



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

**EVALUACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN LA GENERACIÓN DE VAPOR DE AGUA  
EN UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE JABONES Y DETERGENTES DE LAVANDERÍA**

**Karla Yoselyn Casado Sierra**

Asesorado por el Ing. Giancarlo Salvatore Vitola Sanchinelli

Guatemala, noviembre de 2020



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN LA GENERACIÓN DE VAPOR DE AGUA  
EN UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE JABONES Y DETERGENTES DE LAVANDERÍA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**KARLA YOSELYN CASADO SIERRA**

ASESORADO POR EL ING. GIANCARLO SALVATORE VITOLA  
SANCHINELLI

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2020



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
EXAMINADOR	Ing. Sergio Alejandro Recinos
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez



## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **EVALUACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO EN LA GENERACIÓN DE VAPOR DE AGUA EN UNA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE JABONES Y DETERGENTES DE LAVANDERÍA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 21 de noviembre de 2016.

**Karla Yoselyn Casado Sierra**





## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por ser la guía y compañía eterna en mi vida.
- Mi madre** Ivonne Sierra Quiroa, por apoyarme incondicionalmente en la decisión más importante que he tomado en mi vida hasta el momento y por siempre motivarme a seguir adelante, a pesar de la distancia. Todos mis logros serán para usted.
- Mis hermanos** Marisol y Daniel Casado, por ser apoyo y parte importante en mi vida para cumplir esta meta.
- Mi familia** Por siempre preocuparse y estar pendiente de mí.



## **AGRADECIMIENTOS A:**

**La Universidad de San  
Carlos de Guatemala**

Por abrirme las puertas a su casa de estudios, y darme la oportunidad de adquirir conocimientos y ser la base de mi desarrollo profesional.

**Facultad de Ingeniería**

Por darme las herramientas necesarias para mi formación académica.

**Mis amigos**

Por su compañía y apoyo en todo momento. Y por aprender más de la vida a su lado.

**Ing. Giancarlo Vitola**

Por el apoyo incondicional y la confianza durante el desarrollo del proyecto.

**Henkel La Luz, S.A.**

Por darme la oportunidad de realizar mi proyecto de graduación y por brindarme conocimientos que serán parte de mi formación profesional.





	2.2.1.6.	Por el combustible utilizado.....	16
2.2.2.		Partes principales de la caldera .....	17
	2.2.2.1.	Hogar o fogón.....	18
	2.2.2.2.	Quemador .....	19
	2.2.2.3.	Ventilador .....	20
	2.2.2.4.	Fluxes o tubos de intercambio de calor .....	21
	2.2.2.5.	Chimenea .....	22
	2.2.2.6.	Carcasa o cuerpo de caldera .....	23
2.2.3.		Partes complementarias.....	23
	2.2.3.1.	Válvula de seguridad.....	24
	2.2.3.2.	Válvula de purga .....	24
	2.2.3.3.	Indicador de nivel .....	24
2.2.4.		Producción de vapor .....	24
	2.2.4.1.	Vapor saturado.....	25
	2.2.4.2.	Vapor sobrecalentado .....	26
	2.2.4.3.	Tablas de vapor.....	26
2.2.5.		Proceso de combustión .....	27
	2.2.5.1.	Triángulo de fuego .....	28
	2.2.5.2.	Poder calorífico o potencia calorífica del combustible .....	29
2.2.6.		Tratamiento de agua de alimentación .....	30
	2.2.6.1.	Parámetros de tratamiento de agua de alimentación .....	32
2.2.7.		Eficiencia térmica de la caldera.....	33
2.3.		Sistemas de vapor industrial .....	36
2.4.		Impacto ambiental ocasionado por gases de combustión.....	37
	2.4.1.	Efecto invernadero .....	38
	2.4.2.	Límites máximos permisibles .....	38

2.5.	Normas Internacionales de Impacto Ambiental .....	42
2.5.1.	Huellas ambientales .....	42
3.	DISEÑO METODOLÓGICO .....	45
3.1.	Variables.....	45
3.2.	Delimitación de campo de estudio.....	46
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	46
3.4.	Recursos materiales disponibles .....	46
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa .....	47
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información .....	48
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información .....	49
3.7.1.	Balance de energía.....	49
3.7.2.	Demanda de generación de vapor.....	53
3.7.3.	Grado de contribución a emisiones de gases de efecto invernadero .....	54
3.8.	Análisis estadístico .....	55
4.	RESULTADOS .....	57
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	63
	CONCLUSIONES .....	67
	RECOMENDACIONES.....	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	71





## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Caldera pirotubular de la planta de fabricación de jabones y detergentes de lavandería.....	4
2.	Partes principales de la caldera pirotubular .....	18
3.	Corte transversal de una caldera pirotubular .....	19
4.	Quemador de una caldera.....	20
5.	Ventilador de una caldera .....	20
6.	Fluxes de una caldera .....	21
7.	Chimenea de la caldera .....	22
8.	Carcasa de una caldera .....	23
9.	Diagrama de fases del agua .....	25
10.	Triángulo de fuego .....	29
11.	Diagrama del tratamiento de agua de caldera .....	32
12.	Diagrama del análisis de la eficiencia térmica.....	35
13.	Funcionamiento de una caldera .....	36
14.	Diagrama de flujo de la generación de vapor en una caldera .....	37
15.	Aparato ORSAT .....	40
16.	Composición de los gases de combustión en función del exceso de aire para el bunker .....	41
17.	Diagrama del sistema.....	53
18.	Eficiencia térmica de la caldera en condiciones actuales de operación .....	57
19.	Capacidad de generación de vapor de agua.....	58

20.	Análisis comparativo de la demanda de consumo de vapor contra la capacidad de generación de la caldera .....	59
21.	Grado de contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de la combustión de la caldera.....	61
22.	Composición de los gases de combustión (base seca) de la caldera 100 BHP .....	62

## TABLAS

I.	Tipos de combustible para calderas .....	17
II.	Poder calorífico de los principales combustibles .....	30
III.	Límites máximos permisibles de concentraciones de emisión para calderos generadores de vapor (mg/Nm <sup>3</sup> ) .....	39
IV.	Costo de inversión inicial para otras alternativas.....	60

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<i>bar</i>	Bar
<b>BHP</b>	Caballos de presión de caldera
<i>d</i>	Día
\$	Dólar
<i>gal</i>	Galón
°C	Grados Centígrados
°F	Grados Fahrenheit
<b>K</b>	Grados Kelvin
<i>h</i>	Hora
<i>kg</i>	Kilogramo
<i>kJ</i>	Kilojoule
<i>kmol</i>	Kilomol
<i>kW</i>	Kilowatts
<i>psi</i>	Libras por pulgada cuadrada
<i>L</i>	Litro
<b>MPa</b>	Mega Pascal
<i>m</i>	Metro
<i>m<sup>2</sup></i>	Metro cuadrado
<i>m<sup>3</sup></i>	Metro cubico
<i>ppm</i>	Partes por millón
%	Porcentaje
<b>Ton</b>	Tonelada
<b>W</b>	Watts



## GLOSARIO

<b>Aire en exceso</b>	La cantidad por la cual el aire que se alimenta a la caldera excede al aire teórico.
<b>Aire teórico</b>	La cantidad de aire requerida para quemar por completo el combustible que se alimenta a la caldera.
<b>Calor</b>	Forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia en la temperatura.
<b>Calor latente</b>	Cantidad de energía necesaria para cambiar el estado físico de una sustancia.
<b>Calor sensible</b>	Cantidad de energía que absorbe o libera un cuerpo sin que en él ocurran cambios en su estado físico.
<b>Capacidad evaporativa</b>	Cantidad de vapor que puede producir una caldera o máquina de vapor.
<b>Combustión</b>	Reacción química de oxidación en la cual se desprende gran cantidad de energía en forma de calor.

<b>Conductividad Térmica</b>	Capacidad de un material para conducir calor.
<b>Dureza del agua</b>	Concentración total de iones de calcio y magnesio presentes en una determinada cantidad de agua. Mientras más sales tenga el agua, mayor será la dureza.
<b>Efecto invernadero</b>	Aumento de la temperatura de la atmósfera como resultado de la concentración de gases en la misma, principalmente dióxido de carbono.
<b>Eficiencia de combustión</b>	Capacidad de convertir la energía interna contenida en un combustible en energía calórica.
<b>Eficiencia térmica</b>	Relación entre el calor absorbido por el fluido de trabajo y el calor liberado por la reacción de combustión en el horno.
<b>Emisividad</b>	Cantidad de radiación emitida por un objetivo o superficie debido a su temperatura.
<b>Energía</b>	Capacidad de un cuerpo de transferir calor o realizar un trabajo.
<b>Entalpía</b>	Cantidad de energía absorbida o liberada por un sistema.
<b>Gases de combustión</b>	Gases generados a partir del proceso de combustión.

