



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**ANÁLISIS TERMODINÁMICO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA
EFICIENCIA DE OPERACIÓN DE LA CALDERA DEL INGENIO
TULULÁ**

Rufino Gregorio Siquiná Sánchez

Asesorado por el Ing. Julio Cesar Campos Paiz

Guatemala, octubre de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS TERMODINÁMICO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA
EFICIENCIA DE OPERACIÓN DE LA CALDERA DEL INGENIO
TULULÁ**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

RUFINO GREGORIO SIQUINA SANCHEZ

ASESORADO POR EL ING. JULIO CESAR CAMPOS PAIZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|-------------------|--------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| VOCAL I | Ingá. Glenda Patricia García Soria |
| VOCAL II | Ingá. Alba Maritza Guerrero de López |
| VOCAL III | Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón |
| VOCAL IV | Br. José Milton De León Bran |
| VOCAL V | Br. Isaac Sultán Mejía |
| SECRETARIO | Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|-------------------|------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Ing. Julio Cesar Recinos Paiz |
| EXAMINADOR | Ing. Edwin Estuardo Sarceño Zepeda |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma |
| SECRETARIA | Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS TERMODINÁMICO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA DE OPERACIONES DE LA CALDERA DEL INGENIO TULULÁ,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 18 de agosto de 2008.



RUFINO GREGORIO SIQUINA SANCHEZ

Ingeniera:
Norma Ileana Sarmiento Zeceña de Serrano
Director Unidad de E.P.S.
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Directora

Por medio de la presente hago de su conocimiento que como asesor del trabajo de graduación del estudiante **RUFINO GREGORIO SIQUINA SANCHEZ**, con número de carné **1998-30357** procedí a revisar el informe final, cuyo título es **"ANÁLISIS TERMODINÁMICO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA DE OPERACIÓN DE LA CALDERA DEL INGENIO TULULA"**.

Habiendo encontrado satisfactoria el contenido de dicho informe, lo doy por aprobado solicitándole a la vez se le dé el siguiente trámite que le corresponda.

Sin otro particular, me suscribo de usted

Atentamente



Ing. Julio Cesar Campos Paiz
Colegiado No. 2701

MA Ing. Julio César Campos Paiz
DIRECTOR
Esc. Ingeniería Mecánica

Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería



UNIDAD DE E.P.S.

Guatemala, 11 de septiembre de 2009
REF.EPS.DOC.580.09.09.

Inga. Norma Ileana Sarmiento Zeceña de Serrano
Directora Unidad de EPS
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimada Ingeniera Sarmiento Zeceña.

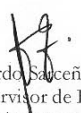
Por este medio atentamente le informo que como Asesor-Supervisor de la Práctica del Ejercicio Profesional Supervisado (E.P.S.), del estudiante universitario **Rufino Gregorio Siquiná Sánchez** de la Carrera de Ingeniería Mecánica, con carné No. **199830357**, procedí a revisar el informe final, cuyo título es **“ANÁLISIS TERMODINÁMICO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA DE OPERACIÓN DE LA CALDERA DEL INGENIO TULULÁ”**.

En tal virtud, **LO DOY POR APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

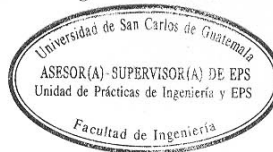
Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Ing. Edwin Estuardo Saucedo Zepeda
Asesor-Supervisor de EPS
Área de Ingeniería Mecánica

c.c. Archivo
EESZ/ra



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería



UNIDAD DE E.P.S.

Guatemala, 11 de septiembre de 2009
REF.EPS.D.1335.09.09

Ing. Julio César Campos Paiz
Director Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Presente


Estimado Ingeniero Campos Paiz:

Por este medio atentamente le envío el informe final correspondiente a la práctica del Ejercicio Profesional Supervisado, (E.P.S) titulado "**ANÁLISIS TERMODINÁMICO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA DE OPERACIÓN DE LA CALDERA DEL INGENIO TULULÁ**" que fue desarrollado por el estudiante universitario, **Rufino Gregorio Siquiná Sánchez** quien fue debidamente asesorado por el Ing. Julio César Campos Paiz y supervisado por el Ingeniero Edwin Estuardo Sarceño Zepeda.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y requisitos de ley del referido trabajo y existiendo la aprobación del mismo por parte del Asesor y del Supervisor de EPS, en mi calidad de Directora apruebo su contenido solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,
"Id y Enseñad a Todos"


Inga. Norma Ileana Sarmiento Zeceña de Serrano
Directora Unidad de EPS

NISZ/ra



Edificio de E.P.S., Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala
Ciudad Universitaria zona 12, teléfono directo: 2442-3509

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación de la directora del Ejercicio Profesional Supervisado, E.P.S., al Trabajo de Graduación ANÁLISIS TERMODINÁMICO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA DE OPERACIÓN DE LA CALDERA DEL INGENIO TULULÁ, del estudiante Rufino Gregorio Siquiná Sánchez, procede a la autorización del mismo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Julio César Campos Paiz
DIRECTOR



Guatemala, octubre de 2009

JCCP/behdei

Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG. 391.2009

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS TERMODINÁMICO PARA EL MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA DE OPERACIÓN DE LA CALDERA DEL INGENIO TULULÁ**, presentado por el estudiante universitario **Rufino Gregorio Siquiná Sánchez**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, octubre de 2009



/gdech

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

ACTO QUE DEDICO A

JESUCRISTO

MI SEÑOR Y SALVADOR

Porque Jehová da la sabiduría, y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia (Proverbios 2:6)

MIS PADRES

PEDRO CIRIACO SIQUINA OTZOY

LUCIA PATRICIA SANCHEZ MACHIC

Por su apoyo incondicional, sus consejos y su ayuda en todo momento, por su motivación en momentos de desánimo para seguir adelante en la meta de alcanzar este logro tan importante en mi vida, y que Dios los bendiga.

MIS HERMANOS

LORENZO GREGORIO

ISABEL FRANCISCA

MARÍA SEBASTIANA

PAULA VIRGINIA

MIS SOBRINOS

CON CARIÑO

MIS AMIGOS

EVER BAUTISTA

PERCY PALACIOS

JUAN PABLO

JORGE SANDOVAL

MARTIN AROCHE

Por brindarme su apoyo y amistad

LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|----------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | VII |
| LISTA DE SÍMBOLOS | IX |
| GLOSARIO | XIII |
| RESUMEN | XVII |
| OBJETIVOS | XIX |
| INTRODUCCIÓN | XXI |
| | |
| 1. GENERALIDADES | 1 |
| | |
| 1.1 Generalidades del INGENIO TULULÁ, S.A. | 1 |
| 1.1.1 Actividades y productos | 1 |
| 1.1.2 Visión y Misión | 2 |
| 1.1.2.1 Visión | 2 |
| 1.1.2.2 Misión | 2 |
| 1.1.3 Ubicación | 2 |
| 1.2 Generalidades de las calderas instaladas | 3 |
| 1.2.1 Potencia | 4 |
| 1.2.2 Presión de trabajo | 4 |

| | |
|---|----|
| 1.2.3 Volumen de la caldera | 5 |
| 1.2.4 Cantidad de vapor que genera | 6 |
| 1.2.5 Propiedades del vapor | 9 |
| 1.3 Diagnostico situacional de los equipos utilizado en la generación de vapor | 12 |
| 1.3.1 Manómetro | 12 |
| 1.3.2 Medidor de temperatura | 12 |
| 1.3.3 Ventiladores | 13 |
| 1.3.4 Domos | 15 |
| 1.3.5 Indicador de nivel | 17 |
| 1.3.6 Soplador de hollín | 18 |
| 1.3.7 Alimentador de bagazo | 19 |
| 1.4 Trasferencia de calor | 20 |
| 1.4.1 Mecanismos de transferencia de calor | 21 |
| 1.4.2 Recuperación de calor en calderas | 27 |
| 1.4.2.1 Economizador | 28 |
| 1.4.2.2 Precalentador | 32 |
| 1.5 Accesorios de seguridad de la caldera | 35 |
| 1.5.1 Válvulas de seguridad | 35 |
| 1.5.2 Medidor de flujo | 36 |
| 1.5.3 Válvulas de purga | 37 |
| 1.6 Accesorios y equipos auxiliares de la caldera | 38 |
| 1.6.1 Parrilla | 38 |
| 1.6.2 Hogar | 39 |
| 1.6.3 Paredes de agua | 40 |

| | |
|--|----|
| 1.6.4 Sobrecalentadores | 40 |
| 1.6.5 Chimenea | 41 |
| 1.6.6 Tiro forzado | 41 |
| 1.6.7 Over fire | 42 |
| 1.6.8 Trampas de vapor | 43 |
| 1.6.9 Conductor de bagazo | 44 |
| 1.6.10 Bombas | 46 |
| 1.6.11 Motores eléctricos | 47 |
| 1.6.12 Aire comprimido | 49 |
| 1.7 Sistema de control de la caldera | 50 |
| 1.7.1 Control del agua de alimentación | 50 |
| 1.7.2 Control de presión | 52 |
| 1.7.3 Control del tiro en el hogar | 54 |

2. PROPUESTA PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE OPERACIÓN DE LA CALDERA

57

| | |
|--|----|
| 2.1 Condiciones actuales de los gases de combustion de la caldera | 57 |
| 2.2 Temperatura de los gases de chimenea y el aire | 57 |
| 2.2.1 Gases en la salida de chimenea | 58 |
| 2.2.2 Temperatura del aire al entrar al hogar | 58 |
| 2.2.3 Temperatura del agua de alimentación | 59 |

| | |
|---|----|
| 2.2.4 Gas O ₂ en la chimenea | 59 |
| 2.2.5 Flujo y presión de vapor | 60 |
| 2.3 Datos del sistema de fuego | 61 |
| 2.3.1 Tipo de combustión | 62 |
| 2.3.2 Poder calorífico del combustible | 62 |
| 2.3.3 Eficiencia de combustión | 63 |
| 2.3.4 Cálculos para el balance térmico | 73 |
| 2.4 Análisis y propuesta para el montaje del economizador | 78 |
| 2.4.1 Montaje del economizador | 80 |
| 2.4.1.1 Estructura | 81 |
| 2.4.1.2 Instalación | 81 |
| 2.4.1.3 Materiales requeridos | 84 |
| 2.5 Realizar comparaciones de la eficiencia de la caldera | 91 |
| 2.5.1 Eficiencia de la caldera | 91 |
| 2.5.2 Calcular la eficiencia de la caldera con economizador | 91 |
| 2.5.3 Calcular la eficiencia de la caldera sin economizador | 93 |
| 2.5.4 Funcionamiento del sistema economizador-caldera | 94 |

| | |
|------------------------|-----|
| CONCLUSIONES | 103 |
| RECOMENDACIONES | 105 |
| BIBLIOGRAFÍA | 107 |
| ANÉXOS | 109 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|----|--|-----|
| 1 | Soplador de hollín | 19 |
| 2 | Válvula de seguridad | 36 |
| 3 | Trampas de vapor | 44 |
| 4 | Conductor de bagazo | 45 |
| 5 | Bomba de agua de inyección de caldera | 47 |
| 6 | Motores eléctricos utilizados en el departamento de calderas | 49 |
| 7 | Diagrama de agua de alimentación en la caldera | 51 |
| 8 | Sistema de control de presión en la caldera | 53 |
| 9 | Sistema de control del tiro en el hogar | 55 |
| 10 | Tubería de agua | 83 |
| 11 | Detalles de la tubería con aletas | 87 |
| 12 | Detalles de los elementos cabezal y estándar | 88 |
| 13 | Detalles de toda la tubería del economizador | 89 |
| 14 | Detalles de los codos para el economizador | 90 |
| 15 | Funcionamiento economizador – caldera | 96 |
| 16 | Diagrama temperatura vrs. entropía sin economizador | 97 |
| 17 | Diagrama temperatura vrs. entropía con economizador | 98 |
| 18 | Diagrama temperatura vrs. entropía análisis comparativo | 100 |

TABLAS

| | | |
|-----|---|----|
| I | Tipos de tubos empleados para el economizador | 29 |
| II | Combustión para diferentes porcentajes de aire | 68 |
| III | La capacidad de cada caldera | 74 |
| IV | Coefficiente de transferencia de calor en el economizador | 85 |
| V | Volumen y pesos óptimos de aletas metálicas | 86 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------------|---|
| A.S.M.E | American Society of Mechanical Engineers |
| A.S.T.M | American Society for Testing and Materials. |
| Atm. | Atmósfera. |
| Btu | Unidad de medida de la energía en el sistema inglés, por sus siglas en inglés British Thermal Unit. |
| °C | Unidad de medida de la temperatura en grados centígrados o Celsius. |
| CO | Monóxido de carbono |
| CO₂ | Dióxido de carbono |
| EC. | Eficiencia de combustión |

| | |
|----------------------|--|
| eC1 | Eficiencia de la caldera sin economizador. |
| eC2 | Eficiencia de la caldera con economizador. |
| °F | Unidad de medida de la temperatura en grados Fahrenheit |
| Hp | Unidad de medida de la potencia de un motor eléctrico, por sus siglas en inglés Horse Power. |
| h | Hora. |
| Kg | Kilogramo. |
| Klb-h | Flujo de vapor medido en miles de libras por hora |
| Lb | Libra. |
| Mv | Cantidad máxima de vapor que se genera en la caldera. |
| N₂ | Nitrógeno. |
| O₂ | Oxígeno. |

| | |
|------------|---|
| Psi | Dimensional de la presión manométrica, por sus siglas en inglés <i>Pound square inch gauge</i> (libras por pulgada cuadrada). |
| PRC | Pérdida por radiación y convección. |
| S | Área de calefacción. |
| Ta | Temperatura del agua de alimentación. |
| Tc | Temperatura del aire de suministro a la caldera. |
| Tg | Temperatura de los gases en la chimenea. |
| Ts | Temperatura de la pares en las calderas. |
| VCB | Valor calorífico del bagazo seco. |
| w | humedad del bagazo. |



Válvula de alivio



Válvula de compuerta

GLOSARIO

| | |
|------------------------|---|
| Ácido sulfúrico | Uno de los gases producto que se forma a partir de la reacción química entre el óxido de azufre y el vapor de agua. |
| Azufre | Es un elemento no metálico, insípido, inodoro, de color amarillo pálido. |
| Bagazo | Material sólido y fibroso residuo de la molienda de la caña de azúcar. |
| Caldera | Dispositivo generador de vapor para un fin determinado. |
| Calor latente | Energía necesaria para cambiar de fase una sustancia. |
| Calor sensible | Energía necesaria para elevar la temperatura del líquido a vapor sin que exista cambio de fase. |

| | |
|---------------------------|--|
| Combustión | Proceso químico en el cual el carbono y el hidrógeno del combustible, reaccionan con el oxígeno del aire, liberando su energía térmica. |
| Condensado | Líquido formado cuando el vapor se enfría. |
| Corrosión | Desgaste de un material, con disminución de su resistencia Mecánica. |
| Chifle | Conducto que se utiliza para introducir bagazo, desde la horizontal a los hornos de las calderas. |
| Deareación | Proceso de intercambio de calor a través del cual la mezcla directa de vapor y agua, expulsa los gases como O ₂ y CO ₂ contenidas en ésta. |
| Dióxido de azufre: | Uno de los dos gases producto que resulta de la reacción química entre el oxígeno y el azufre. |
| Dámper | Regulador de entrada de gases en los ventiladores. |

| | |
|----------------------------|--|
| Economizador | Es un intercambiador de calor ubicado en la descarga de los gases de combustión. |
| Hollín | Parte no gaseosa de los gases de combustión, que forma todo el material sólido que está suspendido en los gases. Resulta de una combustión incompleta. |
| Ingenio | Planta agro-industrial donde se procesa la caña para producir azúcar y sus derivados. |
| Presión manométrica | Diferencia entre presión absoluta y presión atmosférica. |
| Purga | Representa el sangrado o extracción de agua de caldera para mantener los niveles adecuados de concentración. |
| Tiro forzado | Es la corriente de aire que se introduce al hogar después de pasar por el calentador. |
| Tiro inducido | Extrae los gases de la cámara de combustión y los expulsa hacia la chimenea. |

| | |
|-----------------------------|--|
| Vapor húmedo | Es el que contiene minúsculas gotas de agua, a tal punto de dar la apariencia blanca de humo. |
| Vapor saturado | Es aquél que está en equilibrio con su fase líquida a una determinada presión y temperatura. |
| Vapor sobrecalentado | Es el vapor que se encuentra a una temperatura mayor que la de saturación a una presión determinada. |
| Vapor seco | De aspecto invisible, es el que se genera con cero humedad, debido a que fue totalmente vaporizado. |
| Zafra | Nombre que se le asigna al período de duración de la producción de azúcar y sus derivados. |

RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación trata sobre el estudio para el mejoramiento de la eficiencia de la caldera del Ingenio Tululá, S.A., dicha empresa se dedica a la producción de azúcar para exportación.

La primera parte del mismo son generalidades acerca de la caldera de vapor, conceptos básicos utilizados en la producción del vapor y conceptos acerca de todos los equipos que afectan la eficiencia de operación de una caldera.

Más adelante se encuentran las propuestas que se presentan para mejoramiento de la eficiencia de operación de la caldera, abarcando instalaciones, equipos. En esta sección del cuerpo del trabajo se propone la instalación de un economizador el cual se encarga de calentar el agua de alimentación de la caldera.

La parte final del trabajo trata sobre el funcionamiento del economizador propuesto para la caldera.

OBJETIVOS

General:

Crear un documento de fácil comprensión que proporcione información de los equipos involucrados en la generación de vapor y elaborar una propuesta para el montaje de un economizador, para mejorar la eficiencia de operación de la caldera.

Específicos:

1. Describir los distintos equipos utilizados en la generación de vapor, con el fin de mejorar su conservación y asegurar su funcionamiento continuo.
2. Proporcionar información sobre los medios de recuperación de calor, en una caldera, para mejorar la eficiencia.
3. Establecer la forma en que se puede mejorar la eficiencia de operación de la caldera y así poder determinar los recursos.
5. Diseñar el procedimiento que se debe seguir para la instalación de un economizador y su puesta en operación.

INTRODUCCIÓN

En la economía de Guatemala, la agroindustria desempeña un papel muy importante y uno de los productos más relevantes es la producción del azúcar de caña. Especialmente las empresas encargadas de extraer el azúcar de la caña son los ingenios azucareros. En la actualidad en nuestro país, son varios los ingenios azucareros que se encuentran funcionando, los cuales además de producir azúcar, se están dedicando a la generación de energía eléctrica, utilizando como combustible el bagazo de la caña en tiempo de zafra y en tiempo de reparación se usa bunker. Por esto es importante conocer el funcionamiento de una caldera, la cual genera el vapor necesario para hacer funcionar los turbogeneradores y demás equipos.

Es de hacer notar, que en las calderas que utilizan bagazo de caña como combustible, la producción de vapor no se mantiene constante. Por esta razón, se citará una generalización de lo que son calderas, sus accesorios y equipos auxiliares. Se mencionan también los medios y operaciones que determinan la eficiencia de una caldera, si éstas trabajan eficientemente, se obtendrá una buena producción de vapor y un consumo normal del combustible.

En el presente trabajo también se hará mención de la forma de operación y obtención de la eficiencia de las calderas dos y cuatro específicamente, las cuales corresponden al horno tipo Desctrick y la otra de horno de parrilla fija. La alternativa aquí propuesta está dirigida a la caldera dos, la misma consiste en la implementación de un economizador. Este equipo ayudara a disminuir el consumo de combustible y generando con ello beneficios económicos como energéticos en la planta termoeléctrica.

1. GENERALIDADES

El objetivo principal de este capítulo es hacer una breve descripción de las etapas del proceso termodinámico y las áreas que componen la planta térmica, donde además, se realiza una monografía del lugar donde se desarrolló el presente proyecto.

1.1 Generalidades del Ingenio Tzulá, S.A.

Es una empresa Agroindustrial, creada en 1914 por iniciativa del señor Antonio Buscayrol. En sus inicios produjo panela por medio de trapiches de caña. Posteriormente fue uno de los primeros en la producción de azúcar. En el año 2005 Ingenio Tzulá pasó a ser parte de la Industria Licores de Guatemala.

1.1.1 Actividades y productos

Su comercialización principal es el azúcar de caña y miel invertida por sus siglas en inglés HTM (High Total Molasses).

- 1) Azúcar Crudo Granel, se comercializa al exterior del país, principalmente con Asia y Europa, por medio de la Terminal EXPOGRANEL.
- 2) HTM, comercializa con la Destiladora de Alcoholes y Ronas DARSA.
- 3) Melaza, comercializa al igual que con el HTM con DARSA.

1.1.2 Visión y misión

1.1.2.2 Visión

Ser la organización líder en la elaboración y comercialización de los más finos rones añejos y otros productos, para el mundo que disfruta de la excelencia.

1.1.2.2 Misión

Satisfacemos los gustos más exigentes alrededor del mundo con los rones añejos y otros productos, de la más alta calidad y excelencia, innovando constantemente con un equipo comprometido a una rentabilidad y crecimiento sostenido, con responsabilidad social.

1.1.3 Ubicación (Colindancias)

Al norte: Con fincas particulares y río Sis

Al sur: Con el parcelamiento habitacional El Salto

Al este: Con el cantón Chacalté Aparicio y fincas Cañeras

Al oeste: Con cañales propios.

Localización. El Ingenio Tululá se encuentra ubicado en la Finca Tululá, en San Andrés Villa Seca municipio de Retalhuleu.

Vías de acceso. Sobre la carretera CA 2 del Pacífico, a 4.5 kilómetros de la cabecera municipal de Cuyotenango Suchitepéquez, sobre la carretera que conduce al Parcelamiento San José La Máquina. Está ubicado a 170 kilómetros de la ciudad capital de Guatemala.

1.2 Generalidades de las calderas instaladas

El ingenio Tululá se fundó en el año 1,914 tiempo en que inicia el funcionamiento del departamento de calderas. Al principio empezó a trabajar con una caldera, la cual con el correr del tiempo se fueron modificando. El tipo de caldera utilizada en ese entonces eran de hornos de herraduras. En la actualidad, se encuentran cuatro calderas funcionando, dos de hornos de herradura y dos calderas de parrilla; las dos son de parrilla fijas. En reparación se cuenta con un número de treinta personas laborando en dicho departamento. En el tiempo de zafra, laboran más personas que en tiempo de reparación, algunas personas que son contratadas sólo para esta época. Las funciones que realizan son diversas, hay fogoneros, controladores de alimentación de agua de calderas, controladores de alimentación de bagazo, etc.

1.2.1 Potencia

Las calderas son catalogadas en base a la cantidad de vapor que ellas pueden producir en un cierto período de tiempo a una cierta temperatura. Las calderas más grandes producen 1,000,000 de libras por hora o son catalogadas con base a un caballo de fuerza o caballo vapor caldera por cada 34.5 libras de agua que pueden ser evaporadas por hora.

Otra definición es un “caballo de fuerza” por cada 10 pies² de superficie de calentamiento en una caldera de tubos de agua o 12 pies² de superficie de calentamiento en una caldera de tubos de humo.

$$\begin{aligned} \text{HP de la caldera} &= \frac{Mv (h_g - h_f)}{(34.5) \times (970.40)} \\ \text{Hp de la caldera 2} &= \frac{61,349.05 (1,201.80 - 198.37)}{(34.5) \times (970.40)} = \mathbf{1,839} \\ \text{Hp de la caldera 4} &= \frac{116,044.99 (1278.10 - 198.37)}{(34.5) \times (970.40)} = \mathbf{3,742} \end{aligned}$$

1.2.2 Presión de trabajo

El término presión en esta sección está referido a la diferencia de presión que debe existir entre el hogar de la caldera y la salida de los gases a la atmósfera. Este factor de diseño es llamado tiro. El tiro puede ser natural o forzado. La caldera en estudio es acuatubular y está clasificada dentro del medio guatemalteco industrial, como caldera de consumo alto.

Cuando el hogar de la caldera forma gases de combustión en un tiempo menor es necesario utilizar ventiladores que induzcan los gases por la chimenea. La caldera posee un medidor de presión en pulgadas de agua. Este medidor tiene dos escalas. Una de ellas mide la presión del horno y la otra, la presión de salida. Si no existe diferencia, debe de estar obstruido el paso de los gases hacia la salida. Otra razón debe ser el incremento de hollinación, producto de combustiones incompletas en ciertos momentos de operación. Actualmente, se registran.

1.2.3 Volumen de la caldera

La caldera o generador de vapor es un equipo que consta de diferentes elementos destinados a la producción de vapor de agua o de cualquier otra clase de vapor a partir de su fase líquida.

La caldera se compone de tres colectores o domos a los que van a conectar todos los tubos de la caldera, con dos o más columnas de circulación natural. En la cual el volumen total de la caldera es de 14,500 galones de condensado que se deposita en las tuberías de pared y en los domo.

1.2.4 Cantidad de vapor que genera

El vapor se define como agua en estado gaseoso que se emplea para generar energía en muchos procesos industriales. Esto hace que las técnicas de generación y uso del vapor de agua sean componentes importantes de la ingeniería tecnológica. Existen tres etapas diferentes durante el proceso de conversión del agua a vapor. El agua debe estar hirviendo antes que se pueda formar el vapor, y el vapor sobrecalentado no puede formarse hasta que el vapor esté totalmente seco.

En la primera etapa, el calor se aplica para incrementar la temperatura del agua hasta la temperatura de ebullición correspondiente a las condiciones de presión bajo las cuales se proporciona calor. El punto de ebullición se conoce normalmente como la temperatura de generación o saturación. La cantidad de calor requerido para subir la temperatura del agua desde 0°C hasta la temperatura de saturación se conoce como entalpia del agua o calor sensible. En la segunda etapa y bajo condiciones de presión constante, el agua se convierte en vapor sin aumentar la temperatura.

Esta es la fase evaporación o de calor latente, en esta fase, el vapor en contacto con el agua líquida se encuentra en la condición conocida como saturado. Puede estar seco o húmedo dependiendo de las condiciones de generación. El vapor saturado seco es vapor libre de partículas de agua, mientras que lo húmedo es el que contiene partículas de agua en suspensión. El vapor saturado a cualquier presión tiene una temperatura definida.

Si el agua se calienta en un recipiente que esté completamente lleno, la presión aumenta después de que se comienza a formar vapor y este aumento provoca un incremento de temperatura. La tercera etapa comienza cuando el vapor a una determinada presión se calienta por encima de la temperatura del vapor saturado a esa presión. El vapor se llama entonces sobrecalentado. A continuación se calcula la cantidad de vapor que genera las calderas:

Cálculos para la cantidad de vapor sobre calentado para la caldera 2 y 4, o vapor calentado a una temperatura superior a la temperatura de generación en las calderas.

Por la fórmula

$$Q = Mv \times (h_g - h_f)$$

$$\text{HP caldera} = Q / (34.5 \times 970.40) = (S) \times (\text{potencia nominal}) / 10$$

Sustituyendo y despejando Mv

$$Mv = \frac{(34.50 \times 970.40 \times S \times \text{potencia nominal})}{(10) \times (h_g - h_f)}$$

CANTIDAD DE VAPOR PARA LA CALDERA NÚMERO 2.

Donde por el ANEXO

$h_g =$ Entalpia del vapor a la presión de la caldera 250 PSIA

$h_g =$ **1,201.80 Btu/ lbm**

$h_f =$ Entalpia del agua de alimentación de la caldera 230 °F

$h_f =$ **198.37 Btu/ lbm**

$S =$ Área de la caldera = **6,686.40 pies²**

% de potencia nominal = 2.75 para alcanzar la máxima producción de ebullición

Calor latente del agua a la presión atmosférica = **970.40**

Evaporación del agua a la temperatura de ebullición = **34.50**

$M_v = \frac{(34.50) \times (970.40) \times (6,686.40) \times (2.75)}{$

$\left[(10) \times (1,201.80 - 198.37) \right]$

$M_v =$ **61, 349.05 libras de vapor saturado/ hora.**

CANTIDAD DE VAPOR PARA LA CALDERA NÚMERO 4.

