left[\frac{7.8 + 16 * y_{H2O}}{3.16 \sqrt{(P_{H2O} + P_{CO2}) * L}} - 1 \right] * \left[1 - 0.37 * \frac{Tg}{1000} \right] \text{ (Ecuación 52)}$$

Donde:

y_{H2O} : Fracción molar del H2O = 0.565

P_{H2O} : Presión parcial del gas H2O = 0.408 atm \approx 0.0413 MPa

P_{CO2} : Presión parcial del gas CO2 = 0.31 atm \approx 0.0314 MPa

L: Longitud de la flama

Tg: Temperatura de la flama adiabática (K)

3.22. Longitud de la flama

La longitud media efectiva del haz L_e es una correlación en términos de un solo parámetro que expresa la dependencia de la emisividad del gas con respecto del tamaño y forma de la geometría que ocupa el gas, para determinar su valor se usa la siguiente ecuación (Chavarro y Otálora 2015).

$$L_e = 0.65 D_{int, hogar}$$

Utilizamos la misma para flama de combustión

$$L_e = 0.65 * \phi_{flama} \text{ (Ecuación 53)}$$

$$\phi_{flama} = 0.26 m$$

$$L_e = 0.169 m$$

$$ky = \left[\frac{7.8 + 16 * 0.565}{3.16 \sqrt{(0.048 + 0.031) * 0.169}} - 1 \right] * \left[1 - 0.37 * \frac{1707.33k}{1000K} \right]$$

$$ky = \left[\frac{16.84}{0.36} - 1 \right] * [0.368]$$

$$ky = 16.84 \frac{1}{m * MPa}$$

Para kc

$$kc = 2 - ((EA - 1) * (0.00016 Tg - 0.5)) * \frac{F_{molarC}}{F_{molarH}} \text{ (Ecuación 54)}$$

Donde

EA: Exceso de aire para la combustión del GLP = 35%

Tg: Temperatura de la flama adiabática (K) = 1707.33k

F_{molarC} : Fracción molar del Carbono = 3.3

F_{molarH} : Fracción molar del Hidrogeno = 8.6

$$kc = 2 - ((0.35 - 1) * (0.00016 * 1707.33k - 0.5)) * \frac{3.3}{8.6}$$

$$kc = 2 - (-0.65) * (-0.226) * 0.38$$

$$kc = 1.943$$

$$\varepsilon_L = m (1 - e^{-(ky*r+kc)*P*L})$$

$$\varepsilon_L = 1 (1 - e^{-(16.84*0.079+1.94)*0.073*0.169})$$

0.7227atm: 0.0732275775MPa

$$\varepsilon_L = 0.8 (1 - e^{-(3.27)*0.012})$$

$$\varepsilon_L = 0.8 (1 - e^{(-0.039)})$$

$$\varepsilon_L = 0.8(1 - 0.9615)$$

$$\varepsilon_L = 0.03085$$

Se calcula el calor por radiación luminosa en el hogar. Se puede considerar un %

$$Q_L = A_{flama} * \sigma \varepsilon_L (T_G^4 - T_S^4) \text{ (Ecuación 55)}$$

$$Q_L = 0.53 * 5.67 \times 10^{-8} * 0.03085 (1707.33^4 - 800^4)$$

$$Q_L = 3.0 \times 10^{-8} * 0.03085 * 8.087 \times 10^{12}$$

$$Q_L = 7484.51w$$

Se calcula el calor por radiación no luminosa en el hogar con la ecuación 61

$$Q_{NL} = A_{SIH} * \sigma (\varepsilon_G T_G^4 - \alpha_G T_S^4) \text{ (Ecuación 56)}$$

Donde:

Q_{NL} : calor no luminica

A_{SIH} : area del tanque interior

σ : Constante de Stefan - Boltzmann $5.6704 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2K}$

α_g : absorvidad de los gases = 0.0995

ε_g : emisibilidad de los gases = 0.087

T_g : Temperatura de los gases de combustión (K)

T_s : Temperatura de la superficie interna del tanque hogar del caldero (K).

$$Q_{NL} = 0.53m^2 * 5.6704 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2K} (0.087 * 1707.33^4 - 0.0995 * 800^4)$$

$$Q_{NL} = 3.0 \times 10^{-8} \frac{W}{K} (7.39 * 10^{10} - 4.075 * 10^{10}) K$$

$$Q_{NL} = 3.0 \times 10^{-8} \frac{W}{K} (3.315 * 10^{10}) K$$

$$Q_{NL} = 996.19 W$$

Se calcula el calor por radiación total con la ecuación 57:

$$Q_{RADIACION} = Q_{NL} + Q_L$$

(Ecuación 57)

$$Q_{RADIACION} = 996.19 W + 7484.51 W$$

$$Q_{RADIACION} = 8480.70 W$$

Se realiza una malla térmica en el sentido de transferencia de calor:

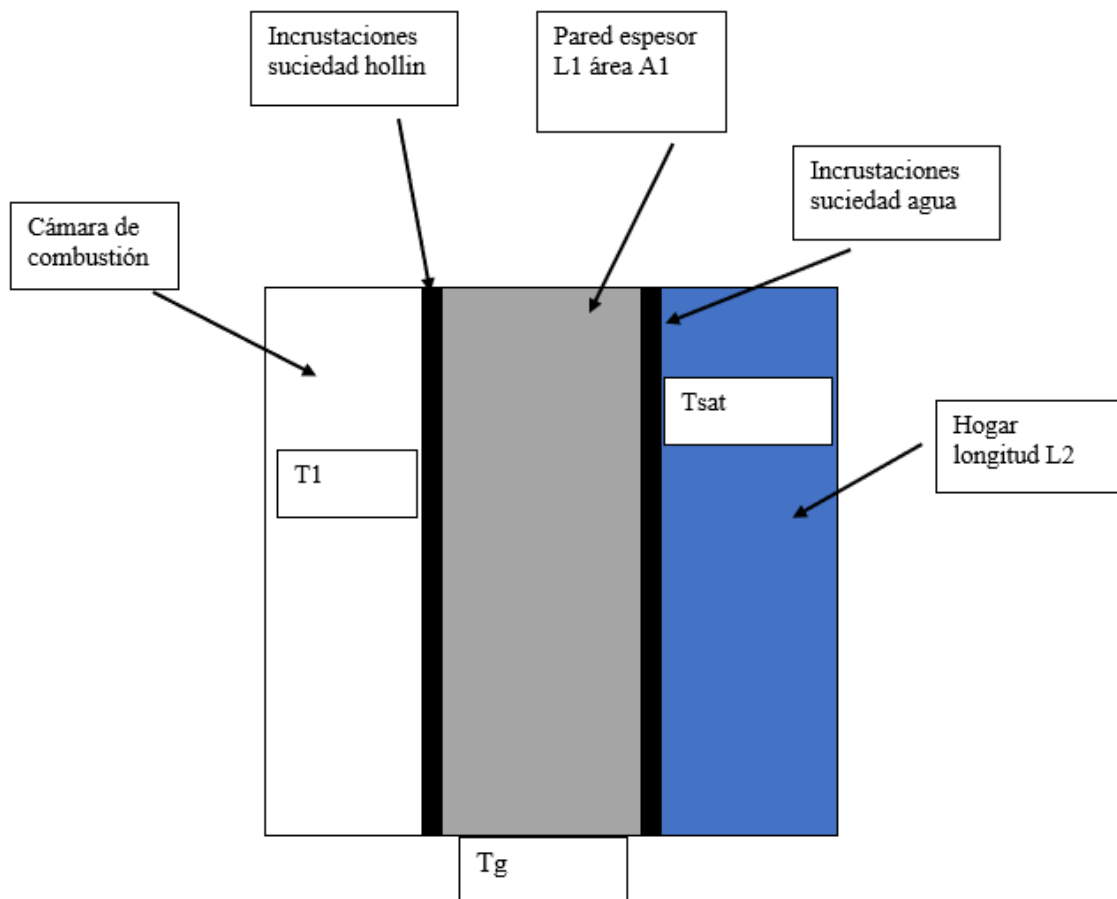


Ilustración 2-3: Malla térmica

Fuente: Elaboración propia.

3.23. Análisis de la transferencia de calor

Se realiza mediante resistencias térmicas, debido a falta de correlaciones se toma en consideración únicamente ebullición nucleada indicando que el calor transmitido por este mecanismo es igual al calor transferido por los gases al calor útil.

3.24. Transferencia de calor por ebullición nucleada(\dot{q})

Se determina la resistencia térmica por ebullición.

3.24.1. Ebullición nucleada

En el régimen de ebullición nucleada la razón de la transferencia de calor depende fuertemente de la naturaleza de la nucleación (el número de sitios activos de nucleación sobre la superficie, la rapidez de la formación de burbujas en cada sitio, etc.), lo cual es difícil de predecir. El tipo y la condición de la superficie calentada también afectan la transferencia de calor. Estas complicaciones dificultan desarrollar relaciones teóricas para la transferencia de calor en el régimen de ebullición nucleada y se necesita apoyar en relaciones basadas en datos experimentales (Jaya y Buenahora 2015). La correlación que se usa con mayor amplitud para el flujo de calor en el régimen de ebullición nucleada fue propuesta en 1952 por Rohsenow y se expresa como:

$$\dot{q}_{\text{nucleada}} = \mu_l * h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} * \left[\frac{C_{pl}(T_s - T_{\text{sat}})}{C_{sf} * h_{fg} * Pr_l^n} \right]^3 \quad (\text{Ecuación 58})$$

Donde:

$\dot{q}_{\text{nucleada}}$: flujo de calor en la ebullición nucleada, (W/m²)

μ_l : Viscosidad del líquido a temperatura de saturación (kg/m · s)

h_{fg} : Entalpía de vaporización a temperatura de saturación (J/kg).

g : Aceleración gravitacional (m/ s²).

ρ_l : Densidad del líquido a la presión de operación a temperatura de saturación (kg/ m³).

ρ_v : Densidad del vapor a la presión de operación a temperatura de saturación (kg/ m³).

σ : Tensión superficial de la interfase líquido – vapor (N/m).

C_{pl} : Calor específico del líquido a la presión de operación a temperatura de saturación (J/ kg · K).

T_s : Temperatura de la superficie exterior del tanque hogar del caldero (K)

Siempre mayor en unos 5 a 5.5

T_{sat} : Temperatura de saturación a la presión de trabajo del caldero (K).

C_{sf} : Constante experimental dependiente de la combinación superficie – fluido.

Pr_1 : Numero de Prandtl del líquido a temperatura de saturación.

n : Constante universal que depende del fluido

Con la temperatura de vapor 145.15°C se calcula las diferentes propiedades (anexo 17) de la misma como, numero de Prandtl, calor específico, entalpia de vaporización, densidad, tanto de forma líquida como vapor.

Tabla 6-3: Datos para interpolación de calor específico

140	0.197
145.15	0.18979
150	0.183

Fuente: Cengel, 2010.

Utilizando el Anexo 16 vamos a encontrar la tensión superficial de la interfase liquido-vapor (agua). Utilizando el anexo 18 procedemos a calcular los coeficientes C_{sf} y n para combinación fluido-superficie (agua, acero inoxidable).

Tabla 7-3: Datos para interpolación de tensión superficial

140	0.0509
145.15	0.04979275
160	0.0466

Fuente: Cengel, 2010.

$$\mu_l = 0.18979 * 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}}$$

$$h_{fg} = 2129.035 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$g = 9.81 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\rho_l = 919.0735 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_v = 2.264215 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\sigma = 0.04979 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$C_{pl} = 4.298875 \frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}}$$

$$T_s = 423.55K$$

$$T_{sat} = 145.15 + 273.15 = 418.3 K$$

$$C_{sf} = 0.0130$$

$$Pr_l = 1.1987999999999999$$

$$n = 1$$

$$\begin{aligned} \dot{q}_{nucleada} &= 0.18979 * 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}} * 2129.035 * 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \\ & * \left[\frac{9.81 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} (919.0735 - 2.264215) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0.04979 \frac{\text{N}}{\text{m}}} \right]^{\frac{1}{2}} \\ & * \left[\frac{4298,875 \frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}} (5.25)}{0.0130 * 2129.035 * 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} * 1.199^1} \right]^3 \\ \dot{q}_{nucleada} &= 0.18979 * 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m} * \text{s}} * 2129.035 * 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}} * 425.01 * 0.3145 \\ \dot{q}_{nucleada} &= 54020.87668 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

Dentro de una caldera, resulta que existe la acumulación de impurezas luego de cierto tiempo de funcionamiento de la maquina térmica en el área de transferencia de calor debido a la capa de hollín producida por las partículas de carbono, presentes en los gases de combustión, mientras que en el interior del hogar el fouling se debe a la calcificación de las sales minerales, presentes en el agua de alimentación del caldero se puede encontrar dos resistencias: la primera se debe al ensuciamiento de las paredes internas de los tubos debido al hollín (R_{fh}) y la otra resistencia, se forma en la parte exterior de los tubos, causada por incrustaciones (R_{fi}).

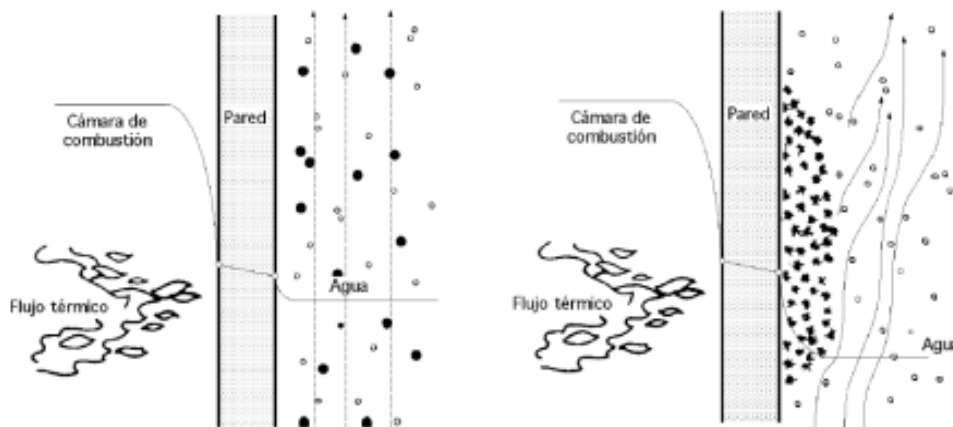


Ilustración 3-3: Suciedad sobre la superficie en la que se realiza transferencia de calor

Fuente: Elaboración propia

La resistencia térmica del depósito de las incrustaciones de suciedad se puede determinar, generalmente, a partir de ensayos reales o de la experiencia, y actualmente existen tabulaciones representativas de estos valores (Guiot y Ramos 2018).

Usando el Anexo 19 vamos a obtener los factores de incrustación dependiendo del origen de agua, y su temperatura de entrada.

$$R_{fh} = \frac{R1}{A_{\text{interna del hogar}}}$$

(Ecuación 59)

$$R_{fi} = \frac{R2}{A_{\text{externa del hogar}}} \quad (\text{Ecuación 60})$$

$A_{\text{interna del hogar}}$: Área superficial interna del tanque hogar (m²)

$A_{\text{externa del hogar}}$: Área superficial externa del tanque hogar (m²)

R2: factor de incrustación representativo debido a las incrustaciones generadas por los gases de carbono

que ingresa a el caldero = 0.00176m² K/W

R2: factor de incrustación representativo debido a las incrustaciones generadas por el agua que ingresa a el caldero = 0.0001m² K/W

$$R_{fhi} = \frac{0.00176}{\pi * D * L}$$

$$R_{fhi} = \frac{0.00176}{\pi * 0.26m * 0.65m}$$

$$R_{fhi} = 0.0033K/W$$

$$R_{fho} = \frac{0.0001}{\pi * 0.272m * 0.65m}$$

$$R_{fho} = 0.00018K/W$$

Se determina el coeficiente convectivo del agua-vapor según la ecuación 64:

Sabiendo que el coeficiente de convección está dado por:

$$h_e = \frac{\dot{q}}{T_{S2} - T_{SAT}} \quad (\text{Ecuación 61})$$

h_e : Coeficiente de convección equivalente para la ebullición nucleada W/m² * K

\dot{q} : Flujo de calor en la ebullición nucleada (W/m²)

T_{S2} : Temperatura de la superficie exterior del tanque hogar del caldero (K).

T_{Sat} : Temperatura de saturación a la presión de trabajo del caldero (K).

$$h_e = \frac{\dot{q}}{T_{S2} - T_{SAT}}$$
$$h_e = \frac{54020.87668 \text{ W/m}^2}{800 - 418.3}$$
$$h_e = 141.52 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{K}}$$

3.25. Resistencia total

Las resistencias que se presentan en la transferencia de calor desde el hogar del caldero, hacia el agua, se puede encontrar la resistencia total del sistema ocupando la fórmula:

$$R_{total} = R_g + R_{fh} + R_p + R_{fi} + R_e \text{ (Ecuación 62)}$$

Donde:

R_{total} : resistencia total en el caldero

R_g : Resistencia térmica por los gases de combustión

R_{fh} : Resistencia térmica generada por el hollin.