<b>Gases de efecto invernadero</b>	Conjunto de sustancias gaseosas que se vierten a la atmosfera.
<b>Generación de vapor</b>	Proceso en el que ocurre un cambio de fase líquida a fase gaseosa a una presión y temperatura constante.
<b>Presión de vapor</b>	Presión a la cual un líquido puede coexistir con su vapor a una temperatura dada.
<b>Purga</b>	Sólidos disueltos procedentes del agua y de productos químicos utilizados para su tratamiento. Se depositan en el fondo de la caldera y en las superficies de calentamiento afectando la eficiencia y productividad de la misma.
<b>Vapor de agua</b>	Gas que se obtiene a partir de la vaporización del agua, el cual se emplea como fuente principal de energía.
<b>Vapor saturado</b>	Se presenta a presiones y temperaturas en las cuales el vapor y el agua coexistan juntos.
<b>Vapor sobrecalentado</b>	Vapor calentado por arriba del punto de saturación.





## RESUMEN

En la planta de producción de jabones y detergentes para lavandería, una de las fuentes principales de energía es el vapor generado a partir del calentamiento de agua por medio de una caldera pirotubular de tres pasos con una capacidad de 100 BHP.

En ocasiones, la demanda de consumo de vapor es baja, por lo tanto, la caldera no genera vapor de agua a su máxima eficiencia. Debido a la baja de la eficiencia térmica de la caldera, se realizó un análisis del consumo energético del equipo para determinar si el sistema actual cumplía adecuadamente con la demanda de vapor.

Para lograrlo, se realizaron mediciones de temperatura, presión, consumo de agua y combustible. Posteriormente, se realizó un balance de masa y energía para determinar la eficiencia térmica del equipo

La eficiencia térmica promedio de la caldera fue de 64 % a partir del calor liberado por la reacción de combustión del bunker. Se obtuvo una capacidad de generación máxima de 36 toneladas de vapor al día, considerando que la demanda de vapor actual de las líneas de producción se encuentra entre 7 a 20 toneladas.

A partir del análisis del consumo energético realizado, se evaluó la propuesta de mejorar la eficiencia térmica, según la demanda de producción, considerando una inversión inicial con posibles alternativas para satisfacer con las necesidades actuales de operación. El buen funcionamiento de la caldera

está destinado a incrementar la eficiencia de la caldera y, a su vez, mejorar los costos de operación.

La concentración de los gases de combustión promedio generados por la reacción incompleta del bunker en base húmeda fue del 12,18 % de  $\text{CO}_2$  0,93 ppm de  $\text{CO}$ , 5,31 % de  $\text{O}_2$ , 96,92 % de  $\text{N}_2$  y 8,30 % de  $\text{SO}_2$ .

# OBJETIVOS

## General

Evaluar el consumo energético en la generación de vapor de agua en una planta de producción de jabones y detergentes de lavandería.

## Específicos

1. Realizar el análisis de un balance energético para la caldera en condiciones normales de operación.
2. Determinar la eficiencia térmica de la caldera en el proceso de generación de vapor, según condiciones normales de operación.
3. Realizar un análisis comparativo de la demanda de consumo de vapor contra la capacidad de generación del equipo actual.
4. Establecer el costo de una inversión inicial para otras alternativas.
5. Evaluar el grado de contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de la combustión de la caldera.



## INTRODUCCIÓN

En innumerables industrias, el consumo de vapor de agua es parte de la producción diaria para el calentamiento de múltiples equipos, sin tener que recurrir a la presencia de diferentes combustiones en distintos puntos.

Una caldera tiene como objetivo principal generar energía limpia, rentable y eficiente para ser aprovechada en los procesos de producción. A través del proceso de generación, distribución y consumo siempre se dará lugar a pérdidas energéticas, sin embargo, pueden llegar a disminuir si se realiza una adecuada evaluación y control de ciertos puntos críticos del proceso.

En el proceso de producción de una industria de productos de lavandería se utiliza vapor de agua como fuente de calentamiento para la fabricación de jabones y detergentes. Dicho vapor es generado a partir de una caldera pirotubular con una capacidad de 100 BHP.

El vapor de agua, producido por una caldera, tiene múltiples aplicaciones a nivel industrial dependiendo de su presión, temperatura o caudal. En cualquier industria se busca la optimización, y si es necesario, evaluar la posibilidad de implementar un nuevo sistema de generación de vapor con la finalidad de cubrir la demanda energética requerida en función de la capacidad de producción.