Donde por el Anexo

$h_g =$ 1278.10 Btu/lbm a una presión de 250 PSIA y la $T = 475$

$h_f =$ 198.37 Btu/lbm a una temperatura 230 °F

$M_v = \frac{(34.50) \times (970.40) \times (13609.40) \times (2.75)}{$

$10 \times (1278.10 - 198.37)$

$M_v = 116,044.99$ libras de vapor sobrecalentado / hora

1.2.5 Propiedades del vapor

Algunas de las propiedades físicas del vapor que interesan definir para este caso son:

a) Temperatura

Propiedad de los sistemas que determina si están en equilibrio térmico. El concepto de temperatura se deriva de la idea de medir el calor o frialdad relativos y de la observación de que el suministro de calor a un cuerpo conlleva a un aumento de su temperatura mientras no se produzca la fusión o ebullición. En el caso de dos cuerpos con temperaturas diferentes, el calor fluye del más caliente al más frío hasta que sus temperaturas sean idénticas y se alcance el equilibrio térmico. Por tanto, los términos de temperatura y calor, aunque relacionados entre sí, se refieren a conceptos diferentes: la temperatura es una propiedad de un cuerpo y el calor es un flujo de energía entre dos cuerpos a diferentes temperaturas.

b) Presión

En mecánica, fuerza por unidad de superficie que ejerce un líquido a un gas perpendicularmente a dicha superficie. La presión suele medirse en atmósferas (atm); en el Sistema Internacional de unidades (SI), la presión se expresa en Newton por metro cuadrado; un newton por metro cuadrado es un pascal (Pa). La atmósfera se define como 101,325 Pa (1.01325bar), y equivale a 760 mm de mercurio en un barómetro convencional. La presión en el vapor juega un papel muy importante en los procesos de producción y en los consumos de combustible.

Cuanto mayor sea la presión de diseño para satisfacer la demanda de vapor de la planta, mayor serán los consumos de combustible por unidad de tiempo. Es decir, cuando se desea elevar la presión del vapor, se debe aumentar el régimen de fogeo en el horno, para que éste a su vez eleve la temperatura, y en consecuencia vaporice mayores volúmenes de agua por unidad de tiempo. Debe entenderse que la presión de cualquier caldera está gobernada por un “switch” de presión; de lo contrario la presión de la caldera aumentaría indefinidamente, posibilitando riesgos de explosión y elevando consumos de combustible.

c) Volumen específico

El volumen específico se ha definido como el volumen por unidad de masa de una sustancia; corresponde, por lo tanto, al recíproco de la densidad. Las unidades en las que se expresa el volumen específico son: m^3/kg para el SI y pie^3/lbm para el sistema uscs. Los volúmenes específicos, en metros cúbicos ocupados por un kilogramo de vapor varían de manera inversa con la presión es decir, cuanto mayor es la presión que desarrolla la caldera en su operación, el volumen por cada kilogramo de vapor es menor debido a que la materia (en este caso el agua) se ha expandido más.

d) Entalpia

Cantidad de energía que un sistema termodinámica puede intercambiar con su entorno. Por ejemplo, en una reacción química a presión constante, el cambio de entalpía del sistema es el calor absorbido o desprendido en la reacción. En un cambio de fase, por ejemplo de líquido a gas, el cambio de entalpía del sistema es el calor sensible, en este caso el de vaporización. En un simple cambio de temperatura, el cambio de entalpía por cada grado de variación corresponde a la capacidad calorífica del sistema a presión constante.

Los conceptos definidos en el párrafo anterior corresponden a la situación operacional de una caldera. En una caldera la fuente de calor se toma de la reacción química que produce la combustión de un hidrocarburo. Este calor es el que absorbe el agua para modificar su entalpía, y con ello la fase del agua. El término de entalpía fue acuñado por el físico alemán Rudolf L.E. Clausius en 1850.

e) Entropía

Medida del desorden de un sistema físico, y por tanto de su proximidad al equilibrio térmico. Es la cantidad de calor en BTU o kJ que se le aplica a una libra o kilogramo de vapor a una temperatura determinada. En una caldera toda la vaporización del agua se da a temperatura y presión constante, cuando se han alcanzado los parámetros de operación. Mientras mayor sea la presión a la que se quiera enviar el vapor a la planta, mayor será su temperatura y por lo tanto, menor será la entropía de dicha masa. Como la entropía varía con la temperatura de ebullición, lo hace a temperatura constante. Es decir, entonces, que si se transformara un volumen de agua a una presión crítica (muy elevada), lo haría también a una temperatura crítica, lo cual provocaría un cambio instantáneo de fase y un valor de entropía igual a cero. $Q = \text{Temperatura} \times \text{Entropía}$.

1.3 Diagnóstico situacional de los equipos utilizado en la generación de vapor

1.3.1 Manómetro

Los manómetros son instrumentos utilizados para la medición de la presión manométrica local de los diferentes procesos de la caldera, los más utilizados son los manómetros de Bourdon y de diafragma. El rango de medición de los manómetros es de 300 psi. La presión es la fuerza unitaria impuesta sobre una unidad de área por un fluido líquido o gaseoso; está fuerza también actúa sobre las paredes de un recipiente. En unidades inglesas se expresa en libras por pulgada cuadrada (psi), y el sistema internacional de medidas, en kilogramo por centímetro cuadrado.

1.3.2 Medidor de temperatura

Para el monitoreo de la temperatura la planta térmica dispone de termómetros mecánicos los más utilizados son el de tipo bimetálico y el termómetro de gas o líquido, estos termómetros son de lectura local, para la lectura remota se utiliza los termómetros a base de resistencia RTD se basa en el principio de que la resistencia eléctrica de un conductor metálico varía linealmente con la temperatura, estos medidores electrónicos se emplean para la comprobación de las lecturas mecánicas.

1.3.3 Ventiladores

En el tiro mecánico se utiliza generalmente ventiladores, unas veces para la impulsión de los gases, en el tiro forzado (ventiladores propiamente dicho o impulsores), otras veces para la aspiración de estos gases, en el tiro inducido (aspiradores o extractores). Esencialmente, un ventilador consiste en un rodete o impulsor giratorio, rodeado de una envolvente estática o carcasa. En el ventilador se comunica energía al gas mediante el rodete, con lo cual crea una diferencia de presión y se produce la corriente de gas. La diferencia entre un impulsor y un extractor, es que el primero descarga los gases venciendo una cierta presión en su boca de salida, mientras que el extractor, extrae los gases de un recinto por aspiración y los descarga a presión en un conducto de descarga.

Los ventiladores utilizados en las centrales térmicas son principalmente de dos tipos.

a) Ventiladores axiales

En estos aparatos el flujo o corriente de fluido gaseoso es esencialmente paralelo al eje longitudinal o eje de giro de la hélice o rodete. Unas veces, el elemento impulsor está montado en el eje del motor de accionamiento, mientras que otras veces, la hélice puede montarse con eje propio y cojinetes independientes del motor, el cual se instala fuera de la corriente de gases, en lugar directamente accesible; en estos casos, la transmisión entre el motor y la hélice se realiza por medio de correas trapezoidales.

b) Ventiladores centrífugos

Están constituidos por un rodete que gira en el interior de una carcasa o envolvente, construida de planchas metálica. Este envolvente tiene forma de espiral lo cual permite que el aire sea lanzado a la periferia del rodete. Los rodetes de los ventiladores centrífugos están constituidos por un cubo, para ajustar al eje del ventilador, al que se fijan una serie de paletas o álabes, en números variable según los casos, que impulsan los gases radialmente hacia afuera, como consecuencia de la fuerza centrífuga, siendo lanzados estos gases desde los bordes de las paletas hacia la envolvente. Como resultado de este movimiento, en el interior del rodete se produce una presión inferior a la atmosférica, así como una sobrepresión en la envolvente que le rodea. Para reemplazar el gas descargado por el ventilador, una nueva cantidad de gas fluye axialmente hacia el centro del rodete, desde la boca de aspiración del ventilador. El accionamiento de los ventiladores centrífugos se realiza, casi siempre, por medio de motor eléctrico directamente acoplado al eje del ventilador.

Leyes de los ventiladores. Todas las leyes de los ventiladores se basan en la consideración fundamental de un rendimiento constante. Cuando se haga referencia a un tamaño determinado, se hablará generalmente del diámetro del rotor, aunque se pueda usar cualquier sistema de números que sean proporcionales a las dimensiones de los ventiladores. Algunas de las leyes principales son:

1. El gasto es directamente proporcional a la velocidad.
2. La presión es proporcional a cuadrado de la velocidad.
3. La potencia es proporcional al cubo de la velocidad.

1.3.4 Domo

El domo es una parte muy importante en la trayectoria del fluido de trabajo (agua-vapor) dentro de la caldera de circulación natural; las principales funciones del domo son las siguientes:

- a) Proveer un volumen de agua adecuado para proteger la caldera en casos de emergencia.
- b) Acomodar internamente los dispositivos necesarios para realizar sus múltiples funciones.
- c) Proporcionar espacio suficiente para acomodar la llegada de los tubos evaporadores, la salida de los tubos al sobrecalentador y la salida de los tubos de bajada o descendentes.

Para protección de la caldera, durante su operación con fuego encendido, debe existir un flujo de fluido enfriador en las paredes del hogar y sobrecalentamiento para evitar que se quemen los tubos; el nivel normal de operación es de ± 10 cm del centro del domo.

La caldera debe diseñarse para trabajar con seguridad durante un minuto con quemadores encendidos después de la falla del agua de alimentación, el domo debe tener una reserva de 20 a 30 s y los tubos descendentes deben proporcionar la diferencia.

Las principales partes internas del domo son:

a) Tubería de agua de alimentación. Es un tubo de distribución con pequeños orificios a lo largo del domo que penetra por un extremo o por ambos y que llega del economizador.

b) Tubería de dosificación de químicos. Es un tubo pequeño con perforaciones para su distribución uniforme. Permite la inyección intermitente, por medio de una bomba pequeña, de sustancias químicas en función con el estado del agua.

c) Tubería de muestreo. Es un tubo, similar al de dosificación de sustancias químicas que se utiliza para extraer muestra de agua para análisis.

d) Faja guía. Tiene por objetivo dirigir la mezcla de agua-vapor que viene de los tubos evaporadores hacia los separadores de vapor: así se logra también mantener el volumen de agua en el domo libre de disturbios que ocasionan las burbujas de vapor.

e) Separadores de vapor. Estos dispositivos tienen dos propósitos: suministrar vapor libre de agua al sobrealentador y asegurar que se suministre agua libre de vapor a los tubos de bajada o descendentes. Normalmente se utiliza el tipo ciclónico horizontal o vertical y su efectividad depende de la densidad relativa de agua y vapor, de la caída de presión disponible para empujar la mezcla a través del separador, de la cantidad relativa de agua en la mezcla y de la cantidad total de la mezcla.

f) Secadores de vapor. Estos dispositivos constituyen una segunda etapa de separación, con el objeto de eliminar toda el agua en el vapor, antes de que pase al sobrealentador. Son tira de acero en sección V o W;

g) Limpiadores o purificadores. En algunas ocasiones, la distribución de alimentación y el separador se arreglan combinados para bajar la temperatura del vapor ligeramente abajo de la saturación, enfriándose y condensándose parte de éste; las impurezas actúan como núcleos de condensación que se concentran en pequeñas gotas y se separan fuera de los secadores.

h) Caja de secado. En la parte superior del domo se tiene un compartimiento empleado para coleccionar el vapor seco de los secadores y distribuirlos a los tubos de salida al sobrecalentador. Se conocen como tubos saturados porque conducen vapor seco saturado.

1.3.5 Indicadores de nivel

Para la medición de nivel de la caldera se cuenta con tres dispositivos para la comprobación, esto se debe a que el agua es un punto crítico para el funcionamiento de la unidad, y se requiere de una medición exacta, por tanto consta de:

a) Medidores de nivel visual, colocados en los extremos del domo superior de la caldera y para la verificación del nivel el operador tiene que observarse el medidor físicamente.

b) Comprobación de niveles desde una pantalla, este es un medidor de nivel electrónico de presión diferencial que funciona por medio de una celda de nivel instalada en el domo superior de la caldera el cual censa continuamente el nivel y trasfiere esta información a monitores remotos.

c) Comprobación de nivel por medio de luces, este es un medidor eléctrico en el cual se tiene 5 luces piloto o posiciones, cada posición o nivel está previamente calibrado y representa el nivel real de agua en la caldera.

1.3.6 Soplador de hollín

Durante el funcionamiento de la caldera, se depositan sobre la tubería hollín y ceniza, estas sustancias son aislantes térmicos que reducen la transferencia de calor, el rendimiento de la caldera disminuye a medida que crece el espesor de la incrustación, los sopladores de hollín están instalados en la caldera y situados de manera que todas las superficies de transferencia de calor sometidas a la acumulación de hollín puedan limpiarse con chorros de vapor y eliminar el hollín de la caldera, por medio de la chimenea. Para la limpieza de la caldera se cuenta con 9 sopladores de hollín, los cuales están distribuidos uniformemente en las áreas de mayor incrustación y ensuciamiento, estos sopladores estacionarios que giran sobre su propio eje y permanecen en el interior de la caldera, están refrigerados por una corriente de aire para evitar pandeo o deformaciones del tubo que realiza el soplado, estos generalmente están calibrados para trabajar con 80 libras de vapor para la limpieza de la tubería y movidos mecánicamente. Los sopladores de hollín se emplean sobre todo en las superficies de convección (Sobrecalentadores, recalentadores, economizadores y precalentadores de aire).

Figura 1. Soplador de hollín



Fotografía tomada por el autor

1.3.7 Alimentador de bagazo

El bagazo transportado pasa entonces de los conductores a los alimentadores de bagazo por medio de ductos, estos equipos hidráulicos rotatorios constituidos por tambores movidos mecánicamente descargan el bagazo a través de un chifle en cuyo fondo un flujo de aire caliente empuja las partículas de bagazo hacia el hogar; las partículas más gruesas arden sobre la parrilla.

Estos dispositivos automáticos regulan la cantidad de bagazo alimentando a la caldera, dependiendo de las condiciones de operación de la planta termoeléctrica. Estos transportadores de velocidad variable operan de forma conjunta con un equipo automático manteniendo una alimentación uniforme, una adecuada relación aire combustión y una buena eficiencia de la caldera. Parte del bagazo transportado por los conductores no es utilizado en la caldera ya que el porcentaje de bagazo quemado en el hogar depende de la razón de generación de energía eléctrica, la capacidad de molienda en el ingenio y el volumen almacenado, por lo que el excedente es almacenado en un área denominada bagacera.

1.4 Transferencia de calor

Proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. Cuando se vaporiza una libra de agua o se condensa una libra de vapor, el cambio de energía en los dos procesos es idéntico. La velocidad a la que cualquier de estos procesos puede hacerse progresar con una fuente o receptor independientemente es, sin embargo inherentemente muy diferente. Generalmente, la vaporización es un fenómeno mucho más rápido que la condensación. El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

1.4.1 Mecanismos de transferencia de calor

Hay tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor, aun cuando muchas de las aplicaciones en la ingeniería son combinaciones de dos o tres. Estas son, conducción, convección radiación.

a) Conducción

En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción. No se comprende en totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura.

Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor. En 1822, el matemático francés Barón Joseph Fourier dio una expresión matemática precisa que hoy se conoce como la ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado).

El factor de proporcionalidad se denomina conductividad térmica del material. Los materiales como el oro, la plata o el cobre tienen conductividades térmicas elevadas y conducen bien el calor, mientras que materiales como el vidrio tienen conductividades cientos e incluso miles de veces menores; conducen muy mal el calor, y se conocen como aislantes. Aun cuando la conducción de calor se asocia usualmente con la transferencia de calor a través de los sólidos, también es aplicable a gases y líquidos, son sus limitaciones.

En ingeniería resulta necesario conocer la velocidad de conducción del calor a través de un sólido en el que existe una diferencia de temperatura conocida. Para averiguarlo se requieren técnicas matemáticas muy complejas, sobre todo si el proceso varía con el tiempo; en este caso, se habla de conducción térmica transitoria. Con la ayuda de ordenadores (computadoras) analógicos y digitales, estos problemas pueden resolverse en la actualidad incluso para cuerpos de geometría complicada.

b) Convección

La transferencia de calor por convección se debe al movimiento del fluido. El fluido frío adyacente a superficies caliente recibe calor que luego transfiere al resto del fluido frío mezclándose con él. Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección. El movimiento del fluido puede ser natural o forzado.

Si se calienta un líquido o un gas, su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural.

La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos. Suponiendo, por ejemplo, que calentamos desde abajo una cacerola llena de agua. El líquido más próximo al fondo se calienta por el calor que se ha transmitido por conducción a través de la cacerola.

Al expandirse, su densidad disminuye y como resultado de ello el agua caliente asciende y parte del fluido más frío baja hacia el fondo, con lo que se inicia un movimiento de circulación. El líquido más frío vuelve a calentarse por conducción, mientras que el líquido más caliente situado arriba pierde parte de su calor por radiación y lo cede al aire situado por encima. De forma similar, en una cámara vertical llena de gas, como la cámara de aire situada entre los dos paneles de una ventana con doble vidrio, el aire situado junto al panel exterior que está más frío desciende, mientras que al aire cercano al panel interior más caliente asciende, lo que produce un movimiento de circulación.

El calentamiento de una habitación mediante un radiador no depende tanto de la radiación como de las corrientes naturales de convección, que hace que el aire caliente suba hacia el techo y el aire frío del resto de la habitación se dirija hacia el radiador. Debido a que el aire caliente tiende a subir y el aire frío a bajar, los radiadores deben colocarse cerca del suelo (y los aparatos de aire acondicionados cerca del techo) para que la eficiencia sea máxima. De la misma forma, la convección natural es responsable de la ascensión del agua caliente y el vapor en las calderas de convección natural, y del tiro de las chimeneas.

La convección también determina el movimiento de las grandes masas de aire sobre la superficie terrestre, la acción de los vientos, la formación de nubes, las corrientes oceánicas y la transferencia de calor desde el interior del sol hasta su superficie. Este mecanismo es el modo en que el calor fluye por fluidos, ya sean líquidos o gases. Al pasar fluidos sobre objetos calientes, recogen energía calorífica y la lleva a áreas más frías. Este movimiento convectivo enfría la fuente del calor al calentar el área alrededor. Flujo convectivo en líquidos y gases pueden ocurrir naturalmente, debido a diferenciales de temperatura, o el flujo puede producirse artificialmente con una bomba o ventilador. En un espacio encerrado, el flujo convectivo natural causa que fluidos circulen una masa caliente sube, desplazando fluido más frío, que se sume hacia abajo a la fuente de calor y se caliente a su vez. El flujo convectivo natural es como una estufa continuamente caliente el aire en un cuarto: aire caliente sube, empujando aire más frío hacia la estufa para calentarse.

c) Radiación

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tiene que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas.

Algunos fenómenos de la radiación pueden describir mediante la teoría de ondas, pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica. En 1905, Albert Einstein sugirió que la radiación presenta a veces un comportamiento cuantizado: en el efecto fotoeléctrico, la radiación se comporta como minúsculos proyectiles llamados fotones y no como ondas. La naturaleza cuántica de la energía radiante se había postulado antes de la aparición del artículo de Einstein, y en 1900 el físico alemán Max Planck empleó la teoría y el formalismo matemático de la mecánica estadística para derivar una ley fundamental de la radiación.

La expresión matemática de esta ley, llamada distribución de Planck, relaciona la intensidad de la energía radiante que emite un cuerpo en una longitud de onda determinada con la temperatura del cuerpo. Para cada temperatura y cada longitud de onda existe un máximo de energía radiante. Solo un cuerpo ideal (cuerpo negro) emite radiación ajustándose exactamente a la ley de Planck.

Los cuerpos reales emiten con una intensidad algo menor. La contribución de todas las longitudes de onda a la energía radiante emitida se denomina poder emisor del cuerpo, y corresponde a la cantidad de energía emitida por unidad de superficie del cuerpo y por unidad de tiempo. Como puede demostrarse a partir de la ley de Planck, el poder emisor de una superficie es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

Las superficies opacas pueden absorber o reflejar la radiación incidente. Generalmente, las superficies rugosas absorben más calor que las superficies brillantes y pulidas, y las superficies brillantes reflejan más energía radiante que las superficies.

Además, las sustancias que absorben mucha radiación también son buenos emisores; las que reflejan muchas radiaciones y absorben poco son malos emisores. Por eso, los utensilios de cocina suelen tener fondos mates para una buena absorción y paredes pulidas para una emisión mínima, con lo que maximizan la transferencia total de calor al contenido de la cazuela. Algunas sustancias, entre ellas muchos gases y el vidrio, son capaces de transmitir grandes cantidades de radiación. Se observan experimentalmente que las propiedades de absorción, reflexión y transmisión de una sustancia depende de la longitud de onda de la radiación incidente.

1.4.2 Recuperación de calor en calderas

En muchas calderas existen oportunidades potenciales para recuperar calor. Hay tres principales fuentes de pérdida de calor en un sistema de calderas: i) gases de chimenea, ii) Purga y iii) Sistemas de trampas de vapor. Los principales métodos de recuperación de calor en calderas industriales utilizan intercambiadores de calor instalados en la salida de la chimenea para recuperar algo de calor que de otra manera se perdería.

Estos intercambiadores de calor se dividen en dos categorías: economizadores y precalentadores. Los economizadores son usados para elevar la temperatura del agua de alimentación (agua fresca) que entra a la caldera, mientras que los precalentadores son usados para precalentar el aire de combustión que se alimenta al quemador. Otros métodos de recuperación de calor incluyen el uso de intercambiadores de calor con la purga (concha y tubo), sistema de tanques vaporización instantánea, retorno de condensado y turbinas con estrangulamiento.

1.4.2.1 Economizador

Cuando el calor perdido de los gases de chimenea es recuperado para calentar líquidos, con el propósito de suministrar agua caliente, calentamiento de agua de alimentación en calderas de vapor, o para el uso de agua en sistema de calefacción, generalmente se usa un intercambiador de calor de superficies extendidas. Los tubos que contienen el líquido que ha de calentarse conectan en forma agrupada y llevan soldadas en el exterior aletas de metal con el propósito de aumentar el área de transferencia de la energía contenida en los gases.

Los tubos están a menudo conectados en serie, pero también pueden estar ordenados en serie y en paralelo para controlar la caída de presión del lado de líquido. La caída de presión del lado del aire es controlada por el espacio que existe entre los tubos dentro del ducto. Los intercambiadores de tubos extendidos están disponibles en forma empacada en diversos tamaños o pueden ser fabricados de acuerdo a las especificaciones del cliente.

El control de temperatura del líquido calentado se logra mediante un ducto de desviación (by-pass) el cual varía el flujo de los gases calientes que entran al intercambiador de calor. Los materiales para los tubos y las aletas son seleccionados para resistir la acción corrosiva de líquidos y/o gases de chimenea. Básicamente todos los economizadores son parecidos, ya que los flujos de gas y agua, espaciamiento de tubos, y demás accesorios varían muy poco entre los diferentes fabricantes.

Tabla I. Tipo de tubos empleados para economizadores y sus aplicaciones.

| Tipo | Descripción del tipo | Tipo de combustible |
|--------|---|------------------------------|
| Tipo 1 | Para tubos desnudos | Todos |
| Tipo 2 | Tubo de acero al carbono con aletas de hierro fundido | Todos |
| Tipo 3 | Tubos de acero al carbono con aletas de 3/4" de alto distribuidas a razón 2.5" a 4" | Aceite o gas combustible |
| Tipo 4 | Tubo de acero al carbono con aletas de 3/4" de alto, 5 aletas por pulgada | Todos los gases combustibles |

Fuente: Mejoramiento de la eficiencia de operación de calderas de vapor pag. 113.

Los economizadores de tipo 1 son tubos desnudos de acero al C de 2" de diámetro externo que tienen un dobléz de 180 grados y que están soldados uno con otro en los extremos, configurando entre 8 y 12 pasos. La longitud y número de elementos son determinados por las condiciones de diseño. Este tipo es usualmente usado por calderas que queman carbón, gas y aceite combustible. Es fácil mantenerlos limpios con sopladores de hollín para el lavado con agua se instalan dispositivos interiormente. Hay espacios de aproximadamente 16" a 18" (40.64 cm a 45.72 cm) para acceso, limpieza y observación. Puede haber problemas de corrosión debido a una baja carga de operación y alto contenido de azufre en el combustible. Este puede ser aliviado mediante el diseño para bajas cargas de operación o adicionado un calentador en la línea de alimentación de agua para elevar la temperatura de está lo suficiente y prevenir la corrosión en el economizador. Algunas calderas nuevas utilizan serpentines para el calentamiento del agua que entra al economizador a niveles más bajos.

El tipo 2 es un economizador de tubo con aletas de hierro fundido tiene dos pulgadas de diámetro externo, con superficies extendidas anulares de hierro fundido unidas a los tubos o, en algunos casos, con las aleta fundidas sobre los tubos. La unidad pesa más comparada con un economizado de tubos desnudos de acero al carbono, pero requiere menos espacio debido a haberse aumentado la superficie de calentamiento por pie de longitud de tubería. Los tubos de superficie extienden con aletas de hierro fundido son más resistentes a la corrosión de los tubos desnudos de acero al carbono y se utilizan generalmente con carbón combustible u otro tipo de combustible sólido. La unidad está dispuesta de tal manera que permite la ventilación del hollín o el lavado con agua.

Los de tipo 3 son economizadores con tubos de acero al carbono de dos pulgadas de diámetros externos (5.08 cm) que tienen soldadas aletas de acero de 3/4" de alto y 0.05" de espesor, espaciadas a razón de 2 1/2 aletas por pulgadas cuando se trabaja con aceite combustible número 6 cuando se quema aceite combustible número 2 las aletas son normalmente de 3/4 pulgada (1.91 cm) de alto y 0.06 pulgada (0.1524 cm) de espesor separadas a razón de cuatro aletas por pulgada. Estas unidades son muy compactadas y, en la mayoría de los casos, son vendidas completamente ensambladas; antes de ser retiradas de la fábrica son examinadas rigurosamente y certificadas de acuerdo a normas ASME. El aislamiento puede ser instalado en la fábrica. La unidad posee bridas de unión para las conexiones de entrada y salida de gas, y al lado del banco de tubos se dispone espacio para el soplador de hollín. Los ventiladores de hollín pueden también ser instalados por la fábrica.

El lavado con agua es algunas veces necesario, requiriéndose entonces de un drenaje en el compartimiento de gas, también pueden ser incorporadas tolvas para hollín en el economizador. Este tipo de economizador no debe colocarse directamente arriba de la salida de los gases de chimenea en las calderas empacadas, porque pueden introducirse hollín o agua de lavado en la tubería de la caldera, ocasionando problemas de limpieza. Al igual que en el economizador de tubos desnudos de acero al carbono este tipo de unidad es susceptible a los problemas de corrosión con baja carga de operación.

Los de tipo 4 son economizadores con tubos de acero y aletas que tienen mucho parecido al tipo 3, excepto que las aletas tienen 0.060 pulgadas de espesor y están espaciadas a razón de 60 por pie o 5 por pulgada y son usados solamente para gas, puesto que la mayor proximidad entre las aletas dificulta la limpieza de hollín con sopladores cuando se utilizan líquidos combustibles tales como aceites, etc. El empleo de los economizadores se pueden decir que, actualmente, en general. Efectivamente, y aparte de la mencionada economía de combustible los economizadores presentan las siguientes ventajas:

- a) Al alimentar la caldera con agua caliente, se reducen las variaciones de temperatura en la chapa de ésta, con evidente beneficio para su conservación.
- b) El calentamiento del agua provoca y favorece la precipitación de lodos e incrustaciones que, de otra forma, se depositarían en la caldera.
- c) Al calentar el agua, pierde gran parte del aire en disolución, lo cual reduce el peligro de oxidaciones y corrosiones.