R_p : Resistencia térmica debido a la conducción (no es necesario)

R_{fi} : Resistencia térmica generada por las incrustaciones

R_e : Resistencia térmica debido a la ebullición

Calor que se libera por Radiación

$$Q_R = \frac{T_g - T_s}{R_g} \text{ (Ecuación 63)}$$

$$Q_R = Q_L + Q_{NL} \text{ (Ecuación 64)}$$

Donde:

Q_R : calor por radiacion(W)

Q_L : calor por radiación luminosa

Q_{NL} : calor por radiación noluminosa

R_g : Resistencia térmica por los gases de combustión

$$Q_{RADIACION} = 8480.70 \text{ w}$$

$$Q_R = \frac{T_g - T_s}{R_g}$$

$$R_g = \frac{1707.33 - 800}{8480.70} * \frac{K}{W}$$

$$R_g = 0.107 \frac{K}{W}$$

$$R_{fh} = 0.00018 K/W$$

$$R_p = \frac{\ln\left(\frac{\varnothing_{\text{exterior}}}{\varnothing_{\text{interior}}}\right)}{2 * \pi * k_{\text{ACERO}} * L} \text{ (Ecuación 65)}$$

$\varnothing_{\text{exterior}}$: Diámetro exterior del tanque hogar del caldero (m).

$\varnothing_{\text{interior}}$: Diámetro interior del tanque hogar del caldero (m).

k_{ACERO} : Conductividad térmica del material para el tanque hogar = 48 W / m · K

L: Longitud del tanque hogar del caldero (m) (Osejo 2017)

$$R_p = \frac{\ln\left(\frac{0.272}{0.26}\right)}{2 * \pi * 48 W/mK * 0.65m}$$

$$R_p = \frac{0.045}{196.035}$$

$$R_p = 0.00023 K/W$$

$$R_{fi} = 0.0033 K/W$$

$$R_e = \frac{1}{h_e A_{\text{exterior}}} \text{ (Ecuación 66)}$$

$$R_e = \frac{1}{141.52 \frac{W}{m^2 * K} \pi * 0.272m * 0.65m}$$

$$R_e = 0.0127 K/W$$

$$R_{\text{total}} = R_g + R_{fh} + R_p + R_{fi} + R_e$$

$$R_{\text{total}} = (0.107 + 0.00018 + 0.00023 + 0.0033 + 0.0127) K/W$$

$$R_{\text{total}} = 0.12341 K/W$$

3.26. Calor total liberado por la radiación de los productos de combustión dentro del tanque hogar del caldero (Q_{TR})

$$Q_{TR} = \frac{T_g - T_s}{R_{\text{Total}}} \text{ (Ecuación 67)}$$

$$Q_{TR} = \frac{1707.33 - 800}{0.123}$$

$$Q_{TR} = 7352.16 W$$

Para comprobar las temperaturas de la superficie interna y externa a la cual estará trabajando el caldero durante el proceso de generación de vapor, se aplica un proceso análogo al flujo de corrientes en circuitos resistivos (Pineda y Rangel 2017), para este proceso se utilizará la fórmula

$$T_{interna} = T_{pc} - Q_{TR} * R_g \text{ (Ecuación 68)}$$

$$T_{interna} = 1707.33K - 7352.16 * 0.107K$$

$$T_{interna} = 920.64K = 647.49^\circ C$$

Temperatura de operación del tanque hogar del caldero.

$$T_{operacion} = \frac{T_{interna} + T_{sat \text{ agua}}}{2} \text{ (Ecuación 69)}$$

$$T_{operacion} = \frac{920.64 + 418.30 K}{2}$$

$$T_{operacion} = 669.47K = 396.23^\circ C$$

La temperatura de los gases de combustión a la salida del primer paso no se conoce, este valor debe ser asumido y después verificado, por esta razón, los cálculos se vuelven iterativos hasta que la temperatura de salida de los gases de combustión sea igual a la seleccionada para los cálculos temperaturas finales de cada volumen de control.

Para realizar este cálculo se plantea el balance de energía, tomando algunas consideraciones:

- El quemador es adiabático.
- La combustión es completa con el exceso de aire utilizado para el GLP
- Se considera el proceso en estado estacionario.
- La temperatura de los gases de combustión dentro del hogar, es igual a la temperatura de la flama adiabática (Herrera y Betancourt 2018).

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema}$$

$$E_{ENTRADA,hogar} = E_{SALIDA,hogar}$$

$$\dot{Q}_{PC} - \dot{Q}_{TR} = \dot{Q}_{PC}$$

$$(\dot{m} * cp_{agua} * T_{PC}) - \dot{Q}_{TR} = (\dot{m} * cp_{vapor \text{ agua}} * T_{PC+1}) \text{ (Ecuación 70)}$$

Donde:

\dot{m} : Flujo másico de los productos de combustión ($kg \ h$).

cp_{agua} : Calor específico de los productos de combustión ($kJ \ kg \cdot K$).

T_{pc} : Temperatura de los productos de combustión (K).

Q_{TR} : Flujo total de calor liberado por la radiación (W).

Ahora, se despeja la ecuación para encontrar el valor final de T_{pc+1} :

$$T_{PC+1} = \frac{\dot{m}_{gas} * c_{p_{gpc}} * T_{PC} - Q_{TR}}{\dot{m}_{gas} * c_{p_{gpc}}}$$

$$T_{PC+1} = \frac{\frac{74.8\text{kg}}{\text{h}} * \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} * 1.129 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * \text{K}} * 1707.33\text{K} - 7352.16\text{W} * \frac{1\text{KW}}{1000\text{W}}}{\frac{74.8\text{kg}}{\text{h}} * \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} * 1.129 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * \text{K}}}$$

$$T_{PC+1} = \frac{\frac{0.020}{\text{s}} * 1.129 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * \text{K}} * 1707.33 - 7.35216\text{KW}}{\frac{74.8}{\text{h}} * 1.129 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * \text{K}}}$$

$$T_{PC+1} = \frac{(40.05 - 7.35216)\text{KW}}{0.02345\text{KW/K}}$$

$$T_{PC+1} = 1394.39\text{K}$$

3.27. Área de transferencia (A_{trans})

$$A_{trans} = \frac{\dot{Q}_{util}}{\dot{q}} \text{ (Ecuación 71)}$$

$$A_{trans} = \frac{\frac{123599.7\text{kJ}}{\text{h}} * 1000 \frac{\text{J}}{\text{kJ}} * \frac{1\text{h}}{3600\text{s}}}{54020.87668 \text{ W/m}^2}$$

$$A_{trans} = 0.636\text{m}^2$$

3.28. Diseño mecánico

Tabla 8-3: Diseño mecánico para el tanque hogar

Tanque hogar			
Descripción	Mediciones		
	m	mm	in
Diámetro interior	0.26	260	10.23
Diámetro exterior	0.272	272	10.63
Espesor	0.006	6	0.236
Longitud	0.31	310	12.19

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9-3: Diseño mecánico para el cilindro

Cilindro			
Descripción	Mediciones		
	m	Mm	in
Diámetro interior	0.440	440	17.3228
Diámetro exterior	0.448	448	17.6377
Espesor	0.004	4	0.15
longitud	1	1000	39.37

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10-3: Diseño mecánico para los tubos y tapas

Tubos			
Descripción	Mediciones		
	m	mm	in
Diámetro interior	0.01905	19,05	0.75
Diámetro exterior	0.0254	25.4	0.99
Espesor	0.003175	3.175	0.125
Longitud	0.65	650	25.5905
Tapas			
Descripción	Mediciones		
	m	mm	in
Diámetro interior	0.0254	25.4	0.99
Diámetro exterior	0.448	448	17.63
Espesor	0.004	4	0.15
Longitud	---	---	---

Fuente: Elaboración propia.

3.29. Dimensionamiento geométrico

3.29.1. Diámetro interior del recipiente a presión (D_{in})

Tomando en consideración que el recipiente a presión debe ser menor a 0.40 m como se indica el manual PMB-2.1 EN LA REF 18 (ASME 2010), además que a nivel local se trabaja entre 0.39 y 0.38 tomaremos el valor de:

$$D_{in} = 0.272m$$

3.29.2. Altura efectiva del cilindro (L_{efec})

$$L_{efec} = \frac{A_{pared}}{\pi * D_{in}} \text{ (Ecuación 72)}$$

$$A_{pared} = A_{trans} - A_{base} \text{ (Ecuación 73)}$$

Donde:

A_{pared} = Área de la pared cilíndrica que esta en contacto con el agua

A_{base} = Área de la tapa plana base del recipiente a presión

$$A_{pared} = 0.636m^2 - (0.04 * 0.44)m^2$$

$$A_{pared} = 0.6184m^2$$

$$L_{efec} = \frac{0.6184m^2}{\pi * 0.26m}$$

$$L_{efec} = 0.756m$$

3.29.3. Altura efectiva del cilindro (L_{total})

El nivel máximo de agua no debe superar 2/3 de la altura de la pared cilíndrica (no considerar las tapas planas) como se especifica en PMB-13.1 referencia 18 (ASME 2010) tenemos:

$$L_{total} = L_{efec} * 3/2 \text{ (Ecuación 74)}$$

$$L_{total} = 0.76m * 3/2$$

$$L_{total} = 1.14m$$

3.30. Selección de materiales

3.30.1. Selección de materiales para el caldero que están sometidas a presión

Para realizar la selección de los materiales para el caldero se seleccionó aquella materia prima que conste en el listado de la norma ASME y que estén disponibles en el mercado nacional, de acuerdo con las variables que se necesiten utilizar para el óptimo funcionamiento de nuestro equipo. A continuación, se presentan un listado de componentes con sus características.

Tabla 11-3: Características de los Componentes

ÍTEM	NORMA	DESCRIPCIÓN
Cuerpo de calderín y sus tapas	ASMT- A36	Placas de acero negro naval que soportan una determinada presión en media y baja temperatura de operación
Tubos del caldero	ASMT- A53 GrB	Tubos de cedula 40 sin costura usado para soportar altas temperaturas
Base del calderín	ASMT- A36	Accesorios que conforman las tuberías las cuales son de acero negro naval ideales para elevadas temperaturas
Tubería	ASMT- A53 GrB	Tubería de acero negro sin costura ideales para soportar elevadas temperaturas
Accesorios	ASTM A105	Productos forjados de acero de carbono, las cuáles se utilizarán en las tuberías del calderín, están compuestas de bridas las cuales se utilizarán a razón de la norma ASME 16.5-16.11
Pernos	ASTM A193-B7	Elementos para atornillado de acero inoxidable que

		ayudarán a soportar altas presiones y temperaturas.
Tuercas	ASTM A193-B7	Tuercas de acero inoxidable para atornillado nos ayudarán a soportar altas presiones y temperaturas
Arandelas	ASTM F436	Accesorios para ajuste compuestas de material galvanizado

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12-3: Propiedades de los componentes del caldero

Descripción	Máxima Temperatura de Operación °C	Máxima Temperatura de Operación °F	Material Seleccionado
Tanque Hogar	500°C	932°F	ASMT- A36
Cámara Combustión	500°C	932°F	ASMT- A36
Tubos Caldera	500°C	932°F	ASMT- A36
Tanque Coraza	500°C	932°F	ASMT- A36

Fuente: elaboración propia.

3.31. Diseño de los sistemas periféricos

3.31.1. Selección de componentes

Como se especifica en la norma ASME todo calderín debe poseer algún tipo de sistema de alimentación que pueda abastecer de agua a una presión mayor de la que se va a operar.

3.31.1.1. Bomba de agua

Teniendo en cuenta el mercado nacional y la presión de trabajo de 50 Psi se procede con las siguientes características:

Tabla 13-3: Características bomba de agua

Marca	Tecnovapor
Modelo	APM75L-A
Material	Fundición de hierro
Altura máxima	65 m
Caudal máximo	46 l/min
Presión de descarga	75 Psi
Potencia	1 hp
Alimentación	110 V

Fuente: elaboración propia.



Ilustración 4-3: bomba de agua

Fuente: elaboración propia

3.31.1.2. Válvula manual de bola

Tabla 14-3: Características válvula manual de bola

Marca	Genebre
Modelo	CF8M (316)
Material	Acero inoxidable
Conexión	Rosca gas ISO 7-1 (EN 10226-1). Juntas y asiento: PTFE + 15% FV tórica eje vitón PN 63.
Presión máxima de trabajo	150 Psi
Rango de temperatura	-25°C + 180°C

Fuente: elaboración propia.



Ilustración 5-3: válvula manual de bola

Fuente: elaboración propia

3.31.1.3. Válvula Check

Como menciona las normas ASME la tubería de alimentación de contar con una válvula de retención de un diámetro similar al que se encuentra en la tubería, la cual evitara el retorno del agua desde el caldero, cuando el sistema de alimentación que en nuestro caso es la bomba no se encuentre en actividad provocando una falta de presión necesaria en el sistema de alimentación, en base a esto se procede a seleccionar la siguiente válvula:

Tabla 15-3: Características válvula check

Marca	FV Ecuador
Modelo	E499.13
Material	Acero inoxidable
Conexión	Roscas tipo Hembra – Hembra (H-H).
Presión máxima de trabajo	235 Psi
Rango de temperatura	-25°C + 180°C

Fuente: elaboración propia.



Ilustración 6-3: válvula check

Fuente: elaboración propia

3.31.1.4. Manguera flexible para GLP

Tabla 16-3: Manguera flexible para GLP

Marca	Perfilplast
Material	Caucho reforzado recubierto con PVC
Diámetro interno	5/16"
Presión máxima	Roscas tipo Hembra – Hembra (H-H).

Fuente: elaboración propia.



Ilustración 7-3: Manguera flexible para GLP

Fuente: elaboración propia

3.31.2. Sistema de control

3.31.2.1. Válvula de seguridad

Tabla 17-3: Características de válvula de seguridad

Marca	Venamet
Modelo	Kunkle 6010EDM01-AM0150
Material	Acero inoxidable
Conexión	Roscas macho ¼ "
Presión de tarado	100 Psi

Fuente: elaboración propia



Ilustración 8-3: válvula de seguridad

Fuente: elaboración propia

3.31.2.2. Manómetro

Instrumento encargado de medir la presión dentro del caldero, conociendo que la presión de operación es de 50 Psi y que la presión de tardado de la válvula de seguridad es de 100 Psi, en base a estas especificaciones procedemos a seleccionar:

Tabla 18-3: Características del manómetro

	Genebre
Modelo	StabiliZR
Material	Acero Inoxidable con Internos de bronce
Conexión	Roscas macho ¼"
Rango de presión	0-150 Psi
Tamaño diámetro dial	2.5-4"

Fuente: elaboración propia



Ilustración 9-3: manómetro

Fuente: elaboración propia

3.31.2.3. Presostato

Es el encargado de mantener la presión dentro del rango estimado, con lo que abre y cierra el circuito eléctrico que controla la electroválvula de combustible en función de la presión preestablecida del caldero.

El presostato ha sido calibrado en 70 Psi con un diferencial de 20 Psi con el fin de mantener el calderín a la presión establecida:

Tabla 19-3: Características del presostato.

Marca	Venamet
Modelo	Honeywell L91B10
Conexión	Terminales de tornillo (Modulante)
Rango de ajuste de presión	5 Psi a 150 Psi
Diferencial de presión	5 a 23 Psi

Fuente: elaboración propia



Ilustración 10-3: bomba de agua

Fuente: elaboración propia

3.32. Diseño de elementos sometidos a presión

3.32.1. Cálculo del diseño mecánico

3.32.1.1. Condiciones de diseño mecánico.

Para el diseño se consideró las condiciones más severas de operación con lo que se garantiza seguridad para la operación del caldero evitando de esta manera posibles malos funcionamientos y evitando cualquier tipo de peligro que se pueda presentar. Para simplificar el diseño mecánico se ha tomado una temperatura general de diseño recomendado por el código ASME sección I PFT-50.1 que recomienda 700 °F para la temperatura de diseño. La presión de diseño se ha tomado 150 Psi que es mayor a la presión de operación del caldero que operara a 50 Psi (ASME 2010)

Referencias

- Presión de referencia 150 Psi
- Temperatura de referencia 370 °C
- Diseño de casco
- Selección pg-27.2.2

$$t = \frac{PD}{2SE + 2yP} + C$$

(Ecuación 75)

Donde:

t: Espesor mínimo requerido mm

C: Margen mínimo para roscado y estabilidad estructural

D: Diámetro exterior del cilindro mm

E: Eficiencia junta

S: Valor del esfuerzo máximo admisible a la temperatura de diseño Psi

P: Máxima presión de trabajo admisible MAWP Psi

y: Coeficiente de temperatura

E se calcula de PG-27.4.1 (acero naval sin costura =1)

C: PG-27.4.3

No debe roscarse la tubería de acero o no ferrosa, más delgada que SCH. 40 de ASME B36.10M, "Tubería Elaborada sin Costura y Soldada". Por ende, c toma un valor de 0

Y: material no ferroso no incluido en la tabla toma un valor de 0.4

S=17984,68 psi: ASTM A516 – 70 tomando referencia al acero ASTM A516 con una temperatura de referencia 370 °C (ASME 2019)

$$t = \frac{150\text{Psi} * (0.44\text{m} * \frac{39.37\text{in}}{1\text{m}})}{2 * 17984,68 * 1 + 2 * 0,4 * 150\text{Psi}} + 0$$
$$t = \frac{150\text{Psi} * (17.323\text{in})}{2 * 17984,68\text{Psi} * 1 + 2 * 0.4 * 150\text{Psi}} + 0$$
$$t = 0.072 \text{ in}$$

En el mercado no existen laminas con ese espesor de 0.072 in, además que siempre se construye con un grosor mayor al calculado, por lo que se ha tomado una lámina con espesor nominal de 0.18 in de acero negro naval ASTM A36. Este valor para el cilindro externo.