En una caldera, el agua de alimentación debe tener un tratamiento previo para reducir la cantidad de sólidos disueltos en el agua (dureza) por medio de procesos químicos, con el objetivo de prevenir incrustaciones y corrosión en el

interior de la caldera que puedan ocasionar un bajo rendimiento de la misma y fugas de agua.

En el presente informe de proyecto de graduación de EPS, se presenta la evaluación realizada del consumo energético en la generación de vapor de agua de una planta industrial encargada de la producción de jabones y detergentes para lavandería. Durante la ejecución del proyecto fue posible aplicar los conocimientos obtenidos durante la carrera de Ingeniería Química, a fin de determinar el grado de aprovechamiento de la energía del combustible para producir vapor por medio de una caldera.

## **1. ANTECEDENTES**

En abril de 1940, Oscar Kong fundó la planta en Mixco, Guatemala. En esa época se dedicaba a la producción de velas de sebo de origen animal, las cuales eran elaboradas de forma artesanal. Con el tiempo, se interesaron en la producción de detergentes en polvo y jabones. Fue la primera fábrica del país en producir productos de lavandería a nivel industrial. Durante más de 60 años de operación, la fábrica adquirió conocimiento y experiencia en la producción de esta línea de productos.

En el 2003, la fábrica se une en sociedad de forma estratégica con una empresa de origen alemán, e inició actividades con una Unidad de Detergentes. En 2010 se concluye la adquisición de la planta guatemalteca, que se consolida como una empresa de capital alemán, capaz de expandir el negocio a nuevos mercados como el de Centro América y el Caribe.

Actualmente, la empresa cuenta con diversas marcas y productos que la han posicionado en el mercado. Es pionera en el mercado de lavaplatos líquido, línea que ingresó al país en el 2011. También cuenta con una marca de jabón sólido, la cual ha sido icono para los guatemaltecos. Sin embargo, con el paso del tiempo ha disminuido la demanda de producción en algunos de estos productos, por ende, el consumo de vapor generado por el calentamiento del agua a partir de una caldera y usado de forma energética, también ha disminuido, ocasionando que el equipo no trabaje eficientemente.

## **1.1. Condiciones actuales del equipo**

Antes de iniciar el estudio es importante conocer las condiciones de operación en las que se encuentra actualmente la caldera con respecto a la generación de vapor.

Se dispone de una caldera pirotubular marca Fulton con capacidad de 100 BHP, una presión máxima de diseño de 1,0 MPa (150 psi), horizontal de tres pasos, una demanda evaporativa promedio actual de 12 toneladas de vapor al día. El quemador marca Maraton Electric tiene una potencia de 3 a 5 kW, el cual trabaja con gas natural.

La caldera trabaja durante 24 horas al día, 7 días a la semana, para cumplir con la demanda de consumo de vapor requerida en la producción de los productos de lavandería.

El monitoreo de los medidores del sistema de vapor en el cuarto de máquinas es llevado por el Departamento de Ingeniería de la planta y consiste en la lectura del ingreso y consumo de búnker por la caldera y el control del agua de alimentación.

El aseguramiento de la calidad del agua de alimentación de la caldera cumple con ciertos requerimientos o puntos críticos establecidos para agua de calderas, que definen los límites recomendados para los parámetros involucrados en el tratamiento del agua, de los cuales se mide pH, alcalinidad, sólidos, dureza, sílice, fosfatos y sulfitos.

El tratamiento del agua de una caldera de vapor es fundamental para asegurar una larga vida útil sin problemas operacionales y de mantenimiento. El



objetivo principal del tratamiento de agua es evitar problemas de corrosión y de incrustaciones, asegurando la calidad del agua de alimentación y del agua dentro de la caldera.

El agua que ingresa a la caldera recibe un tratamiento previo a través de un suavizador por intercambio iónico, para evitar la formación de incrustaciones en la caldera. Este tipo de suavizador tiene la capacidad de remover la dureza del agua. Esto quiere decir que los iones de calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ ) que producen la dureza del agua, son removidos por completo. Como primer paso, el agua fluye por un sistema conformado por filtros de sedimentos y de carbón activado. Luego, el agua pasa a través del suavizador que contiene una capa de resina cubierta con iones de sodio ( $\text{Na}^{+}$ ). Cuando el agua dura pasa a través de las resinas iónicas, estas actúan como un imán, atrayendo los iones de calcio y magnesio a cambio de los iones de sodio.