- d) La gran cantidad de agua caliente contenida en el economizador permite hacer frente a las sobrecargas momentáneas en la central.

1.4.2.2 Precalentador

Es un aparato de intercambiador de calor, a través del cual se pasa el aire que es calentado por los gases de escape, cuya temperatura es mayor tales como los productos que proceden de la combustión o por medio de vapor. Se utiliza para la recuperación de calor de los gases de escape en una unidad generadora de vapor; ocasionalmente se le utiliza para extraer calor en alguna otra fuente. Este calor recuperado se agrega al aire requerido para la combustión, o se usa para secado de algún proceso.

En este trabajo, las unidades empleadas en el calentamiento del aire de la combustión en las plantas generadoras de vapor, serán designadas con el nombre de calentadores de aire. Este intercambiador de calor se compone, en lo esencial, de una superficie de intercambio de calor, instalada en el curso de la corriente de los gases de escape de la combustión procedentes de la caldera, entre ésta y la chimenea, o entre el economizador si lo hay y la chimenea. El aire para la combustión es calentado por los gases de escape, al ser empujados a través del calentador por medio de un ventilador de tiro forzado. Los dos tipos más comunes de precalentadores de aire son: regenerativos y no regenerativos, aunque los llamados calentadores de tubo de calor cobran cada vez más popularidad.

El tipo tubular consiste de un gran número de tubos (generalmente de 2 ó 2 1/2 pulgadas de diámetro externo) en el que el gas de chimenea fluye dentro de los tubos y el aire fluye en contracorriente en el exterior de los mismos. El flujo de aire puede ser transversal lo cual hace que el intercambiador sea entre 3 y 4 pies más ancho. Este tipo es usado generalmente con combustible sólido.

El Precalentador tubular puede adquirirse de dos pasos en el lado del gas, lo que permite relación aproximada de 80% de longitud de tubería para el primer paso y 20% para el segundo, considerando este la sección de gas a baja temperatura. Para evitar la corrosión, la salida de gas debe ser suficiente alta para remover y reemplazar los tubos de la sección corta, sin necesidad de desmantelar cualquier recámara o ducto. Esta disposición es deseable cuando se quema combustible con alto contenido de azufre.

El Precalentador tipo regenerativo consiste en un gran cilindro rotatorio que contiene láminas delgadas de acero que forma un laberinto para el paso de los gases que salen de la caldera y el aire fresco del ventilador de tiro forzado. La sección de lámina de acero rota en el interior de una cubierta de acero con los gases calientes que entran en una mitad del cilindro mientras que el aire fresco entra a través de la otra mitad, y fluye en dirección opuesta de los gases. Las láminas de acero son calentadas por los gases y enfriadas por el aire fresco. Debido a la diferencia en presiones en los lados de aire y gas del Precalentador regenerativo, hay una fuga de aire de 8 a 10% del lado del aire hacia el lado del gas del calentador.

Este tipo de precalentador se utiliza frecuentemente en calderas de gas y aceites combustibles, pues es muy compacto y requiere menos espacio que el tipo tubular. También, el extremo frío de las láminas de acero puede cubrirse con aleaciones metálicas que resisten mucho mejor la corrosión que al acero dulce. El costo de las aleaciones es mínimo considerando lo que se gana en eficiencia, debido a la temperatura más baja que se obtiene en los gases de chimeneas que salen de la unidad.

El equipo de soplado de hollín o lavado con agua puede ser construido y adaptado a la unidad por el fabricante del precalentador. En los últimos años, la tendencia ha sido usar precalentadores tipo regenerativo para combustibles gaseosos y líquidos, y de tipo tubular para carbón y combustible sólido. Esto se ha debido particularmente a los requerimientos de menor espacio ocupado y menor trabajo en tuberías y mano de obra para el montaje (la mayoría de tipos regenerativos se venden ya ensambladas). El calor latente de vaporización es transportado en el vapor hacia el extremo frío del tubo de calor localizado en el ducto de gas frío. Aquí se condensa el vapor cediendo su calor latente. El líquido condensado es entonces conducido por capilaridad y /o acción de la gravedad, de regreso al extremo caliente de donde es reciclado. El tubo de calor es compacto y eficiente debido a:

- 1) El haz de tubos con aletas presenta una buena configuración para la transferencia de calor por convección en los ductos de gas y está exento de contaminación.
- 2) El ciclo de evaporación – condensación dentro de los tubos de calor es un método altamente eficiente de transferencia de calor interno.

1.5 Accesorios de seguridad de la caldera

1.5.1 Válvulas de seguridad

Es un dispositivo de alivio de presión y se utiliza para impedir que en la caldera se desarrollen presiones de vapor excesivas, abriéndose automáticamente a una presión determinada y dejando escapar el vapor, el accionamiento debe ser de apertura rápida para trabajar y rebajar la presión inmediatamente. La caldera dispone de dos válvulas de seguridad como medida de protección contra elevadas presiones estas se calibran en un 5% por arriba de la presión de operación normal, siendo estas 265 psi, 260 psi. Estas calibraciones son validas para una caldera operando a 250 psi.

Las válvulas de seguridad deberán conectarse directamente a la caldera sin válvulas intermedias de ningún tipo. Es importante que la tobera de apertura a la tubería de descarga de la válvula de seguridad. Si dos o más válvulas de seguridad se conectan a una tubería común o acoplamiento, el área de la misma deberá ser al menos igual a las áreas sumadas de todas las válvulas de seguridad conectadas. Una tubería de descarga apropiada es tan esencial para la seguridad de los trabajadores de la planta como la válvula de seguridad lo es para la seguridad de la caldera. Es esencial que el diámetro de la tubería de descarga sea, igual al de la salida de la válvula de seguridad. Una línea más larga sin diámetro aumentado producirá un retroceso de presión por causa de la pérdida de carga por rozamiento en la estrecha tubería y podría producir una vibración seria en la válvula de seguridad. Asimismo, todo codo a curva a 90° debería evitarse.

Figura 2. Válvula de seguridad



Fotografía tomada por el autor

1.5.2 Medidor de flujo

El agua entra en el domo y, después de absorber en los tubos el calor de la combustión, la caldera genera el vapor. En una operación correcta es necesario que el nivel de agua se mantenga dentro de una banda alrededor del punto de consigna del controlador. Una excesiva disminución del nivel puede dejar vacíos algunos de los tubos de la caldera, los cuales serán sometidos a un sobrecalentamiento, mientras que con un aumento excesivo en el nivel se puede llegar a la situación peligrosa que salga del domo agua junto con el vapor producido.

Por último, el agua está siempre más fría que el vapor saturado, por lo que parte del vapor producido en los tubos se condensa cuando entra en contacto con el agua en el domo. Un aumento rápido en el caudal de agua tiende a reducir temporalmente la formación de burbujas en los tubos. Todas estas reacciones tienden a equilibrarse en pocos segundos, pero en los primeros momentos responde en dirección inversa.

1.5.3 Válvulas de purga

Están instaladas en la parte más baja de la caldera; se utilizan para eliminar cierta cantidad de agua con el propósito de extraer de la caldera los lodos, sedimentos y espumas. Se utiliza también como medida de eliminación de agua del sistema de la caldera de modo que pueda añadirse agua nueva para mantener la concentración de los sólidos por debajo del punto donde pueda haber dificultades. Las válvulas y los accesorios de purga deberían estar diseñados para, una presión 25 por 100 mayor que la presión admisible en la caldera.

Se precisa una conexión u orificio de purga en la parte inferior de la caldera y en su generatriz más baja para cumplir con tres propósitos:

1. Eliminar y evacuar los lodos precipitados y restos de escamación.
2. Permitir una baja rápida del nivel del agua si se ha elevado con exceso accidentalmente.

3. Como medida de eliminación de agua del sistema de caldera de modo que pueda añadirse agua nueva para mantener la concentración de sólidos en la caldera por debajo del punto en que pueda haber dificultades.

1.6 Accesorios y equipos auxiliares de la caldera

A continuación se describen los equipos auxiliares más relevantes con los que debe de contar una caldera de vapor para la generación de vapor.

1.6.1 Parrilla

Es una estructura metálica estacionaria utilizada para sostener el bagazo en el hogar y a dar paso al aire secundario para la combustión, la parrilla tiene un ancho de 229 pulgadas y un largo de 383 pulgadas, está compuesta por planchas de hierro fundido de 5 7/8 pulgadas de ancho, 2 1/8 pulgadas de espesor y 12 pulgadas de largo, sujetas con tornillos tipo herradura, para evitar el movimiento ante las altas temperaturas que éstas soportan, éstas planchas tienen varios agujeros para la distribución del aire secundario para la combustión y refrigeración de la parrilla y las planchas con toberas, están unidas a una tubería de vapor de 1 1/2" mediante unas juntas de expansión, estas toberas se utilizan para la limpieza de la parrilla mediante un flujo de vapor seco.

1.6.2 Hogar

El hogar o cámara de combustión es el lugar donde se realiza la combustión del combustible, tiene un volumen de 29,500 pies cúbicos y está compuesta por las paredes de agua, sobre calentadores, parrillas y tuberías de convección.

En general, el hogar deberá diseñarse para cumplir con las siguientes características:

- a) Tener capacidad para aire suficiente, con objeto de reducir la temperatura de los gases a un nivel aceptable a los requerimientos de sobrecalentamiento.
- b) Tener suficiente altura para asegurar una circulación adecuada del agua en los tubos.
- c) Tener tubos de diámetros suficientes para asegurar una mínima caída de difusión y evitar impedancias en la mezcla de flujo de agua-vapor y asegurar un flujo suficiente que evite quemaduras de tubo.
- d) Dimensión suficiente para evitar que la flama ataque las paredes.
- e) Forma y dimensiones adecuadas para asegurarse que los gases llenen el hogar, proporcionando una absorción óptima de todas las partes, y dar tiempo suficiente para que las partículas se quemen y reduzcan su temperatura por debajo del punto de fusión.
- f) Limitar la formación de NO_x a niveles aceptables.

1.6.3 Paredes de agua

Las paredes de agua constan de tubos verticales relativamente próximos y conformando los cuatro muros o paredes del hogar, y fueron diseñados para enfriar y proteger el revestimiento del refractario del hogar. Las paredes de tubo de agua cumplen tres funciones básicas. 1) Proteger el aislamiento de las paredes del hogar; 2) absorber calor del hogar para incrementar la capacidad de la unidad generadora; 3) hacer sello en la caldera.

1.6.4 Sobrecalentadores

Cada presión de vapor saturado tiene su temperatura correspondiente, el calor añadido al vapor seco a presión constante se conoce como sobrecalentamiento y da como resultado una mayor temperatura que la indicada en la curva para la presión correspondiente, el sobrecalentamiento se da cuando el vapor saturado sale del domo superior de la caldera y es conducido a un banco de tuberías en donde el vapor absorbe mayor cantidad de energía por radiación y convección.

Las ventajas del vapor sobrecalentado son: 1) El trabajo puede realizarse a través de sobrecalentamiento antes de que tenga lugar la condensación, 2) Este periodo de trabajo realizado con vapor seco elimina los efectos corrosivos y agresivos del condensado, además se incrementa la eficiencia de la caldera, una temperatura constante del vapor sobrecalentado se requiere ya que las turbinas de vapor están diseñadas para trabajar a 900 °F de vapor a la cual trabaja con mayor eficiencia.

1.6.5 Chimenea

La chimenea es un conducto o pasaje de salida hacia la atmosfera de los gases de combustión, así como cualquier calor residual, es aquí donde se tiene la mayor cantidad de pérdida de calor, tiene una altura de 70 pies y diámetro de 7 pies, con un espesor de 1/4 de pulgada. La chimenea se utiliza para los siguientes propósitos:

- a) Evacuar los gases de combustión de la caldera, después de que han cedido la mayor parte posible de calor.
- b) Producir un tiro o presión estática para ayudar a la evacuación de los gases de combustión.
- c) Ayuda a controlar la contaminación ambiental.

1.6.6 Tiro forzado

La finalidad del tiro forzado es proporcionar el aire necesario para la combustión. El aire del tiro forzado es el que pasa a través del calentador de tubos, aprovechando los gases de combustión que se dirigen a la chimenea.

El hecho de que se precaliente el aire ayuda notablemente a realizar una buena combustión. Ante el aumento o disminuciones de carga, el comportamiento es el siguiente:

Incremento de carga. El punto de consigna del controlador de caudal aumenta por la acción del sistema de control, abriendo el dámper para dejar pasar más aire.

Disminución de carga. Al disminuir la demanda de aire, el comportamiento es exactamente el mismo que el anterior, excepto que ahora el dámper de aire cierra.

1.6.7 Over fire

Tiene como finalidad absorber una determinada cantidad de aire absorbido por el tiro forzado, el cual llevara a la parte inferior de la entrada de bagazo (chifles) de la caldera, para que le sirva como atomizador y puede alimentar al mismo tiempo de oxígeno la llama de la combustión. El ventilador del over fire está conectado directamente a un motor donde la velocidad es directa y su función es distribuir uniformemente el bagazo en la parrilla, esto ayuda a mantener una combustión eficiente y estable también se utiliza para refrigerar los (chifles) que suministran el bagazo al hogar.

1.6.8 Trampas de vapor

El vapor generado en la caldera es transportado a través de tuberías hasta las turbinas y los equipos auxiliares que consumen vapor. Estas deben de estar correctamente aislada o con recubrimiento con el fin de prever la pérdida de calor, no obstante parte del calor es radiado al ambiente. En este transporte el vapor cede calor a las paredes de la tubería y empieza a condensar el agua caliente y a depositarse en el fondo de la tubería. El condensado en las líneas de vapor ocasiona pérdidas de calor, como daño en los equipos, por tanto es necesario evacuarlo del sistema.

Las trampas de vapor se utilizan para drenar el condensado de las líneas de consumo sin permitir la fuga de vapor. Además cuando se interrumpe el flujo de vapor en las líneas de consumo, el aire ingresa en las tuberías para ocupar el espacio del vapor en compañía del condensado generado. Las trampas de vapor deben por tanto desalojar ese aire en el momento de arranque de estos sistemas. En resumen, las tres funciones de las trampas de vapor son: Descargar el condensado, no permitir las fugas de vapor, y ser capaces de desalojar aire y gases.

Figura 3. Trampas de vapor



Fotografía tomado por el autor

1.6.9 Conductor de bagazo

Los conductores de bagazo se conocen como: conductor inclinado, horizontal y de retorno. Están destinados a llevar el bagazo desde el ultimo molino a los hornos de las calderas para ser quemados, cuando hay bagazo en exceso se conserva en el patio, considerando como un 5% del total de bagazo. El conductor inclinado tiene la función de llevar, el bagazo desde la salida del último molino hasta el conductor horizontal. El conductor horizontal está instalado en la parte superior del hogar de las cuatro calderas, alimenta a los hornos con bagazo por medio de las compuertas y de los chifles.

El conductor de retorno vuelve a subir el bagazo de reserva al conductor horizontal, cuando se necesita alimentar a las calderas en el momento en que no se esté moliendo, o para tener caliente las calderas. Los conductores están formados por: una serie de tablillas que están distribuidas a una distancia determinada estas se encuentran sujetas por medio de unas orejas de hierro fundido a una cadena con sus respectivas guías, conjunto de ejes y sprockets, reductores y motores eléctricos. El otro tipo de conductor es conocido como faja conductora de bagazo y consiste en una banda de hule que circula sobre rodillos y que obtiene su movimiento por medio de un motorreductor.

Figura 4. Conductor de bagazo



Fotografía tomado por el autor

1.6.10 Bombas

Todas las bombas centrifugas están diseñadas para operar con líquidos, siempre que se formen mezclas de líquido y vapor o aire, pueden esperarse daños para la vida de los elementos rotativos. Si el líquido está a una temperatura elevada o el vapor está presente en el agua de alimentación de la caldera, puede ocurrir en una destrucción rápida de la carcasa o el envolvente de la bomba. Para suministrar agua a la caldera utiliza una bomba centrífuga principal impulsada por un motor eléctrico de corriente trifásica, ésta bomba es la encargada de abastecer de agua a la caldera en operación normal, tiene una capacidad de operación de 400 galones de agua por minuto a una presión de descarga de 250 psi y con una temperatura de 320 °F, ésta tiene un sistema de regulación de presión para evitar elevadas presiones en la línea de descarga.

Además se dispone de una segunda bomba centrífuga esta tiene una capacidad de 500 galones por minuto de agua a una presión de descarga de 300 psi y con una temperatura de 320 °F. Esta bomba es utilizada como by-pass para cualquier falla mecánica o eléctrica de la bomba principalmente para el mantenimiento de rutina; como cambio aceite, inspección de cojinetes o simplemente trabajar la caldera a baja carga y presiones donde la demanda de agua es limitada. Como medida de protección para la caldera se cuenta con una bomba de emergencia cuya capacidad es de 100 galones por minuto de agua y una presión de descarga de 400 psi a una temperatura de 120 °F, ésta bomba es utilizada en los arranques y paradas de la caldera.

Figura 5. Bomba para el condensado



Fotografía tomado por el autor

1.6.11 Motores eléctricos

Desde hace mucho tiempo el motor de inducción del tipo jaula de ardilla ha sido el caballo de batalla de la industria por su simplicidad, fuerte construcción y bajo costos de fabricación. Con el empleo cada vez más extenso de controles electrónicos por ajuste de frecuencia, el motor de inducción de corriente alterna (CA) parece encontrarse en ventaja para mantener su liderazgo. A fin de obtener un funcionamiento óptimo, es importante que el usuario tenga un conocimiento adecuado de los principios y características de operación tanto de los motores de inducción como de su control. Un motor de inducción está constituido por dos componentes básicas: una parte estacionaria o estator está formado por laminaciones (laminas) de acero eléctrico, troqueladas individualmente y unidas entre sí por cordones de soldadura u otro procedimiento equivalente que permita mantener alineadas las ranuras que

servirán de alojamiento de las bobinas. Básicamente, las ranuras pueden ser de dos tipos: abiertas o semicerradas.

Los motores de corriente directa (CD) se emplea en forma extensa en la industria gracias a su capacidad para satisfacer una gran variedad de requisitos de par y velocidad estos motores; son especialmente adecuados para aplicaciones que requieren aceleración gradual dentro de un intervalo muy amplio, ajustes preciso de velocidad, sincronización de velocidades y control preciso del par de rotación o tensión. En casi todas las ramas de la industria, es posible encontrar aplicaciones tanto para motores de CA como para motores de CD.

En condiciones usuales en que la alimentación general de una industria es a base de CA, las principales razones para especificar un motor de CD son: a) la facilidad para controlar su velocidad, b) el control del par motor, y c) la posibilidad de obtener su detención en posiciones muy precisas. En efecto, los motores de CD son extremadamente flexibles en sus características de operación, y es posible obtener con ellos una gran variedad de curvas par – velocidad, ya que estas máquinas motrices poseen una característica que ningún motor de CA ha logrado igualar: la facilidad para ajustar su velocidad dentro de una gama sumamente amplia, que pueden ser controlada con gran precisión. Además, los motores de CD tienen mayor eficiencia que los CA en aplicaciones que impliquen aceleración y desaceleración frecuentes con cargas de inercia elevada.

Figura 6. Motor eléctrico para los ventiladores



Fotografía tomado por el autor

1.6.12 Aire comprimido

El aire comprimido es una fuente de energía utilizada para el accionamiento de los controles y protecciones de la planta termoeléctrica, como válvulas automáticas, celdas de presión, medidores de flujo, accionamiento de los mecanismos neumáticos.

Para el suministro de aire comprimido la planta cuenta con tres compresores de los cuales uno está en línea para mantener una presión de aire de 100 psi, el aire requerido debe cumplir con varios parámetros para el óptimo funcionamiento de los controles, es decir debe suministrarse en calidad y cantidad necesaria, como debe estar libre de humedad y partículas que puedan obstruir los conductos de paso de aire.

1.7 Sistema de control de la caldera

A continuación se describen los elementos de control vitales para que la caldera de vapor pueda operar de modo automático.

1.7.1 Control del agua de alimentación

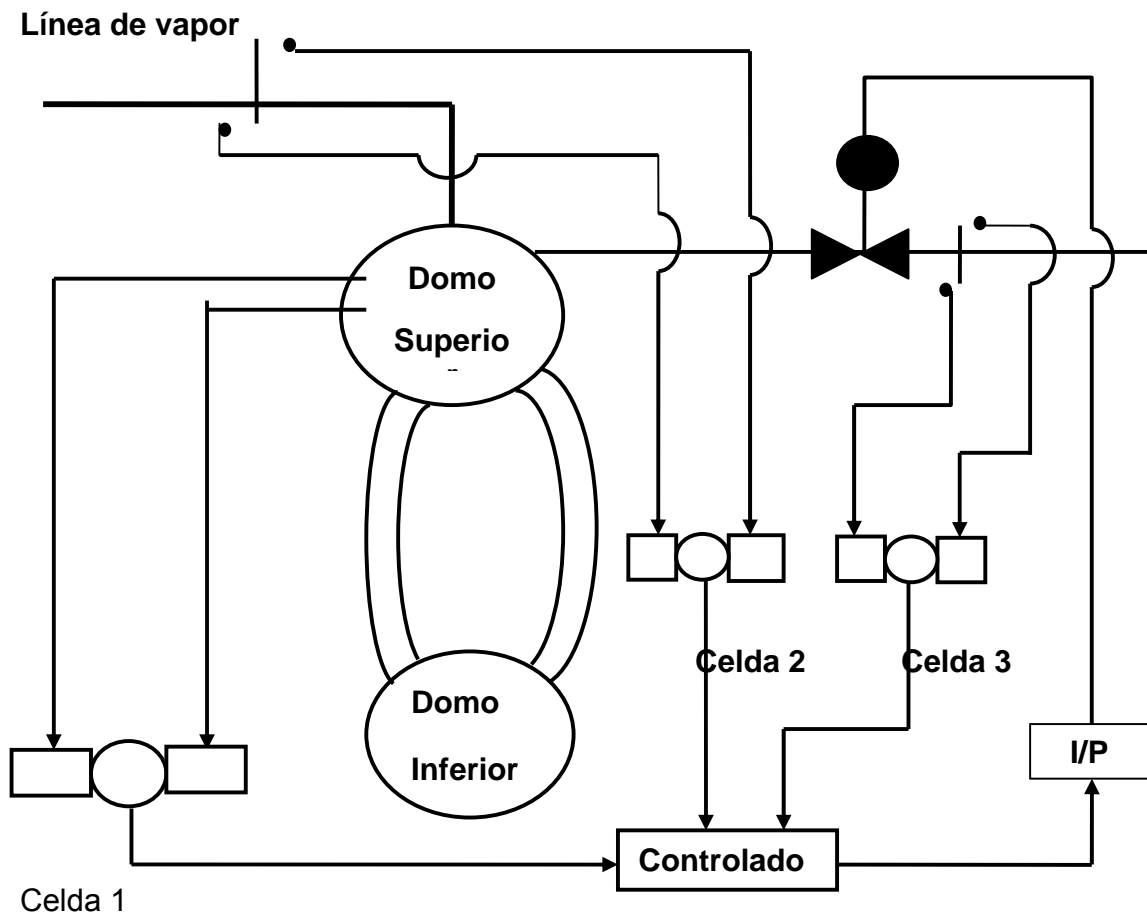
La regulación del nivel de agua y el caudal de alimentación se realiza por medio de válvulas automáticas que depende de sensores para detectar el nivel y después transferir esta medida mediante señales neumáticas o eléctricas a un actuador, que después ajusta el nivel al punto deseado o requerido. Este es un control de alimentación de agua de tres elementos, el flujo de vapor, el caudal de agua de alimentación y el nivel de agua son medidos y registrados por medidores operados mecánicamente.

Las medidas de flujo de vapor y de agua están equilibradas una respecto de la otra mediante un mecanismo diferencial. Un control piloto está conectado al mecanismo de modo que cualquier diferencia entre las cantidades de caudal de vapor y agua produce un cambio en la señal de salida neumática. Esta señal se transmite a un relé que está combinado con la señal neumática procedente del registrador de nivel de agua. Un cambio de carga en la caldera desequilibra el mecanismo, produciendo así un cambio en la señal de salida del control piloto. Lo que a su vez cambia la señal de salida del relé. Esta nueva señal reposiciona la válvula de control de agua de alimentación, admitiendo el agua necesaria en la caldera, igualando el caudal de agua entrante al del vapor que

sale de la caldera. El cambio resultante en el caudal de agua equilibra el mecanismo diferencial y lleva la señal de control piloto a su punto neutro. Como comprobación final y para asegurarse que la caldera tiene el nivel de agua necesario, la señal del control piloto en el registrador de nivel de agua reajusta el control de la válvula de alimentación, si es preciso, ver figura 7. El selector situado en la válvula del sistema proporciona control automático o manual.

Figura 7. Diagrama de agua de alimentación en la caldera

DIAGRAMA DE AGUA DE ALIMENTACION EN LA CALDERA



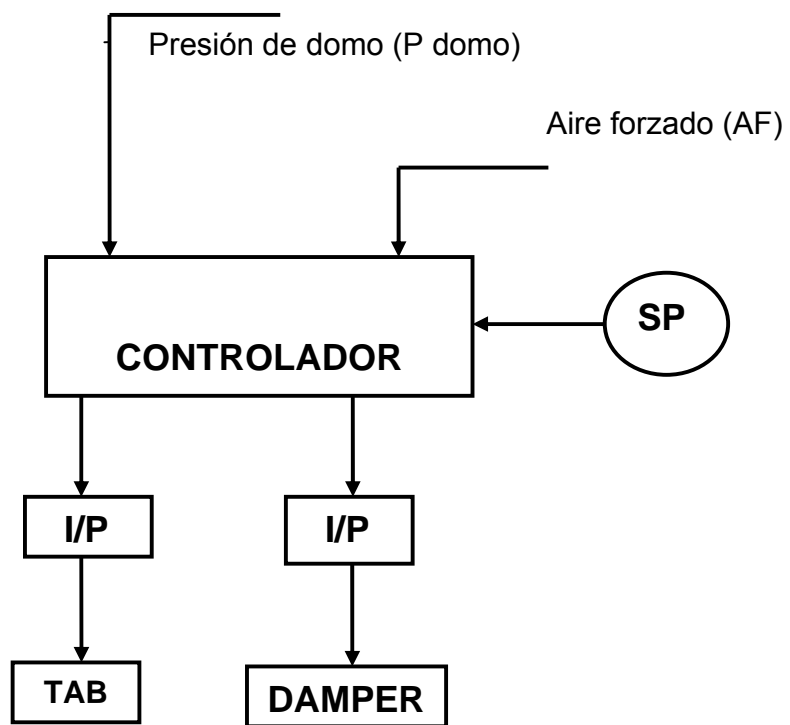
1.7.2 Control de presión

En la figura 8, se muestra un diagrama que representa el sistema de control de la presión de vapor en la caldera por medio del control del aire de combustión y el sistema de alimentación de combustible. Es necesario recordar que la presión de la caldera solo puede ser controlada manteniendo una adecuada relación aire y combustible es decir una mezcla de aire forzado con bagazo.

Como se puede observar en el diagrama, el controlador recibe señales electrónicas de la presión del domo superior (P_{domo}), de la presión del aire forzado (AF), y además un valor de referencia (SP) que es el valor de la presión de vapor que se desea mantener en la caldera. Cuando el controlador recibe estas dos señales, las opera y realiza dos funciones: la primera es enviar una señal electrónica a un convertidor de señales (I/P), que la convierte en una señal de presión para accionar tanto los alimentadores de bagazo. La segunda es enviar otra señal electrónica a un convertidor de señal (I/P), para también la convertida en una señal de presión que accione los dampers del tiro forzado que controla el flujo de aire hacia el hogar de la caldera.