3.32.1.2. Presión admisible en el cilindro

$$P = \frac{2SE(t-C)}{D-2y(t-C)} \text{ (Ecuación 76)}$$

Donde:

t: Espesor mínimo requerido (in)

C: Margen mínimo para roscado y estabilidad estructural (0)

D: Diámetro exterior del cilindro mm

E: Eficiencia junta

S: Valor del esfuerzo máximo admisible a la temperatura de diseño Psi

P: Máxima presión de trabajo admisible MAWP Psi

Y: Coeficiente de temperatura

$$P = \frac{2 * 17984,68\text{Psi} * 1 * (0.18\text{in} - 0)}{17.32\text{in} - 2 * 0.4(0.18\text{in} - 0)}$$

$$P = \frac{6473.4048\text{Psi} * \text{in}}{17.176\text{in}}$$

$$P = \frac{6473.4048\text{Psi} * \text{in}}{17.176\text{in}}$$

$$P = 377.018\text{Psi}$$

3.32.1.3. Diseño de las tapas planas.

Para el diseño de la tapa plana se ha utilizado las ecuaciones del código ASME sección I PG-31.3.2 (ASME 2010)

$$t = d \sqrt{\frac{CP}{S}} \text{ (Ecuación 77)}$$

Donde:

t: Espesor mínimo requerido mm

d: Diámetro menor mm

C: Factor adimensional depende de la fijación de la tapa Fig. PG-31 (Anexo 20)

S: Esfuerzo máximo admisible a la temperatura de diseño Psi

$$t = 0.432\text{m} * 39.37 \frac{\text{in}}{\text{m}} \sqrt{\frac{0.33 * 150\text{PSI}}{17984,68\text{PSI}}}$$

$$t = 17\text{in} * 0.0546$$

$$t = 0.89\text{in}$$

Cuerpo del vaso comunicante En concordancia con el apartado PG – 27.2.2 (ASME 2010), se procede a calcular la presión máxima admisible en el cuerpo del vaso comunicante, mediante la ecuación 77 Se calcula la presión del tubo.

3.32.1.4. Diseño de la cámara de combustión.

La cámara de combustión es un elemento que está sujeto a presión externa por lo cual nos asumiremos un espesor de 3/8 in y se ha calculado el MAWP siguiendo el procedimiento indicado el código ASME sección I PFT-51.1.2. (ASME 2010)

$$\frac{D_o}{t} = \frac{0.26m * \frac{39.37in}{1m}}{\frac{3}{8}in} \text{ (Ecuación 78)}$$

$$\frac{D_o}{t} = 27.29$$

Se obtuvo un valor mayor a 10 por lo que se utiliza el literal A.

Asumimos que $t = 3/8$ in

$$\frac{L}{D_o} = \frac{0.32m}{0.26m} \text{ (Ecuación 79)}$$

$$\frac{L}{D_o} = 1.23$$

$$\frac{D_o}{t} = \frac{0.26m * \frac{39.37in}{m}}{\frac{3}{8}in}$$

$$\frac{D_o}{t} = 27.29$$

Para calcular nuestro factor A en función al diseño geométrico y tomando t con un valor de referencia de 3/8" se procede a verificar estos valores. (Anexo 21). $A=0.0049$

Una vez calculado el factor A procedemos a buscar el factor B en función de la temperatura de referencia 370°C. (anexo 22).

El valor de factor B da como resultado

$$B = 78 \text{ MPa} \frac{145.0377 \text{ Psi}}{1 \text{ MPa}}$$

$$B = 11312.9 \text{ Psi}$$

3.32.1.5. Presión externa admisible (presión máxima)

$$P_a = \frac{4B}{3\left(\frac{D_o}{t}\right)} \text{ (Ecuación 79)}$$

$$P_a = \frac{4 * 11312.9 \text{ Psi}}{3(27.29)}$$

$$P_a = 552.59 \text{ Psi}$$

Ya que esta presión es mayor a la presión máxima admisible del caldero ($150 \text{ Psi} \approx 10,34 \text{ barg}$) se cumple con la norma ASME sección I.

3.32.1.6. Diseño de los tubos de humo

Los tubos de humos también están sujetos a una presión externa por lo cual se ha comprobado su resistencia para poder asegurar su utilización.

$$\frac{Do}{t} = \frac{\frac{3}{4}in}{\frac{1}{8}in}$$
$$\frac{Do}{t} = 6$$

Valor menor a 10 por lo que se utiliza el literal B: Asumimos que $t = 1/8$ in

$$\frac{L}{Do} = \frac{0.65m}{0.75in * \frac{1m}{39.37in}}$$
$$\frac{L}{Do} = \frac{0.65m}{0.019m} = 34.12$$

Debido a que la relación $\frac{Do}{t}$ es muy pequeña se utiliza los valores del factor A y B hallados en el anexo 23. $A=0.3$

Para valores mayores a 0.1 mantener ese valor (ASME 2010).

Una vez calculado el factor A procedemos a buscar el factor B en función de la temperatura de referencia 370°C (anexo 22)

$$B = 98 \text{ MPa} \frac{145.0377\text{Psi}}{1\text{MPa}}$$
$$B = 14213.69\text{Psi}$$

Para 0.1

$$B = 88 \text{ MPa} \frac{145.0377\text{Psi}}{1\text{MPa}}$$
$$B = 12763.31\text{Psi}$$

3.32.1.7. La presión máxima admisible

$$P_a = \left(\frac{2.167}{\frac{Do}{t}} - 0.0833 \right) B \text{ (Ecuación 80)}$$

$$P_a = \left(\frac{2.167}{6} - 0.0833 \right) 14213.69 \text{Psi}$$

$$P_a = (0.277) 14213.69 \text{Psi}$$

$$P_a = 3949.51 \text{Psi}$$

Con 0.1

$$P_a = (0.277) 12763.31 \text{Psi}$$

$$P_a = 3535.4 \text{Psi}$$

Ambos valores muchos mayores a los máximos permisibles del caldero

3.33. Diseño mecánico

3.33.1. Instrumentos de control y equipos auxiliares

Una vez realizado el diseño térmico y mecánico del caldero y con los datos generales del equipo, se puede seleccionar todos los instrumentos de control y equipos auxiliares necesarios para el funcionamiento del caldero. A continuación, serán detallados cada una de estas partes:

3.33.2. Selección de válvula de distribución de vapor

Con los datos del diámetro de la tubería de salida (3 in) y la presión de diseño del equipo de 150 Psi (10,34bar) se seleccionó una válvula seleccionada en función a las características solicitadas según su diseño, esta válvula, es de tipo globo y cumple con los requerimientos necesarios para el tipo de construcción de este dispositivo.

3.33.3. Selección de válvula de purga

Según la norma ASME el diámetro máximo permitido para las conexiones de purga de una caldera es de 2.5 in NPS, por esta razón, para el caldero se utiliza una conexión de tubería de 2 in.

Además, ya que la válvula de la purga tendrá que ser para diámetro de tubería de 2 in, se eligió una válvula de la mismas condiciones y modelo que la válvula de distribución, pero con la diferencia en su diámetro.

3.33.4. Selección de válvula de alivio

De acuerdo con la Norma ASME, si la más de superficie de calentamiento, se deberá tener como mínimo una válvula de alivio de presión. Asimismo, para determinar el tamaño de las válvulas, se debe establecer una presión de ajuste del 6% por encima de la presión de operación del caldero y un 10% mayor a la capacidad de generación de vapor:

3.33.5. Selección válvula de alivio

$$P_{ajuste} = 1.06 \cdot P_{ope} \text{ (Ecuación 84)}$$

$$P_{ajuste} = 1.06 \cdot 50 \text{ Psi}_g$$

$$P_{ajuste} = 53 \text{ Psi}_g \approx 3.64 \text{ bar}_g$$

3.33.6. Selección de control de presión

Para el caldero, se seleccionarán dos controladores de presión. El primero, es de control de presión de operación y el segundo, es un control de seguridad.

3.33.7. Selección de control de nivel de agua

El control de nivel elegido para el caldero es de tipo ON-OFF de accionamiento por flotador y micro-switch de la marca MCDONNELLY:

3.33.8. Selección manómetro indicador de presión

$$P_{manómetro} = 2 \cdot P_{ope} \text{ (Ecuación 85)}$$

$$P_{manómetro} = 2 \cdot 50$$

$$P_{manómetro} = 100 \text{ Psi}_g$$

3.33.9. Selección de la bomba de agua para la alimentación del caldero

Para obtener la potencia de la bomba de agua para el caldero, es necesario encontrar el diámetro de acople para el ingreso del agua a él caldero. Según el libro de MC. Cabe, la velocidad del fluido dentro de una tubería esta alrededor de 1 y 3m/s para las tuberías de descarga. Asimismo, para que la bomba funcione correctamente el flujo que debe de entregar al caldero es 1,5 veces mayor al flujo de evaporación.

$$1.5 \cdot m_a = V \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot p$$

Donde:

- m_a : flujo másico de agua evaporada $\frac{Kg}{h}$
- V : Velocidad del agua dentro de la tubería $\frac{m}{h}$
- D : diámetro interior de la tubería (m)
- p : densidad del agua $\frac{Kg}{m^3}$

$$D = \sqrt{\frac{6 \cdot m_a}{\pi \cdot V \cdot p}}$$

$$D = \sqrt{\frac{6 \cdot 1565 \frac{Kg}{h}}{\pi \cdot 4389 \frac{m}{h} \cdot 998 \frac{Kg}{m^3}}}$$

$$D = 0.026m \approx 1.02 \text{ in}$$

Como se observa, en el diámetro interior que deberá tener el acople de entrada de agua a él caldero será de 1.02in (0,026m) lo que corresponde a una tubería de diámetro 1 ¼ in CED 40, que se aproxima al diámetro requerido para la bomba de alimentación. Del mismo modo, se procede a calcular el caudal requerido con la fórmula 86:

$$Q = \frac{m}{p} \text{ (Ecuación 86)}$$

$$Q = \frac{1565 \frac{Kg}{h}}{998 \frac{Kg}{m^3}}$$

Con este dato, se puede seleccionar la bomba para el caldero, pero es necesario tener en consideración la presión de descarga de esta bomba, la cual, debe ser igual al 1,5 por la presión de operación del caldero, esto se debe a que la bomba del caldero debe descargar el agua a dentro del caldero para que se mantenga a una presión de operación. Para este procedimiento se ocupará la fórmula 87.

$$Q = 1.56 \frac{m^3}{h} \approx 6.9 \text{ G. P. M}$$

$$P_{\text{descarga}} = 1.5 \cdot P_{\text{ope}} \text{ (Ecuación 87)}$$

$$P_{\text{descarga}} = 1.5 \cdot 50 \text{ Psi}_g$$

$$P_{\text{descarga}} = 75 \text{ Psi}_g \sim 5,17 \text{ barg}$$

3.33.10. Construcción paso a paso del equipo

El cuerpo cilíndrico se procede a construir en base a nuestro material que es acero negro naval, ASTM A-36, se parte en base de las dimensiones y especificaciones que se detallan en los planos.

3.33.10.1. Proceso construcción cuerpo

- Cortar la plancha de acero negro naval en base a las dimensiones propuestas
- Dar forma de cilindro a la plancha de acero negro naval



Ilustración 11-3: construcción del cuerpo

Fuente: elaboración propia

3.33.10.2. Proceso construcción tapas planas

- Cortar la plancha de acero negro naval en base a las dimensiones propuestas para formar dos discos planos
- Deformar los discos planos de manera que se pueda convertir en unas tapas



Ilustración 12-3: construcción de tapas cóncavas

Fuente: elaboración propia

3.33.10.3. *Proceso construcción del recipiente*

- Cortar de manera oblicua los bordes del cuerpo cilíndrico y sus tapas
- Soldar el cuerpo del cilindro
- Soldar las tapas al cilindro
- Empezar a perforar el cuerpo del caldero para la tubería
- Soldar los tubos



Ilustración 13-3: construcción del recipiente

Fuente: elaboración propia

3.33.10.4. *Proceso construcción de cubiertas*

Cortar las planchas de acero para general las cubiertas que se utilizaran en el calderín en base a los planos



Ilustración 14-3: construcción de cubiertas

Fuente: elaboración propia

3.33.11. Montaje del calderín

Una vez que ya tenemos nuestras piezas y los elementos principales del cuerpo junto a sus cubiertas y tubos se procede a realizar el montaje en base a los planos.

3.33.11.1. Proceso montaje N°1

- Pulir las superficies que van a ser usadas para la soldadura
- Soldar el recipiente cilíndrico
- Soldar las tapas al recipiente de presión mediante la tubería y accesorios

3.33.11.2. Proceso montaje N°2

Pintar la superficie con pintura anticorrosiva mate gris



Ilustración 15-3: montaje del calderín

Fuente: elaboración propia

3.33.11.3. Proceso montaje N°3

- Soldar los tubos que escapan los gases
- Colocar la fibra aislante sobre la cubierta de acero negro
- Colocar y fijar la cubierta externa mediante remaches

3.33.12. Montaje sistemas periféricas

Al haber montado la estructura procedemos a realizar la conexión de los elementos y accesorios aplicados en nuestro calderín.

3.33.12.1. Proceso montaje sistemas periféricos

- Cortar la tubería en ½” y 1” de acuerdo con las medidas establecidas
- Acoplar las válvulas, los accesorios y las tuberías que se utilizaran para el sistema de alimentación de agua
- Acoplar la bomba de alimentación de agua para las diferentes purgas
- Acoplar el quemador tipo calefón a nuestro recipiente
- Acoplar las mangueras y válvulas acorde al sistema de combustión

3.33.13. Montaje de sistema de control

Una vez que estos elementos periféricos se proceden a instalar todos los sistemas de control utilizados en el equipo.

3.33.13.1. Proceso montaje sistemas periféricos

- Acoplar los accesorios y tuberías que se utilizarán en el sistema de control
- Distribuir las conexiones generales para el uso de los diferentes instrumentos de control
- Construir el panel de control
- Acoplar la conexión para la alimentación de la energía eléctrica



Ilustración 16-3: montaje de procesos periféricos

Fuente: elaboración propia

3.33.14. Montaje final

Luego de tener tanto montaje periférico y del sistema de control, se procede a montar en las instalaciones del laboratorio de procesos industriales de la ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DEL CHIMBORAZO.

CAPITULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta y establece los costos que se ocuparon al momento de la fabricación de nuestro caldero de 3BHP, se dividió según los materiales, herramientas y equipos que se usaron en la fabricación del mismo, así como otros gastos que incluyen transporte, mano de obra que se detalla a continuación.

Tabla 1-4: Matriz de resultados.

Resultados termodinámicos y de transferencia de calor			
Datos	descripción	Valor	Unidad
PTw	Presión total a trabajar	417.97	KPa
Tsat	Temperatura de vapor a trabajar o temperatura saturada	145.15	°C
Fe	Factor de evaporación	0.85	
Pn	Potencia nominal del caldero	3.5	BHP
\dot{Q}_{total}	Calor total requerido	154499.62	$\frac{kJ}{h}$
\dot{Q}_{util}	Calor util	123599.7	$\frac{kJ}{h}$
\dot{m}	Caudal másico real del agua/vapor	45.93	$\frac{Kg}{h}$
\dot{V}_{agua}	Flujo volumétrico del agua	0.0476	$\frac{m^3}{h}$
\dot{m}_{comb}	Caudal másico de combustible	3.4	$\frac{kg}{h}$
\dot{V}_{Comb}	Flujo volumétrico de combustible	6.08	$\frac{l}{h}$
AC	Relación aire/combustible para mezcla estequiométrica	21.00	kgaire /kgcombustible
Maire	Masa de aire	1014.82	Kg

M _{comb}	Masa de combustible	48.31	kg
\dot{m}_{gas}	Caudal másico de los gases de combustión	74.8	$\frac{kg}{h}$
Pr _{gasprodc}	Numero de Prandtl	0.7374	
Cp _{gasprodc}	Calor específico	1.129	$\frac{KJ}{Kg * K}$
$\mu_{gasprodc}$	viscosidad dinámica de los gases	$2.18 * 10^{-5}$	$\frac{Kg}{m * s}$
k _{gasprodc}	conductividad térmica de los gases	0.032	$\frac{W}{m * K}$
$\rho_{gasprodc}$	densidad de los gases	0.6	$\frac{Kg}{m^3}$
T _g	Temperatura de llama adiabática	1684.18	°C
T _{g real}	Temperatura máxima teórica de la llama	1707.33K	K
ϵ_g	Emisividad de los gases	0.087	
α_g	absortividad de los gases	0.0995	
A _{flama}	Área interna del tubo	0.53	m ²
Q _L	Calor por radiación luminosa	7484.51	W
Q _{NL}	calor por radiación no luminosa	996.19	W
$\dot{q}_{nucleada}$	Calor nucleado	54020.87668	W/m ²
R _{total}	Resistencia total	0.12341	K/W

Q_{TR}	Calor total liberado por la radiación de los productos de combustión	7352.16	W
$T_{interna}$	Temperatura interna	647.49	°C
$T_{operacion}$	Temperatura de operación	396.23	°C
T_{PC+1}	La temperatura de los gases de combustión a la salida del primer paso	1394.39	K

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2-4: Matriz de costos unitarios