A medida que el agua pasa a través de la capa de resina, aumenta la cantidad de minerales hasta saturarla; en este punto es necesario regenerarla. Este proceso se conoce como regeneración. Durante dicho proceso, una solución de salmuera pasa a través de la resina, y una corriente de iones de sodio reemplazan los iones de calcio y magnesio acumulados. Por último, la solución de salmuera es expulsada del tanque arrastrando los iones de calcio y magnesio, y es vaciada a la fosa de la purga.

Figura 1. **Caldera pirotubular de la planta de fabricación de jabones y detergentes de lavandería**



Fuente: elaboración propia.

## 1.2. **Justificación**

El objetivo principal de la planta de producción es optimizar el manejo de los recursos y alcanzar la mayor eficiencia posible en los procesos que la conforman, con el propósito de disminuir los costos de producción, obtener mayores ganancias y eliminar pérdidas innecesarias de energía que pudiesen ser de vapor de agua.

Para mejorar la eficiencia térmica en la generación de vapor de agua es necesario la instalación de un sistema adecuado que cubra la demanda de

producción requerida y, con ello, obtener beneficios económicos y ambientales, para optimizar la productividad de la empresa.

Al instalar una caldera de potencia superior a la necesaria implica que durante la mayor parte del tiempo funcionará a carga parcial, con un rendimiento inferior al nominal. Por lo tanto, será menos eficiente energéticamente y ocasionará pérdidas económicas debido a consumos elevados de combustible. Lo que se busca al instalar un equipo adecuado, según las necesidades de producción, es que el sistema trabaje el máximo tiempo posible en el rango de potencia idóneo.

La importancia de dimensionar correctamente un equipo a partir de la demanda requerida de producción es lograr el uso inteligente de los recursos disponibles, desde su generación en el área de calderas y la red de distribución, hasta los principales procesos que consumen vapor en las líneas de producción. Se busca ahorrar energía y, al mismo tiempo, reducir las emisiones de los gases de combustión que tienen un impacto ambiental significativo. Debido a que la eficiencia actual de generación de vapor es baja, se evaluaron alternativas para obtener una mayor eficiencia a través de un equipo más pequeño que cubra la demanda de producción.

Se desarrolló el análisis de la eficiencia de la caldera de acuerdo a la NOM-002-ENER-1995 “Norma Oficial Mexicana Eficiencia Térmica de Calderas, Especificaciones y Método de Prueba” y el de las variables involucradas en la generación de vapor. La planta de producción implementará oportunidades de mejora en el control del proceso y en el equipo propiamente, considerando condiciones de mayor eficiencia en el consumo energético.

### **1.3. Estudios previos realizados**

La generación de vapor de agua se produce mediante la transferencia de calor del proceso de combustión que ocurre en el interior de la caldera hacia el agua por medio de la convección y radiación, elevando de esta manera su temperatura y presión, para luego convertirla en vapor.

Con la generación de vapor se requiere producir más vapor a menor costo por medio del aumento de la eficiencia en la que trabaja la caldera. Al respecto, se han realizados distintas investigaciones y establecido propuestas para incrementar la eficiencia y contrarrestar costos innecesarios en diferentes países.

En abril de 2007, Jorge Palencia, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, desarrolló una propuesta de mejoramiento de un sistema de vapor en su generación, distribución y utilización para un buen aprovechamiento de la energía e implementó programas de mantenimiento preventivo y correctivo para maximizar la eficiencia del sistema.

En octubre de 2010, Samuel Cardozo, de la Universidad Simón Bolívar, Barranquilla, Colombia, realizó un seguimiento de algunos parámetros fisicoquímicos importantes para el diagnóstico de las aguas de caldera para garantizar la operación óptima y segura de los equipos en un sistema de generación de vapor.

En febrero de 2012, Heidi Lara, de la Escuela de Ingeniería Química, planteó la propuesta de incrementar la eficiencia de una caldera pirotubular en una planta enfocada a la producción de artículos para la higiene del hogar, con

el objetivo de contrarrestar el incremento de los costos de operación por medio de la introducción de una línea de retorno de condensado.

En febrero de 2015, Rodolfo Izaguirre, de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, realizó un estudio sobre el correcto aprovechamiento del vapor, desde su generación en el área de calderas, con la finalidad de medir su eficiencia y optimizar dicho consumo. Durante el análisis determinó reacciones de combustión deficientes en la caldera con equipos especializados por pérdidas de calor por radiación y convección.

En noviembre de 2015, Edgar Valenzuela, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, llevó a cabo la evaluación de los sistemas encargados de la generación de vapor y definió factores que restaban eficiencia en el proceso y su distribución hacia otros equipos. Dentro de dichos factores identificó que las incrustaciones en los tubos internos de la caldera y el exceso de aire en la combustión y de purgas ocasionaban que la eficiencia térmica de la producción de vapor no fuera completamente óptima.