Figura 8. Sistema de control de presión en la caldera

SISTEMA DE CONTROL DE PRESIÓN EN LA CALDERA



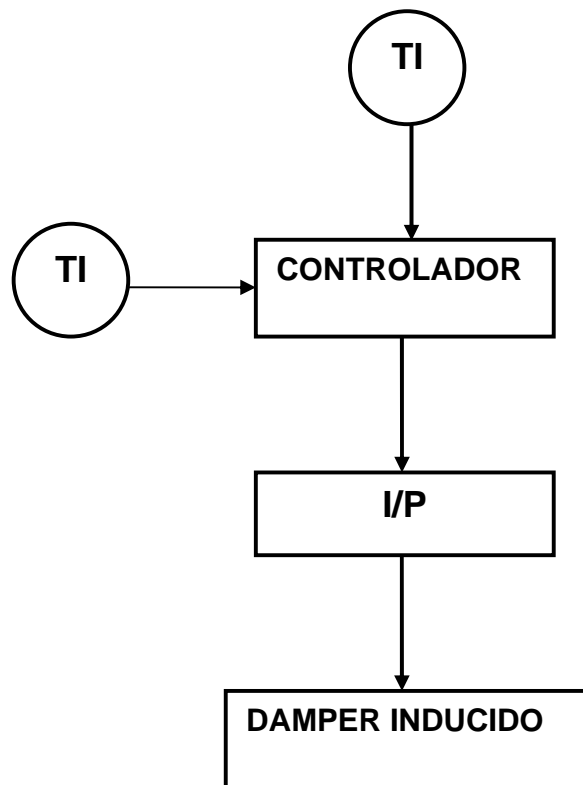
1.7.3 Control de tiro en el hogar

El tiro en el hogar de la caldera no es más que el flujo de los gases de combustión que son extraídos del hogar a través de la chimenea por medio de un ventilador de tiro inducido. Es preciso recordar que la presión que debe existir en el hogar debe ser negativa, es decir menor a la presión atmosférica, para que los gases puedan ser succionados hacia afuera de la caldera.

Como se puede observar en la figura 9, el controlador recibe una señal electrónica (TI) de la presión real que existe en el hogar y un valor SP, introducido externamente al controlador, que representa la presión que se desea mantener para que los gases sean evacuados eficientemente. Cuando estos dos datos son operados por el controlador, éste envía una señal electrónica a un convertidor de señales (I/P) que la convierte en una señal de presión, que accionan los dámper de los ventiladores de tiro inducido que abren o cierran el flujo de los gases expulsados de la caldera por la chimenea.

Figura 9. Sistema de control de tiro en el hogar

SISTEMA DE CONTROL DE TIRO EN EL HOGAR



2. PROPUESTA PARA MEJORAR LA EFICIENCIA DE OPERACIÓN DE LA CALDERA

2.1 Condiciones actuales de los gases de combustión de la caldera

Monitorear diariamente la calidad de los gases de combustión, es una práctica de rutina que los operadores de caldera deben ejecutar diariamente. Hay una serie de aspectos ligados a mantener una buena combustión. La cantidad de bagazo que consume varía en función de la demanda de vapor. Debido a esta situación, se dan regímenes altos y bajos de fuego.

2.2 Temperatura de los gases de chimenea y el aire

La temperatura de los gases de combustión es un parámetro que gobierna la eficiencia de la caldera. Es un índice de que tan eficientemente la reacción química del bagazo-aire, transfiere su calor a los tubos por donde circula el agua. Para que el operador tenga una idea clara en cuanto a la interpretación de esta variable se vale de dos medios:

- La utilización de un termómetro instalado en la chimenea de la caldera.
- La medición de CO₂ y O₂ (dióxido de carbono y oxígeno) en los gases de combustión.

De acuerdo con las prácticas de rutina monitoreadas se ha establecido una temperatura asociada a un régimen de fuego. Es decir para situaciones de fuego alto o bajo debe registrarse una temperatura normal asociada. El operador registrara una temperatura de 550 °F (273.55 °C) en el termómetro ubicado en la chimenea de la caldera.

2.2.1 Gas en la salida de chimenea

Los gases obtenidos de la combustión antes de salir a la atmosfera son aprovechados en el hogar para transmitir su temperatura a los distintos juegos de tubos encontrados en la caldera como lo son los tubos de agua, de vapor, súper – hiter, Precalentador de aire y si hubiera al economizador.

2.2.2 Temperatura del aire al entrar al hogar

El oxígeno para la combustion generalmente proviene del aire, donde se encuentra en una proporción de un 21% del volumen total, la mayor parte del 79% remanente es nitrógeno. El nitrógeno es de menor importancia en la producción de calor puesto que solo un porcentaje muy pequeño forma parte de las reacciones químicas de la combustión.

Sin embargo tiene un efecto significativo en la eficiencia de la caldera ya que parte del calor liberado por la reacción de la combustión tiene que ser utilizado para calentar el nitrógeno a la misma temperatura de la llama más baja que si se usara oxígeno puro.

Como el oxígeno del aire se conoce puede calcularse la cantidad de aire necesario para la combustión, se denomina aire teórico a la cantidad de aire necesaria para una combustión perfecta. Para medir todo lo referente a temperatura, se utiliza el sensor. El aire cuando entra al hogar ya ha pasado por el Precalentador de aire, el cual aumentará considerablemente su temperatura y mejorar la eficiencia.

2.2.3 Temperatura del agua de alimentación

La eficiencia de la caldera aumenta con la elevación de la temperatura del agua de alimentación. Ya se menciono que la utilización de economizador es un medio eficaz para precalentar el agua de alimentación por recuperación del calor desperdiciado en los gases de chimenea.

2.2.4 Gas O₂ en chimenea

El control del exceso de aire en realidad es sinónimo del control del exceso de O₂ en la chimenea, se recomienda que todos los operadores de calderas utilicen la medición del exceso de O₂. Sin embargo, las lecturas constantes de exceso de oxígeno en los gases de chimenea son buenos indicadores de que el flujo de bagazo y aire es estable. Es muy importante realizar las pruebas a presión normal. Los quemadores son los elementos del hogar para la combustión se alimenta con combustible y aire en condiciones estables y crean las condiciones aerodinámicas necesarias para producir una flama con características adecuadas a la instalación.

2.2.5 Flujo y presión de vapor

Para obtener la cantidad de flujo de vapor producido, se utilizan las placas de orificio, instrumentos que trabajan por medio de un diferencial de presión. En cada una de las placas de orificio que es una por caldera, está colocado un sensor del tipo de celdas diferenciales de presión, el cual convierte el dato obtenido de la presión diferencial a una señal analógica, la cual es recibida en el panel por un controlador. Este controlador posee tres formas de acceso a su base de datos y configuración. La primera es por medio del panel del propio controlador.

Desde este teclado, se pueden configurar y alterar los valores cargados en las bases de datos. La segunda es empleando el conocido como Hand Held, la cual es una terminal portátil diseñada para tener comunicación con el controlador y su base de datos. Es esencialmente un teclado similar al de una calculadora con números y letras. En la parte frontal del panel, se encuentra un conector por el que se realiza la conexión física. Realiza las mismas funciones que las que se pudieran realizar desde el teclado del panel frontal.

La ventaja es que existe mayor facilidad en el manejo de los datos a ser requeridos por el usuario. La tercera es utilizando una computadora personal con comunicación. Este es el medio más fácil de poder programar y configurar el controlador. Este continuamente monitorea y controla el proceso de acuerdo con su algoritmo configurado; posee una barra de set point, medición y salida. Todos los parámetros de configuración son accedidos desde el panel de control.

Para medir la presión en la caldera, se utiliza directamente un manómetro, el cual se encuentra ubicado en un lugar de fácil acceso a los operadores. También para medir la presión en la caldera se utiliza el sistema neumático, el cual toma la señal desde el domo de vapor; aquí toma la señal un sensor, el cual se encuentra calibrado en el rango de (0 a 300 Psi); esta señal se dirige seguidamente al panel de control donde llega hasta el controlador.

2.3 Datos del sistema de fuego

En la caldera 2, se cuenta con dos hornos de tipo Bigelow, que es el lugar donde se quema el combustible (bagazo de caña), el cual entra a cada uno de los hornos por medio de los chifles alimentadores, los que están conectados directamente con el conductor de bagazo horizontal y tiene una capacidad de flujo de 60,000 lb/hrs.

La caldera 4 tiene un horno de parrilla fija. El medio de alimentación de bagazo es automático, ya que consta de cuatro alimentadores hidráulicos, los cuales regulan la alimentación del combustible; esta caldera tiene una capacidad de flujo de 120,000 lb/hrs.

2.3.1 Tipo de combustible

Los ingenios azucareros de nuestro país cuentan con calderas acuotubulares, las cuales utilizan como combustible el bagazo de caña, el cual se obtiene de un subproducto o residuo de molienda de la caña de azúcar. En la actualidad, la mayoría de los ingenios azucareros de nuestro país se están dedicando a la cogeneración de energía, por lo que se ven en la necesidad de instalar calderas de gran capacidad, para la producción de vapor, que necesita de bagazo para poder alimentar su horno y poder producir así la energía calorífica necesaria. El poder calorífico del bagazo que se quema en los hornos depende de la humedad que contiene, ya que requiere calorías para su vaporización. Es importante mencionar que el bagazo tiene que estar de un intervalo de humedad, entre 40% y 60%. También hay que tomar en cuenta la fibra que contiene la caña, pues tendrá mucha influencia en la calidad del bagazo y esto a la vez influirá mucho en la eficiencia de combustión y por ende en la eficiencia de la caldera.

2.3.2 Poder calorífico del combustible

El poder calorífico verdadero del bagazo que se quema en los hornos depende de la humedad que contiene, ya que requiere calorías para su vaporización. En el caso del Ingenio Tumulá, el poder calorífico del bagazo se toma 4210.38 Btu/lb. Con relación a la fibra contenida en el bagazo, esta ha sido analizada por varios investigadores, quienes han obtenido valores medios de: 47% de carbono, 6.5% de hidrogeno, 44% de oxígeno y 2.5% de ceniza.

2.3.3 Eficiencia de combustión

El término eficiencia de combustión se usa muy a menudo como sinónimo de eficiencia de caldera, aunque su definición no es la misma. La eficiencia de combustión se expresa como el 100% menos la suma de las pérdidas por gases secos de la chimenea y las pérdidas por humedad en dichos gases. Este punto de vista no toma en cuenta las pérdidas de combustión, como tal las pérdidas por transmisión de calor en la superficie de la caldera ni las pérdidas por purgas. Aunque estas pérdidas son pequeñas en comparación con la suma de la pérdida de los gases de chimenea y la humedad de estos, su efecto total será siempre que la eficiencia de caldera (la cual si toma en cuenta tales pérdidas) sea menor que la eficiencia de combustión conducirá en general, a un aumento de eficiencia de caldera, ambas expresiones son sinónimos como medida del rendimiento operativo de la unidad.

Por medio del análisis de combustión se puede determinar la eficiencia de la caldera, que puede ser mayor que el rendimiento estándar de cualquier caldera. Si este análisis es pasado por alto, es seguro que no se obtendrá un rendimiento óptimo. Cualquiera que sea la medición que se efectúe en la chimenea ya sea CO_2 , CO , exceso de O_2 humo, temperaturas, etc., es importante que se haga sobre una muestra respectiva del volumen de gases de chimenea. La localización del lugar en donde se obtiene la muestra de gases de combustión y la temperatura de la chimenea es tan importante con la misma medición.

Los análisis de los gases de combustión tienen por objeto determinar:

i) Análisis de los gases de combustión

En la composición de los gases de combustión, el quemador está sujeto a una producción adecuada de CO_2 en los gases de la chimenea. Esto permite la tasación de la caldera sobre una base de comparación. Es tan factible la obtención de rendimiento irregular afectado por la prueba en condiciones ideales. Un horno puede desarrollar eficiencias que no es posible lograr en el campo de la aplicación.

ii) Temperatura de los gases de escape

Una temperatura máxima de los gases de la chimenea, durante el rendimiento máximo de la caldera, asegura la operación económica favorable y elimina los riesgos de encendido.

iii) Pérdida de tiro a través de la caldera

La pérdida excesiva de tiro, precisará la instalación de una chimenea más alta o de otra manera dará lugar a dificultades como consecuencia con la combustión defectuosa resultante.

iv) Densidad del humo

El humo grueso indica combustión incompleta, operación poco eficiente y en general acarreará condiciones indeseables de trabajo.

v) Eficiencia de combustion

Debido a que la eficiencia de la combustión se expresa como el 100% menos la pérdida debida a los gases de combustión, obviamente la eficiencia depende tanto del exceso de O, como el de la temperatura de los gases de combustión.

Los procedimientos que disminuyen el contenido de energía de estas corrientes benefician directamente la operación de la unidad. La eficiencia máxima se obtiene cuando la combustión es completa y se reducen las pérdidas de calor.

Cálculo de combustión

Porcentaje el bagazo según Hugot:

C = Carbono = 45.43

H = Hidrógeno = 6.228

O = Oxígeno = 42.53

La fórmula para el bagazo será: por análisis y los pesos moleculares

$C_x H_y O_z$

$$12.011X = 45.43 \Rightarrow X = 3.782$$

$$1.0079Y = 6.228 \Rightarrow Y = 6.233$$

$$16.000Z = 42.53 \Rightarrow Z = 2.658$$

Sustituyendo los valores en la fórmula de los bagazos

$C_{3.782} H_{6.233} O_{2.658}$

Fórmula del bagazo promedio

$C_{17} H_{28} O_{12}$

Fórmula de la combustión del bagazo con el aire

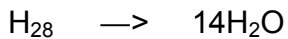
$C_{17} H_{28} O_{12} + O_2 + 3.76N_2 \Rightarrow CO_2 + H_2O + N_2$

Realizar el balance de la ecuación de combustión

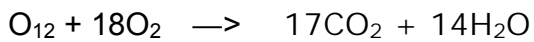
Balance del carbono



Balance del hidrógeno

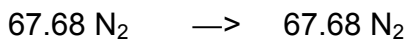


Balance del oxígeno

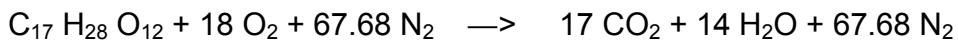


El aire puede suponerse que tiene una composición molar de $0.21 O_2 + 0.79 N_2$, es decir, 3.76 moles de N_2 por cada mol de O_2 .

Balance del Nitrógeno donde $N = 3.76 O$



El resultado del balance de los diferentes elementos que compone la ecuación de combustión.



| |
|--|
| $\text{Relación aire combustión} = \frac{\text{Peso del aire}}{\text{Peso del combustible}}$ |
|--|

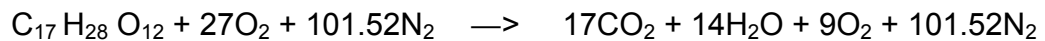
Para calcular la relación del aire combustible con un 0% de exceso de aire se suma la cantidad de aire y se multiplica por el peso molecular del aire que tiene un valor de 28.97. Luego se divide entre el peso del combustible.

$$\text{Relación aire combustión} = \frac{(18+67.68) \times (28.97)}{[(17) \times (12.011) + (28) \times (1.008) + (12) \times (16)]}$$

$$\text{Relación aire combustible} = \frac{2,482.15}{424.41}$$

$$\text{Relación aire combustible} = \mathbf{5.85}$$

Con un 50 % de exceso de aire, para mejorar la combustión en la caldera se tiene:



$$\text{Relación aire combustible} = \frac{(27+101.52) \times (28.97)}{[(17) \times (12.01) + (28) \times (1.008) + (12) \times (15.99)]}$$

$$\text{Relación aire combustible} = \frac{3723.22}{424.41}$$

$$\text{Relación aire combustible} = \mathbf{8.77}$$

Tabla II. Combustión para diferentes porcentajes de aire

| EXCESO DE AIRE % | RELACIÓN AIRE/COMB. |
|------------------|---------------------|
| 0 | 5.85 |
| 10 | 6.43 |
| 20 | 7.02 |
| 30 | 7.60 |
| 40 | 8.19 |
| 50 | 8.77 |
| 60 | 9.36 |
| 70 | 9.94 |
| 80 | 10.53 |
| 90 | 11.11 |
| 100 | 11.70 |

El conocimiento de O_2 y la temperatura de los gases evacuados por la chimenea, con estos datos se puede toma la idea de la combustión. Cuanto más bajo es la temperatura y el O_2 mejor la combustión.

Para lograr esto hay que agregar la cantidad en exceso de aire necesario de acuerdo a la cantidad de combustible que se quema. Para un porcentaje alto de O_2 así debe ser la relación de aire y combustible.

Calcular la eficiencia de combustión.

a) Calor perdido en los gases de chimenea

$$Q = \int_{T_1}^{t_g} C_p dT = MC_p dT$$

Se utiliza una función de C_p con respecto a las temperaturas. Estas funciones son:(4)

$$C_p(\text{CO}_2) = 8.45 + 5.76 \times 10^{-3} T - 2159 \times 10^{-7} T^2 + 3.05 \times 10^{-10} T^3$$

$$C_p(\text{O}_2) = 7.10 + 0.78 \times 10^{-3} T - 0.55 \times 10^{-7} T^2$$

$$C_p(\text{N}_2) = 6.89 + 0.76 \times 10^{-3} T - 0.70 \times 10^{-7} T^2$$

$$C_p(\text{CO}) = 6.86 + 0.80 \times 10^{-3} T - 0.74 \times 10^{-7} T^2$$

Ahora a cada C_p de cada gas hay que multiplicar por la fracción de ese gas en el total de gases, con el propósito de encontrar el C_p neto.

$$C_p(\text{CO}_2) = (13.10/100) [8.45 + 5.76 \times 10^{-3} T - 2159 \times 10^{-7} T^2 + 3.05 \times 10^{-10} T^3]$$

$$C_p(\text{O}_2) = (3.70/100) [7.10 + 0.78 \times 10^{-3} T - 0.55 \times 10^{-7} T^2]$$

$$C_p(\text{N}_2) = (82.2/100) [6.89 + 0.76 \times 10^{-3} T - 0.70 \times 10^{-7} T^2]$$

$$C_p(\text{CO}) = (1/100) [6.86 + 0.80 \times 10^{-3} T - 0.74 \times 10^{-7} T^2]$$

Resolviendo y sumando los términos semejantes.

$$\text{Sumatoria de gases} = 7.11 + 1.43 \times 10^{-3} T - 3.47 \times 10^{-7} T^2 + 0.405 \times 10^{-10} T^3$$

El C_p puede representarse así:

$$C_p \text{ gases} = a + b \times 10^{-3} T - c \times 10^{-7} T^2 + d \times 10^{-10} T^3$$

$$Q = \int_{T_1}^{t_g} (a + b E-3 T - c E-7 T^2 + d E-10 T^3)$$

Resolviendo la integral.

$$Q = a(t_g - T_1) + \frac{bE-3}{2} [(t_g)^2 - (T_1)^2] - \frac{cE-7}{3} [(t_g)^3 - (T_1)^3] + \frac{dE-10}{4} [(t_g)^4 - (T_1)^4]$$

Sustituyendo valores en la funciones con las temperaturas siguientes.

$$t_g = 375 \text{ }^\circ\text{F}; \quad T_1 = 98 \text{ }^\circ\text{F}$$

$$Q = 7.11 (375 - 98) + \frac{1.43E-3}{2} [(375)^2 - (98)^2] - \frac{3.47E-7}{3} [(375)^3 - (98)^3] +$$

$$\frac{0.405E-10}{4} [(375)^4 - (98)^4]$$

$$Q = 2,056.96 \text{ Btu/lb.mol gases secos}$$

Recordando el balance de materiales, (balance de carbono), se tiene:

$$0.1331 \text{ lb. Mol gases secos} \times \frac{2,056.96 \text{ Btu}}{\text{Lb. de bagazo Lb.mol gases secos}}$$

$$Q = 273.78 \text{ Btu/lb. bagazo}$$

b) Calor perdido relacionado con el vapor de agua contenida en los gases debido a la combustión con el bagazo. Las pérdidas pueden determinarse de la expresión siguiente que se tiene en la ASME.

$$Q_{H_2O} = \frac{(M}{100} + \frac{9H}{100}) (0.46t_g + 1089 - t_a)$$

En donde M es el porcentaje de agua en el combustible; H es el porcentaje de hidrógeno en el combustible; t_g es la temperatura de los gases después del precalentador; t_a es la temperatura aire suministrado. Y sustituyendo valores tenemos:

$$Q_{H_2O} = \frac{49.15}{100} + \frac{9(3.12)}{100} [(0.46 \times (375^\circ\text{F}) + 1089 - (325^\circ\text{F})]$$

$Q_{H_2O} = 728.60 \text{ Btu/ lb. Bagazo}$

c) Calor perdido por los sólidos no quemados se observó que al efectuar dicha limpieza, quedaba una mínima porción de bagazo que no se quemó completamente. Según el criterio se estableció un dos por ciento.

$$Q_s = 14,600 \frac{(\text{bagazo no quemado completamente})}{(\text{Total del residuo})}$$

$$Q_s = 14,600 \frac{(2 \text{ lbs. de bagazo})}{(100 \text{ lb. de bagazo})}$$

$Q_s = 292 \text{ Btu/lb. de bagazo}$

d) Calor perdida por combustión incompleta. Esta pérdida es consecuencia de la liberación incompleta de la energía del combustible.

$$Q_{\text{comb.}} = \frac{\% \text{ CO}}{\% \text{ de CO} + \% \text{ CO}_2} \times \frac{22.56}{100} \times 10,190$$

$$Q_{\text{comb.}} = \frac{1}{1 + 13.12} \times \frac{22.56}{100} \times 10,190$$

Qcomb. = 162.81 Btu/ lb. bagazo

e) Calor perdido por radiación de las superficies de la caldera ya que el calor perdido por la unidad no aumenta proporcionalmente con la salida de vapor en donde W es la humedad del bagazo.

$$Q_r = 0.019 [8,280 (1 - W)]$$

$$Q_r = 0.019 [8,280 (1 - 0.4915)]$$

Qr = 80 Btu/ lb. bagazo

Finalmente se cuantifica las pérdidas que fueron calculados.

Sumatoria de las pérdidas de calor (**Qp**) = **1,537.19 Btu/lb. bagazo**

Calor total producido **Qt = 4,210.38 Btu/lb. bagazo**

$$\text{Eficiencia} = \frac{Q_{\text{total}} - Q_{\text{péridas}}}{Q_{\text{total}}} \times 100$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{4,210.38 - 1537.19}{4210.38} \times 100$$

La eficiencia de combustión

Eficiencia = 63.49%

2.3.4 Cálculos para el balance térmico

La combustión o quemado de los combustibles más comunes, o sea aquellos que consisten principalmente en carbono e hidrógeno (tales como el aceite combustible, el gas, el carbón y la madera) implica la reacción del carbono y el hidrógeno con el oxígeno para la producir dióxido de carbono y vapor de agua, y la consecuente liberación de la energía química de enlace de forma de luz y calor. Las reacciones químicas que tienen lugar se indican a continuación.

Período del 17de noviembre al 11 de diciembre

| | |
|-----------------------|-----------------|
| Caña molida: | 143,733.27 ton. |
| Toneladas de bagazo: | 36,695.10 ton. |
| Molida por día: | 5,749.33 ton. |
| Humedad del bagazo | 49.15 % |
| Bagazo seco | 50.85 % |
| Porcentaje de bagazo: | 25.53 % |
| Días moliendo: | 25 días |

El calor total producido al quemar una libra de bagazo o sea el valor calorífico superior (VCS), que es dado por la siguiente expresión.

$$\text{V.C.S} = 8280 (1 - W)$$

$$\text{V.C.S} = 8280 (1 - 0.4915)$$

$$\text{V.C.S} = 4,210.38 \text{ Btu/Lbs. de bagazo}$$

Ton. bagazo húmedo = (36,695.10 ton.) (0.4915) = **18,035.64 ton.**

Ton. bagazo seco = (36,695.10 ton.) (0.5085) = **18695.45 ton.**

Bagazo por día = (5,749.33 ton/día) (0.2553) = **1,467.80 ton/día.**

Bagazo húmedo por día = (1,467.80 ton/día) (0.4915) = **721.42 ton. bagazo/día**

Bagazo seco por día = (1,467.80 ton/día) (0.5085) = **746.38 ton. bagazo/día**

Energía del bagazo seco = (1,115.17 ton/día) (1 día/ 24 hrs) (2,000 lb/1ton)
(3517.02 Btu/lb) = **261.88 Mbtu/hr.**

Porcentaje de bagazo no consumido = (1267.80 ton.bagazo / día) (0.05)

= **73.39 ton. bagazo/día.**

Calculo para el porcentaje de bagazo que consume cada caldera.

2.
$$\frac{(60,000 \text{ libras/hora}) (100 \%)}{(440,000 \text{ libras/hora})} = 13.64 \%$$

4.
$$\frac{(120,000 \text{ libras/hora}) (100\%)}{(440,000 \text{ libras/hora})} = 27.27\%$$

5.
$$\frac{(260,000 \text{ libras/hora}) (100\%)}{(440,000 \text{ libras/hora})} = 59.09 \%$$

Para obtener el porcentaje de bagazo consumido por cada caldera se efectúa un promedio ponderal, en base a su capacidad nominal.

Tabla III. La capacidad de cada caldera

| No. calderas | Capacidad nominal | Porcentaje de bagazo |
|--------------|---------------------|----------------------|
| 2 | 60,000 libras/hora | 13.64 % |
| 4 | 120,000 libras/hora | 27.27 % |
| 5 | 260,000 libras/hora | 59.09 % |
| Total = | 440,000 libras/hora | 100.00 % |

Seguidamente se calculará la cantidad de bagazo para cada una de las calderas y en base al por ciento que le corresponde que fue calculado anteriormente.

Caldera 2.

$$(1467.80 \text{ ton./día}) (0.1364) = \mathbf{200.15 \text{ ton. bagazo/ día}}$$

Caldera 4.

$$(1467.80 \text{ ton./día}) (0.2727) = \mathbf{400.31 \text{ ton. bagazo/ día}}$$

Caldera 5.

$$(1467.80 \text{ ton./día}) (0.5909) = \mathbf{867.32 \text{ ton. bagazo/ día}}$$

Continuando con los cálculos de la composición química del bagazo que entra al departamento de calderas, procedente del tándem de molinos. Esto se hace con el objetivo de establecer la composición final del bagazo que se está consumiendo. Datos de la composición química del bagazo seco según Hugot, esto se obtuvo debido a que no se contaba con el equipo para realizar el análisis respectivo.