MATRIZ DE COSTOS UNITARIOS	
ELABORADO POR:	Izquierda Quezada Dalton David, Saltos Ruiz Steven Marcelo
EMPRESA:	CALDEROX STEAM
PROYECTO:	CALDERO PIROTUBULAR SIMPLE DE 3 BHP
ITEM:	1
DESCRIPCIÓN:	Subconjunto tanque presión
COSTO DEL ITEM:	3994.40

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3-4: Materiales para el caldero

Materiales para el armado del caldero				
Descripción	Norma	Cantidad	Precio unitario	Costo total
Plancha tanque hogar	ASMT-A36	1	168.26	168.26
Plancha tanque C.C	ASMT-A36	1	215.76	215.76
Plancha placa tubulares exterior	ASMT-A36	2	176.15	352.30
Plancha tanque coraza	ASMT-A36	2	158.16	316,32
Tubo para caldera	SA-192	21	35	735
Unión roscada de AF 3000 lbs-1"	ASME B16.11	2	6.99	13.98
Unión roscada de AF 3000 lbs-1/2"	ASME B16.11	1	3.99	3.99
Neplo roscado de HN Sch 40- 1/2" x 6"	ASMT A106-B	4	1.29	5.15
Total:	1810.76			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-4: Instrumentos y accesorios

Instrumentos y Accesorios			
Descripción	Cantidad	Precio unitario	Costo total
Presostato escala 0-200 Psi	1	105,00	105,00
Manómetro de presión control diésel	2	40,00	80,00
Termómetros analógicos esc. 10-150 °C	1	45,00	45,00
Manómetro de presión escala 0-90 Psi	2	65,00	130,00
Válvula de seguridad esc. 0-90 Psi	1	36,00	36,00
Válvula check de acero inoxidable 1/2"	1	35,00	35,00
Filtro ecp 5-10 plisado celulosa	1	90,00	90,00
Universales negras 150 lb 1/2"	3	4,00	12,00
Te negra 150 lb 1/2"	6	2,99	17,94
Llave cortadora 3/4" tipo palanca	1	9,50	9,50
Llave cortadora 1/2" tipo palanca	3	15,00	45,00
Codo negro 300x 3/4"x90	1	4,50	4,50
Codo negro 150 lb 1/2"x90	7	1,20	8,40
Acoples m-m 1042-8-8 negro	5	4,50	22,50
Acople m-e 1042-12-12 negro	2	6,00	12,00
Unión negra 150 lb 1/2"	2	3,50	7,00
Teflón bl	3	0,60	1,80
Amortiguador de presión	1	25,00	25,00
Bomba de agua de 1/2 BHP	1	125,00	125,00
Controlador de nivel de agua (McDonnell)	1	150,00	150,00
Sistema eléctrico y electrónico	1	300,00	300,00
Caja de control	1	230,00	230,00
Tapón 3/4"	1	6,00	6,00
Quemador	2	150,00	230,00
Total:			

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-4: Costo de mano de obra

Costo de mano de obra			
Descripción	Cantidad	Precio unitario	Costo total
Corte, perforación y ensamblado	-	100,00	100,00
Ensamblaje	-	200,00	200,00
Maquinaria y herramientas	-	50,00	50,00
Total:	350,00		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-4: Costo de investigación

Costo de investigación			
Descripción	Cantidad	Precio unitario	Costo total
Movilización	-	60,00	60,00
Materiales de oficina	-	50,00	50,00
Total:	110,00		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7-4: Costo total de investigación

Costos totales	
Descripción	Total
Materiales para el armado del caldero	1810.76
Instrumentos y accesorios	1727.64
Costo de mano de obra	350,00
Costo de investigación	110,00
Total:	3994,40

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

- Se construyó un calderín con base a las estipulaciones y requerimientos del laboratorio de Procesos Industriales de la Facultad de Ciencias. Un caldero pirotubular vertical, con una potencia de 3 BHP, una generación de vapor a 45.93 Kg/ hora, una presión de diseño de 150 Psi y una presión de operación de 50 PSI, utilizando combustible GLP a partir de las normas ASME para construcción de calderas y equipos a vapor, dichas normas de diseño fueron formulados a partir de una basta recolección de datos según el tipo de equipo, sus usos y aplicaciones dentro de la industria, así como; que disponibilidad de materiales encontramos en el mercado, con lo cual se procedió a seleccionar los materiales a trabajar que se ajusten a las necesidades en el laboratorio.
- Se efectuó a partir del diseño en función del área de transferencia de calor, aplicando las diferentes tablas, además; una recolección bibliográfica con base a normas ASME; los cálculos están regidos a un sistema de referencia, dando así, su dimensionamiento según el tipo de material y la temperatura de operación de cada uno de ellos.
- Se realizo el diseño en función a los cálculos preestablecidos para su construcción, los mismos que se rigieron a la normativa de diseño ASME, planos y especificaciones anteriormente seleccionadas, en función de equipos y materiales encontrados en el mercado nacional.
- Se realizó la respectiva validación del equipo al momento de la entrega puesta en el laboratorio, según lo estipulado en la carrera de Ingeniería Química, con lo cual se logró demostrar su funcionamiento optimo, así como; una lista detallada de los costos unitarios, directos e indirectos comprobando que es viable fabricar un caldero de 3 BHP cumpliendo los estándares de calidad preestablecidos en la industria.

RECOMENDACIONES

- El equipo debe estar operando acorde a los lineamientos establecidos en este documento con el fin de evitar algún tipo de incidente o accidente dentro del medio en el cual se opere, así como algún desperfecto o daño dentro de sus accesorios en el cual incluyen, equipo que puedan afectar a la percepción en la medición, esto es con la finalidad de mantener su vida útil.
- Es recomendable purgar el equipo luego de haberlo usado mínimo una vez dentro de la semana en la cual se ha utilizado ya que con esto nos aseguramos que no existan presencia de sedimentos ya se por algún tipo de acumulación de los mismos, estos provocan incrustaciones que afectarían el rendimientos de nuestro equipo, es importante mencionar que la purga principal se la realiza según la presión diseñada para operar, mientras que las demás purgas se las puede realizar mediante la presión atmosférica.
- Si el equipo va a estar en paro durante un tiempo prolongado es necesario que el tanque recipiente de agua sea vaciado en su totalidad, con la finalidad de evitar problemas al contener agua no tratada, con lo cual es importante analizar como sugerencia un proceso de tratamiento de agua con el fin de evitar corrosión en el equipo.
- Para futuros proyectos es importante adquirir válvulas de seguridad y equipos de medición. En el mercado se puede encontrar muchos de estos, a un precio relativamente bajo, con lo cual es importante adquirir a marcar reconocidas en este rubro que cumplan la normativa ASME o análogas.

BIBLIOGRAFÍA

ALAGUMALAI, Avinash. “Internal combustion engines: Progress and prospects”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 38 (2014), (Reino Unido) pp. 561-571.

ALDERETES, Carlos O. *Calderas a Bagazo - Proyecto, operación y mantenimiento*. Argentina: 2016.

ARROYO-VINUEZA, Juan. “Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor”. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, n° 16 (2016), (Ecuador) pp. 20-40.

ASME 2010. *REGLAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CALDERAS DE POTENCIA*.

ASME 2019. *BOILER AND PRESSURE VESSEL SECTION II MATERIALS*.

BAE, Choongsik; & KIM, Jaeheun. “Alternative fuels for internal combustion engines”. *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 36, n° 3 (2017), (Países Bajos) pp. 3389-3413.

BAÑO, Jonathan; & SOSA, Leonardo. Diseño de un sistema de combustible dual diésel-bunker, para una red de alimentación de combustible a un grupo de calderas con capacidades entre 300 y 1700 BHP (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Universidad Politécnica Salesiana. Guayaquil-Ecuador. 2021.

BUENAHORA, Leyson. Diseño del sistema de control de motores para una caldera industrial basado en su selección para una planta extractora de aceite de palma (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Universidad Francisco de Paula Santander. San José de Cúcuta-Colombia. 2015.

CASTILLO, David. Diseño y construcción del sistema eléctrico automatizado para la utilización de una caldera piro tubular, que servirá para la formación práctica en los estudiantes de la facultad de ingeniería industrial de la UPSE (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Universidad Estatal Península de Santa Elena. Santa Elena-Ecuador. 2015.

CASTILLO, Fritzon; & CHIMBO, Freddy. Desarrollo de un sistema automático implementado sobre un caldero piro tubular en el laboratorio de procesos industriales en la Facultad de Ciencias-ESPOCH (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba-Ecuador. 2018.

CÁZAREZ-AYALA, Gerardo; et al. “Sistema de control inalámbrico: diseño, construcción y aplicación en caldera industrial”. *Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*, vol. 10 (2014), (México) pp. 39-53.

CHAVARRO, César; & OTÁLORA, Diana. Diseño de sistema de integración energética entre horno de recocido y caldera industrial con el fin de minimizar el consumo de gas natural en la empresa IDECOL S.A (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Universidad Piloto de Colombia. Bogotá-Colombia. 2015.

DÜMMER, Walter. *Descripción de Calderas y Generadores de Vapor*. Santiago-Chile: ACHS, 2018.

DZUL, Luis; et al. “Propuesta metodológica para la medición y seguimiento de los costes de la calidad en el diseño de proyectos”. *Afinidad LXVI* [en línea], 2009, (España) 66(540), pp. 117-125. Disponible en: <http://www.iqs.es>.

GARCÍA, Ricardo; & FLÓREZ, Eder. “Estudio analítico de la transferencia de calor por convección que afectan los frenos de disco ventilados”. *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*, vol. 20, n° 1 (2016), (Colombia) pp. 15-30.

GUIOT, Juan; & RAMOS, David. Diseño de un economizador para una caldera de 500BHP (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Fundación Universidad de América. Bogotá-Colombia. 2018.

HERRERA, Omar; & BETANCOURT, Jorge. Plan de mantenimiento basado en RBI para el caldero de vapor power máster del área de apoyo crítico de una empresa del sector nutraceutico (omega 3) (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga-Colombia. 2018.

LLANES CEDEÑO, Edilberto, & CUEVA UQUILLAS, Juan. Diseño y Construcción de una caldera de vapor piro tubular vertical para un biorreactor de algas (Trabajo de titulación) (Tercer nivel). Universidad Internacional SEK. Quito-Ecuador. 2017.

MERCADER, P.; et al. “Multivariable PID Control of a Boiler”. *RIAI: Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 16, n°. 1 (2019), pp. 15-25.

MEZU, Jhonatan. Diseño del lazo de control de combustión para la regulación del vapor vivo en una caldera industrial (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali-Colombia. 2012.

MOLINA, Edgar; & NÚÑEZ, Eddison. Diseño y construcción de un sistema de alimentación de biomasa mediante control electro-mecánico para el abastecimiento del hogar de una caldera pirotubular horizontal de 300 BHP (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Universidad Politécnica Salesiana. Guayaquil-Ecuador. 2021.

MUÑOZ, Álvaro; & MENENDEZ, Joseph. Manejo de las calderas industriales y su impacto en el medio ambiente en la ciudad de Guayaquil (Trabajo de Titulación) (Maestría). Universidad Politécnica Salesiana. Guayaquil-Ecuador. 2020.

MUÑOZ, Cristian; & LAGOS, Patricio. Diseño Cinta Transportadora Intralox para Pesquera Bahía Caldera (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Universidad del Bío-Bío. Concepción-Chile. 2013

OSEJO, David. Diseño de una caldera de generación de vapor piro tubular de 10 bhp expandible a 25 BHP mediante módulos (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Fundación Universidad de América. Bogotá-Colombia. 2017.

PÉREZ -REYES, M.E.; & SOSA -MORALES, M.E. “Mecanismos de transferencia de calor que ocurren en tratamientos térmicos de alimentos”. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, vol. 7, n° 1 (2013), (México) pp. 37-47.

PÉREZ, Carlos; et al. “Diseño e implementación de un sistema de control para mejorar la calidad de los gases de combustión de una caldera pirotubular de 5 BHP”. *Revista de la Universidad Tecnológica Equinoccial* [en línea], 2016, (Ecuador) 5 (2), pp. 55-68. ISSN 1390-9363. Disponible en: <http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/>.

PINEDA, Ronald; & RANGEL, Victor. “Metodología para determinar la eficiencia energética de calderas de baja potencia”. *Jóvenes en la ciencia*, vol. 3, n° 2 (2017), (México) pp. 2628-2634.

PINEDO, Ervin; & RUIZ, Ever. Análisis del diseño, construcción y evaluación de un caldero pirotubular con fines académicos en la escuela académica profesional de ingeniería en energía (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Universidad Nacional del Santa. Nuevo Chimbote-Perú. 2017.

RESTREPO, Neysser. Diseño de un intercambiador de calor (economizador) para una caldera pirotubular de 300 BHP (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Universidad de Antioquia. Medellín-Colombia, 2021.

RODRÍGUEZ, Otoniel. Procedimiento para la puesta en funcionamiento de una caldera pirotubular conforme a especificaciones de diseño (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Universidad Autónoma de Occidente. Santiago de Cali-Colombia. 2019.

CABRERA, Santiago; & SÁNCHEZ, Alejandro. Análisis térmico para evaluar eficiencia en un calderín pirotubular de 2 BHP del laboratorio de la carrera de ingeniería mecánica (Trabajo de Titulación) (Pregrado). Universidad Técnica de Ambato. Ambato-Ecuador. 2019.

SORIANO MARTÍNEZ, Antonio. Diseño y cálculo de una caldera de aceite térmico de 5MW y elementos auxiliares para industria maderera que usa como combustible biomasa (Trabajo de Titulación) (Maestría). Universitat Politècnica de València. Valencia-España. 2019

VALDES, Jorge; & CASTILLO, Alexis. “Evaluación de la calidad ambiental de los sedimentos marinos en el sistema de bahías de Caldera (27°S)”. *Latin American Journal of Aquatic Research*, vol. 42, no. 3 (2014), (Chile) pp. 497-513.

ANEXOS

ANEXO A: TABLA DE PRESIONES DE AGUA SATURADA

Agua saturada. Tabla de presiones

Pres., P kPa	Temp. sat., T_{sat} °C	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $kJ/kg \cdot K$		
		Liq. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Liq. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Liq. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Liq. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322

Nota: Tabla A-5 termodinámica de Cengel

ANEXO B: TABLA DE TEMPERATURAS DE AGUA SATURADA

Temp., T °C	Pres. sat., P _{sat} kPa	Volumen específico, m ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Liq. sat, v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
205	1724.3	0.001164	0.11508	872.86	1723.5	2596.4	874.87	1920.0	2794.8	2.3776	4.0154	6.3930
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38	1702.9	2598.3	897.61	1899.7	2797.3	2.4245	3.9318	6.3563
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02	1681.9	2599.9	920.50	1878.8	2799.3	2.4712	3.8489	6.3200
220	2319.6	0.001190	0.086094	940.79	1660.5	2601.3	943.55	1857.4	2801.0	2.5176	3.7664	6.2840
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70	1638.6	2602.3	966.76	1835.4	2802.2	2.5639	3.6844	6.2483
230	2797.1	0.001209	0.071505	986.76	1616.1	2602.9	990.14	1812.8	2802.9	2.6100	3.6028	6.2128
235	3062.6	0.001219	0.065300	1010.0	1593.2	2603.2	1013.7	1789.5	2803.2	2.6560	3.5216	6.1775
240	3347.0	0.001229	0.059707	1033.4	1569.8	2603.1	1037.5	1765.5	2803.0	2.7018	3.4405	6.1424
245	3651.2	0.001240	0.054656	1056.9	1545.7	2602.7	1061.5	1740.8	2802.2	2.7476	3.3596	6.1072
250	3976.2	0.001252	0.050085	1080.7	1521.1	2601.8	1085.7	1715.3	2801.0	2.7933	3.2788	6.0721
255	4322.9	0.001263	0.045941	1104.7	1495.8	2600.5	1110.1	1689.0	2799.1	2.8390	3.1979	6.0369
260	4692.3	0.001276	0.042175	1128.8	1469.9	2598.7	1134.8	1661.8	2796.6	2.8847	3.1169	6.0017
265	5085.3	0.001289	0.038748	1153.3	1443.2	2596.5	1159.8	1633.7	2793.5	2.9304	3.0358	5.9662
270	5503.0	0.001303	0.035622	1177.9	1415.7	2593.7	1185.1	1604.6	2789.7	2.9762	2.9542	5.9305
275	5946.4	0.001317	0.032767	1202.9	1387.4	2590.3	1210.7	1574.5	2785.2	3.0221	2.8723	5.8944
280	6416.6	0.001333	0.030153	1228.2	1358.2	2586.4	1236.7	1543.2	2779.9	3.0681	2.7898	5.8579
285	6914.6	0.001349	0.027756	1253.7	1328.1	2581.8	1263.1	1510.7	2773.7	3.1144	2.7066	5.8210
290	7441.8	0.001366	0.025554	1279.7	1296.9	2576.5	1289.8	1476.9	2766.7	3.1608	2.6225	5.7834
295	7999.0	0.001384	0.023528	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2076	2.5374	5.7450
300	8587.9	0.001404	0.021659	1332.7	1230.9	2563.6	1344.8	1404.8	2749.6	3.2548	2.4511	5.7059
305	9209.4	0.001425	0.019932	1360.0	1195.9	2555.8	1373.1	1366.3	2739.4	3.3024	2.3633	5.6657
310	9865.0	0.001447	0.018333	1387.7	1159.3	2547.1	1402.0	1325.9	2727.9	3.3506	2.2737	5.6243
315	10,556	0.001472	0.016849	1416.1	1121.1	2537.2	1431.6	1283.4	2715.0	3.3994	2.1821	5.5816
320	11,284	0.001499	0.015470	1445.1	1080.9	2526.0	1462.0	1238.5	2700.6	3.4491	2.0881	5.5372
325	12,051	0.001528	0.014183	1475.0	1038.5	2513.4	1493.4	1191.0	2684.3	3.4998	1.9911	5.4908
330	12,858	0.001560	0.012979	1505.7	993.5	2499.2	1525.8	1140.3	2666.0	3.5516	1.8906	5.4422
335	13,707	0.001597	0.011848	1537.5	945.5	2483.0	1559.4	1086.0	2645.4	3.6050	1.7857	5.3907
340	14,601	0.001638	0.010783	1570.7	893.8	2464.5	1594.6	1027.4	2622.0	3.6602	1.6756	5.3358
345	15,541	0.001685	0.009772	1605.5	837.7	2443.2	1631.7	963.4	2595.1	3.7179	1.5585	5.2765
350	16,529	0.001741	0.008806	1642.4	775.9	2418.3	1671.2	892.7	2563.9	3.7788	1.4326	5.2114
355	17,570	0.001808	0.007872	1682.2	706.4	2388.6	1714.0	812.9	2526.9	3.8442	1.2942	5.1384
360	18,666	0.001895	0.006950	1726.2	625.7	2351.9	1761.5	720.1	2481.6	3.9165	1.1373	5.0537
365	19,822	0.002015	0.006009	1777.2	526.4	2303.6	1817.2	605.5	2422.7	4.0004	0.9489	4.9493
370	21,044	0.002217	0.004953	1844.5	385.6	2230.1	1891.2	443.1	2334.3	4.1119	0.6890	4.8009
373.95	22,064	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Nota: Tabla A-4 termodinámica Cengel