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Transferencia de calor

La transferencia de calor siempre se produce a partir del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja y esa transferencia se detiene cuando ambos alcanzan la misma temperatura.

La diferencia de temperaturas es la fuerza impulsora para la transferencia de calor. A mayor gradiente de temperatura, mayor es la razón de la transferencia.

El calor se puede transferir por tres mecanismos diferentes: conducción, convección y radiación.

#### 2.1.1. Conducción

Este mecanismo ocurre por contacto directo entre dos cuerpos, sin que tenga lugar un movimiento observable de la materia. La conducción puede tener lugar en sólidos, líquidos o gases. Este mecanismo de transferencia de calor está expresado por la Ley de Fourier de la conducción de calor, la cual indica que el flujo de calor es proporcional al área de contacto entre el gradiente de temperaturas e inversamente proporcional a la separación entre ambas.

$$\dot{Q}_{CD} = \frac{kA_c\Delta T}{x}$$

Donde:

$\dot{Q}_{CD}$  = calor transferido por conducción [W]

$k$  = conductividad térmica del material [W/k · m]

$A_c$  = área de la superficie de contacto [m<sup>2</sup>]

$\Delta T$  = diferencia de temperatura [K]

$x$  = espesor del material [m]

### 2.1.2. Convección

Constituye el mecanismo de transferencia de energía entre una superficie sólida a través de un fluido, líquido o gas adyacente, en presencia de un movimiento masivo de este. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección.

La convección se clasifica como convección natural o libre y forzada, dependiendo de la manera en que se inicia el movimiento del fluido. En la convección forzada se obliga a que el fluido fluya sobre una superficie o en un tubo por medios externos. En la convección natural, cualquier movimiento del fluido es causado por medios naturales.

La convección también se clasifica como interna y externa, dependiendo de si se obliga al fluido a fluir sobre una superficie o en un tubo.

A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la razón de la transferencia de calor por este mecanismo es proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie sólida y el fluido.



La transferencia conductiva se expresa por la Ley de Enfriamiento de Newton.

$$\dot{Q}_{CV} = hA_s(T_s - T_\infty)$$

Donde:

$\dot{Q}_{CV}$  = calor transferido por convección [W]

$h$  = coeficiente de película o convectivo [ $W/m^2 \cdot K$ ]

$A_s$  = área superficial de transferencia [ $m^2$ ]

$T_s$  = temperatura de la superficie [K]

$T_\infty$  = temperatura del fluido [K]

### 2.1.3. Radiación

Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida. A diferencia de los otros mecanismos, para la radiación no es necesario que los cuerpos se encuentren en contacto directo, al contrario, puede haber espacio entre ellos para que ocurra la transferencia.

La radiación térmica es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Todos los sólidos, líquidos y gases reflejan, absorben o transmiten radiación.

La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica  $T_s$  es expresada por la Ley de Stefan-Böoltzman.

$$\dot{Q}_{RD} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4$$

Donde:

$\dot{Q}_{RD}$  = radiación emitida por una superficie [W]

$\varepsilon$  = emisividad del cuerpo [adimensional]

$\sigma$  = constante de Stefan-Böoltzman ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )

$A_s$  = área superficial del cuerpo emisor [ $\text{m}^2$ ]

$T_s^4$  = temperatura de la superficie [K]

## 2.2. Calderas y generadores de vapor

Una caldera está destinada a producir vapor o calentar agua mediante la acción del calor a una temperatura superior a la del ambiente y presión mayor a la atmosférica. A la combinación de una caldera y un sobrecalentador, dedicada a incrementar la temperatura de salida del vapor por encima de su temperatura de saturación, se le conoce como generador de vapor.

Uno de los principales fines del consumo de agua a nivel industrial es su uso en transferencia de calor, tanto en procesos de calentamiento como de enfriamiento. La forma tradicional de suministrar energía calorífica a diversas zonas de un complejo industrial es por medio de vapor de agua.

En este medio la producción de grandes cantidades de vapor se realiza mediante el uso de calderas de diversos tipos, pirotubulares y acuotubulares, a partir de la utilización de un combustible, generalmente derivado del petróleo, como medio aportante de energía para transformar el agua en vapor a determinada presión y temperatura. En calderas de agua caliente no se suelen

sobrepasar los 90 °C, queda por debajo del punto de ebullición del agua y en calderas de vapor se llega a temperaturas arriba del punto de ebullición.