Carbono = 47 %
 Hidrogeno = 6.5 %
 Oxígeno = 44 %
 Ceniza = 2.5 %

De acuerdo a los datos del Ingenio Tululá, la humedad promedio del bagazo es 49.15 %. Como el 49.15 es agua, el 50.85 % restante es bagazo seco. Entonces del 50.85 % se calculará qué porcentaje pertenece a la composición química.

$$\begin{aligned}
 \text{Porcentaje de carbono} &= \frac{(50.85)(47)}{100} = \mathbf{23.90\%} \\
 \text{Porcentaje de hidrógeno} &= \frac{(50.85)(6.5)}{100} = \mathbf{3.31\%} \\
 \text{Porcentaje de oxígeno} &= \frac{(50.85)(44)}{100} = \mathbf{22.37\%} \\
 \text{Porcentaje de cenizas} &= \frac{(50.85)(2.5)}{100} = \mathbf{1.27\%}
 \end{aligned}$$

La composición química final del bagazo que entra al departamento de calderas es:

Humedad en el bagazo = **50.85 %**
 Carbono en el bagazo = **23.89 %**
 Hidrógeno en el bagazo = **3.30 %**
 Oxígeno en el bagazo = **22.33 %**
 Ceniza = **1.27 %**

Para calcular la eficiencia del hogar de la caldera se usa los siguientes datos:

Temperatura del pared del horno = 182 °F

Temperatura del aire de alimentación = 98 °F

Área de transferencia de calor = 13609.40

Energía del bagazo = 261877215.20 Btu/h

% del bagazo consumido = 27.27%

a) Perdida por radiación y convección.

$$PRC = \{0.94 (0.17)[((T_s + 460)/100)^4 - ((T_a - 460)/100)^4] + 0.296(T_s - T_a)^{1.25}\} \times$$

(área)/(Energía del bagazo)x(% bagazo consumido)

$$PRC = \{0.94 (0.17)x[((182 + 460)/100)^4 - ((98 + 460)/100)^4] +$$

$$0.29(182 - 98)^{1.25}\}x(13,609.40)/(261,877,215.20)x(0.2727)$$

PRC = 0.0109

b) Perdida por condensación.

$$PC = [100(562 - 4.82) (\% \text{ de hum. De bag.})] / VCS$$

$$PC = [100(562 - 4.82) (0.4915)] / 4,210.38$$

PC = 6.50%

E.hogar = E Comb. - (PRC + PC)

La eficiencia del hogar de la caldera

$$Ec = 63.49 - (0.0109 + 6.50)$$

Ec = 57%

2.4 Análisis y propuesta para el montaje del economizador

Este es el principio del economizador. Es un intercambiador de calor colocado en el paso de los gases que deja la caldera y a través del cual circula el agua de alimentación, entre la bomba de alimentación y la caldera. Generalmente consiste en varios tubos, en muchos casos con aletas, a través de ellos circula el agua en varios pasos. Los economizadores se disponen en haces de manera que el agua pasa de un tubo al siguiente por medio de un codo de 180°.

Calcular la superficie de calentamiento en donde se necesita los datos siguientes:

Cantidad de agua al economizador = 49,090 Kg/h

Temperatura gas que entra al economizador = 383 °F

Temperatura gas que sale del economizador = 316 °F

Temperatura del agua que entra al economizador = 221 °F

Temperatura del agua que sale del economizador = 279 °F

$$\Delta t_a = 383 - 279$$

$$\Delta t_a = 104 \text{ °F}$$

$$\Delta t_b = 316 - 221$$

$$\Delta t_b = 95 \text{ °F}$$

Calcular la media logarítmica de la diferencia de temperatura (MLDT)

$$\text{MLDT} = \frac{\Delta t_a - \Delta t_b}{\frac{\ln \Delta t_a}{\Delta t_b}}$$

$$\text{MLTD} = \frac{104 - 95}{\frac{\ln 104}{95}} = 104$$

La fórmula para calcular el área de transferencia de calor.

$$A = \frac{m_w (h_2 - h_1)}{U \times \text{MLTD}}$$

Se calcula las entalpías, según tabla del anexo.

entalpia a una temperatura de 137 °F $h_2 = 140.62 \text{ Kcaloria/ Kg}$

entalpia a una temperatura de 105 °F $h_1 = 105.07 \text{ Kcaloria/ Kg}$

$$A = \frac{(49,090) \times (140.61 - 105.07)}{(585) \times (104)}$$

$$A = \frac{(49,090) \times (35.54)}{(585) \times (104.40)}$$

$$A = 28 \text{ m}^2$$

2.4.1 Montaje del economizador

2.4.1.1 Estructura

Este aspecto del proyecto se refiere a la forma en que ciertos elementos estructurales, estarán disponibles para soportar las cargas muertas (tubería, economizador); las condiciones ambientales atmosféricas contaminantes, temperaturas, presión, etc. En lo referente a la construcción no hay distinción, es decir que las recomendaciones y técnicas siguientes es para cualquier economizador. Si el agua de alimentación es de mala calidad o calidad indeterminada, habrá necesidad de revisar y limpiar periódicamente la superficie interior de los tubos del economizador. La facilidad de acceso se logra por medio de:

Caja de unión pequeña. Una caja de acero troquelada, formada por soldadura o hierro colado. Se emplea para conectar los tubos rectos. La caja está dotada de un registro de mano para el rolado de los tubos, para su inspección y limpieza.

Curva reversible dotadas de bridas. Las vueltas de 180° se atornillan mediante bridas similares a las utilizadas en los tubos rectos, facilitando el acceso al tubo en sus dos extremos. Se requieren, espacios para maniobra y puertas de acceso en ambos extremos de la unidad.

2.4.1.2 Instalación

Una vez se encuentren disponibles todos los elementos estructurales, que soporten el proyecto se proceden a instalar los accesorios o líneas de servicios como el agua, vapor etc. que se requieran. Las líneas que el equipo necesita son:

a) Instalación del economizador

Inicialmente se debe colocar la unidad sobre una estructura que sea capaz de soportar el peso en operación. Las dimensiones de la caldera y el diámetro del ducto de salida de los gases de combustión tendrán que haberse calculado previamente, como en la sección anterior. Tener el cuidado de que las tuberías queden en posición horizontal para asegurar el vaciado del economizador en caso de mantenimiento. Soldar los bordes del ducto de gases de combustión a los bordes de salida del dimensionamiento de la caldera. El acceso a este ducto debe ser lo más corto posible, en forma hermética y aislada. En el economizador se instala un soplador de hollín para poder limpiar periódicamente la tubería del economizador así poder tener una buena transferencia de calor.

Instalar una válvula que regule la cantidad de agua a una presión tal, que impida la formación de vapor y así evitar los golpes de ariete. Recordar que cuando el agua está a una presión mayor a su temperatura de saturación se encuentra comprimida, y esto evita que se vaporice arriba de los 300 °C.

b) Instalación de la tubería de agua

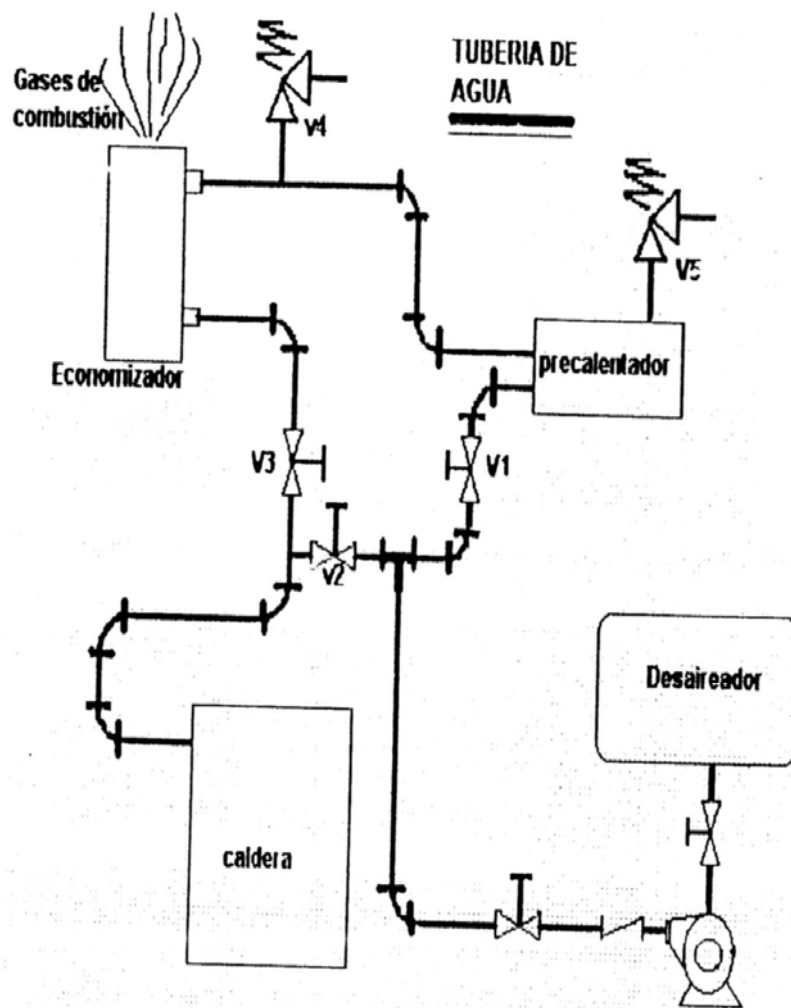
Una vez se haya instalado la estructura del economizador se empieza la instalación de la tubería para la circulación del agua. Al instalar la tubería agua se debe de considerar lo siguiente:

Protección contra las sobrepresiones

Aseguramiento que durante las paradas de producción, se pueda efectuar las inspección y mantenimiento.

En la figura 10 se puede analizar un diagrama sugerido para conducir el agua dentro del sistema. Agua tratada, procedente de dicho proceso, es bombeada hacia el economizador como primer paso. La válvula V_1 debe estar abierta y la V_2 cerrada. Cuando se efectúen trabajos de inspección o mantenimiento cerrar V_1 y V_3 , asegurándose de esta forma que el agua pasará directamente hacia la caldera, sin pasar por el economizador. La función que cumple V_2 es como "by pass". La válvula V_4 es una válvula de alivio y tienen como función proteger el equipo contra efectos de sobrepresión, lo cual incluye los tubos del economizador respectivamente.

Figura 10. Tubería de agua



Fuente: Kentube company. Fuel economizador.

4.2.1.3 Materiales requeridos

El material requerido para la fabricación del economizador es el siguiente:

El tipo de tubería, el espesor de la lámina y el acero estructural que se utilizará para la fabricación del economizador.

La temperatura o condiciones ambientales donde se instalará el economizador posee una humedad relativa del 85%, con temperatura promedio de 37°C.

Las presiones a las que trabajará el sistema de tubería serán:

Presión de la tubería de agua = Presión máxima = 340 PSI (23.43 bar)

Presión mínima = 260 PSI (17.92 bar)

Temperatura de la tubería de agua = T_{max} = 130°C

T_{min} = 100 °C

Una vez establecidos los datos anteriores, se procederá a seleccionar el material a utilizar.

Material de acero

Para la construcción de economizador, especialmente en los generadores de presión más altas, se emplea por lo regular tubería de acero suave. Esta tubería permite la disposición compacta de la superficie con un espaciamiento reducido de los tubos.

Material de hierro fundido. Para la operación a presiones bajas, cuando el agua de alimentación no ha sido plenamente tratada ni desaerada, o cuando la atención operacional y el mantenimiento son problemáticos, se emplea el economizador de hierro colado, a pesar de su costo inicial más elevado ya que de otra manera puede aparecer la corrosión. Un economizador de hierro colado ampliamente usado está construido de tubos con aletas superficies amplificada con discos fundidos, formando una sola pieza con el tubo con un diámetro interior de 64 mm (2 ½”). Para un economizador determinado con límites fijos de temperatura, un aumento en la velocidad de los gases provocará un aumento en la conductividad.

Tabla IV. Coeficiente de transferencia de calor en el economizador

| Tipo de economizador | Coeficiente del flujo de la masa lb/h por pie ² de área libre | Conductancia Btu/h por °F |
|--|---|------------------------------|
| Economizadores de tubos de acero: tubos con aletas | 6500 | 12-13.5 |
| Tubos liso | 4500- 7000 | 8 -12 |
| Hierro colado | 1500 | 2.5- 3.5 |
| | 3000 | 5 – 6 |

Fuente: Mejoramiento de la eficiencia de operación de calderas de vapor. Pág. 113

Tamaño y espaciamiento de los tubos. Los tubos de acero son por lo general de 51 ó 64 mm (2 0 2 ½”) de diámetro exterior y serán de paredes delgadas. El espaciamiento lateral y el del fondo se rigen por la facilidad para la limpieza. El espaciamiento hacia los lados debe dejar claros entre 38 y 51 mm (1 ½ y 2”) de ancho 25 mm (1”) para combustible limpios. El espaciamiento hacia el fondo debe ser de 101 a 127 mm (4 a 5”) entre centros para tubos de 51 mm (2”) y de 76 a 127 mm (3 a 5”) para tubos de 64 mm (2 ½). Los tubos se alinean en forma alternada por lo general, aunque esto no es indispensablemente necesario.

Las aletas transversales. El metal usado en la manufactura afecta grandemente la economicidad de las aletas. Schimidt ha preparado la siguiente tabla que compara el cociente de la cantidad de metal requerido para aletas de idéntica forma donde el peso y volumen de una aleta de cobre se toma como unidas.

Tabla V. Volúmenes y pesos óptimos de aletas metálicas

| Metal | K | Gravedad | Volumen | Peso |
|----------|-----|----------|---------|-------|
| Cobre | 222 | 8.9 | 1.0 | 1.0 |
| Aluminio | 121 | 2.7 | 1.83 | 0.556 |
| Acero | 30 | 7.8 | 7.33 | 0.43 |

Fuente: Kentube company. Fuel economizer. Pág. 119

Figura 11. Detalles de la tubería con aletas

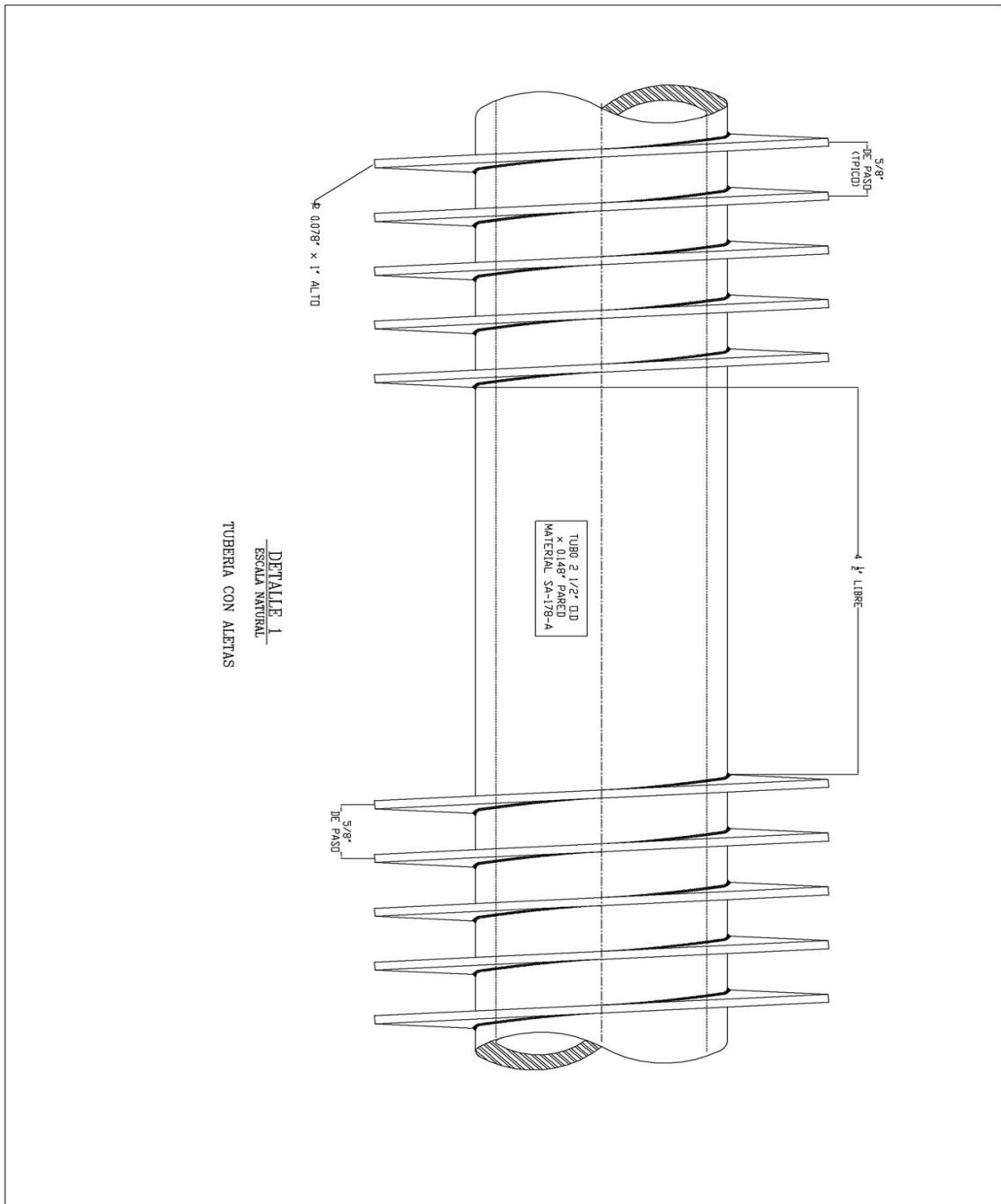


Figura 12. Detalles de los elemento cabezal y estándar

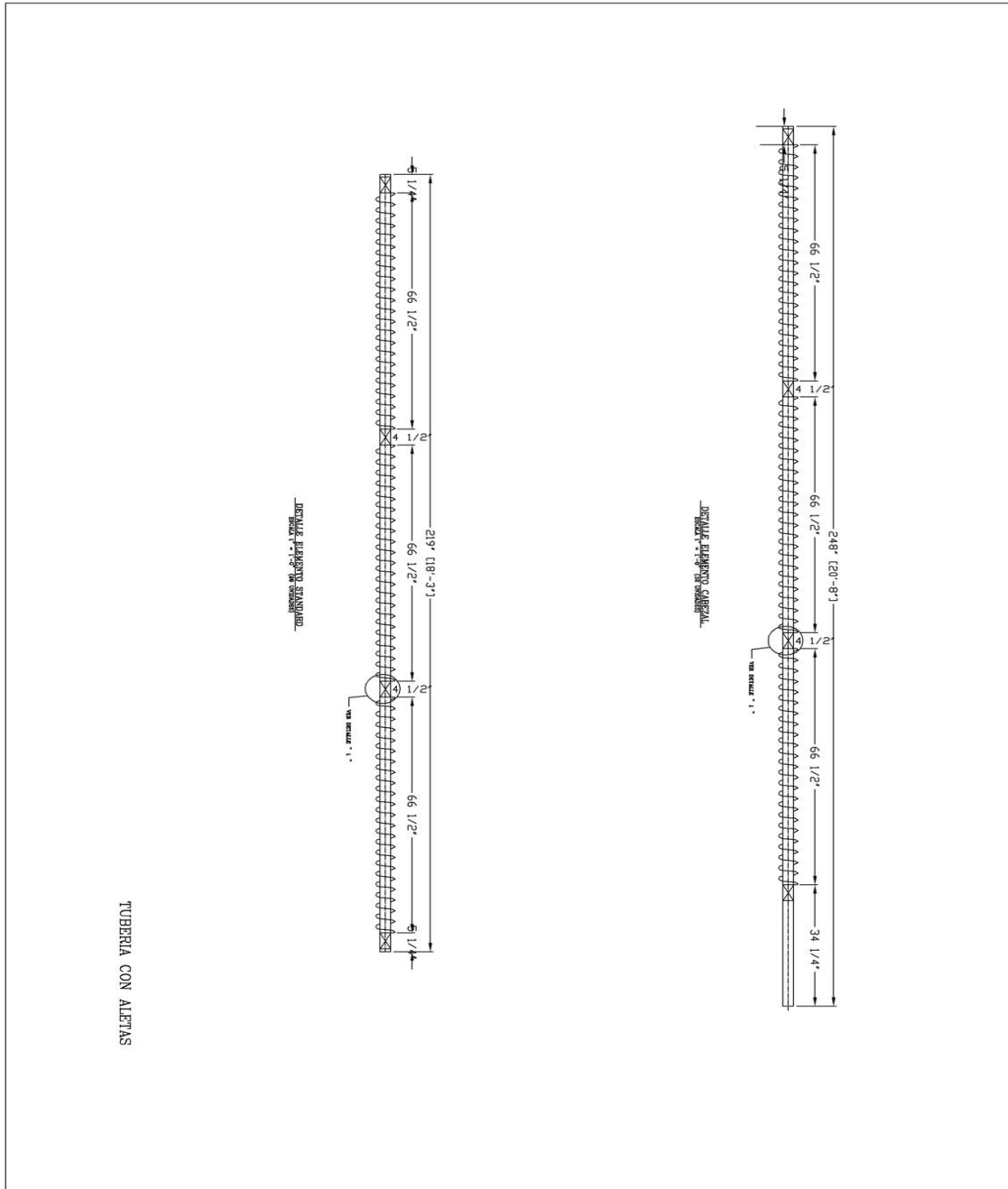


Figura 13. Detalles de toda la tubería del economizador

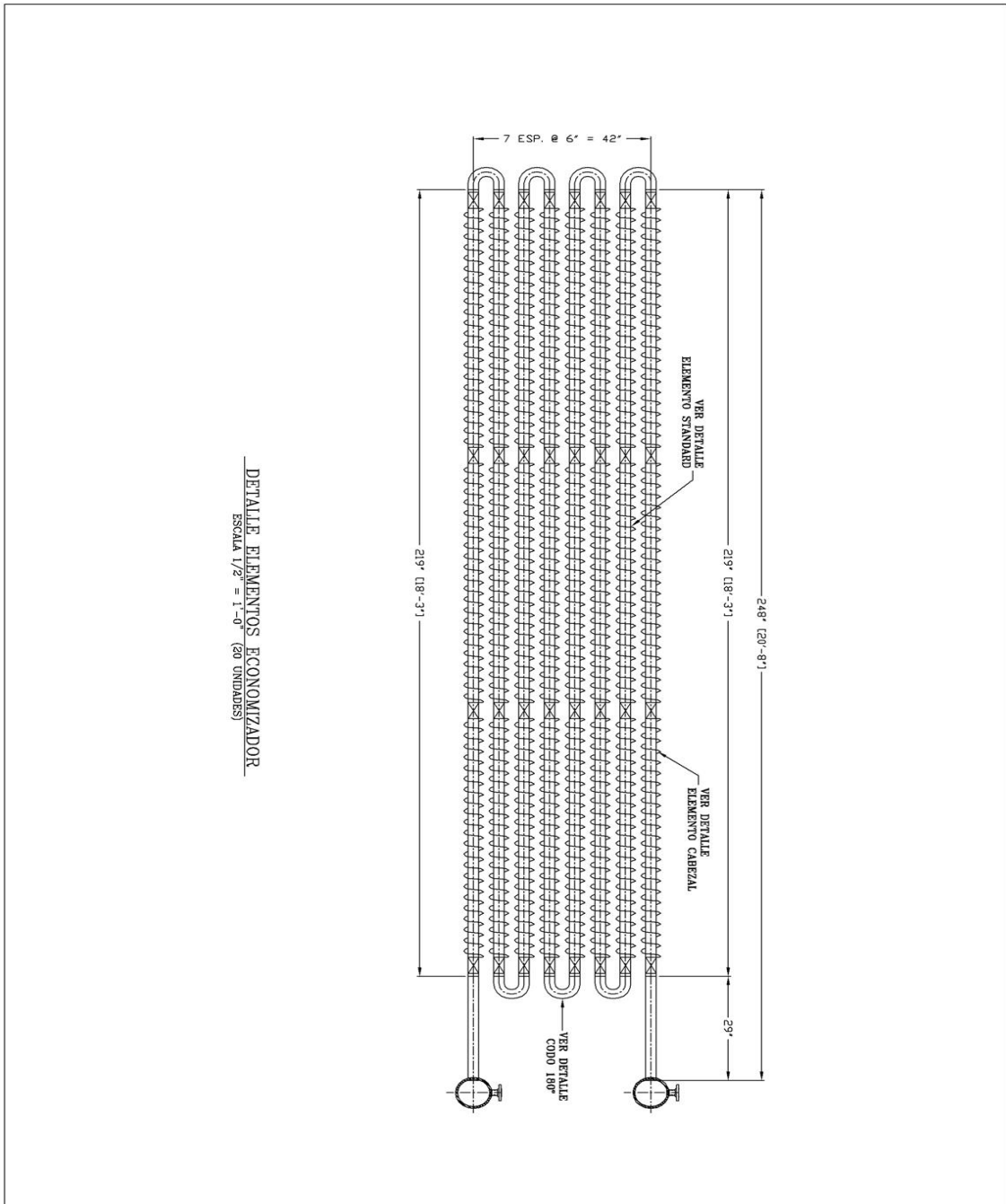
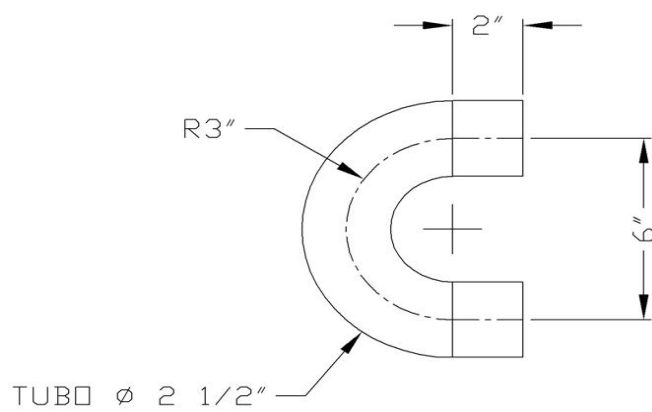


Figura 14. Detalle de los codos para el economizador



DETALLE CODO 180°
ESCALA 1 1/2" = 1'-0" (112 UNIDADES)

2.5 Realizar comparaciones de la eficiencia de la caldera

2.5.1 Eficiencia de la caldera

La eficiencia es una medida del aprovechamiento del combustible por la caldera al generar una determinada cantidad de vapor. No es económicamente factible la fabricación de una caldera que funcione con muy pocas pérdidas de calor o si ellas y por consiguiente, la eficiencia de una caldera siempre es menor del 100%. No obstante, algunas de las pérdidas de calor pueden reducirse al mínimo o eliminarse mediante prácticas apropiadas de operación y mantenimiento. La eficiencia máxima se obtiene cuando la combustión es completa y se reduce al mínimo las pérdidas.

2.5.2 Calcular la eficiencia de la caldera con economizador

Para realizar el cálculo de la eficiencia se utilizaron diferentes parámetros de operación de la caldera, mencionados a continuación.

La temperatura del agua de alimentación es de 175 °C, la presión de la caldera es 233 psi realizando la conversión el resultado es 1.60MPa, la entalpia del agua de alimentación según tablas es de 487.01KJ/kg realizando la conversión el resultado es 116.35 Kcal/Kg, la entalpia del vapor según tablas e interpolando es 708.60 Kcal/Kg, el peso del combustible (bagazo) es 16,666.67Kg/hr, el poder calorífico del bagazo que se calculó anteriormente es 4,210.38 Btu/lbs., llevando a cabo las conversiones, se determinó que dividiendo esta cantidad entre 1.8 da como resultado 2,339.10 Kcal/Kg.

Con estos parámetros se procede al cálculo de la eficiencia de la caldera.

$$E.cad. = \frac{m_s (h - h_f)}{(m_f) \times (VCB)} \times (100)$$

En donde:

m_s = peso del vapor producido por la caldera en Kg/hr

h = entalpía del vapor a presión y temperatura en Kcal/Kg

h_f = entalpia del agua de alimentación de la caldera en Kcal/Kg

m_f = peso total del combustible quemado en Kg/hr

VCB = Poder calorífico del combustible (bagazo) en Kcal/Kg

$$E.cad = \frac{(55,454.55) \times (708.60 - 116.35)}{(16,666.67) \times (2,339.10)} \times (100)$$

E.cad. = 84%

2.5.3 Calcular la eficiencia de la caldera sin economizador

La temperatura del agua de alimentación es de 105 °C, la presión de la caldera es 220 psi realizando la conversión el resultado es 1.50MPa, la entalpía del agua de alimentación según tablas es de 440.28 KJ/kg realizando la conversión el resultado es 105.18 Kcal/Kg, la entalpía del vapor según tablas es 692.64 Kca/Kg, el peso del combustible (bagazo) es 16,666.67Kg/hr, el poder calorífico del bagazo que se calculó anteriormente es 4,210.38 Btu/lbs., llevando a cabo las conversiones, se determinó que dividiendo esta cantidad entre 1.8 da como resultado 2,339.10 Kcal/Kg.