ANEXO C: CALOR ESPECÍFICO DEL AGUA

Calor específico del agua entre 0 °C y 100 °C

www.vaxasoftware.com

Temp. °C	Calor específico		Temp. °C	Calor específico		Temp. °C	Calor específico	
	$\frac{\text{kJ}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$		$\frac{\text{kJ}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$		$\frac{\text{kJ}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$	$\frac{\text{kcal}}{\text{K}\cdot\text{kg}}$
0 (hielo)	1,960	0,468	34	4,178	0,999	68	4,189	1,001
0	4,217	1,008	35	4,178	0,999	69	4,189	1,001
1	4,213	1,007	36	4,178	0,999	70	4,190	1,001
2	4,210	1,006	37	4,178	0,999	71	4,190	1,001
3	4,207	1,005	38	4,178	0,999	72	4,191	1,002
4	4,205	1,005	39	4,179	0,999	73	4,192	1,002
5	4,202	1,004	40	4,179	0,999	74	4,192	1,002
6	4,200	1,004	41	4,179	0,999	75	4,193	1,002
7	4,198	1,003	42	4,179	0,999	76	4,194	1,002
8	4,196	1,003	43	4,179	0,999	77	4,194	1,002
9	4,194	1,002	44	4,179	0,999	78	4,195	1,003
10	4,192	1,002	45	4,180	0,999	79	4,196	1,003
11	4,191	1,002	46	4,180	0,999	80	4,196	1,003
12	4,189	1,001	47	4,180	0,999	81	4,197	1,003
13	4,188	1,001	48	4,180	0,999	82	4,198	1,003
14	4,187	1,001	49	4,181	0,999	83	4,199	1,004
15	4,186	1,000	50	4,181	0,999	84	4,200	1,004
16	4,185	1,000	51	4,181	0,999	85	4,200	1,004
17	4,184	1,000	52	4,182	1,000	86	4,201	1,004
18	4,183	1,000	53	4,182	1,000	87	4,202	1,004
19	4,182	1,000	54	4,182	1,000	88	4,203	1,005
20	4,182	1,000	55	4,183	1,000	89	4,204	1,005
21	4,181	0,999	56	4,183	1,000	90	4,205	1,005
22	4,181	0,999	57	4,183	1,000	91	4,206	1,005
23	4,180	0,999	58	4,184	1,000	92	4,207	1,005
24	4,180	0,999	59	4,184	1,000	93	4,208	1,006
25	4,180	0,999	60	4,185	1,000	94	4,209	1,006
26	4,179	0,999	61	4,185	1,000	95	4,210	1,006
27	4,179	0,999	62	4,186	1,000	96	4,211	1,006
28	4,179	0,999	63	4,186	1,000	97	4,212	1,007
29	4,179	0,999	64	4,187	1,001	98	4,213	1,007
30	4,178	0,999	65	4,187	1,001	99	4,214	1,007
31	4,178	0,999	66	4,188	1,001	100	4,216	1,008
32	4,178	0,999	67	4,188	1,001	100 (gas)	2,080	0,497
33	4,178	0,999						

Nota: Tomado de UPS-CT009777.pdf

ANEXO D: CALORES ESPECÍFICOS DE GAS IDEAL DE VARIOS GASES COMUNES, EN FUNCIÓN DE TEMPERATURA

$$\bar{c}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

(T en K, c_p en kJ/kmol · K)

Sustancia	Fórmula	a	b	c	d	Rango de temp., K	% de error	
							Máx.	Prom.
Acetileno	C ₂ H ₂	21.8	9.2143 × 10 ⁻²	-6.527 × 10 ⁻⁵	18.21 × 10 ⁻⁹	273-1500	1.46	0.59
Aire	—	28.11	0.1967 × 10 ⁻²	0.4802 × 10 ⁻⁵	-1.966 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.72	0.33
Amoniaco	NH ₃	27.568	2.5630 × 10 ⁻²	0.99072 × 10 ⁻⁵	-6.6909 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.91	0.36
Azufre	S ₂	27.21	2.218 × 10 ⁻²	-1.628 × 10 ⁻⁵	3.986 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.99	0.38
Benceno	C ₆ H ₆	-36.22	48.475 × 10 ⁻²	-31.57 × 10 ⁻⁵	77.62 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.34	0.20
i-Butano	C ₄ H ₁₀	-7.913	41.60 × 10 ⁻²	-23.01 × 10 ⁻⁵	49.91 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.25	0.13
n-Butano	C ₄ H ₁₀	3.96	37.15 × 10 ⁻²	-18.34 × 10 ⁻⁵	35.00 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.54	0.24
Cloruro de hidrógeno	HCl	30.33	-0.7620 × 10 ⁻²	1.327 × 10 ⁻⁵	-4.338 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.22	0.08
Dióxido de azufre	SO ₂	25.78	5.795 × 10 ⁻²	-3.812 × 10 ⁻⁵	8.612 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.45	0.24
Dióxido de carbono	CO ₂	22.26	5.981 × 10 ⁻²	-3.501 × 10 ⁻⁵	7.469 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.67	0.22
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	22.9	5.715 × 10 ⁻²	-3.52 × 10 ⁻⁵	7.87 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.46	0.18
Etano	C ₂ H ₆	6.900	17.27 × 10 ⁻²	-6.406 × 10 ⁻⁵	7.285 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.83	0.28
Etanol	C ₂ H ₆ O	19.9	20.96 × 10 ⁻²	-10.38 × 10 ⁻⁵	20.05 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.40	0.22
Etileno	C ₂ H ₄	3.95	15.64 × 10 ⁻²	-8.344 × 10 ⁻⁵	17.67 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.54	0.13
n-Hexano	C ₆ H ₁₄	6.938	55.22 × 10 ⁻²	-28.65 × 10 ⁻⁵	57.69 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.72	0.20
Hidrógeno	H ₂	29.11	-0.1916 × 10 ⁻²	0.4003 × 10 ⁻⁵	-0.8704 × 10 ⁻⁹	273-1800	1.01	0.26
Metano	CH ₄	19.89	5.024 × 10 ⁻²	1.269 × 10 ⁻⁵	-11.01 × 10 ⁻⁹	273-1500	1.33	0.57
Metanol	CH ₄ O	19.0	9.152 × 10 ⁻²	-1.22 × 10 ⁻⁵	-8.039 × 10 ⁻⁹	273-1000	0.18	0.08
Monóxido de carbono	CO	28.16	0.1675 × 10 ⁻²	0.5372 × 10 ⁻⁵	-2.222 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.89	0.37
Nitrógeno	N ₂	28.90	-0.1571 × 10 ⁻²	0.8081 × 10 ⁻⁵	-2.873 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.59	0.34
Óxido nítrico	NO	29.34	-0.09395 × 10 ⁻²	0.9747 × 10 ⁻⁵	-4.187 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.97	0.36
Óxido nitroso	N ₂ O	24.11	5.8632 × 10 ⁻²	-3.562 × 10 ⁻⁵	10.58 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.59	0.26
Oxígeno	O ₂	25.48	1.520 × 10 ⁻²	-0.7155 × 10 ⁻⁵	1.312 × 10 ⁻⁹	273-1800	1.19	0.28
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	6.774	45.43 × 10 ⁻²	-22.46 × 10 ⁻⁵	42.29 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.56	0.21
Propano	C ₃ H ₈	-4.04	30.48 × 10 ⁻²	-15.72 × 10 ⁻⁵	31.74 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.40	0.12
Propileno	C ₃ H ₆	3.15	23.83 × 10 ⁻²	-12.18 × 10 ⁻⁵	24.62 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.73	0.17
Trióxido de azufre	SO ₃	16.40	14.58 × 10 ⁻²	-11.20 × 10 ⁻⁵	32.42 × 10 ⁻⁹	273-1300	0.29	0.13
Agua (vapor)	H ₂ O	32.24	0.1923 × 10 ⁻²	1.055 × 10 ⁻⁵	-3.595 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.53	0.24

Nota: Transferencia de calor y masa Cengel tabla A-2

ANEXO E: TABLA DE TEMPERATURAS DE AGUA SATURADA

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P _{sat} kPa	Volumen específico, m ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Liq. sat., v _f	Vapor sat., v _g	Liq. sat., u _f	Evap., u _{fg}	Vapor sat., u _g	Liq. sat., h _f	Evap., h _{fg}	Vapor sat., h _g	Liq. sat., s _f	Evap., s _{fg}	Vapor sat., s _g
		0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952

Nota: Tabla A-4 termodinámica Cengel

ANEXO F: PROPIEDADES DEL AGUA A DIFERENTES TEMPERATURAS

Temperatura (°C)	Densidad ρ (kg/m ³)	Calor Especifico c_p (J/kg°C)	Conductiv. térmica k (W/m°C)	Visc. dinám. $\eta \cdot 10^6$ (N.seg/m ²)	Visc. cinem. $\nu \cdot 10^6$ (m ² /seg)
0	999,9	4226	0,558	1794	1,789
20	998,2	4182	0,597	1004	1,006
40	992,3	4178	0,633	653,0	0,658
60	983,2	4181	0,658	470,0	0,478
80	971,8	4194	0,673	353,7	0,364
100	958,4	4211	0,682	281,0	0,294
140	926,1	4279	0,687	198,2	0,214
180	887,0	4413	0,678	153,5	0,173
220	840,5	4606	0,656	126,0	0,150
260	784,0	4944	0,614	107,5	0,137
300	712,5	6594	0,543	94,1	0,132

Nota: Tomado de UPS-CT009777.pdf

ANEXO G: ENTALPIA DE SUSTANCIAS A UNA TEMPERATURA DE 23°C

Substance	\bar{h}_f° kJ/kmol	$\bar{h}_{285\text{ K}}$ kJ/kmol	$\bar{h}_{298\text{ K}}$ kJ/kmol	$\bar{h}_{1200\text{ K}}$ kJ/kmol
$\text{C}_2\text{H}_8 (\ell)$	-118,910	---	---	---
O_2	0	8296.5	8682	38,447
N_2	0	8286.5	8669	36,777
$\text{H}_2\text{O} (\text{g})$	-241,820	---	9904	44,380
CO_2	-393,520	---	9364	53,848

Nota: Tomado de UPS-CT009777.pdf

**ANEXO H: PROPIEDADES A PRESION DE 1 ATM DE BIOXIDO DE CARBONO Y
MONOXIDO DE CARBONO.**

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
<i>Bióxido de carbono, CO₂</i>							
-50	2.4035	746	0.01051	5.860×10^{-6}	1.129×10^{-5}	4.699×10^{-6}	0.8019
0	1.9635	811	0.01456	9.141×10^{-6}	1.375×10^{-5}	7.003×10^{-6}	0.7661
50	1.6597	866.6	0.01858	1.291×10^{-5}	1.612×10^{-5}	9.714×10^{-6}	0.7520
100	1.4373	914.8	0.02257	1.716×10^{-5}	1.841×10^{-5}	1.281×10^{-5}	0.7464
150	1.2675	957.4	0.02652	2.186×10^{-5}	2.063×10^{-5}	1.627×10^{-5}	0.7445
200	1.1336	995.2	0.03044	2.698×10^{-5}	2.276×10^{-5}	2.008×10^{-5}	0.7442
300	0.9358	1 060	0.03814	3.847×10^{-5}	2.682×10^{-5}	2.866×10^{-5}	0.7450
400	0.7968	1 112	0.04565	5.151×10^{-5}	3.061×10^{-5}	3.842×10^{-5}	0.7458
500	0.6937	1 156	0.05293	6.600×10^{-5}	3.416×10^{-5}	4.924×10^{-5}	0.7460
1 000	0.4213	1 292	0.08491	1.560×10^{-4}	4.898×10^{-5}	1.162×10^{-4}	0.7455
1 500	0.3025	1 356	0.10688	2.606×10^{-4}	6.106×10^{-5}	2.019×10^{-4}	0.7745
2 000	0.2359	1 387	0.11522	3.521×10^{-4}	7.322×10^{-5}	3.103×10^{-4}	0.8815
<i>Monóxido de carbono, CO</i>							
-50	1.5297	1 081	0.01901	1.149×10^{-5}	1.378×10^{-5}	9.012×10^{-6}	0.7840
0	1.2497	1 048	0.02278	1.739×10^{-5}	1.629×10^{-5}	1.303×10^{-5}	0.7499
50	1.0563	1 039	0.02641	2.407×10^{-5}	1.863×10^{-5}	1.764×10^{-5}	0.7328
100	0.9148	1 041	0.02992	3.142×10^{-5}	2.080×10^{-5}	2.274×10^{-5}	0.7239
150	0.8067	1 049	0.03330	3.936×10^{-5}	2.283×10^{-5}	2.830×10^{-5}	0.7191
200	0.7214	1 060	0.03656	4.782×10^{-5}	2.472×10^{-5}	3.426×10^{-5}	0.7164
300	0.5956	1 085	0.04277	6.619×10^{-5}	2.812×10^{-5}	4.722×10^{-5}	0.7134
400	0.5071	1 111	0.04860	8.628×10^{-5}	3.111×10^{-5}	6.136×10^{-5}	0.7111
500	0.4415	1 135	0.05412	1.079×10^{-4}	3.379×10^{-5}	7.653×10^{-5}	0.7087
1 000	0.2681	1 226	0.07894	2.401×10^{-4}	4.557×10^{-5}	1.700×10^{-4}	0.7080
1 500	0.1925	1 279	0.10458	4.246×10^{-4}	6.321×10^{-5}	3.284×10^{-4}	0.7733
2 000	0.1502	1 309	0.13833	7.034×10^{-4}	9.826×10^{-5}	6.543×10^{-4}	0.9302