Luego de ser generado, y debido a su presión, el vapor de agua puede ser transportado al equipo o proceso sin necesidad de utilizar algún medio mecánico, pero sí por tuberías aisladas.

Una caldera es un intercambiador de calor en el que la energía se aporta generalmente por un proceso de combustión. El calor aportado se transmite a un fluido, generalmente agua, que se vaporiza según la temperatura y presión requerida y se transporta a un equipo en el que se cede esa energía calorífica.

### **2.2.1. Clasificación de las calderas**

Se clasifican según diversos criterios, relacionados con la disposición de los fluidos y su circulación.

#### **2.2.1.1. Por la disposición de los fluidos**

Según por donde circulen los humos de combustión y por donde lo haga el agua, las calderas se clasifican en:

- **Pirotubulares o de tubos de humos:** las calderas de vapor pirotubular están construidas especialmente para el aprovechamiento de los gases de recuperación. El vapor generado pasa por el interior de los tubos y el agua se circula por el exterior.
- **Acuotubulares o de tubos de agua:** la diferencia principal entre este tipo de calderas y las pirotubulares es el modo en que circulan los fluidos por el

interior. En el caso de las acuotubulares, es el agua la que circula por el interior de los tubos y los gases entre los tubos y la carcasa exterior.

### **2.2.1.2. Por la configuración de la caldera**

- Calderas verticales: ofrecen un compacto y eficiente diseño que reduce requerimientos de espacio, mantenimiento y suministro de combustible. Ocupan un espacio reducido y son de menor peso, por ende, el mantenimiento es sencillo y rápido. Su especial diseño permite producir gran cantidad de vapor en tiempos cortos, por lo que tienen una capacidad de respuesta muy ágil a la demanda de vapor.
- Calderas horizontales: aquellas en las que el gas sigue una trayectoria horizontal hasta su conducción a la chimenea de evacuación.

Generalmente las calderas verticales presentan eficiencias menores a las de configuración horizontal, debido a que los gases calientes hacen un recorrido muy corto en su paso hacia la chimenea y ceden muy poco calor al agua.

### **2.2.1.3. Por el número de pasos**

Por su construcción, las calderas pueden ser de varios pasos. A medida que se aumentan el número de pasos se complica más el diseño de la caldera y su operación.

- Calderas de un paso
- Calderas de dos pasos
- Calderas de tres pasos

El número de pasos es el método que combina las características de dos o más intercambiadores de calor y permite mejorar el desempeño al tener que pasar el fluido varias veces dentro del intercambiador.

La razón principal para usar diseños multipasos es el incremento en la velocidad promedio del fluido en el tubo. Al aumentar el número de pasos también se requiere mayor presión de aire del ventilador para vencer la resistencia de los gases a circular por los tubos.

#### **2.2.1.4. Por la presión de trabajo de la caldera**

Entre los factores más importantes para determinar la caldera por utilizar, se debe conocer cuál será la presión de operación que demanden las actividades en las que se utilizará el vapor.

- Calderas de baja presión: producen vapor a baja presión hasta 60 psi. Este rango de presiones es más común en las calderas de agua caliente que en las calderas que generan vapor.
- Calderas de media presión: producen vapor entre 60 a 150 psi, aproximadamente. Generalmente generan vapor saturado para ser utilizado en la industria en general.
- Calderas de alta presión: asociadas a ciclos de potencia que trabajan con presiones de 150 a 250 psi.
- Calderas supercríticas: son calderas que trabajan con presiones superiores a 250 psi. Utilizadas en grandes plantas de generación de energía eléctrica.

### **2.2.1.5. Por la producción de vapor**

Dependiendo del tamaño de la caldera, así será la cantidad de vapor que sea generado por la misma.

- Calderas pequeñas: producen hasta 1 o 2 toneladas de vapor saturado por hora.
- Calderas medianas: producciones de hasta 20 toneladas de vapor por hora. Las calderas pequeñas y medianas, casi en su totalidad, son calderas piro-tubulares de baja y media presión.
- Calderas grandes: producen mayor a 20 toneladas de vapor por hora, es normal encontrar producciones de 500 y 600 toneladas por hora. Generalmente de vapor sobrecalentado, son calderas acuotubulares.

### **2.2.1.6. Por el combustible utilizado**

El diseño de la caldera depende del combustible que se usa. En la industria hay varias situaciones en las que encontramos calderas que operan con combustibles duales, lo que permite el uso de uno u otro combustible, dependiendo de su disponibilidad y costo.