Con estos parámetros se procede al cálculo de la eficiencia de la caldera.

$$E.cad. = \frac{m_s (h - h_f)}{(m_f) \times (VCB)} \times (100)$$

En donde:

m_s = peso del vapor producido por la caldera en Kg/hr

h = entalpía del vapor a presión y temperatura en Kcal/Kg

h_f = entalpía del agua de alimentación de la caldera en Kcal/Kg

m_f = peso total del combustible quemado en Kg/hr

VCB = Poder calorífico del combustible (bagazo) en Kcal/Kg

$$E.cad = \frac{(52,747.72) \times (692.64 - 105.18)}{(16,666.67) \times (2,339.10)} \times (100)$$

E.cad. = 79%

2.5.4 Funcionamiento del sistema economizador- caldera

Basados en la figura 15, se describirá la forma en que trabajará el proyecto. Una vez que se encuentra acoplado a la caldera.

En el punto 1 se tiene agua procedente de dos fuente, disponible para ser bombeada hacia la caldera. Esta dos fuentes son el retorno de condensado obtenido del proceso de la planta, como del calor de vaporización que el vapor ha cedido a las turbinas respectivas. Es decir, cuando el vapor transfiere calor pierde su energía interna de vaporización, manifestándose este fenómeno en el descenso de temperatura, y en consecuencia su cambio de estado de gaseoso a líquido. La segunda fuente de alimentación es el agua de pozo, que ha pasado por un proceso de ablandamiento en caliente y deaireación.

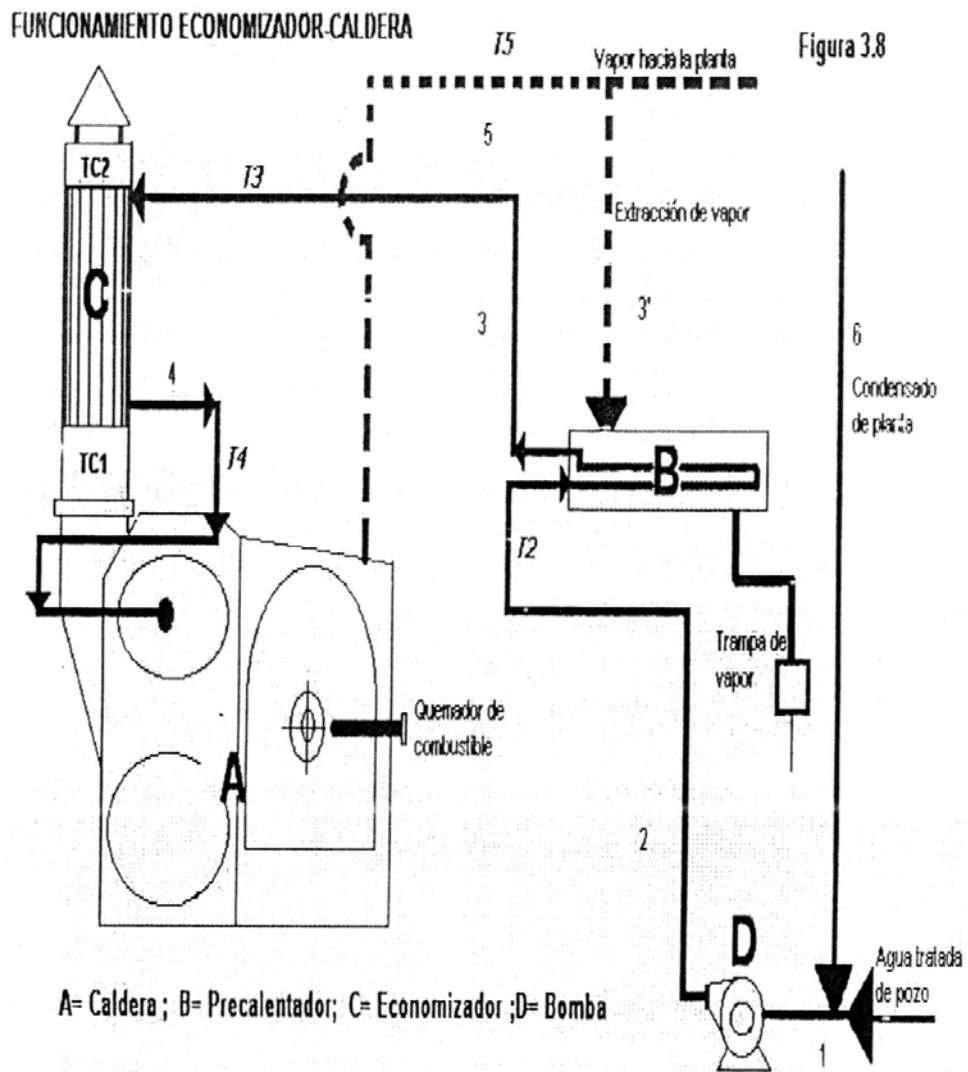
Del punto 2 el agua de alimentación ha sido comprimida por la bomba a 300 P.S.I. (20.68 bar), conservando aún sus condiciones de temperatura. Antes de ser inyectada en la caldera, el agua debe incrementar su temperatura, tomando energía calorífica del vapor en proceso de intercambio del Precalentador y principalmente de los gases de combustión, cuando pasa por el economizador. Si el agua ingresa al economizador por debajo de la temperatura mínima recomendada, los gases de combustión pierden gran parte de su calor a presión constante.

Este fenómeno provoca que el vapor del agua contenido en dichos gases, se condense, y al entrar en contacto íntimo con el dióxido de azufre (SO_2) y trióxido de carbono (SO_3) reaccionen como ácido sulfúrico (H_2SO_4). El ácido sulfúrico es altamente corrosivo y en pocos meses destruye el economizador. Cuando el agua alcanza el estado 3, ingresa entonces al economizador. Es aquí donde se realiza el intercambio de energía que el proyecto propone. Los gases de combustión ingresarán al economizador procedente del horno de la caldera a una temperatura TC1 . La TC1 tiene el mismo valor que la temperatura con que el agua saldrá del economizador (T4); la temperatura T3 con que ingresa el agua al economizador equivale a la temperatura con que sale los gases de combustión de la chimenea al ambiente. Si la temperatura T3 es muy fría, los gases se enfrían tanto a la salida, que provoca corrosión.

Al salir el agua del economizador a la temperatura T_4 ingresa a la caldera. Este incremento de temperatura constituye un nivel de entalpía más alto en el agua. Termodinámicamente se sabe que mientras mayor sea la entalpía del fluido que ingresa a la caldera, menor será la entalpía de vaporización para convertir el agua en vapor. Dicho en otras palabras, el horno necesitaría menor volumen de bagazo para vaporizar el mismo volumen de agua que ingresa.

Al salir el vapor de la caldera se encuentra a una temperatura T_5 . De esta extracción se derivan tres sangrados: un para soplar la caldera, otro para soplar el economizador y el que va para el proceso de la planta. Cuando el vapor cede su energía, cae su presión y consecuentemente su temperatura desciende hasta una temperatura T_6 . Cuando este condensado se enfría alcanza nuevamente el estado T_1 mezclándose con el agua tratada. Aquí se repite nuevamente el ciclo.

Figura 15. Funcionamiento economizador - caldera



Fuente: Kentube company. Fuel economizer.

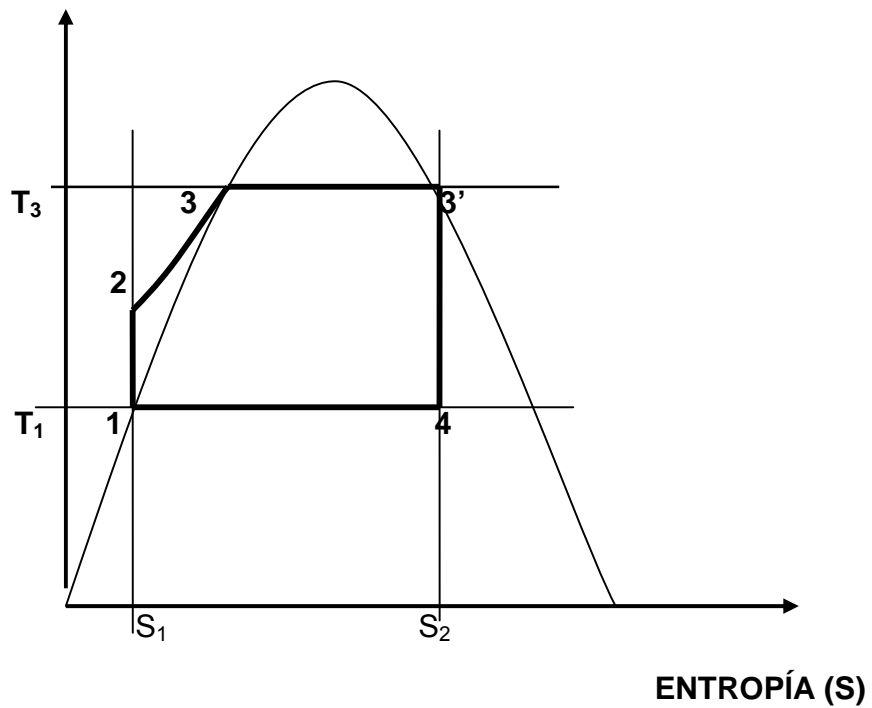
Análisis del diagrama T-S

El análisis termodinámico del funcionamiento economizador- caldera se detalla en las siguientes gráficas de temperatura vrs. entropía.

Figura 16. Diagrama temperatura vrs. entropía sin economizador

DIAGRAMA TEMPERATURA vrs. ENTROPÍA SIN ECONOMIZADOR

TEMPERATURA (T)



Fuente: Kentube company. Fuel economizer

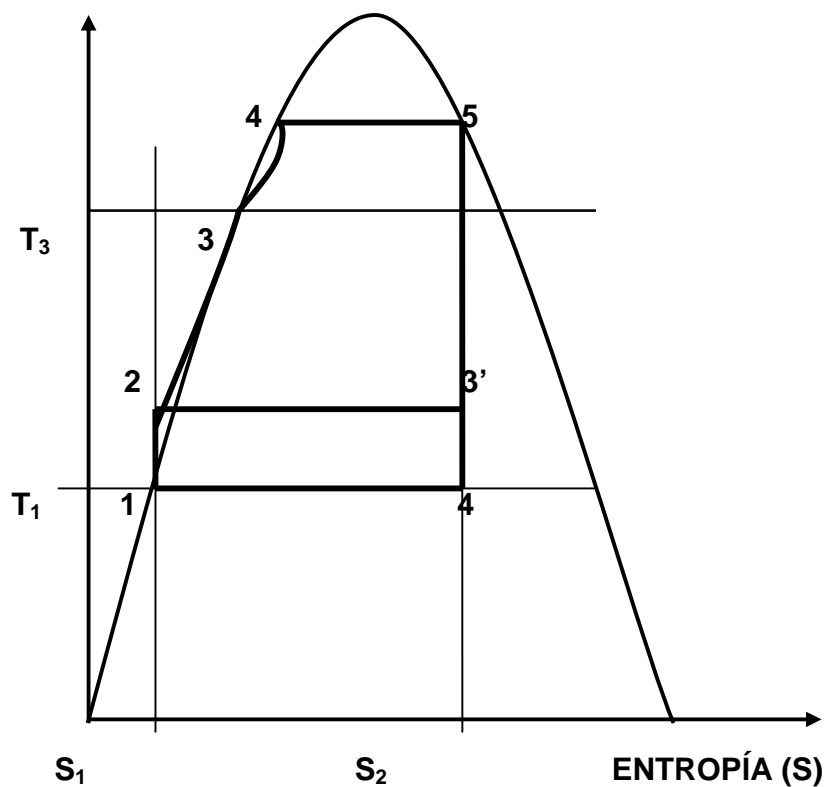
Los procesos termodinámicos en el diagrama de la figura 16 son:

- 1-2 Compresión isoentrópica en la bomba D.
- 1-3 Adición de calor a presión constante en la caldera.
- 1-4 Expansión isoentrópica en las turbinas
- 4-1 Enfriamiento a presión constante líneas de condensado.

Figura 17. Diagrama temperatura vrs. entropía con economizador

DIAGRAMA TEMPERATURA vrs. ENTROPÍA CON ECONOMIZADOR

TEMPERATURA (T)



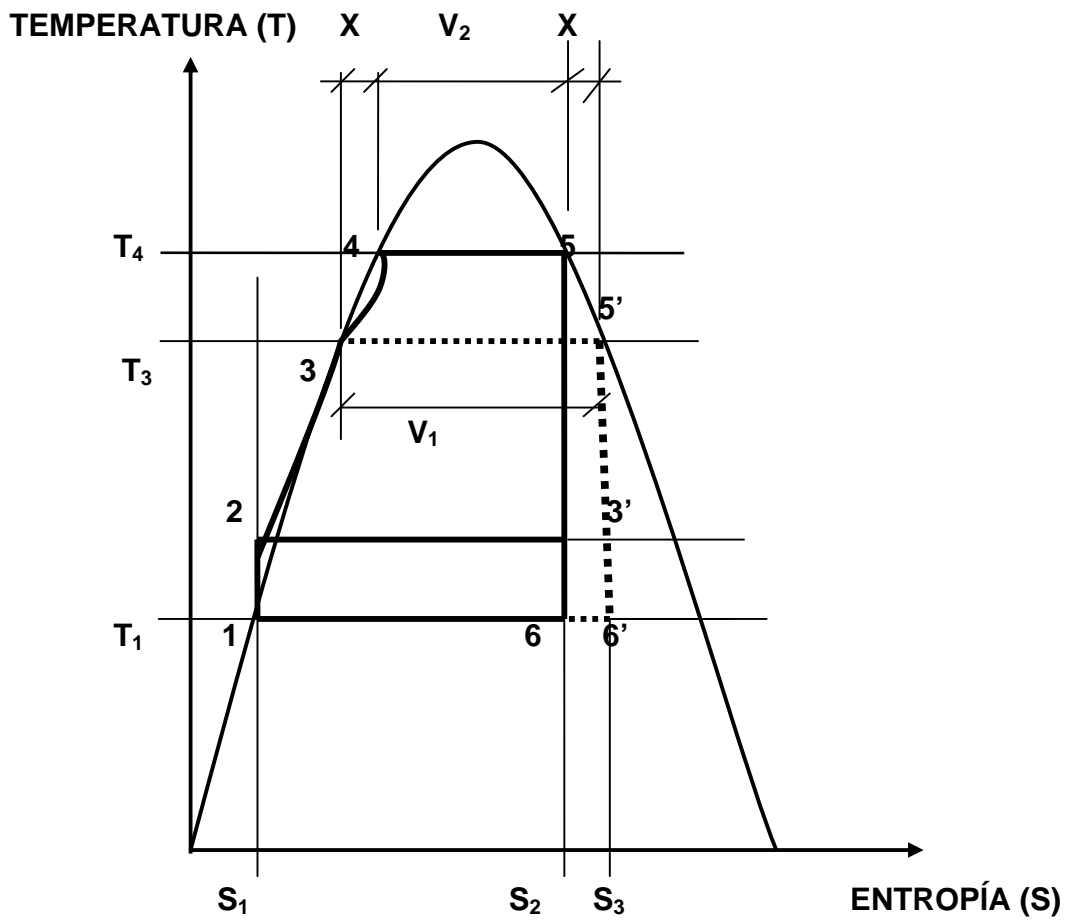
Fuente: Kentube company. Fuel economizer

Los procesos termodinámicos en el diagrama de la figura 17 son:

- 1-2 Compresión isoentrópica en la bomba D
- 2-3-4-5 Adición de calor a presión constante debido a la caldera, el
 Precalentador y el economizador.
- 3-4 Adición de calor gracias al economizador.
- 5-4 Expansión isoentrópica en las turbinas
- 4-1 Enfriamiento a presión constante en las líneas de condensado.

Figura 18. Diagrama temperatura vrs entropía, análisis comparativo

DIAGRAMA TEMPERATURA vrs. ENTROPÍA ANÁLISIS COMPARATIVO



Fuente: Kentube company. Fuel economizer

Es el proceso termodinámico que muestra la figura 18 se observa que cuando la caldera está operando sin el economizador de combustible, la línea de vaporización a presión constante es de 3-5'. Toda esta vaporización del agua la realiza el quemador de combustible, utilizando para ello un volumen v_1 de combustible, bagazo. Cuando se utiliza el economizador, la línea de vaporización es de 4-5; estos tramos designados con X suman 2X. El valor 2X representa el calentamiento del agua aprovechado del calor de los gases de combustión, y en consecuencia el uso del volumen v_2 del bagazo para la vaporización. V_1 es el volumen del bagazo utilizado sin el economizador. El $DV = V_1 - V_2$, representa en el diagrama, el ahorro de combustible bagazo que propone el proyecto.

CONCLUSIONES

1. Las pérdidas de eficiencia en la caldera son originadas por el calor arrastrado en la chimenea, por el vapor del agua presente en los gases de combustión, combustible no quemado, el calor perdido a través del aislamiento, incrustación en los tubos de la caldera y el calor que transporta la purga.
2. En la caldera dos, se dan mayores pérdidas debido a que no cuenta con un economizador de combustible.
3. Al aumentar la temperatura del agua de alimentación, retornando adecuadamente todos los condensados al sistema de agua de alimentación, se disminuye el consumo de combustible necesario para elevar la temperatura del agua al punto de ebullición.
4. La implementación de equipos que recuperen el calor de los gases de la chimenea, ayuda a mejorar la eficiencia de la caldera en un 5%, disminuyendo por ende los costos de operación.
5. Se estableció que la instalación de un economizador, varía técnicamente de acuerdo con la capacidad nominal de la caldera, el mantenimiento, el precalentamiento y tratamiento del agua.

6. Después de los respectivos cálculos, se concluye que la caldera es más eficiente, al instalar un economizador de combustible, que sin economizador.

RECOMENDACIONES

1. Dar a conocer a los operadores y jefes de turno, recomendaciones para la operación adecuada de los equipos involucrados en la generación de vapor.
2. Crear guías o rutinas de inspección de los equipos, maquinarias y sistemas de seguridad, para monitorear el funcionamiento de la caldera, a fin de reducir paradas innecesarias.
3. Instalar un economizador de combustible en la caldera que desecha grandes cantidades de calor en los gases de combustión. Con la finalidad de mejorar la eficiencia de la caldera, tomando en cuenta el tipo de caldera.
4. Al instalar el economizador en la caldera, la distancia entre la salida de los gases de la caldera y el economizador debe ser lo más corta posible, para aprovechar mejor el calor que contiene el gas de combustión.
5. Tomar en cuenta las condiciones de la caldera para hacerle mantenimiento o limpieza con agua a alta presión a los tubos, verificando el grado de incrustación y corrosión, con el fin de evaluar los resultados del tratamiento químico que se le está dando al agua de alimentación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial.
Ahorro de energía en sistema de vapor. Guatemala: s.e. 1989.
223 pp.
2. Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial.
Mejoramiento de la eficiencia de operación de calderas de vapor.
Guatemala: s.e. 1989. 153 pp.
3. Kohan L. Anthony. **Manual de calderas.** España: McGraw Hill,
2000 800 pp.
4. Severns. **Producción de energía mediante aire, vapor o gas.** España:
Reverte. s.a. 487 pp.
5. Emile Hugot **Manual para ingenieros azucareros.** (en español.
Editorial Continental, S.A. septiembre de 1963), pp. 617-636.
6. Meade Spencer Jorge **Manual del azúcar de caña.** (9ª. Ed. España:
Montaner y Simón, S.A. 1967), pp. 66.
7. Huang Francis **Ingeniería termodinámica, fundamentos y
aplicaciones.** (México: Editorial CECSA, 1981) pp. 54-55.

8. De La Cruz Muñoz, Jorge Fernando. Operación de calderas en la planta de fuerza de ingenio la unión. Guatemala: Editorial universitaria, 1994) pp. 39-44.

9. Montejo R, Walter. Mejoramiento en la producción de vapor en un Ingenio azucarero. (Trabajo de Graduación: Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1979) pp. 100.

ANEXOS 1

728
TERMODINÁMICA

TABLA A.4

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 | | |
|-------------------|-------------------------------------|---|------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| | | Líqu. sat., v _f | Vap. sat., v _g | Líqu. sat., u _f | Evap., u _{fg} | Vap. sat., u _g | Líqu. sat., h _f | Evap., h _{fg} | Vap. sat., h _g | Líqu. sat., s _f | Evap., s _{fg} | Vap. sat., s _g |
| 0.01 | 0.6113 | 0.001000 | 206.14 | 0.0 | 2 375.3 | 2 375.3 | 0.01 | 2 501.3 | 2 501.4 | 0.000 | 9.1562 | 9.1562 |
| 5 | 0.8721 | 0.001000 | 147.12 | 20.97 | 2 361.3 | 2 382.3 | 20.98 | 2 489.6 | 2 510.6 | 0.0761 | 8.9496 | 9.0257 |
| 10 | 1.2276 | 0.001000 | 106.38 | 42.00 | 2 347.2 | 2 389.2 | 42.01 | 2 477.7 | 2 519.8 | 0.1510 | 8.7498 | 8.9008 |
| 15 | 1.7051 | 0.001001 | 77.93 | 62.99 | 2 333.1 | 2 396.1 | 62.99 | 2 465.9 | 2 528.9 | 0.2245 | 8.5569 | 8.7814 |
| 20 | 2.339 | 0.001002 | 57.79 | 83.95 | 2 319.0 | 2 402.9 | 83.96 | 2 454.1 | 2 538.1 | 0.2966 | 8.3706 | 8.6672 |
| 25 | 3.169 | 0.001003 | 43.36 | 104.88 | 2 304.9 | 2 409.8 | 104.89 | 2 442.3 | 2 547.2 | 0.3674 | 8.1905 | 8.5580 |
| 30 | 4.246 | 0.001004 | 32.89 | 125.78 | 2 290.8 | 2 416.6 | 125.79 | 2 430.5 | 2 556.3 | 0.4369 | 8.0164 | 8.4533 |
| 35 | 5.628 | 0.001006 | 25.22 | 146.67 | 2 276.7 | 2 423.4 | 146.68 | 2 418.6 | 2 565.3 | 0.5053 | 7.8478 | 8.3531 |
| 40 | 7.384 | 0.001008 | 19.52 | 167.56 | 2 262.6 | 2 430.1 | 167.57 | 2 406.7 | 2 574.3 | 0.5725 | 7.6845 | 8.2570 |
| 45 | 9.593 | 0.001010 | 15.26 | 188.44 | 2 248.4 | 2 436.8 | 188.45 | 2 394.8 | 2 583.2 | 0.6387 | 7.5261 | 8.1648 |
| 50 | 12.349 | 0.001012 | 12.03 | 209.32 | 2 234.2 | 2 443.5 | 209.33 | 2 382.7 | 2 592.1 | 0.7038 | 7.3725 | 8.0763 |
| 55 | 15.758 | 0.001015 | 9.568 | 230.21 | 2 219.9 | 2 450.1 | 230.23 | 2 370.7 | 2 600.9 | 0.7679 | 7.2234 | 7.9913 |
| 60 | 19.940 | 0.001017 | 7.671 | 251.11 | 2 205.5 | 2 456.6 | 251.13 | 2 358.5 | 2 609.6 | 0.8312 | 7.0784 | 7.9096 |
| 65 | 25.03 | 0.001020 | 6.197 | 272.02 | 2 191.1 | 2 463.1 | 272.06 | 2 346.2 | 2 618.3 | 0.8935 | 6.9375 | 7.8310 |
| 70 | 31.19 | 0.001023 | 5.042 | 292.95 | 2 176.6 | 2 469.6 | 292.98 | 2 333.8 | 2 626.8 | 0.9549 | 6.8004 | 7.7553 |
| 75 | 38.58 | 0.001026 | 4.131 | 313.90 | 2 162.0 | 2 475.9 | 313.93 | 2 321.4 | 2 635.3 | 1.0155 | 6.6669 | 7.6824 |
| 80 | 47.39 | 0.001029 | 3.407 | 334.86 | 2 147.4 | 2 482.2 | 334.91 | 2 308.8 | 2 643.7 | 1.0753 | 6.5369 | 7.6122 |
| 85 | 57.83 | 0.001033 | 2.828 | 355.84 | 2 132.6 | 2 488.4 | 355.90 | 2 296.0 | 2 651.9 | 1.1343 | 6.4102 | 7.5445 |
| 90 | 70.14 | 0.001036 | 2.361 | 376.85 | 2 117.7 | 2 494.5 | 376.92 | 2 283.2 | 2 660.1 | 1.1925 | 6.2866 | 7.4791 |
| 95 | 84.55 | 0.001040 | 1.982 | 397.88 | 2 102.7 | 2 500.6 | 397.96 | 2 270.2 | 2 668.1 | 1.2500 | 6.1659 | 7.4159 |
| Presión sat., MPa | | | | | | | | | | | | |
| 100 | 0.10135 | 0.001044 | 1.6729 | 418.94 | 2 087.6 | 2 506.5 | 419.04 | 2 257.0 | 2 676.1 | 1.3069 | 6.0480 | 7.3549 |
| 105 | 0.12082 | 0.001048 | 1.4194 | 440.02 | 2 072.3 | 2 512.4 | 440.15 | 2 243.7 | 2 683.8 | 1.3630 | 5.9328 | 7.2958 |
| 110 | 0.14327 | 0.001052 | 1.2102 | 461.14 | 2 057.0 | 2 518.1 | 461.30 | 2 230.2 | 2 691.5 | 1.4185 | 5.8202 | 7.2387 |
| 115 | 0.16906 | 0.001056 | 1.0366 | 482.30 | 2 041.4 | 2 523.7 | 482.48 | 2 216.5 | 2 699.0 | 1.4734 | 5.7100 | 7.1833 |
| 120 | 0.19853 | 0.001060 | 0.8919 | 503.50 | 2 025.8 | 2 529.3 | 503.71 | 2 202.6 | 2 706.3 | 1.5276 | 5.6020 | 7.1296 |
| 125 | 0.2321 | 0.001065 | 0.7706 | 524.74 | 2 009.9 | 2 534.6 | 524.99 | 2 188.5 | 2 713.5 | 1.5813 | 5.4962 | 7.0775 |
| 130 | 0.2701 | 0.001070 | 0.6685 | 546.02 | 1 993.9 | 2 539.9 | 546.31 | 2 174.2 | 2 720.5 | 1.6344 | 5.3925 | 7.0269 |
| 135 | 0.3130 | 0.001075 | 0.5822 | 567.35 | 1 977.7 | 2 545.0 | 567.69 | 2 159.6 | 2 727.3 | 1.6870 | 5.2907 | 6.9777 |
| 140 | 0.3613 | 0.001080 | 0.5089 | 588.74 | 1 961.3 | 2 550.0 | 589.13 | 2 144.7 | 2 733.9 | 1.7391 | 5.1908 | 6.9299 |
| 145 | 0.4154 | 0.001085 | 0.4463 | 610.18 | 1 944.7 | 2 554.9 | 610.63 | 2 129.6 | 2 740.3 | 1.7907 | 5.0926 | 6.8833 |
| 150 | 0.4758 | 0.001091 | 0.3928 | 631.68 | 1 927.9 | 2 559.5 | 632.20 | 2 114.3 | 2 746.5 | 1.8418 | 4.9960 | 6.8379 |
| 155 | 0.5431 | 0.001096 | 0.3468 | 653.24 | 1 910.8 | 2 564.1 | 653.84 | 2 098.6 | 2 752.4 | 1.8925 | 4.9010 | 6.7935 |
| 160 | 0.6178 | 0.001102 | 0.3071 | 674.87 | 1 893.5 | 2 568.4 | 675.55 | 2 082.6 | 2 758.1 | 1.9427 | 4.8075 | 6.7502 |
| 165 | 0.7005 | 0.001108 | 0.2727 | 696.56 | 1 876.0 | 2 572.5 | 697.34 | 2 066.2 | 2 763.5 | 1.9925 | 4.7153 | 6.7078 |
| 170 | 0.7917 | 0.001114 | 0.2428 | 718.33 | 1 858.1 | 2 576.5 | 719.21 | 2 049.5 | 2 768.7 | 2.0419 | 4.6244 | 6.6663 |
| 175 | 0.8920 | 0.001121 | 0.2168 | 740.17 | 1 840.0 | 2 580.2 | 741.17 | 2 032.4 | 2 773.6 | 2.0909 | 4.5347 | 6.6256 |
| 180 | 1.0021 | 0.001127 | 0.19405 | 762.09 | 1 821.6 | 2 583.7 | 763.22 | 2 015.0 | 2 778.2 | 2.1396 | 4.4461 | 6.5857 |
| 185 | 1.1227 | 0.001134 | 0.17409 | 784.10 | 1 802.9 | 2 587.0 | 785.37 | 1 997.1 | 2 782.4 | 2.1879 | 4.3586 | 6.5465 |
| 190 | 1.2544 | 0.001141 | 0.15654 | 806.19 | 1 783.8 | 2 590.0 | 807.62 | 1 978.8 | 2 786.4 | 2.2359 | 4.2720 | 6.5079 |
| 195 | 1.3978 | 0.001149 | 0.14105 | 828.37 | 1 764.4 | 2 592.8 | 829.98 | 1 960.0 | 2 790.0 | 2.2835 | 4.1863 | 6.4698 |