Nota: Tranferencia de calor y masa Cengel A-16

ANEXO I: PROPIEDADES A PRESION DE 1 ATM DE NITROGENO, OXIGENO Y VAPOR DE AGUA

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	de Prandtl, Pr
<i>Nitrógeno, N_2</i>							
-50	1.5299	957.3	0.02001	1.366×10^{-5}	1.390×10^{-5}	9.091×10^{-6}	0.6655
0	1.2498	1 035	0.02384	1.843×10^{-5}	1.640×10^{-5}	1.312×10^{-5}	0.7121
50	1.0564	1 042	0.02746	2.494×10^{-5}	1.874×10^{-5}	1.774×10^{-5}	0.7114
100	0.9149	1 041	0.03090	3.244×10^{-5}	2.094×10^{-5}	2.289×10^{-5}	0.7056
150	0.8068	1 043	0.03416	4.058×10^{-5}	2.300×10^{-5}	2.851×10^{-5}	0.7025
200	0.7215	1 050	0.03727	4.921×10^{-5}	2.494×10^{-5}	3.457×10^{-5}	0.7025
300	0.5956	1 070	0.04309	6.758×10^{-5}	2.849×10^{-5}	4.783×10^{-5}	0.7078
400	0.5072	1 095	0.04848	8.727×10^{-5}	3.166×10^{-5}	6.242×10^{-5}	0.7153
500	0.4416	1 120	0.05358	1.083×10^{-4}	3.451×10^{-5}	7.816×10^{-5}	0.7215
1 000	0.2681	1 213	0.07938	2.440×10^{-4}	4.594×10^{-5}	1.713×10^{-4}	0.7022
1 500	0.1925	1 266	0.11793	4.839×10^{-4}	5.562×10^{-5}	2.889×10^{-4}	0.5969
2 000	0.1502	1 297	0.18590	9.543×10^{-4}	6.426×10^{-5}	4.278×10^{-4}	0.4483
<i>Oxígeno, O_2</i>							
-50	1.7475	984.4	0.02067	1.201×10^{-5}	1.616×10^{-5}	9.246×10^{-6}	0.7694
0	1.4277	928.7	0.02472	1.865×10^{-5}	1.916×10^{-5}	1.342×10^{-5}	0.7198
50	1.2068	921.7	0.02867	2.577×10^{-5}	2.194×10^{-5}	1.818×10^{-5}	0.7053
100	1.0451	931.8	0.03254	3.342×10^{-5}	2.451×10^{-5}	2.346×10^{-5}	0.7019
150	0.9216	947.6	0.03637	4.164×10^{-5}	2.694×10^{-5}	2.923×10^{-5}	0.7019
200	0.8242	964.7	0.04014	5.048×10^{-5}	2.923×10^{-5}	3.546×10^{-5}	0.7025
300	0.6804	997.1	0.04751	7.003×10^{-5}	3.350×10^{-5}	4.923×10^{-5}	0.7030
400	0.5793	1 025	0.05463	9.204×10^{-5}	3.744×10^{-5}	6.463×10^{-5}	0.7023
500	0.5044	1 048	0.06148	1.163×10^{-4}	4.114×10^{-5}	8.156×10^{-5}	0.7010
1 000	0.3063	1 121	0.09198	2.678×10^{-4}	5.732×10^{-5}	1.871×10^{-4}	0.6986
1 500	0.2199	1 165	0.11901	4.643×10^{-4}	7.133×10^{-5}	3.243×10^{-4}	0.6985
2 000	0.1716	1 201	0.14705	7.139×10^{-4}	8.417×10^{-5}	4.907×10^{-4}	0.6873
<i>Vapor de agua, H_2O</i>							
-50	0.9839	1 892	0.01353	7.271×10^{-6}	7.187×10^{-6}	7.305×10^{-6}	1.0047
0	0.8038	1 874	0.01673	1.110×10^{-5}	8.956×10^{-6}	1.114×10^{-5}	1.0033
50	0.6794	1 874	0.02032	1.596×10^{-5}	1.078×10^{-5}	1.587×10^{-5}	0.9944
100	0.5884	1 887	0.02429	2.187×10^{-5}	1.265×10^{-5}	2.150×10^{-5}	0.9830
150	0.5189	1 908	0.02861	2.890×10^{-5}	1.456×10^{-5}	2.806×10^{-5}	0.9712
200	0.4640	1 935	0.03326	3.705×10^{-5}	1.650×10^{-5}	3.556×10^{-5}	0.9599
300	0.3831	1 997	0.04345	5.680×10^{-5}	2.045×10^{-5}	5.340×10^{-5}	0.9401
400	0.3262	2 066	0.05467	8.114×10^{-5}	2.446×10^{-5}	7.409×10^{-5}	0.9240

Nota: Transferencia de calor y masa Cengel A-16 conclusión

ANEXO J: ENTALPIAS ESTANDAR A 2898.15 K JOULES POR MOL FORMADA DE SUSTANCIA

Especie química		Estado (Nota 2)	$\Delta H_{f,2898}^{\circ}$	$\Delta G_{f,2898}^{\circ}$
Parafinas:				
Metano	CH ₄	(g)	-74 520	-50 460
Etano	C ₂ H ₆	(g)	-83 820	-31 855
Propano	C ₃ H ₈	(g)	-104 680	-24 290
n-Butano	C ₄ H ₁₀	(g)	-125 790	-16 570
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	(g)	-146 760	-8 650
n-Hexano	C ₆ H ₁₄	(g)	-166 920	150
n-Heptano	C ₇ H ₁₆	(g)	-187 780	8 260
n-Octano	C ₈ H ₁₈	(g)	-208 750	16 260
1-Alquenos:				
Etileno	C ₂ H ₄	(g)	52 510	68 460
Propileno	C ₃ H ₆	(g)	19 710	62 205
1-Buteno	C ₄ H ₈	(g)	-540	70 340
1-Penteno	C ₅ H ₁₀	(g)	-21280	78 410
1-Hexeno	C ₆ H ₁₂	(g)	-41950	86 830
1-Hepteno	C ₇ H ₁₄	(g)	-62 760	
Sustancias orgánicas misceláneas:				
Acetaldehído	C ₂ H ₄ O	(g)	-166 190	-128 860
Ácido acético	C ₂ H ₄ O ₂	(l)	-484 500	-389 900
Acetileno	C ₂ H ₂	(g)	227 480	209 970
Benceno	C ₆ H ₆	(g)	82 930	129 665
Benceno	C ₆ H ₆	(l)	49 080	124 520
1,3-Butadieno	C ₄ H ₆	(g)	109 240	149 795
Ciclohexano	C ₆ H ₁₂	(g)	-123 140	31 920
Ciclohexano	C ₆ H ₁₂	(l)	-156 230	26 850
1,2-Etanodiol	C ₂ H ₆ O ₂	(l)	-454 800	-323 080
Etanol	C ₂ H ₆ O	(g)	-235 100	-1 6 8 4 9 0
Etanol	C ₂ H ₆ O	(l)	-277 690	-174 780
Etilbenceno	C ₈ H ₁₀	(g)	29 920	130 890
Óxido de etileno	C ₂ H ₄ O	(g)	-52 630	-13 010
Formaldehído	CH ₂ O	(g)	-108 570	-102 530
Metanol	CH ₄ O	(g)	-200 660	-161 960
Metanol	CH ₄ O	(l)	-238 660	-166 270
Metilciclohexano	C ₇ H ₁₄	(g)	-154 770	27 480
Metilciclohexano	C ₇ H ₁₄	(l)	-190 160	20 560
Estireno	C ₈ H ₈	(g)	147 360	213 900
Tolueno	C ₇ H ₈	(g)	50 170	122 050
Tolueno	C ₇ H ₈	(l)	12 180	113 630

Nota: Tabla C.4 termodinámica-Smith-Van-Ness

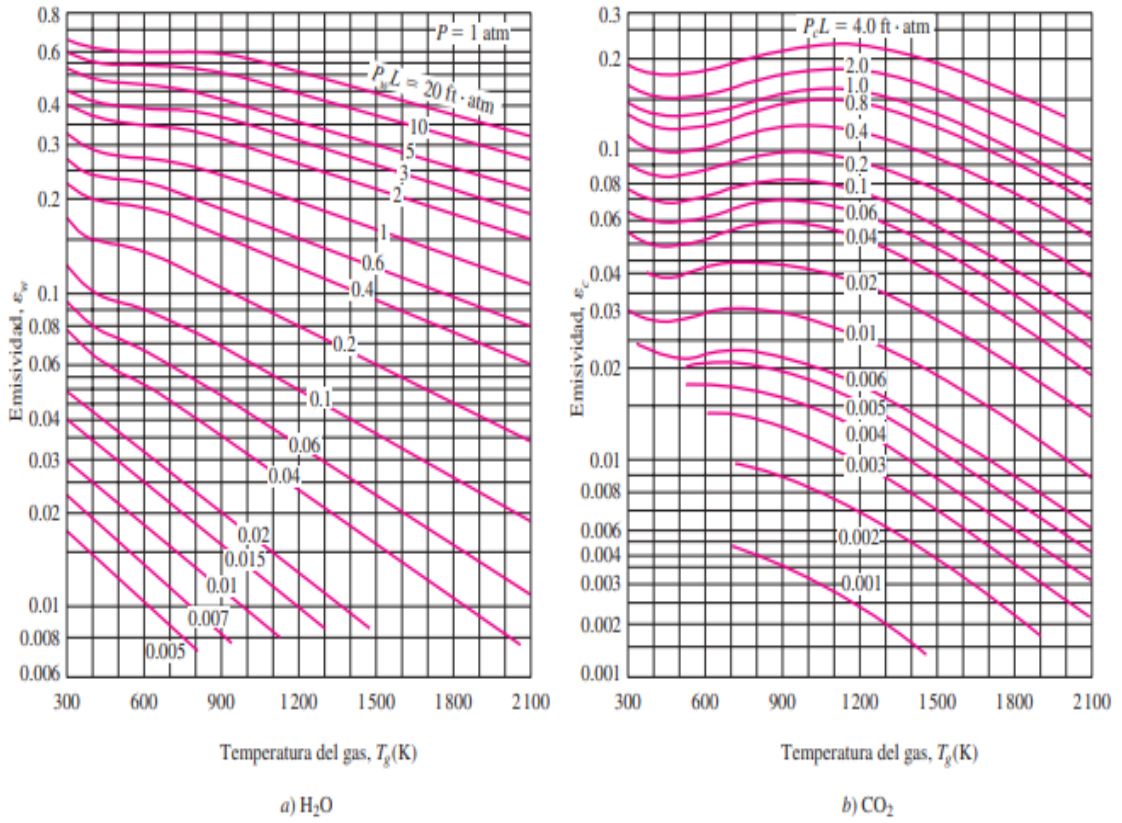
ANEXO K: PROPIEDADES DE GAS IDEAL DEL NITROGENO, N₂

Propiedades de gas ideal del nitrógeno, N₂ (conclusión)

<i>T</i>	<i>h</i>	<i>u</i>	<i>s</i> ^o	<i>T</i>	<i>h</i>	<i>u</i>	<i>s</i> ^o
K	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kmol · K	K	kJ/kmol	kJ/kmol	kJ/kmol · K
1000	30,129	21,815	228.057	1760	56,227	41,594	247.396
1020	30,784	22,304	228.706	1780	56,938	42,139	247.798
1040	31,442	22,795	229.344	1800	57,651	42,685	248.195
1060	32,101	23,288	229.973	1820	58,363	43,231	248.589
1080	32,762	23,782	230.591	1840	59,075	43,777	248.979
1100	33,426	24,280	231.199	1860	59,790	44,324	249.365
1120	34,092	24,780	231.799	1880	60,504	44,873	249.748
1140	34,760	25,282	232.391	1900	61,220	45,423	250.128
1160	35,430	25,786	232.973	1920	61,936	45,973	250.502
1180	36,104	26,291	233.549	1940	62,654	46,524	250.874
1200	36,777	26,799	234.115	1960	63,381	47,075	251.242
1220	37,452	27,308	234.673	1980	64,090	47,627	251.607
1240	38,129	27,819	235.223	2000	64,810	48,181	251.969
1260	38,807	28,331	235.766	2050	66,612	49,567	252.858
1280	39,488	28,845	236.302	2100	68,417	50,957	253.726
1300	40,170	29,361	236.831	2150	70,226	52,351	254.578
1320	40,853	29,378	237.353	2200	72,040	53,749	255.412
1340	41,539	30,398	237.867	2250	73,856	55,149	256.227
1360	42,227	30,919	238.376	2300	75,676	56,553	257.027
1380	42,915	31,441	238.878	2350	77,496	57,958	257.810
1400	43,605	31,964	239.375	2400	79,320	59,366	258.580
1420	44,295	32,489	239.865	2450	81,149	60,779	259.332
1440	44,988	33,014	240.350	2500	82,981	62,195	260.073
1460	45,682	33,543	240.827	2550	84,814	63,613	260.799

Nota: Tabla A-18 termodinamica de Cengel

ANEXO L: EMISIVIDADES DE LOS GASES H₂O Y CO₂ EN UNA MEZCLA DE GASES NO PARTICIPANTES A 1 ATM DE PRESION TOTAL.



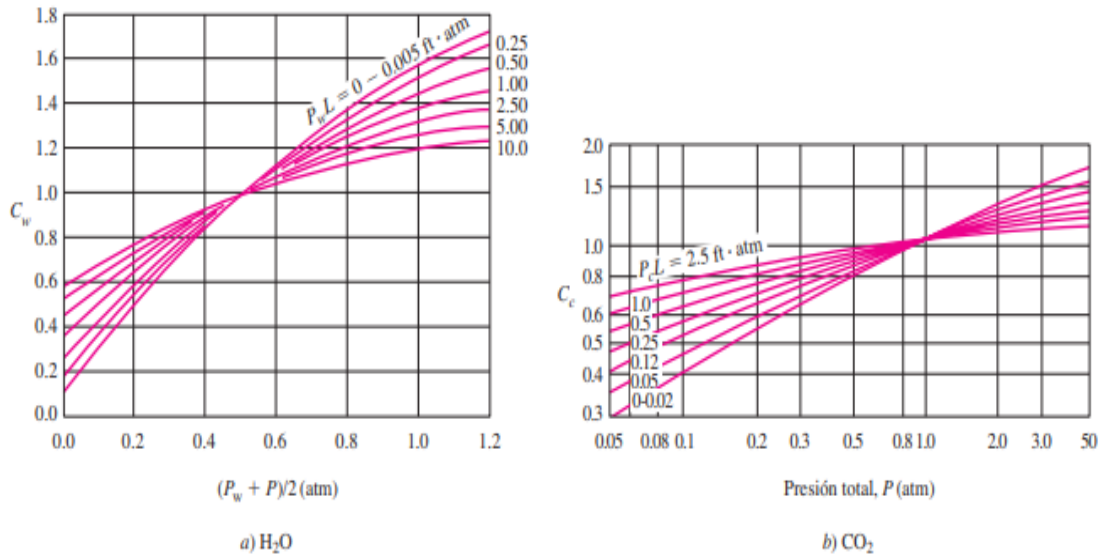
Nota: Figura 13.36 Transferencia de calor y masa Cengel

**ANEXO M: LONGITUD MEDIA DEL HAZ DE L PARA VARIAS FORMAS DEL
VOLUMEN DE GAS**

<u>Configuración geométrica del volumen de gas</u>	<u><i>L</i></u>
Hemisferio de radio <i>R</i> irradiando hacia el centro de su base	<i>R</i>
Esfera de diámetro <i>D</i> irradiando hacia su superficie	$0.65D$
Cilindro circular infinito de diámetro <i>D</i> irradiando hacia la superficie curva	$0.95D$
Cilindro circular semiinfinito de diámetro <i>D</i> irradiando hacia su base	$0.65D$
Cilindro circular semiinfinito de diámetro <i>D</i> irradiando hacia el centro de su base	$0.90D$
Cilindro semicircular infinito de radio <i>R</i> irradiando hacia el centro de su base	$1.26R$
Cilindro circular de altura igual al diámetro <i>D</i> irradiando hacia toda la superficie	$0.60D$
Cilindro circular de altura igual al diámetro <i>D</i> irradiando hacia el centro de su base	$0.71D$
Losa infinita de espesor <i>D</i> irradiando hacia cualquiera de los dos planos que la limitan	$1.80D$
Cubo de longitud <i>L</i> por lado irradiando hacia cualquiera de las caras	$0.66L$
Forma arbitraria de volumen <i>V</i> y área superficial <i>A_s</i> irradiando hacia la superficie	$3.6V/A_s$

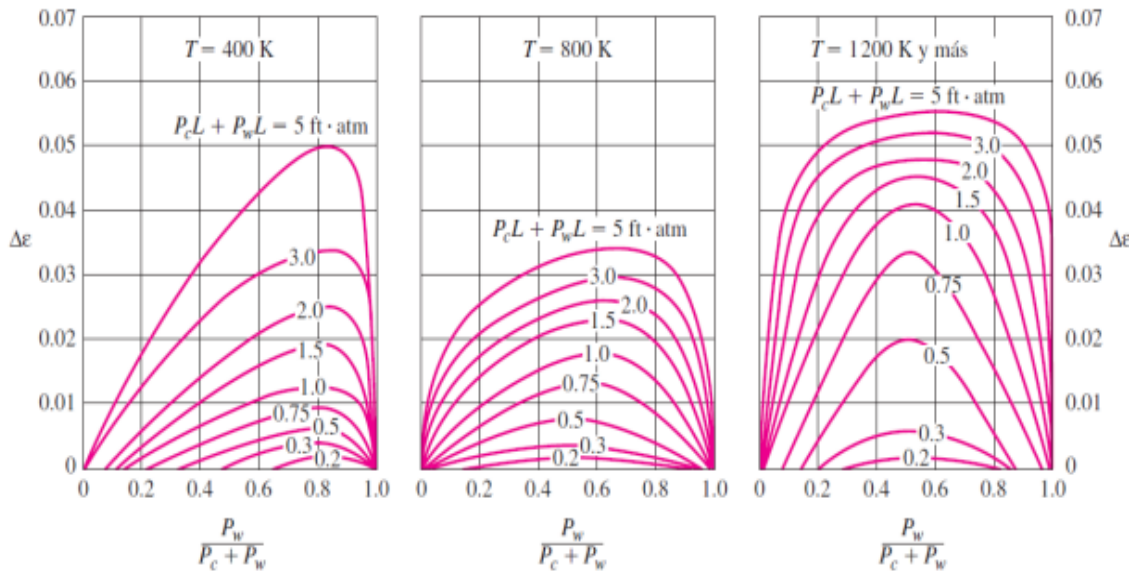
Nota: figura13-4 Tranferencia de calor y masa Cengel

ANEXO N: FACTORES DE CORRECIÓN PARA LAS EMISIVIDADES DE LOS GASES H₂O Y CO₂ A DIFERENTES PRECIONES DE 1 ATM



Nota: figura13-37 Tranferencia de calor y masa Cengel

ANEXO O: FACTOR DE CORRECIÓN Δε PARA GASES DE COMBUSTIÓN



Nota: figura13-37 Tranferencia de calor y masa Cengel

ANEXO P: TENSIÓN SUPERFICIAL DE LA INTERFASE LIQUIDO VAPOR (AGUA)

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{N/m}^*$
0	0.0757
20	0.0727
40	0.0696
60	0.0662
80	0.0627
100	0.0589
120	0.0550
140	0.0509
160	0.0466
180	0.0422
200	0.0377
220	0.0331
240	0.0284
260	0.0237
280	0.0190
300	0.0144
320	0.0099
340	0.0056
360	0.0019
374	0.0