TABLA A.4

Agua saturada-Tabla de temperaturas (Conclusión)

| Temp., T °C | Pres. sat., P_{sat} MPa | Volumen específico, m^3/kg | | Energía interna, kJ/kg | | | Entalpía, kJ/kg | | | Entropía, $kJ/kg \cdot K$ | | |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|--------------------|------------------------|------------------------------|--------------------|------------------------|
| | | Líqu. sat., v_f | Vap. sat., v_g | Líqu. sat., u_f | Evap., u_{fg} | Vap. sat., u_g | Líqu. sat., h_f | Evap., h_{fg} | Vap. sat., h_g | Líqu. sat., s_f | Evap., s_{fg} | Vap. sat., s_g |
| 200 | 1.5538 | 0.001157 | 0.12736 | 850.65 | 1744.7 | 2595.3 | 852.45 | 1940.7 | 2793.2 | 2.3309 | 4.1014 | 6.4323 |
| 205 | 1.7230 | 0.001164 | 0.11521 | 873.04 | 1724.5 | 2597.5 | 875.04 | 1921.0 | 2796.0 | 2.3780 | 4.0172 | 6.3952 |
| 210 | 1.9062 | 0.001173 | 0.10441 | 895.53 | 1703.9 | 2599.5 | 897.76 | 1900.7 | 2798.5 | 2.4248 | 3.9337 | 6.3585 |
| 215 | 2.104 | 0.001181 | 0.09479 | 918.14 | 1682.9 | 2601.1 | 920.62 | 1879.9 | 2800.5 | 2.4714 | 3.8507 | 6.3221 |
| 220 | 2.318 | 0.001190 | 0.08619 | 940.87 | 1661.5 | 2602.4 | 943.62 | 1858.5 | 2802.1 | 2.5178 | 3.7683 | 6.2861 |
| 225 | 2.548 | 0.001199 | 0.07849 | 963.73 | 1639.6 | 2603.3 | 966.78 | 1836.5 | 2803.3 | 2.5639 | 3.6863 | 6.2503 |
| 230 | 2.795 | 0.001209 | 0.07158 | 986.74 | 1617.2 | 2603.9 | 990.12 | 1813.8 | 2804.0 | 2.6099 | 3.6047 | 6.2146 |
| 235 | 3.060 | 0.001219 | 0.06537 | 1009.89 | 1594.2 | 2604.1 | 1013.62 | 1790.5 | 2804.2 | 2.6558 | 3.5233 | 6.1791 |
| 240 | 3.344 | 0.001229 | 0.05976 | 1033.21 | 1570.8 | 2604.0 | 1037.32 | 1766.5 | 2803.8 | 2.7015 | 3.4422 | 6.1437 |
| 245 | 3.648 | 0.001240 | 0.05471 | 1056.71 | 1546.7 | 2603.4 | 1061.23 | 1741.7 | 2803.0 | 2.7472 | 3.3612 | 6.1083 |
| 250 | 3.973 | 0.001251 | 0.05013 | 1080.39 | 1522.0 | 2602.4 | 1085.36 | 1716.2 | 2801.5 | 2.7927 | 3.2802 | 6.0730 |
| 255 | 4.319 | 0.001263 | 0.04598 | 1104.28 | 1496.7 | 2600.9 | 1109.73 | 1689.8 | 2799.5 | 2.8383 | 3.1992 | 6.0375 |
| 260 | 4.688 | 0.001276 | 0.04221 | 1128.39 | 1470.6 | 2599.0 | 1134.37 | 1662.5 | 2796.9 | 2.8838 | 3.1181 | 6.0019 |
| 265 | 5.081 | 0.001289 | 0.03877 | 1152.74 | 1443.9 | 2596.6 | 1159.28 | 1634.4 | 2793.6 | 2.9294 | 3.0368 | 5.9662 |
| 270 | 5.499 | 0.001302 | 0.03564 | 1177.36 | 1416.3 | 2593.7 | 1184.51 | 1605.2 | 2789.7 | 2.9751 | 2.9551 | 5.9301 |
| 275 | 5.942 | 0.001317 | 0.03279 | 1202.25 | 1387.9 | 2590.2 | 1210.07 | 1574.9 | 2785.0 | 3.0208 | 2.8730 | 5.8938 |
| 280 | 6.412 | 0.001332 | 0.03017 | 1227.46 | 1358.7 | 2586.1 | 1235.99 | 1543.6 | 2779.6 | 3.0668 | 2.7903 | 5.8571 |
| 285 | 6.909 | 0.001348 | 0.02777 | 1253.00 | 1328.4 | 2581.4 | 1262.31 | 1511.0 | 2773.3 | 3.1130 | 2.7070 | 5.8199 |
| 290 | 7.436 | 0.001366 | 0.02557 | 1278.92 | 1297.1 | 2576.0 | 1289.07 | 1477.1 | 2766.2 | 3.1594 | 2.6227 | 5.7821 |
| 295 | 7.993 | 0.001384 | 0.02354 | 1305.2 | 1264.7 | 2569.9 | 1316.3 | 1441.8 | 2758.1 | 3.2062 | 2.5375 | 5.7437 |
| 300 | 8.581 | 0.001404 | 0.02167 | 1332.0 | 1231.0 | 2563.0 | 1344.0 | 1404.9 | 2749.0 | 3.2534 | 2.4511 | 5.7045 |
| 305 | 9.202 | 0.001425 | 0.019948 | 1359.3 | 1195.9 | 2555.2 | 1372.4 | 1366.4 | 2738.7 | 3.3010 | 2.3633 | 5.6643 |
| 310 | 9.856 | 0.001447 | 0.018350 | 1387.1 | 1159.4 | 2546.4 | 1401.3 | 1326.0 | 2727.3 | 3.3493 | 2.2737 | 5.6230 |
| 315 | 10.547 | 0.001472 | 0.016867 | 1415.5 | 1121.1 | 2536.6 | 1431.0 | 1283.5 | 2714.5 | 3.3982 | 2.1821 | 5.5804 |
| 320 | 11.274 | 0.001499 | 0.015488 | 1444.6 | 1080.9 | 2525.5 | 1461.5 | 1238.6 | 2700.1 | 3.4480 | 2.0882 | 5.5362 |
| 330 | 12.845 | 0.001561 | 0.012996 | 1505.3 | 993.7 | 2498.9 | 1525.3 | 1140.6 | 2665.9 | 3.5507 | 1.8909 | 5.4417 |
| 340 | 14.586 | 0.001638 | 0.010797 | 1570.3 | 894.3 | 2464.6 | 1594.2 | 1027.9 | 2622.0 | 3.6594 | 1.6763 | 5.3357 |
| 350 | 16.513 | 0.001740 | 0.008813 | 1641.9 | 776.6 | 2418.4 | 1670.6 | 893.4 | 2563.9 | 3.7777 | 1.4335 | 5.2112 |
| 360 | 18.651 | 0.001893 | 0.006945 | 1725.2 | 626.3 | 2351.5 | 1760.5 | 720.3 | 2481.0 | 3.9147 | 1.1379 | 5.0526 |
| 370 | 21.03 | 0.002213 | 0.004925 | 1844.0 | 384.5 | 2228.5 | 1890.5 | 441.6 | 2332.1 | 4.1106 | 0.6865 | 4.7971 |
| 374.14 | 22.09 | 0.003155 | 0.003155 | 2029.6 | 0 | 2029.6 | 2099.3 | 0 | 2099.3 | 4.4298 | 0 | 4.4298 |

Fuente: Las tablas A-4 a la A-8 se adaptaron de Gordon J. Van Wylen y Richard E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, versión inglés/SI, 3a. ed. (Nueva York: John Wiley & Sons, 1986), pp. 635-651. Publicada originalmente en Joseph H. Keenan, Frederick G. Keyes, Philip G. Hill y Joan G. Moore, *Steam Tables*, Unidades SI (Nueva York: John Wiley & Sons, 1978).

TERMODINÁMICA

TABLA A.6

Agua sobrecalentada

| T °C | v m³/kg | u kJ/kg | h kJ/kg | s kJ/kg · K | v m³/kg | u kJ/kg | h kJ/kg | s kJ/kg · K | v m³/kg | u kJ/kg | h kJ/kg | s kJ/kg · K |
|-------------------------|------------|------------|------------|-------------------------|------------|------------|------------|-------------------------|------------|------------|------------|----------------|
| P = 0.01 MPa (45.81°C)* | | | | P = 0.05 MPa (81.33°C) | | | | P = 0.10 MPa (99.63°C) | | | | |
| Sat. ¹ | 14.674 | 2 437.9 | 2 584.7 | 8.1502 | 3.240 | 2 483.9 | 2 645.9 | 7.5939 | 1.6940 | 2 506.1 | 2 675.5 | 7.3594 |
| 50 | 14.869 | 2 443.9 | 2 592.6 | 8.1749 | | | | | | | | |
| 100 | 17.196 | 2 515.5 | 2 687.5 | 8.4479 | 3.418 | 2 511.6 | 2 682.5 | 7.6947 | 1.6958 | 2 506.7 | 2 676.2 | 7.3614 |
| 150 | 19.512 | 2 587.9 | 2 783.0 | 8.6882 | 3.889 | 2 585.6 | 2 780.1 | 7.9401 | 1.9364 | 2 582.8 | 2 776.4 | 7.6134 |
| 200 | 21.825 | 2 661.3 | 2 879.5 | 8.9038 | 4.356 | 2 659.9 | 2 877.7 | 8.1580 | 2.172 | 2 658.1 | 2 875.3 | 7.8343 |
| 250 | 24.136 | 2 736.0 | 2 977.3 | 9.1002 | 4.820 | 2 735.0 | 2 976.0 | 8.3556 | 2.406 | 2 733.7 | 2 974.3 | 8.0333 |
| 300 | 26.445 | 2 812.1 | 3 076.5 | 9.2813 | 5.284 | 2 811.3 | 3 075.5 | 8.5373 | 2.639 | 2 810.4 | 3 074.3 | 8.2158 |
| 400 | 31.063 | 2 968.9 | 3 279.6 | 9.6077 | 6.209 | 2 968.5 | 3 278.9 | 8.8642 | 3.103 | 2 967.9 | 3 278.2 | 8.5435 |
| 500 | 35.679 | 3 132.3 | 3 489.1 | 9.8978 | 7.134 | 3 132.0 | 3 488.7 | 9.1546 | 3.565 | 3 131.6 | 3 488.1 | 8.8342 |
| 600 | 40.295 | 3 302.5 | 3 705.4 | 10.1608 | 8.057 | 3 302.2 | 3 705.1 | 9.4178 | 4.028 | 3 301.9 | 3 704.4 | 9.0976 |
| 700 | 44.911 | 3 479.6 | 3 928.7 | 10.4028 | 8.981 | 3 479.4 | 3 928.5 | 9.6599 | 4.490 | 3 479.2 | 3 928.2 | 9.3398 |
| 800 | 49.526 | 3 663.8 | 4 159.0 | 10.6281 | 9.904 | 3 663.6 | 4 158.9 | 9.8852 | 4.952 | 3 663.5 | 4 158.6 | 9.5652 |
| 900 | 54.141 | 3 855.0 | 4 396.4 | 10.8396 | 10.828 | 3 854.9 | 4 396.3 | 10.0967 | 5.414 | 3 854.8 | 4 396.1 | 9.7767 |
| 1 000 | 58.757 | 4 053.0 | 4 640.6 | 11.0393 | 11.751 | 4 052.9 | 4 640.5 | 10.2964 | 5.875 | 4 052.8 | 4 640.3 | 9.9764 |
| 1 100 | 63.372 | 4 257.5 | 4 891.2 | 11.2287 | 12.674 | 4 257.4 | 4 891.1 | 10.4859 | 6.337 | 4 257.3 | 4 891.0 | 10.1659 |
| 1 200 | 67.987 | 4 467.9 | 5 147.8 | 11.4091 | 13.597 | 4 467.8 | 5 147.7 | 10.6662 | 6.799 | 4 467.7 | 5 147.6 | 10.3463 |
| 1 300 | 72.602 | 4 683.7 | 5 409.7 | 11.5811 | 14.521 | 4 683.6 | 5 409.6 | 10.8382 | 7.260 | 4 683.5 | 5 409.5 | 10.5183 |
| P = 0.20 MPa (120.23°C) | | | | P = 0.30 MPa (133.55°C) | | | | P = 0.40 MPa (143.63°C) | | | | |
| Sat. | 0.8857 | 2 529.5 | 2 706.7 | 7.1272 | 0.6058 | 2 543.6 | 2 725.3 | 6.9919 | 0.4625 | 2 553.6 | 2 738.6 | 6.8959 |
| 150 | 0.9596 | 2 576.9 | 2 768.8 | 7.2795 | 0.6339 | 2 570.8 | 2 761.0 | 7.0778 | 0.4708 | 2 564.5 | 2 752.8 | 6.9299 |
| 200 | 1.0803 | 2 654.4 | 2 870.5 | 7.5066 | 0.7163 | 2 650.7 | 2 865.6 | 7.3115 | 0.5342 | 2 646.8 | 2 860.5 | 7.1706 |
| 250 | 1.1988 | 2 731.2 | 2 971.0 | 7.7086 | 0.7964 | 2 728.7 | 2 967.6 | 7.5166 | 0.5951 | 2 726.1 | 2 964.2 | 7.3789 |
| 300 | 1.3162 | 2 808.6 | 3 071.8 | 7.8926 | 0.8753 | 2 806.7 | 3 069.3 | 7.7022 | 0.6548 | 2 804.8 | 3 066.8 | 7.5662 |
| 400 | 1.5493 | 2 966.7 | 3 276.6 | 8.2218 | 1.0315 | 2 965.6 | 3 275.0 | 8.0330 | 0.7726 | 2 964.4 | 3 273.4 | 7.8985 |
| 500 | 1.7814 | 3 130.8 | 3 487.1 | 8.5133 | 1.1867 | 3 130.0 | 3 486.0 | 8.3251 | 0.8893 | 3 129.2 | 3 484.9 | 8.1913 |
| 600 | 2.013 | 3 301.4 | 3 704.0 | 8.7770 | 1.3414 | 3 300.8 | 3 703.2 | 8.5892 | 1.0055 | 3 300.2 | 3 702.4 | 8.4558 |
| 700 | 2.244 | 3 478.8 | 3 927.6 | 9.0194 | 1.4957 | 3 478.4 | 3 927.1 | 8.8319 | 1.1215 | 3 477.9 | 3 926.5 | 8.6987 |
| 800 | 2.475 | 3 663.1 | 4 158.2 | 9.2449 | 1.6499 | 3 662.9 | 4 157.8 | 9.0576 | 1.2372 | 3 662.4 | 4 157.3 | 8.9244 |
| 900 | 2.705 | 3 854.5 | 4 395.8 | 9.4566 | 1.8041 | 3 854.2 | 4 395.4 | 9.2692 | 1.3529 | 3 853.9 | 4 395.1 | 9.1362 |
| 1 000 | 2.937 | 4 052.5 | 4 640.0 | 9.6563 | 1.9581 | 4 052.3 | 4 639.7 | 9.4690 | 1.4685 | 4 052.0 | 4 639.4 | 9.3360 |
| 1 100 | 3.168 | 4 257.0 | 4 890.7 | 9.8458 | 2.1121 | 4 256.8 | 4 890.4 | 9.6585 | 1.5840 | 4 256.5 | 4 890.2 | 9.5256 |
| 1 200 | 3.399 | 4 467.5 | 5 147.5 | 10.0262 | 2.2661 | 4 467.2 | 5 147.1 | 9.8389 | 1.6996 | 4 467.0 | 5 146.8 | 9.7060 |
| 1 300 | 3.630 | 4 683.2 | 5 409.3 | 10.1982 | 2.4201 | 4 683.0 | 5 409.0 | 10.0110 | 1.8151 | 4 682.8 | 5 408.8 | 9.8780 |
| P = 0.50 MPa (151.86°C) | | | | P = 0.60 MPa (158.85°C) | | | | P = 0.80 MPa (170.43°C) | | | | |
| Sat. | 0.3749 | 2 561.2 | 2 748.7 | 6.8213 | 0.3157 | 2 567.4 | 2 756.8 | 6.7600 | 0.2404 | 2 576.8 | 2 769.1 | 6.6628 |
| 200 | 0.4249 | 2 642.9 | 2 855.4 | 7.0592 | 0.3520 | 2 638.9 | 2 850.1 | 6.9665 | 0.2608 | 2 630.6 | 2 839.3 | 6.8158 |
| 250 | 0.4744 | 2 723.5 | 2 960.7 | 7.2709 | 0.3938 | 2 720.9 | 2 957.2 | 7.1816 | 0.2931 | 2 715.5 | 2 950.0 | 7.0384 |
| 300 | 0.5226 | 2 802.9 | 3 064.2 | 7.4599 | 0.4344 | 2 801.0 | 3 061.6 | 7.3724 | 0.3241 | 2 797.2 | 3 056.5 | 7.2328 |
| 350 | 0.5701 | 2 882.6 | 3 167.7 | 7.6329 | 0.4742 | 2 881.2 | 3 165.7 | 7.5464 | 0.3544 | 2 878.2 | 3 161.7 | 7.4089 |
| 400 | 0.6173 | 2 963.2 | 3 271.9 | 7.7938 | 0.5137 | 2 962.1 | 3 270.3 | 7.7079 | 0.3843 | 2 959.7 | 3 267.1 | 7.5716 |
| 500 | 0.7109 | 3 128.4 | 3 483.9 | 8.0873 | 0.5920 | 3 127.6 | 3 482.8 | 8.0021 | 0.4433 | 3 126.0 | 3 480.6 | 7.8673 |
| 600 | 0.8041 | 3 299.6 | 3 701.7 | 8.3522 | 0.6697 | 3 299.1 | 3 700.9 | 8.2674 | 0.5018 | 3 297.9 | 3 699.4 | 8.1333 |
| 700 | 0.8969 | 3 477.5 | 3 925.9 | 8.5952 | 0.7472 | 3 477.0 | 3 925.3 | 8.5107 | 0.5601 | 3 476.2 | 3 924.2 | 8.3770 |
| 800 | 0.9896 | 3 662.1 | 4 156.9 | 8.8211 | 0.8245 | 3 661.8 | 4 156.5 | 8.7367 | 0.6181 | 3 661.1 | 4 155.6 | 8.6033 |
| 900 | 1.0822 | 3 853.6 | 4 394.7 | 9.0329 | 0.9017 | 3 853.4 | 4 394.4 | 8.9486 | 0.6761 | 3 852.8 | 4 393.7 | 8.8153 |
| 1 000 | 1.1747 | 4 051.8 | 4 639.1 | 9.2328 | 0.9788 | 4 051.5 | 4 638.8 | 9.1485 | 0.7340 | 4 051.0 | 4 638.2 | 9.0153 |
| 1 100 | 1.2672 | 4 256.3 | 4 889.9 | 9.4224 | 1.0559 | 4 256.1 | 4 889.6 | 9.3381 | 0.7919 | 4 255.6 | 4 889.1 | 9.2050 |
| 1 200 | 1.3596 | 4 466.8 | 5 146.6 | 9.6029 | 1.1330 | 4 466.5 | 5 146.3 | 9.5185 | 0.8497 | 4 466.1 | 5 145.9 | 9.3855 |
| 1 300 | 1.4521 | 4 682.5 | 5 408.6 | 9.7749 | 1.2101 | 4 682.3 | 5 408.3 | 9.6906 | 0.9076 | 4 681.8 | 5 407.9 | 9.5575 |

* La temperatura entre paréntesis es la temperatura de saturación a la presión especificada.

¹ Propiedades del vapor saturado a la presión especificada.

TABLA A.6

Agua sobrecalentada (Continuación)

| T °C | v m ³ /kg | u kJ/kg | h kJ/kg | s kJ/kg · K | v m ³ /kg | u kJ/kg | h kJ/kg | s kJ/kg · K | v m ³ /kg | u kJ/kg | h kJ/kg | s kJ/kg · K |
|--------------------------|-------------------------|------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------|------------|----------------|
| P = 1.00 MPa (179.91°C) | | | | P = 1.20 MPa (187.99°C) | | | | P = 1.40 MPa (195.07°C) | | | | |
| Sat. | 0.19444 | 2 583.6 | 2 778.1 | 6.5865 | 0.16333 | 2 588.8 | 2 784.8 | 6.5233 | 0.14084 | 2 592.8 | 2 790.0 | 6.4693 |
| 200 | 0.2060 | 2 621.9 | 2 827.9 | 6.6940 | 0.16930 | 2 612.8 | 2 815.9 | 6.5898 | 0.14302 | 2 603.1 | 2 803.3 | 6.4975 |
| 250 | 0.2327 | 2 709.9 | 2 942.6 | 6.9247 | 0.19234 | 2 704.2 | 2 935.0 | 6.8294 | 0.16350 | 2 698.3 | 2 927.2 | 6.7467 |
| 300 | 0.2579 | 2 793.2 | 3 051.2 | 7.1229 | 0.2138 | 2 789.2 | 3 045.8 | 7.0317 | 0.18228 | 2 785.2 | 3 040.4 | 6.9534 |
| 350 | 0.2825 | 2 875.2 | 3 157.7 | 7.3011 | 0.2345 | 2 872.2 | 3 153.6 | 7.2121 | 0.2003 | 2 869.2 | 3 149.5 | 7.1360 |
| 400 | 0.3066 | 2 957.3 | 3 263.9 | 7.4651 | 0.2548 | 2 954.9 | 3 260.7 | 7.3774 | 0.2178 | 2 952.5 | 3 257.5 | 7.3026 |
| 500 | 0.3541 | 3 124.4 | 3 478.5 | 7.7622 | 0.2946 | 3 122.8 | 3 476.3 | 7.6759 | 0.2521 | 3 121.1 | 3 474.1 | 7.6027 |
| 600 | 0.4011 | 3 296.8 | 3 697.9 | 8.0290 | 0.3339 | 3 295.6 | 3 696.3 | 7.9435 | 0.2860 | 3 294.4 | 3 694.8 | 7.8710 |
| 700 | 0.4478 | 3 475.3 | 3 923.1 | 8.2731 | 0.3729 | 3 474.4 | 3 922.0 | 8.1881 | 0.3195 | 3 473.6 | 3 920.8 | 8.1160 |
| 800 | 0.4943 | 3 660.4 | 4 154.7 | 8.4996 | 0.4118 | 3 659.7 | 4 153.8 | 8.4148 | 0.3528 | 3 659.0 | 4 153.0 | 8.3431 |
| 900 | 0.5407 | 3 852.2 | 4 392.9 | 8.7118 | 0.4505 | 3 851.6 | 4 392.2 | 8.6272 | 0.3861 | 3 851.1 | 4 391.5 | 8.5556 |
| 1 000 | 0.5871 | 4 050.5 | 4 637.6 | 8.9119 | 0.4892 | 4 050.0 | 4 637.0 | 8.8274 | 0.4192 | 4 049.5 | 4 636.4 | 8.7559 |
| 1 100 | 0.6335 | 4 255.1 | 4 888.6 | 9.1017 | 0.5278 | 4 254.6 | 4 888.0 | 9.0172 | 0.4524 | 4 254.1 | 4 887.5 | 8.9457 |
| 1 200 | 0.6798 | 4 465.6 | 5 145.4 | 9.2822 | 0.5665 | 4 465.1 | 5 144.9 | 9.1977 | 0.4855 | 4 464.7 | 5 144.4 | 9.1262 |
| 1 300 | 0.7261 | 4 681.3 | 5 407.4 | 9.4543 | 0.6051 | 4 680.9 | 5 407.0 | 9.3698 | 0.5186 | 4 680.4 | 5 406.5 | 9.2984 |
| P = 1.60 MPa (201.41°C) | | | | P = 1.80 MPa (207.15°C) | | | | P = 2.00 MPa (212.42°C) | | | | |
| Sat. | 0.12380 | 2 596.0 | 2 794.0 | 6.4218 | 0.11042 | 2 598.4 | 2 797.1 | 6.3794 | 0.09963 | 2 600.3 | 2 799.5 | 6.3409 |
| 225 | 0.13287 | 2 644.7 | 2 857.3 | 6.5518 | 0.11673 | 2 636.6 | 2 846.7 | 6.4808 | 0.10377 | 2 628.3 | 2 835.8 | 6.4147 |
| 250 | 0.14184 | 2 692.3 | 2 919.2 | 6.6732 | 0.12497 | 2 686.0 | 2 911.0 | 6.6066 | 0.11144 | 2 679.6 | 2 902.5 | 6.5453 |
| 300 | 0.15862 | 2 781.1 | 3 034.8 | 6.8844 | 0.14021 | 2 776.9 | 3 029.2 | 6.8226 | 0.12547 | 2 772.6 | 3 023.5 | 6.7664 |
| 350 | 0.17456 | 2 866.1 | 3 145.4 | 7.0694 | 0.15457 | 2 863.0 | 3 141.2 | 7.0100 | 0.13857 | 2 859.8 | 3 137.0 | 6.9563 |
| 400 | 0.19005 | 2 950.1 | 3 254.2 | 7.2374 | 0.16847 | 2 947.7 | 3 250.9 | 7.1794 | 0.15120 | 2 945.2 | 3 247.6 | 7.1271 |
| 500 | 0.2203 | 3 119.5 | 3 472.0 | 7.5390 | 0.19550 | 3 117.9 | 3 469.8 | 7.4825 | 0.17568 | 3 116.2 | 3 467.6 | 7.4317 |
| 600 | 0.2500 | 3 293.3 | 3 693.2 | 7.8080 | 0.2220 | 3 292.1 | 3 691.7 | 7.7523 | 0.19960 | 3 290.9 | 3 690.1 | 7.7024 |
| 700 | 0.2794 | 3 472.7 | 3 919.7 | 8.0535 | 0.2482 | 3 471.8 | 3 918.5 | 7.9983 | 0.2232 | 3 470.9 | 3 917.4 | 7.9487 |
| 800 | 0.3086 | 3 658.3 | 4 152.1 | 8.2808 | 0.2742 | 3 657.6 | 4 151.2 | 8.2258 | 0.2467 | 3 657.0 | 4 150.3 | 8.1765 |
| 900 | 0.3377 | 3 850.5 | 4 390.8 | 8.4935 | 0.3001 | 3 849.9 | 4 390.1 | 8.4386 | 0.2700 | 3 849.3 | 4 389.4 | 8.3895 |
| 1 000 | 0.3668 | 4 049.0 | 4 635.8 | 8.6938 | 0.3260 | 4 048.5 | 4 635.2 | 8.6391 | 0.2933 | 4 048.0 | 4 634.6 | 8.5901 |
| 1 100 | 0.3958 | 4 253.7 | 4 887.0 | 8.8837 | 0.3518 | 4 253.2 | 4 886.4 | 8.8290 | 0.3166 | 4 252.7 | 4 885.9 | 8.7800 |
| 1 200 | 0.4248 | 4 464.2 | 5 143.9 | 9.0643 | 0.3776 | 4 463.7 | 5 143.4 | 9.0096 | 0.3398 | 4 463.3 | 5 142.9 | 8.9607 |
| 1 300 | 0.4538 | 4 679.9 | 5 406.0 | 9.2364 | 0.4034 | 4 679.5 | 5 405.6 | 9.1818 | 0.3631 | 4 679.0 | 5 405.1 | 9.1329 |
| P = 2.50 MPa (223.99°C)* | | | | P = 3.00 MPa (233.90°C) | | | | P = 3.50 MPa (242.60°C) | | | | |
| Sat. | 0.07998 | 2 603.1 | 2 803.1 | 6.2575 | 0.06668 | 2 604.1 | 2 804.2 | 6.1869 | 0.05707 | 2 603.7 | 2 803.4 | 6.1253 |
| 225 | 0.08027 | 2 605.6 | 2 806.3 | 6.2639 | | | | | | | | |
| 250 | 0.08700 | 2 662.6 | 2 880.1 | 6.4085 | 0.07058 | 2 644.0 | 2 855.8 | 6.2872 | 0.05872 | 2 623.7 | 2 829.2 | 6.1749 |
| 300 | 0.09890 | 2 761.6 | 3 008.8 | 6.6438 | 0.08114 | 2 750.1 | 2 993.5 | 6.5390 | 0.06842 | 2 738.0 | 2 977.5 | 6.4461 |
| 350 | 0.10976 | 2 851.9 | 3 126.3 | 6.8403 | 0.09053 | 2 843.7 | 3 115.3 | 6.7428 | 0.07678 | 2 835.3 | 3 104.0 | 6.6579 |
| 400 | 0.12010 | 2 939.1 | 3 239.3 | 7.0148 | 0.09936 | 2 932.8 | 3 230.9 | 6.9212 | 0.08453 | 2 926.4 | 3 222.3 | 6.8405 |
| 450 | 0.13014 | 3 025.5 | 3 350.8 | 7.1746 | 0.10787 | 3 020.4 | 3 344.0 | 7.0834 | 0.09196 | 3 015.3 | 3 337.2 | 7.0052 |
| 500 | 0.13993 | 3 112.1 | 3 462.1 | 7.3234 | 0.11619 | 3 108.0 | 3 456.5 | 7.2338 | 0.09918 | 3 103.0 | 3 450.9 | 7.1572 |
| 600 | 0.15930 | 3 288.0 | 3 686.3 | 7.5960 | 0.13243 | 3 285.0 | 3 682.3 | 7.5085 | 0.11324 | 3 282.1 | 3 678.4 | 7.4339 |
| 700 | 0.17832 | 3 468.7 | 3 914.5 | 7.8435 | 0.14838 | 3 466.5 | 3 911.7 | 7.7571 | 0.12699 | 3 464.3 | 3 908.8 | 7.6837 |
| 800 | 0.19716 | 3 655.3 | 4 148.2 | 8.0720 | 0.16414 | 3 653.5 | 4 145.9 | 7.9862 | 0.14056 | 3 651.8 | 4 143.7 | 7.9134 |
| 900 | 0.21590 | 3 847.9 | 4 387.6 | 8.2853 | 0.17980 | 3 846.5 | 4 385.9 | 8.1999 | 0.15402 | 3 845.0 | 4 384.1 | 8.1276 |
| 1 000 | 0.2346 | 4 046.7 | 4 633.1 | 8.4861 | 0.19541 | 4 045.4 | 4 631.6 | 8.4009 | 0.16743 | 4 044.1 | 4 630.1 | 8.3288 |
| 1 100 | 0.2532 | 4 251.5 | 4 884.6 | 8.6762 | 0.21098 | 4 250.3 | 4 883.3 | 8.5912 | 0.18080 | 4 249.2 | 4 881.9 | 8.5192 |
| 1 200 | 0.2718 | 4 462.1 | 5 141.7 | 8.8569 | 0.22652 | 4 460.9 | 5 140.5 | 8.7720 | 0.19415 | 4 459.8 | 5 139.3 | 8.7000 |
| 1 300 | 0.2905 | 4 677.8 | 5 404.0 | 9.0291 | 0.24206 | 4 676.6 | 5 402.8 | 8.9442 | 0.20749 | 4 675.5 | 5 401.7 | 8.8723 |