Nota: tabla 10-1 Transferencia de calor y masa Cengel

ANEXO Q: PROPIEDADES DEL AGUA A DIVERSAS TEMPERATURAS

Temp., T °C	Presión de saturación, P _{sat} , kPa	Densidad, ρ kg/m ³		Entalpia de vaporización, h _g , kJ/kg	Calor específico, c _p , J/kg · K		Conductividad térmica, k W/m · K		Viscosidad dinámica, μ kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	1.792 × 10 ⁻³	0.922 × 10 ⁻⁶	13.5	1.00	-0.068 × 10 ⁻³
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	1.519 × 10 ⁻³	0.934 × 10 ⁻⁶	11.2	1.00	0.015 × 10 ⁻³
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	1.307 × 10 ⁻³	0.946 × 10 ⁻⁶	9.45	1.00	0.733 × 10 ⁻³
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 185	1 863	0.589	0.0179	1.138 × 10 ⁻³	0.959 × 10 ⁻⁶	8.09	1.00	0.138 × 10 ⁻³
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	1.002 × 10 ⁻³	0.973 × 10 ⁻⁶	7.01	1.00	0.195 × 10 ⁻³
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	0.891 × 10 ⁻³	0.987 × 10 ⁻⁶	6.14	1.00	0.247 × 10 ⁻³
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	0.798 × 10 ⁻³	1.001 × 10 ⁻⁶	5.42	1.00	0.294 × 10 ⁻³
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	0.720 × 10 ⁻³	1.016 × 10 ⁻⁶	4.83	1.00	0.337 × 10 ⁻³
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	0.653 × 10 ⁻³	1.031 × 10 ⁻⁶	4.32	1.00	0.377 × 10 ⁻³
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	0.596 × 10 ⁻³	1.046 × 10 ⁻⁶	3.91	1.00	0.415 × 10 ⁻³
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	0.547 × 10 ⁻³	1.062 × 10 ⁻⁶	3.55	1.00	0.451 × 10 ⁻³
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	0.504 × 10 ⁻³	1.077 × 10 ⁻⁶	3.25	1.00	0.484 × 10 ⁻³
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	0.467 × 10 ⁻³	1.093 × 10 ⁻⁶	2.99	1.00	0.517 × 10 ⁻³
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	0.433 × 10 ⁻³	1.110 × 10 ⁻⁶	2.75	1.00	0.548 × 10 ⁻³
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	0.404 × 10 ⁻³	1.126 × 10 ⁻⁶	2.55	1.00	0.578 × 10 ⁻³
75	38.58	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	0.378 × 10 ⁻³	1.142 × 10 ⁻⁶	2.38	1.00	0.607 × 10 ⁻³
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	0.355 × 10 ⁻³	1.159 × 10 ⁻⁶	2.22	1.00	0.633 × 10 ⁻³
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	0.333 × 10 ⁻³	1.176 × 10 ⁻⁶	2.08	1.00	0.670 × 10 ⁻³
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	0.315 × 10 ⁻³	1.193 × 10 ⁻⁶	1.96	1.00	0.702 × 10 ⁻³
95	84.55	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	0.297 × 10 ⁻³	1.210 × 10 ⁻⁶	1.85	1.00	0.716 × 10 ⁻³
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282 × 10 ⁻³	1.227 × 10 ⁻⁶	1.75	1.00	0.750 × 10 ⁻³
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	0.255 × 10 ⁻³	1.261 × 10 ⁻⁶	1.58	1.00	0.798 × 10 ⁻³
120	198.53	943.4	1.121	2 203	4 244	2 120	0.683	0.0275	0.232 × 10 ⁻³	1.296 × 10 ⁻⁶	1.44	1.00	0.858 × 10 ⁻³
130	270.1	934.6	1.496	2 174	4 263	2 177	0.684	0.0288	0.213 × 10 ⁻³	1.330 × 10 ⁻⁶	1.33	1.01	0.913 × 10 ⁻³
140	361.3	921.7	1.965	2 145	4 286	2 244	0.683	0.0301	0.197 × 10 ⁻³	1.365 × 10 ⁻⁶	1.24	1.02	0.970 × 10 ⁻³
150	475.8	916.6	2.546	2 114	4 311	2 314	0.682	0.0316	0.183 × 10 ⁻³	1.399 × 10 ⁻⁶	1.16	1.02	1.025 × 10 ⁻³
160	617.8	907.4	3.256	2 083	4 340	2 420	0.680	0.0331	0.170 × 10 ⁻³	1.434 × 10 ⁻⁶	1.09	1.05	1.145 × 10 ⁻³
170	791.7	897.7	4.119	2 050	4 370	2 490	0.677	0.0347	0.160 × 10 ⁻³	1.468 × 10 ⁻⁶	1.03	1.05	1.178 × 10 ⁻³
180	1 002.1	887.3	5.153	2 015	4 410	2 590	0.673	0.0364	0.150 × 10 ⁻³	1.502 × 10 ⁻⁶	0.983	1.07	1.210 × 10 ⁻³
190	1 254.4	876.4	6.388	1 979	4 460	2 710	0.669	0.0382	0.142 × 10 ⁻³	1.537 × 10 ⁻⁶	0.947	1.09	1.280 × 10 ⁻³
200	1 553.8	864.3	7.852	1 941	4 500	2 840	0.663	0.0401	0.134 × 10 ⁻³	1.571 × 10 ⁻⁶	0.910	1.11	1.350 × 10 ⁻³
220	2 318	840.3	11.60	1 859	4 610	3 110	0.650	0.0442	0.122 × 10 ⁻³	1.641 × 10 ⁻⁶	0.865	1.15	1.520 × 10 ⁻³
240	3 344	813.7	16.73	1 767	4 760	3 520	0.632	0.0487	0.111 × 10 ⁻³	1.712 × 10 ⁻⁶	0.836	1.24	1.720 × 10 ⁻³
260	4 688	783.7	23.69	1 663	4 970	4 070	0.609	0.0540	0.102 × 10 ⁻³	1.788 × 10 ⁻⁶	0.832	1.35	2.000 × 10 ⁻³
280	6 412	750.8	33.15	1 544	5 280	4 835	0.581	0.0605	0.094 × 10 ⁻³	1.870 × 10 ⁻⁶	0.854	1.49	2.380 × 10 ⁻³
300	8 581	713.8	46.15	1 405	5 750	5 980	0.548	0.0695	0.086 × 10 ⁻³	1.965 × 10 ⁻⁶	0.902	1.69	2.950 × 10 ⁻³
320	11 274	667.1	64.57	1 239	6 540	7 900	0.509	0.0836	0.078 × 10 ⁻³	2.084 × 10 ⁻⁶	1.00	1.97	—
340	14 586	610.5	92.62	1 028	8 240	11 870	0.469	0.110	0.070 × 10 ⁻³	2.255 × 10 ⁻⁶	1.23	2.43	—
360	18 651	528.3	144.0	720	14 690	25 800	0.427	0.178	0.060 × 10 ⁻³	2.571 × 10 ⁻⁶	2.06	3.73	—
374.14	22 090	317.0	317.0	0	—	—	—	—	0.043 × 10 ⁻³	4.313 × 10 ⁻⁶	—	—	—

Nota: Tabla A-9 Transferencia de calor y masa Cengel

ANEXO R: COEFICIENTES C_{sf} n PARA CONBINACIONES FLUIDO-SUPERFICIE

Agua-cobre (pulido)	0.0130	1.0
Agua-cobre (rayado)	0.0068	1.0
Agua-acero inoxidable (pulido mecánicamente)	0.0130	1.0
Agua-acero inoxidable (rectificado y pulido)	0.0060	1.0
Agua-acero inoxidable (recubierto de teflón picado)	0.0058	1.0
Agua-acero inoxidable (corroído químicamente)	0.0130	1.0
Agua-latón	0.0060	1.0
Agua-níquel	0.0060	1.0
Agua-platino	0.0130	1.0
<i>n</i> -Pentano-cobre (pulido)	0.0154	1.7
<i>n</i> -Pentano-cromo	0.0150	1.7
Benceno-cromo	0.1010	1.7
Alcohol etílico-cromo	0.0027	1.7
Tetracloruro de carbono-cobre	0.0130	1.7
Isopropanol-cobre	0.0025	1.7

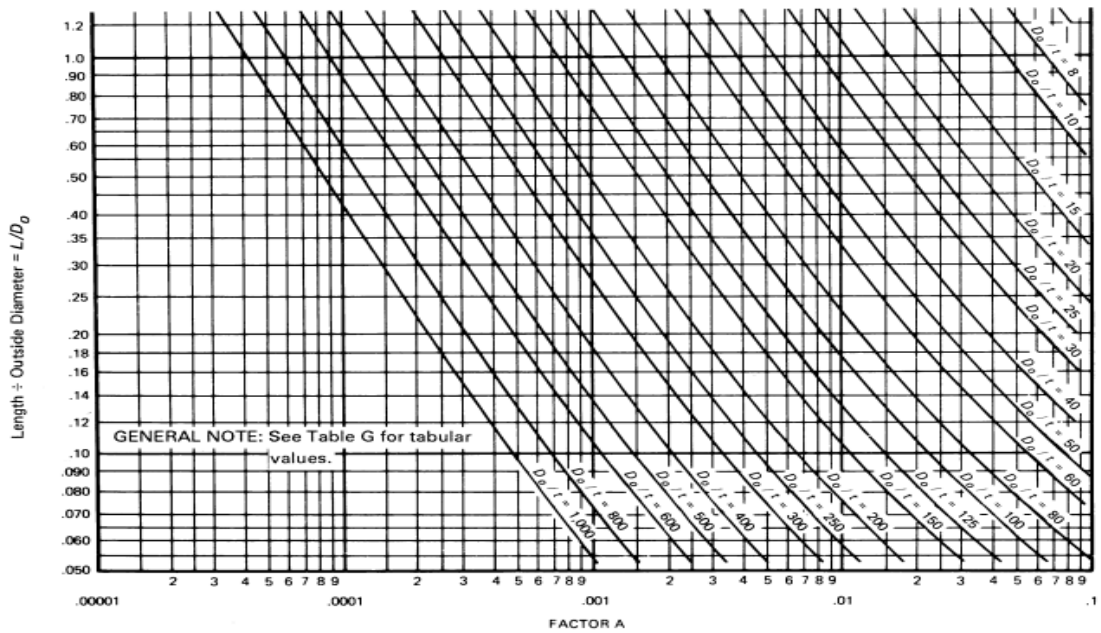
Nota: Tabla 10-3 Tranferencia de calor y masa Cengel

ANEXO S: FACTORES DE INCRUSTACIÓN

Fluido	$R_f, m^2 \cdot ^\circ C/W$
Agua destilada, agua de mar, agua de río, agua de alimentación para calderas:	
Por debajo de 50°C	0.0001
Arriba de 50°C	0.0002
Combustóleo	0.0009
Vapor de agua (libre de aceite)	0.0001
Refrigerantes (líquido)	0.0002
Refrigerantes (vapor)	0.0004
Vapores de alcohol	0.0001
Aire	0.0004

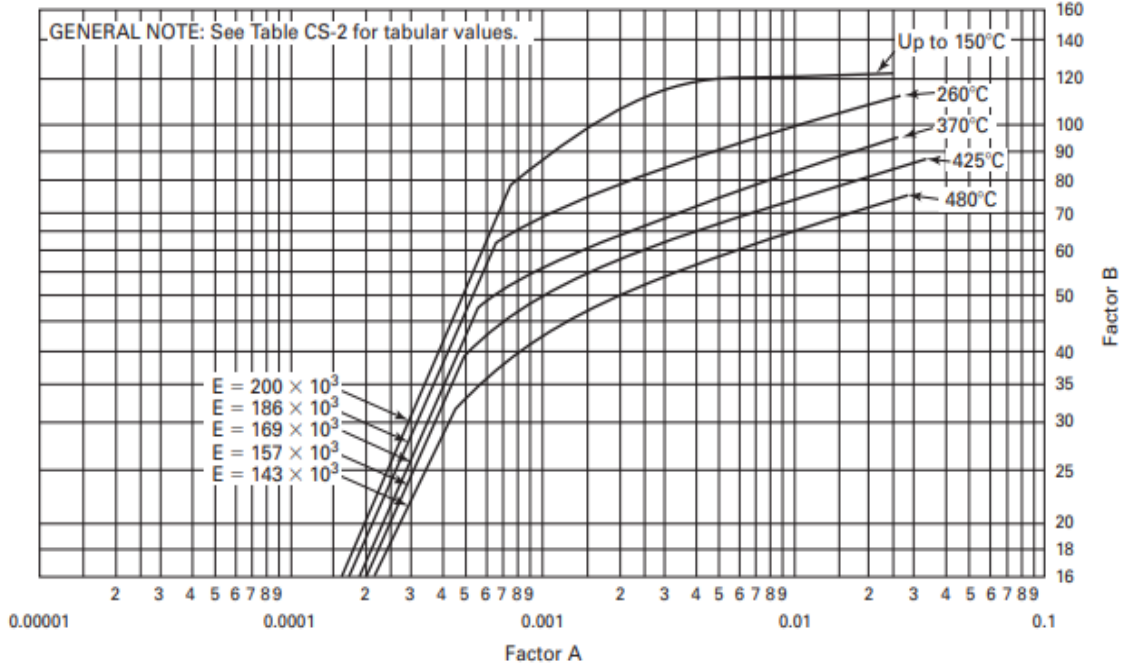
Nota: tabla 11-2 Tranferencia de calor y masa Cengel y Tubular Exchange Manufactures Association

**ANEXO V: GRÁFICO GEOMÉTRICO PARA COMPONENTE BAJO CARGA EXTERNAS
O DE COMPRESIÓN**



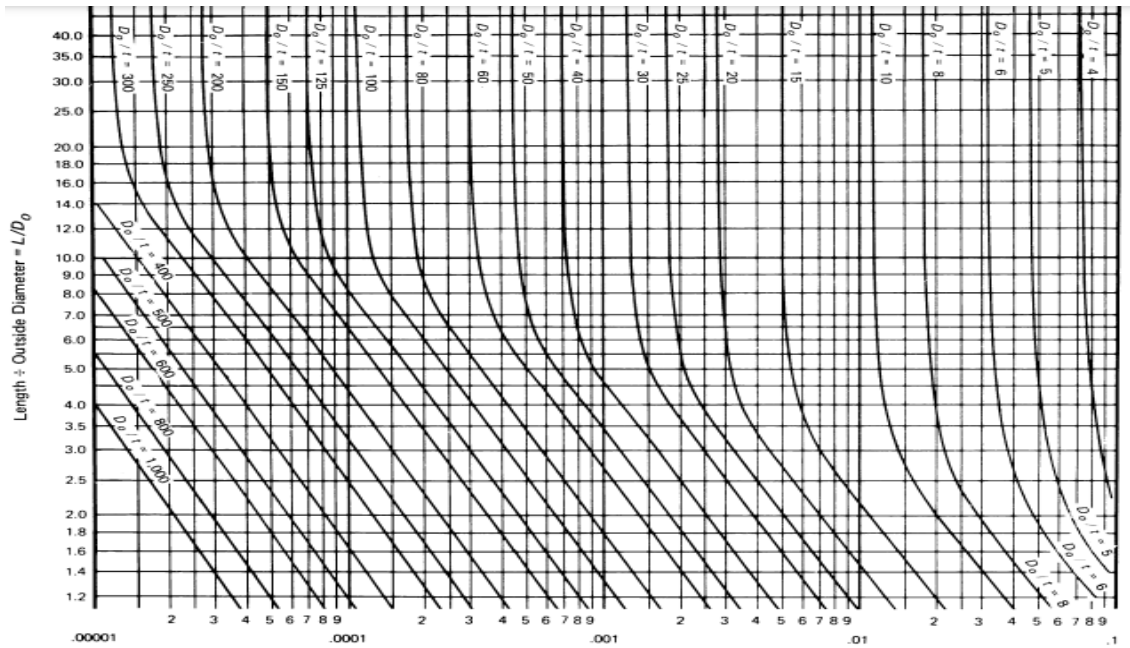
Nota: Figura G CODIGO ASME 2019 SECCION II PARTE B(PAG969)

ANEXO W: GRÁFICO PARA DETERMINAR EL GROSOR DE LA CARCASA DE LOS COMPONENTES BAJO PRESIÓN EXTERNA DESARROLLADO PARA ACEROS DE CARBONO O DE BAJA ALEACIÓN CON UNA RESISTENCIA MÍNIMA DE RENDIMIENTO ESPECIFICADA DE 207MPa Y SUPERIOR.



Nota: Fig. CS-2 CODIGO ASME 2019 SECCION II PARTE D (PAG 971)

ANEXO X: GRÁFICO GEOMÉTRICO PARA COMPONENTE BAJO CARGA EXTERNAS O DE COMPRESIÓN



Nota: Fig. G CODIGO ASME 2019 SECCION II PARTE B(PAG968)

ANEXO Y: MANUAL DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN

MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE CALDERINES DE VAPOR

1. INTRODUCCIÓN

- El calderín de vapor es un aparato diseñado y construido para generar vapor a salida libre en forma permanente y constante.
- Después de su proceso de soldadura, es sometido a una prueba hidrostática para verificar que no haya fugas, ni deformaciones o fallas en los materiales utilizados.
- La alimentación de agua a los calderines es a través de una bomba periférica de alta temperatura, la misma que se encuentra en la capacidad de romper la presión máxima de trabajo del equipo el momento de la producción de vapor.
- La alimentación de corriente eléctrica es de $110\text{ V} \pm 5$, una fase, un neutro y tierra física.
- La alimentación de combustible es G.L.P. es en baja presión y debe ser 6.08 l/h.
- Su funcionamiento y operación es comandado por un sistema de ignición o encendido secuencial. Mientras permanece apagado no existe piloto encendido.
- En la fabricación del cuerpo interior o depósito se utiliza lámina negra de acero al carbón, con planchas de diferentes espesores dependiendo la parte del calderín. El haz de tubos se encuentran formados con tubería negra sin costura de cedhule 40, de 3/4" de diámetro. El cuerpo interior es aislado térmicamente con fibra de vidrio con foil de aluminio, para minimizar las pérdidas de calor con el medio ambiente y protegido con un envolvente exterior en lámina en Acero Inoxidable.

2. COMPONENTES Y ACCESORIOS

Cuerpo interior.

Recipiente fabricado en lámina negra de 4 mm de espesor, donde se almacena y se calienta agua para generar vapor a salida libre, los espejos están fabricados con lámina de 6 mm de espesor.

Cámara interna.

Recipiente fabricado en lámina negra de 6 mm de espesor, donde se almacena y se calienta agua para generar vapor a salida libre, los espejos están fabricados con lámina de 6 mm de espesor.

Haz de tubos.

Se encuentra colocados 42 Tubos en acero negro sin costura C/40 de 3/4" de espesor soldados.

Tanque para almacenamiento para agua.

Recipiente donde se almacena el agua que se suministra al cuerpo interior, recipiente en hierro galvanizado de 2 mm de espesor.

Cuerpo exterior.

Envoltorio fabricado en lámina en acero inoxidable 0.40 mm de espesor.

Panel eléctrico.

Sistema eléctrico que se alimenta con un Voltaje de 110, que permite el acceso al sistema de ignición de los generadores de vapor.

Salida de humos.

Componente fabricado en lámina en hierro galvanizado 0.70 mm de espesor y acabado en pintura anticorrosiva negro brillante, conduce los gases producto de la combustión, al exterior.

Quemador.

Componente fabricado en lámina en acero inoxidable, tipo abanicos, conjunto de flautas que genera la llama del equipo, proporciona la potencia calorífica necesaria para la producción de vapor.

Alimentador de cobre para gas.

Fabricado en tubo de cobre flexible de 6 mm y tuerca cónica de latón de 6 mm, conduce el gas de la salida de la válvula al quemador.

Electrodos de ignición.

Fabricado en tubo de cobre flexible de 6 mm, conduce el gas de la salida de la válvula al piloto, donde se hace la ignición.

Bomba de alimentación de agua.

Bomba Periférica de 07 Hp, 110 V, salida y entrada de agua de 1", para soportar Temperatura de hasta 90 ° C.

Transformador.

Permite bajar la alimentación de 110 V a 12 V, mono de bajada, tipo seco primario 110 V, secundario 12 V.

Control de Ignición.

Comanda secuencia de encendido a través de un programador.

Switch pulsador.

Interruptor de encendido-apagado, para todo el sistema.

Selector.

Selector de dos posiciones de encendido y apagado, para la alimentación del agua a través de la bomba.

Cable porta electrodo.

Conduce el alto voltaje proveniente del control de ignición al electrodo y piloto donde se genera la flama del piloto, de alta temperatura.

Sensor de nivel de agua.

Detecta el nivel alto y bajo del agua que se encuentra en el depósito a través de una boya en acero inoxidable, la misma que soporta presiones de agua y vapor de hasta 80 PSI.

Nivel de agua.

Se encuentra fabricado con un tubo de vidrio visor el mismo que permite verificar la cantidad de agua que se encuentra en el sistema interno.

Manómetro.

Se encuentra colocado un manómetro de presión de 0 – 90 PSI, con glicerina.

Control de presión.

Se encuentra con un presostato regulable de 0 – 150 PSI, el mismo que está seteado a 70 PSI para operar.

Válvula de alivio (Seguridad de presión).

Se encuentra con una válvula de desfogue por sobrepresión del equipo, la misma que evita que el calderín sufra una explosión y libere toda la presión existente.

Válvula de alivio (Seguridad de temperatura).

Se encuentra con una válvula de desfogue por sobrepresión del equipo, la misma que evita que la máquina sufra un sobrecalentamiento por falta de agua, sirve para desactivar el equipo de su funcionamiento.

3. INSTALACIÓN

SISTEMA HIDRÁULICO.

La alimentación de agua del Calderín de vapor requiere una instalación de entrada con tubería de 13 mm (1/2"), se deben colocar dos válvulas check sea tipo compuerta o tipo Y, para que el agua y vapor caliente del equipo no se regrese a la bomba de alimentación de agua. Cuenta con un sensor de nivel alto y un sensor de nivel bajo que permite mantener un nivel constante de agua en su depósito.

SISTEMA DE SALIDA DE VAPOR.

La distancia del calderín de vapor, al lugar de utilización de vapor no debe ser mayor de 10 metros de longitud.

El vapor que se genera es a salida libre, por lo que debe mantenerse el diámetro nominal de la salida del vapor desde el calderín hasta la utilización de vapor, de acuerdo a las especificaciones técnicas. La tubería que conduce el vapor desde el calderín hasta el lugar de utilización de vapor debe estar libre de cualquier válvula de paso.

Deben evitarse demasiados cambios de dirección en el recorrido de la tubería de vapor, así como evitar columpios. En lugares o espacios horizontales debe darse una pequeña inclinación a la tubería para evitar que se entrampe el condensado del vapor.

Para un aprovechamiento óptimo del generador de vapor se recomienda aislar térmicamente la tubería que conduce el vapor.

SISTEMA ELÉCTRICO

La alimentación eléctrica a los calderines de vapor es monofásica; es decir se requiere una fase, un neutro y una tierra física.

Se recomienda utilizar cable concéntrico 14, para su instalación eléctrica.

El consumo de corriente es de aproximadamente 5 Amperes, por lo que se recomienda colocar un centro de carga con un break de 10 - 20 Amperes o equivalente.

La alimentación eléctrica del generador de vapor de 110 V energiza a un transformador que baja el voltaje de 110 V a 12 V.

El funcionamiento de los Calderines de vapor es automático, se debe prender el sistema a través del pulsador ON – OFF.

SISTEMA DE SUMINISTRO DE GAS.

En la alimentación de gas al calderín de vapor, se requiere una instalación de entrada con tubería de 13 mm (1/2”), además una válvula de paso rápido, un regulador de baja presión alto consumo y una tuerca de unión. La válvula de paso rápido y la tuerca de unión facilitarán la instalación y el mantenimiento del generador.

La otra alternativa es colocar una válvula reguladora, la misma que se debe seleccionar considerando el consumo de gas entre 2 a 3 Kg/h.

SISTEMA DE SALIDA DE GASES.

Los generadores de vapor deben instalarse en lugares ventilados, para mantener siempre un ambiente fresco.

Deben mantenerse los diámetros de las chimeneas para permitir que los gases de combustión salgan libremente; ya que en caso contrario se puede provocar una caída de presión que afecte directamente el funcionamiento del Calderín.

4. OPERACIÓN Y FUNCIONAMIENTO

- ✓ Antes de poner en operación el calderín de vapor, verificar que tenga agua, energía eléctrica y alimentación de gas.
- ✓ Alimente eléctricamente al calderín de vapor a 110 V.
- ✓ Abra la alimentación de gas al calderín de vapor.
- ✓ Abra la válvula de alimentación de agua al calderín de vapor.
- ✓ Abrir la purga de controles, para desfogar los gases generados en la última preñida.
- ✓ Abrir o purgar el equipo de la siguiente manera.
- ✓ Purga de Fondo: 15 segundos en 3 golpes de 5 segundos cada uno. Purga Lateral: 15 segundos 1 un solo golpe.
- ✓ Cerrar la purga de controles.

- ✓ Adicionar ½ Litro de producto químico antiincrustante para tratamiento de calderas, en el tanque de alimentación de agua, el mismo que debe contener su respectiva hoja técnica y ficha de seguridad.
- ✓ Active el selector de la bomba de agua, el mismo que debe permanecer en encendido siempre que el calderín este en uso. Una vez energizado, se accionará la bomba, dejando el paso de flujo de agua hasta que el sensor de alto nivel detecte el nivel de agua de seguridad, activando el sistema de ignición.
- ✓ Para que se active el sistema de ignición, se debe presionar el pulsador y colocar en la posición On (Verde), se genera un arco voltaico en el electrodo del piloto, al mismo tiempo también se energiza el solenoide de la válvula del piloto y permite el paso del gas, por lo que éste se enciende.
- ✓ Una vez encendido el piloto, se desactiva el electrodo.
- ✓ Después de unos segundos de incidir la flama del piloto en el electrodo, abre el solenoide de la válvula principal y enciende el quemador.
- ✓ En este momento se inicia el calentamiento y evaporación del agua, por lo que comienza la saturación del equipo con el vapor generado, el mismo que llega hasta 50 PSI, y se apaga automáticamente con un tiempo promedio de entre 30 a 45 minutos.
- ✓ La operación del calderín de vapor es automática, es decir, se vuelve a prender en 20 PSI y apaga en 50 PSI.
- ✓ Cuando se termine la utilización del calderín se apaga el equipo, aplastando el pulsador en Off.
- ✓ Realizar la segunda purga del calderín (las mismas están sujetas a la recomendación del técnico en cuanto al tratamiento químico que debe tener el equipo en la parte de agua).
- ✓ Desconectar el equipo de la energía eléctrica.

5. MANTENIMIENTO

Antes de acceder a los componentes o controles del calderín de vapor desconecte el interruptor general de alimentación eléctrica, cierre la alimentación de gas y cierre la alimentación de agua fría.

DIARIA.

- ✓ Drenado de sólidos del cuerpo interior, es decir purgar el equipo las veces recomendadas por el técnico.
- ✓ Dosificar el producto químico Antiincrustante.

SEMESTRAL.

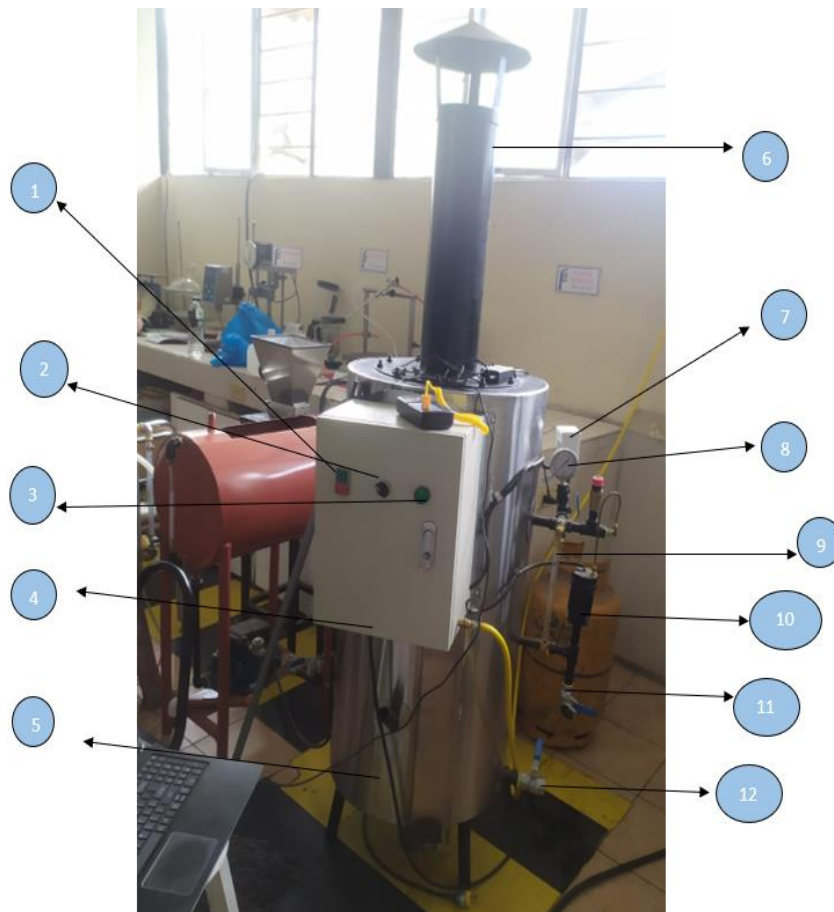
- ✓ Limpieza del conjunto de piloto y electrodo.
- ✓ Limpieza del quemador.
- ✓ Eliminando residuos de hollín, reemplace abanicos si es necesario.
- ✓ Limpieza de depósito para agua y sensores de nivel.
- ✓ Reapriete de conexiones eléctricas.

ANUAL.

- ✓ Limpieza de cámara de combustión.
- ✓ Limpieza de la cámara de agua y vapor.

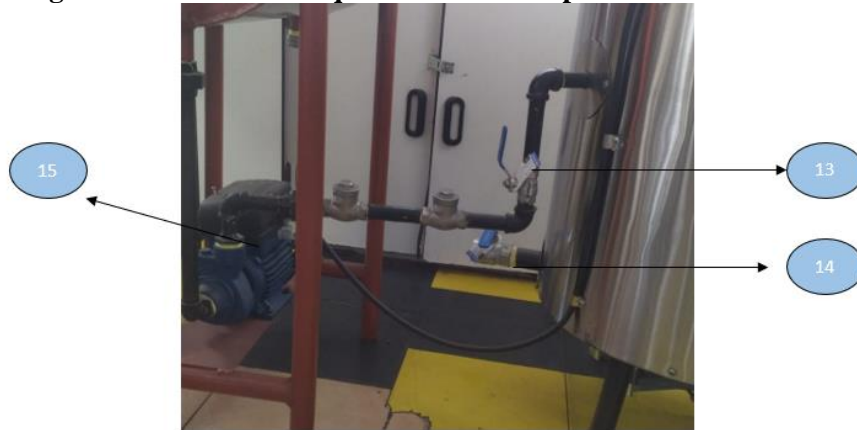
6. GRAFICO DE LOS COMPONENTES DEL CALDERO

Imagen 6.1 Vista frontal de los componentes del Caldero Simple



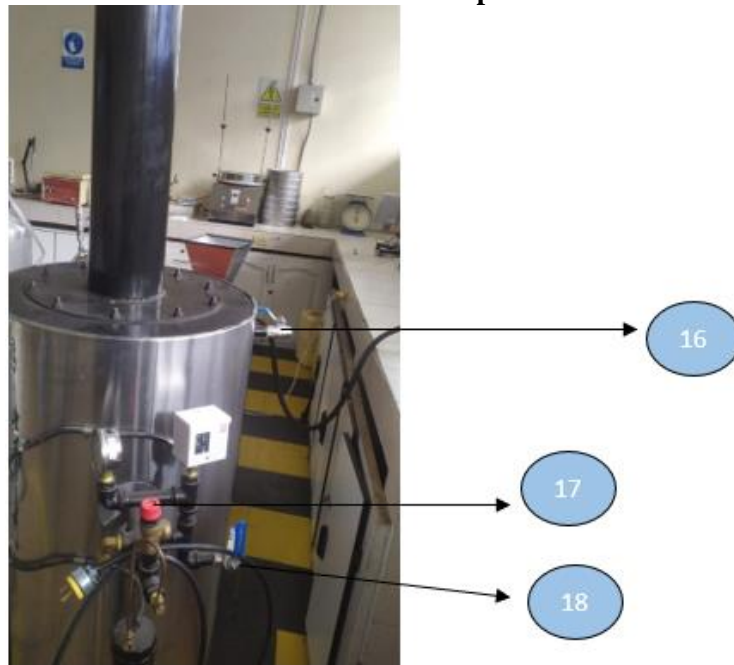
Realizado por: Izquieta, Dalton y Saltos, Steven. 2023

Imagen 6.2 Vista lateral izquierda de los componentes del Caldero Simple



Realizado por: Izquieta, Dalton y Saltos, Steven. 2023

Imagen 6.3 Vista lateral derecha de los componentes del Caldero Simple



Realizado por: Izquieta, Dalton y Saltos, Steven. 2023

Imagen 6.4 Vista interna del Caldero Simple



19

Realizado por: Izquieta, Dalton y Saltos, Steven. 2023

Imagen 6.5 Vista inferior de los componentes del Caldero Simple



20

Realizado por: Izquieta, Dalton y Saltos, Steven. 2023

Tabla 6.1. Componentes

N°	DESCRIPCIÓN
1	Pulsador ON/OFF
2	Encendido/apagado de la bomba
3	Luz piloto
4	Sistema eléctrico
5	Cilindro
6	Chimenea
7	Presostato
8	Manómetro
9	Tubo de vidrio
10	Sensor de nivel de Agua
11	Purga lateral
12	Purga de fondo derecha
13	Paso de nivel de agua
14	Purga de fondo izquierda
15	Motor bomba de agua
16	Llave salida de vapor
17	Válvula de alivio
18	Purga de control
19	Haces de tubo (42)
20	Quemador

Realizado por: Izquieta, Dalton y Saltos, Steven. 2023



epoch

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 13 / 10 / 2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Dalton David Izquieta Quezada Steven Marcelo Saltos Ruiz
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniero Químico
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

1643-DBRA-UPT-2023