TABLA A.6

Agua sobrecalentada (Continuación)

| T °C | v m³/kg | u kJ/kg | h kJ/kg | s kJ/kg · K | v m³/kg | u kJ/kg | h kJ/kg | s kJ/kg · K | v m³/kg | u kJ/kg | h kJ/kg | s kJ/kg · K |
|------------------------|------------|------------|------------|-----------------------------|------------|------------|------------|-------------------------|------------|------------|------------|----------------|
| P = 4.0 MPa (250.40°C) | | | | P = 4.5 MPa (257.49°C) | | | | P = 5.0 MPa (263.99°C) | | | | |
| Sat. | 0.04978 | 2 602.3 | 2 801.4 | 6.0701 | 0.04406 | 2 600.1 | 2 798.3 | 6.0198 | 0.03944 | 2 597.1 | 2 794.3 | 5.9734 |
| 275 | 0.05457 | 2 667.9 | 2 886.2 | 6.2285 | 0.04730 | 2 650.3 | 2 863.2 | 6.1401 | 0.04141 | 2 631.3 | 2 838.3 | 6.0544 |
| 300 | 0.05884 | 2 725.3 | 2 960.7 | 6.3615 | 0.05135 | 2 712.0 | 2 943.1 | 6.2828 | 0.04532 | 2 698.0 | 2 924.5 | 6.2084 |
| 350 | 0.06645 | 2 826.7 | 3 092.5 | 6.5821 | 0.05840 | 2 817.8 | 3 080.6 | 6.5131 | 0.05194 | 2 808.7 | 3 068.4 | 6.4493 |
| 400 | 0.07341 | 2 919.9 | 3 213.6 | 6.7690 | 0.06475 | 2 913.3 | 3 204.7 | 6.7047 | 0.05781 | 2 906.6 | 3 195.7 | 6.6459 |
| 450 | 0.08002 | 3 010.2 | 3 330.3 | 6.9363 | 0.07074 | 3 005.0 | 3 323.3 | 6.8746 | 0.06330 | 2 999.7 | 3 316.2 | 6.8186 |
| 500 | 0.08643 | 3 099.5 | 3 445.3 | 7.0901 | 0.07651 | 3 095.3 | 3 439.6 | 7.0301 | 0.06857 | 3 091.0 | 3 433.8 | 6.9759 |
| 600 | 0.09885 | 3 279.1 | 3 674.4 | 7.3688 | 0.08765 | 3 276.0 | 3 670.5 | 7.3110 | 0.07869 | 3 273.0 | 3 666.5 | 7.2589 |
| 700 | 0.11095 | 3 462.1 | 3 905.9 | 7.6198 | 0.09847 | 3 459.9 | 3 903.0 | 7.5631 | 0.08849 | 3 457.6 | 3 900.1 | 7.5122 |
| 800 | 0.12287 | 3 650.0 | 4 141.5 | 7.8502 | 0.10911 | 3 648.3 | 4 139.3 | 7.7942 | 0.09811 | 3 646.6 | 4 137.1 | 7.7440 |
| 900 | 0.13469 | 3 843.6 | 4 382.3 | 8.0647 | 0.11965 | 3 842.2 | 4 380.6 | 8.0091 | 0.10762 | 3 840.7 | 4 378.8 | 7.9593 |
| 1 000 | 0.14645 | 4 042.9 | 4 628.7 | 8.2662 | 0.13013 | 4 041.6 | 4 627.2 | 8.2108 | 0.11707 | 4 040.4 | 4 625.7 | 8.1612 |
| 1 100 | 0.15817 | 4 248.0 | 4 880.6 | 8.4567 | 0.14056 | 4 246.8 | 4 879.3 | 8.4015 | 0.12648 | 4 245.6 | 4 878.0 | 8.3520 |
| 1 200 | 0.16987 | 4 458.6 | 5 138.1 | 8.6376 | 0.15098 | 4 457.5 | 5 136.9 | 8.5825 | 0.13587 | 4 456.3 | 5 135.7 | 8.5331 |
| 1 300 | 0.18156 | 4 674.3 | 5 400.5 | 8.8100 | 0.16139 | 4 673.1 | 5 399.4 | 8.7549 | 0.14526 | 4 672.0 | 5 398.2 | 8.7055 |
| P = 6.0 MPa (275.64°C) | | | | P = 7.0 MPa (285.88°C) | | | | P = 8.0 MPa (295.06°C) | | | | |
| Sat. | 0.03244 | 2 589.7 | 2 784.3 | 5.8892 | 0.02737 | 2 580.5 | 2 772.1 | 5.8133 | 0.02352 | 2 569.8 | 2 758.0 | 5.7432 |
| 300 | 0.03616 | 2 667.2 | 2 884.2 | 6.0674 | 0.02947 | 2 632.2 | 2 838.4 | 5.9305 | 0.02426 | 2 590.9 | 2 785.0 | 5.7906 |
| 350 | 0.04223 | 2 789.6 | 3 043.0 | 6.3335 | 0.03524 | 2 769.4 | 3 016.0 | 6.2283 | 0.02995 | 2 747.7 | 2 987.3 | 6.1301 |
| 400 | 0.04739 | 2 892.9 | 3 177.2 | 6.5408 | 0.03993 | 2 878.6 | 3 158.1 | 6.4478 | 0.03432 | 2 863.8 | 3 138.3 | 6.3634 |
| 450 | 0.05214 | 2 988.9 | 3 301.8 | 6.7193 | 0.04416 | 2 978.0 | 3 287.1 | 6.6327 | 0.03817 | 2 966.7 | 3 272.0 | 6.5551 |
| 500 | 0.05665 | 3 082.2 | 3 422.2 | 6.8803 | 0.04814 | 3 073.4 | 3 410.3 | 6.7975 | 0.04175 | 3 064.3 | 3 398.3 | 6.7240 |
| 550 | 0.06101 | 3 174.6 | 3 540.6 | 7.0288 | 0.05195 | 3 167.2 | 3 530.9 | 6.9486 | 0.04516 | 3 159.8 | 3 521.0 | 6.8778 |
| 600 | 0.06525 | 3 266.9 | 3 658.4 | 7.1677 | 0.05565 | 3 260.7 | 3 650.3 | 7.0894 | 0.04845 | 3 254.4 | 3 642.0 | 7.0206 |
| 700 | 0.07352 | 3 453.1 | 3 894.2 | 7.4234 | 0.06283 | 3 448.5 | 3 888.3 | 7.3476 | 0.05481 | 3 443.9 | 3 882.4 | 7.2812 |
| 800 | 0.08160 | 3 643.1 | 4 132.7 | 7.6566 | 0.06981 | 3 639.5 | 4 128.2 | 7.5822 | 0.06097 | 3 636.0 | 4 123.8 | 7.5173 |
| 900 | 0.08958 | 3 837.8 | 4 375.3 | 7.8727 | 0.07669 | 3 835.0 | 4 371.8 | 7.7991 | 0.06702 | 3 832.1 | 4 368.3 | 7.7351 |
| 1 000 | 0.09749 | 4 037.8 | 4 622.7 | 8.0751 | 0.08350 | 4 035.3 | 4 619.8 | 8.0020 | 0.07301 | 4 032.8 | 4 616.9 | 7.9384 |
| 1 100 | 0.10536 | 4 243.3 | 4 875.4 | 8.2661 | 0.09027 | 4 240.9 | 4 872.8 | 8.1933 | 0.07896 | 4 238.6 | 4 870.3 | 8.1300 |
| 1 200 | 0.11321 | 4 454.0 | 5 133.3 | 8.4474 | 0.09703 | 4 451.7 | 5 130.9 | 8.3747 | 0.08489 | 4 449.5 | 5 128.5 | 8.3115 |
| 1 300 | 0.12106 | 4 669.6 | 5 396.0 | 8.6199 | 0.10377 | 4 667.3 | 5 393.7 | 8.5475 | 0.09080 | 4 665.0 | 5 391.5 | 8.4842 |
| P = 9.0 MPa (303.40°C) | | | | P = 10.0 MPa (318.351.06°C) | | | | P = 12.5 MPa (327.89°C) | | | | |
| Sat. | 0.02048 | 2 557.8 | 2 742.1 | 5.6772 | 0.018026 | 2 544.4 | 2 724.7 | 5.6141 | 0.013495 | 2 505.1 | 2 673.8 | 5.4624 |
| 325 | 0.02327 | 2 646.6 | 2 856.0 | 5.8712 | 0.019861 | 2 610.4 | 2 809.1 | 5.7568 | 0.016126 | 2 624.6 | 2 826.2 | 5.7118 |
| 350 | 0.02580 | 2 724.4 | 2 956.6 | 6.0361 | 0.02242 | 2 699.2 | 2 923.4 | 5.9443 | 0.02000 | 2 789.3 | 3 039.3 | 6.0417 |
| 400 | 0.02993 | 2 848.4 | 3 117.8 | 6.2854 | 0.02641 | 2 832.4 | 3 096.5 | 6.2120 | 0.02299 | 2 912.5 | 3 199.8 | 6.2719 |
| 450 | 0.03350 | 2 955.2 | 3 256.6 | 6.4844 | 0.02975 | 2 943.4 | 3 240.9 | 6.4190 | 0.02560 | 3 021.7 | 3 341.8 | 6.4618 |
| 500 | 0.03677 | 3 055.2 | 3 386.1 | 6.6576 | 0.03279 | 3 045.8 | 3 373.7 | 6.5966 | 0.02801 | 3 125.0 | 3 475.2 | 6.6290 |
| 550 | 0.03987 | 3 152.2 | 3 511.0 | 6.8142 | 0.03564 | 3 144.6 | 3 500.9 | 6.7561 | 0.03029 | 3 225.4 | 3 604.0 | 6.7810 |
| 600 | 0.04285 | 3 248.1 | 3 633.7 | 6.9589 | 0.03837 | 3 241.7 | 3 625.3 | 6.9029 | 0.03248 | 3 324.4 | 3 730.4 | 6.9218 |
| 650 | 0.04574 | 3 343.6 | 3 755.3 | 7.0943 | 0.04101 | 3 338.2 | 3 748.2 | 7.0398 | 0.03460 | 3 422.9 | 3 855.3 | 7.0536 |
| 700 | 0.04857 | 3 439.3 | 3 876.5 | 7.2221 | 0.04358 | 3 434.7 | 3 870.5 | 7.1687 | 0.03869 | 3 620.0 | 4 103.6 | 7.2965 |
| 800 | 0.05409 | 3 632.5 | 4 119.3 | 7.4596 | 0.04859 | 3 628.9 | 4 114.8 | 7.4077 | 0.04267 | 3 819.1 | 4 352.5 | 7.5182 |
| 900 | 0.05950 | 3 829.2 | 4 364.8 | 7.6783 | 0.05349 | 3 826.3 | 4 361.2 | 7.6272 | 0.04658 | 4 021.6 | 4 603.8 | 7.7237 |
| 1 000 | 0.06485 | 4 030.3 | 4 614.0 | 7.8821 | 0.05832 | 4 027.8 | 4 611.0 | 7.8315 | 0.05045 | 4 228.2 | 4 858.8 | 7.9165 |
| 1 100 | 0.07016 | 4 236.3 | 4 867.7 | 8.0740 | 0.06312 | 4 234.0 | 4 865.1 | 8.0237 | 0.05430 | 4 439.3 | 5 118.0 | 8.0937 |
| 1 200 | 0.07544 | 4 447.2 | 5 126.2 | 8.2556 | 0.06789 | 4 444.9 | 5 123.8 | 8.2055 | 0.05813 | 4 654.8 | 5 381.4 | 8.2717 |
| 1 300 | 0.08072 | 4 662.7 | 5 389.2 | 8.4284 | 0.07265 | 4 660.5 | 5 387.0 | 8.3783 | | | | |

Propiedades del agua: tabla de vapor sobrecalentado

v , cm³/g; u , kJ/kg; h , kJ/kg; s , kJ/(kg · K)

| Temp., °C | v | u | h | s | v | u | h | s |
|--------------|---|--------|--------|--------|---|--------|--------|--------|
| | 0.06 bares (0.006 MPa) ($T_{\text{sat}} = 36.16^\circ\text{C}$) | | | | 0.35 bares (0.035 MPa) ($T_{\text{sat}} = 72.69^\circ\text{C}$) | | | |
| Sat. | 23739 | 2425.0 | 2567.4 | 8.3304 | 4526. | 2473.0 | 2631.4 | 7.7158 |
| 80 | 27132 | 2487.3 | 2650.1 | 8.5004 | 4625. | 2483.7 | 2645.6 | 7.7564 |
| 120 | 30219 | 2544.7 | 2726.0 | 8.7840 | 5163. | 2542.4 | 2723.1 | 7.9644 |
| 160 | 33302 | 2602.7 | 2802.5 | 8.9693 | 5696. | 2601.2 | 2800.6 | 8.1519 |
| 200 | 36383 | 2661.4 | 2879.7 | 9.1398 | 6228. | 2660.4 | 2878.4 | 8.3237 |
| 240 | 39462 | 2721.0 | 2957.8 | 9.2982 | 6758. | 2720.3 | 2956.8 | 8.4828 |
| 280 | 42540 | 2781.5 | 3036.8 | 9.4464 | 7287. | 2780.9 | 3036.0 | 8.6314 |
| 320 | 45618 | 2843.0 | 3116.7 | 9.5859 | 7815. | 2842.5 | 3116.1 | 8.7712 |
| 360 | 48696 | 2905.5 | 3197.7 | 9.7180 | 8344. | 2905.1 | 3197.1 | 8.9034 |
| 400 | 51774 | 2969.0 | 3279.6 | 9.8435 | 8872. | 2968.6 | 3279.2 | 9.0291 |
| 440 | 54851 | 3033.5 | 3362.6 | 9.9633 | 9400. | 3033.2 | 3362.2 | 9.1490 |
| 500 | 59467 | 3132.3 | 3489.1 | 10.134 | 10192. | 3132.1 | 3488.8 | 9.3194 |
| | 0.70 bares (0.07 MPa) ($T_{\text{sat}} = 89.95^\circ\text{C}$) | | | | 1.0 bares (0.10 MPa) ($T_{\text{sat}} = 99.63^\circ\text{C}$) | | | |
| Sat. | 2365. | 2494.5 | 2660.0 | 7.4797 | 1694. | 2506.1 | 2675.5 | 7.3594 |
| 100 | 2434. | 2509.7 | 2680.0 | 7.5341 | 1696. | 2506.7 | 2676.2 | 7.3614 |
| 120 | 2571. | 2539.7 | 2719.6 | 7.6375 | 1793. | 2537.3 | 2716.6 | 7.4668 |
| 160 | 2841. | 2599.4 | 2798.2 | 7.8279 | 1984. | 2597.8 | 2796.2 | 7.6597 |
| 200 | 3108. | 2659.1 | 2876.7 | 8.0012 | 2172. | 2658.1 | 2875.3 | 7.8343 |
| 240 | 3374. | 2719.3 | 2955.5 | 8.1611 | 2359. | 2718.5 | 2954.5 | 7.9949 |
| 280 | 3640. | 2780.2 | 3035.0 | 8.3162 | 2546. | 2779.6 | 3034.2 | 8.1445 |
| 320 | 3905. | 2842.0 | 3115.3 | 8.4504 | 2732. | 2841.5 | 3114.6 | 8.2849 |
| 360 | 4170. | 2904.6 | 3196.5 | 8.5828 | 2917. | 2904.2 | 3195.9 | 8.4175 |
| 400 | 4434. | 2968.2 | 3278.6 | 8.7086 | 3103. | 2967.9 | 3278.2 | 8.5435 |
| 440 | 4698. | 3032.9 | 3361.8 | 8.8286 | 3288. | 3032.6 | 3361.4 | 8.6636 |
| 500 | 5095. | 3131.8 | 3488.5 | 8.9991 | 3565. | 3131.6 | 3488.1 | 8.8342 |
| | 1.5 bares (0.15 MPa) ($T_{\text{sat}} = 111.37^\circ\text{C}$) | | | | 3.0 bares (0.30 MPa) ($T_{\text{sat}} = 133.55^\circ\text{C}$) | | | |
| Sat. | 1159 | 2519.7 | 2693.6 | 7.2233 | 606. | 2543.6 | 2725.3 | 6.9919 |
| 120 | 1188. | 2533.3 | 2711.4 | 7.2693 | | | | |
| 160 | 1317. | 2595.2 | 2792.8 | 7.4665 | 651. | 2587.1 | 2782.3 | 7.1276 |
| 200 | 1444. | 2656.2 | 2872.9 | 7.6433 | 716. | 2650.7 | 2865.5 | 7.3115 |
| 240 | 1570. | 2717.2 | 2952.7 | 7.8052 | 781. | 2713.1 | 2947.3 | 7.4774 |
| 280 | 1695. | 2778.6 | 3032.8 | 7.9555 | 844. | 2775.4 | 3028.6 | 7.6299 |
| 320 | 1819. | 2840.6 | 3113.5 | 8.0964 | 907. | 2838.1 | 3110.1 | 7.7722 |
| 360 | 1943. | 2903.5 | 3195.0 | 8.2293 | 969. | 2901.4 | 3192.2 | 7.9061 |
| 400 | 2067. | 2967.3 | 3277.4 | 8.3555 | 1032. | 2965.6 | 3275.0 | 8.0330 |
| 440 | 2191. | 3032.1 | 3360.7 | 8.4757 | 1094. | 3030.6 | 3358.7 | 8.1538 |
| 500 | 2376. | 3131.2 | 3487.6 | 8.6466 | 1187. | 3130.0 | 3486.0 | 8.3251 |
| 600 | 2685. | 3301.7 | 3704.3 | 8.9101 | 1341. | 3300.8 | 3703.2 | 8.5892 |

| Temp., °C | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> | <i>v</i> | <i>u</i> | <i>h</i> | <i>s</i> |
|--------------|---|----------|----------|----------|---|----------|----------|----------|
| | 5.0 bares (0.50 MPa) ($T_{sat} = 151.86^\circ\text{C}$) | | | | 7.0 bares (0.70 MPa) ($T_{sat} = 164.97^\circ\text{C}$) | | | |
| Sat. | 374.9 | 2561.2 | 2748.7 | 6.8213 | 272.9 | 2572.5 | 2763.5 | 6.7080 |
| 180 | 404.5 | 2609.7 | 2812.0 | 6.9656 | 284.7 | 2599.8 | 2799.1 | 6.7880 |
| 200 | 424.9 | 2642.9 | 2855.4 | 7.0592 | 299.9 | 2634.8 | 2844.8 | 6.8865 |
| 240 | 464.6 | 2707.6 | 2939.9 | 7.2307 | 329.2 | 2701.8 | 2932.2 | 7.0641 |
| 280 | 503.4 | 2771.2 | 3022.9 | 7.3865 | 357.4 | 2766.9 | 3017.1 | 7.2233 |
| 320 | 541.6 | 2834.7 | 3105.6 | 7.5308 | 385.2 | 2831.3 | 3100.9 | 7.3697 |
| 360 | 579.6 | 2898.7 | 3188.4 | 7.6660 | 412.6 | 2895.8 | 3184.7 | 7.5063 |
| 400 | 617.3 | 2963.2 | 3271.9 | 7.7938 | 439.7 | 2960.9 | 3268.7 | 7.6350 |
| 440 | 654.8 | 3028.6 | 3356.0 | 7.9152 | 466.7 | 3026.6 | 3353.3 | 7.7571 |
| 500 | 710.9 | 3128.4 | 3483.9 | 8.0873 | 507.0 | 3126.8 | 3481.7 | 7.9299 |
| 600 | 804.1 | 3299.6 | 3701.7 | 8.3522 | 573.8 | 3298.5 | 3700.2 | 8.1956 |
| 700 | 896.9 | 3477.5 | 3925.9 | 8.5952 | 640.3 | 3476.6 | 3924.8 | 8.4391 |
| | 10.0 bares (1.0 MPa) ($T_{sat} = 179.91^\circ\text{C}$) | | | | 15.0 bares (1.5 MPa) ($T_{sat} = 198.32^\circ\text{C}$) | | | |
| Sat. | 194.4 | 2583.6 | 2778.1 | 6.5865 | 131.8 | 2594.5 | 2792.2 | 6.4448 |
| 200 | 206.0 | 2621.9 | 2827.9 | 6.6940 | 132.5 | 2598.1 | 2796.8 | 6.4546 |
| 240 | 227.5 | 2692.9 | 2920.4 | 6.8817 | 148.3 | 2676.9 | 2899.3 | 6.6628 |
| 280 | 248.0 | 2760.2 | 3008.2 | 7.0465 | 162.7 | 2748.6 | 2992.7 | 6.8381 |
| 320 | 267.8 | 2826.1 | 3093.9 | 7.1962 | 176.5 | 2817.1 | 3081.9 | 6.9938 |
| 360 | 287.3 | 2891.6 | 3178.9 | 7.3349 | 189.9 | 2884.4 | 3169.2 | 7.1363 |
| 400 | 306.6 | 2957.3 | 3263.9 | 7.4651 | 203.0 | 2951.3 | 3255.8 | 7.2690 |
| 440 | 325.7 | 3023.6 | 3349.3 | 7.5883 | 216.0 | 3018.5 | 3342.5 | 7.3940 |
| 500 | 354.1 | 3124.4 | 3478.5 | 7.7622 | 235.2 | 3120.3 | 3473.1 | 7.5698 |
| 540 | 372.9 | 3192.6 | 3565.6 | 7.8720 | 247.8 | 3189.1 | 3560.9 | 7.6805 |
| 600 | 401.1 | 3296.8 | 3697.9 | 8.0290 | 266.8 | 3293.9 | 3694.0 | 7.8385 |
| 640 | 419.8 | 3367.4 | 3787.2 | 8.1290 | 279.3 | 3364.8 | 3783.8 | 7.9391 |
| | 20.0 bares (2.0 MPa) ($T_{sat} = 212.42^\circ\text{C}$) | | | | 30.0 bares (3.0 MPa) ($T_{sat} = 233.90^\circ\text{C}$) | | | |
| Sat. | 99.6 | 2600.3 | 2799.5 | 6.3409 | 66.7 | 2604.1 | 2804.2 | 6.1869 |
| 240 | 108.5 | 2659.6 | 2876.5 | 6.4952 | 68.2 | 2619.7 | 2824.3 | 6.2265 |
| 280 | 120.0 | 2736.4 | 2976.4 | 6.6828 | 77.1 | 2709.9 | 2941.3 | 6.4462 |
| 320 | 130.8 | 2807.9 | 3069.5 | 6.8452 | 85.0 | 2788.4 | 3043.4 | 6.6245 |
| 360 | 141.1 | 2877.0 | 3159.3 | 6.9917 | 92.3 | 2861.7 | 3138.7 | 6.7801 |
| 400 | 151.2 | 2945.2 | 3247.6 | 7.1271 | 99.4 | 2932.8 | 3230.9 | 6.9212 |
| 440 | 161.1 | 3013.4 | 3335.5 | 7.2540 | 106.2 | 3002.9 | 3321.5 | 7.0520 |
| 500 | 175.7 | 3116.2 | 3467.6 | 7.4317 | 116.2 | 3108.0 | 3456.5 | 7.2338 |
| 540 | 185.3 | 3185.6 | 3556.1 | 7.5434 | 122.7 | 3178.4 | 3546.6 | 7.3474 |
| 600 | 199.6 | 3290.9 | 3690.1 | 7.7024 | 132.4 | 3285.0 | 3682.3 | 7.5085 |
| 640 | 209.1 | 3362.2 | 3780.4 | 7.8035 | 138.8 | 3357.0 | 3773.5 | 7.6106 |
| 700 | 223.2 | 3470.9 | 3917.4 | 7.9487 | 148.4 | 3466.5 | 3911.7 | 7.7571 |