Hay tipos diferentes de combustibles que se pueden usar para producir vapor en plantas industriales. Los combustibles usados se dividen en sólidos, líquidos y gaseosos; de origen natural o artificial.

Tabla I. **Tipos de combustible para calderas**

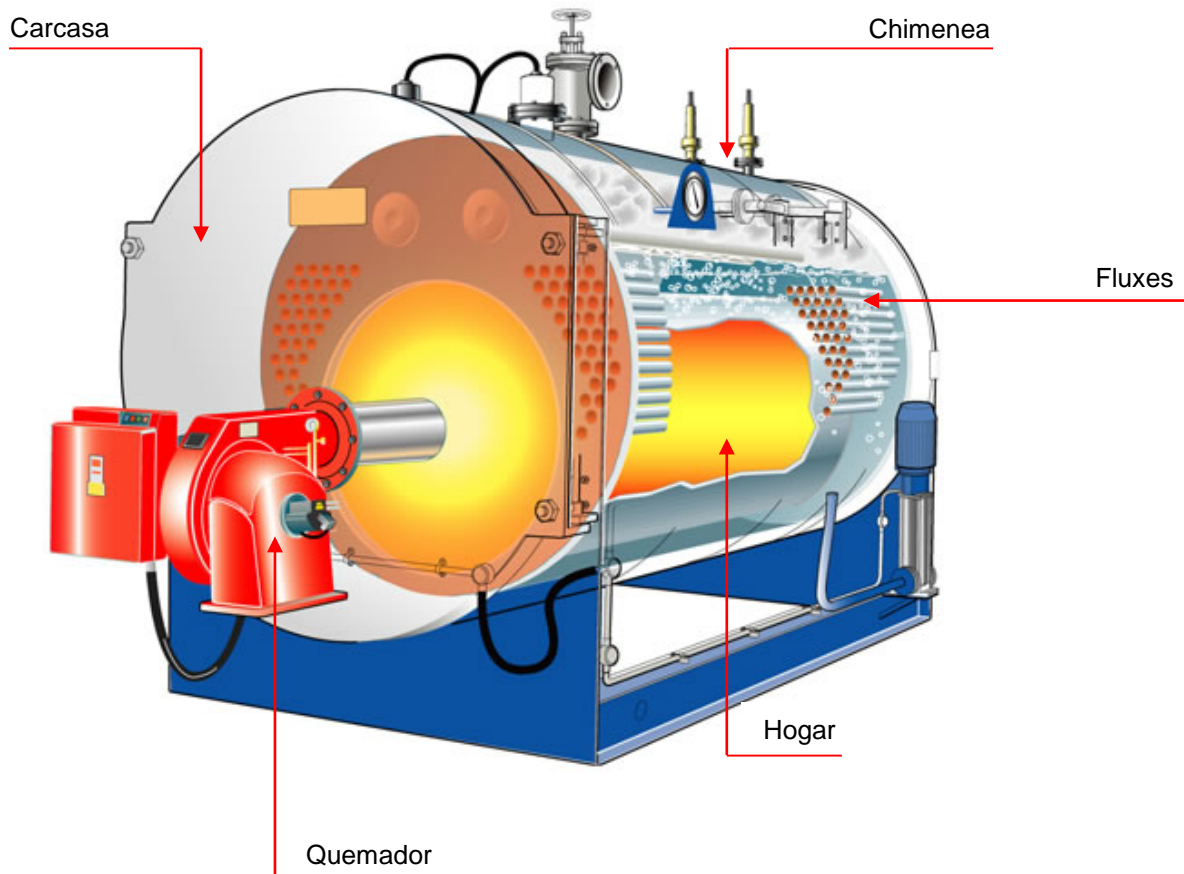
<b>ESTADO</b>	<b>NATURALES</b>	<b>ARTIFICIALES</b>
Sólidos	Leña Turba Lignito Hullas Antracitas	Briquetas
Líquidos	Petróleo	Alquitrán Bencina Kerosene Fuel oil (Bunker) Etanol
Gaseosos	Gas natural	Gas propano Gas butano

Fuente: LEIGHTON, Sebastián; VÁSQUEZ, Carlos. *Plantas térmicas. Tipos de combustibles utilizados en calderas y sus características*. <https://idoc.pub/documents/tipos-de-combustibles-utilizados-en-calderas-k546dredwqn8>. Consulta: noviembre de 2017.

### **2.2.2. Partes principales de la caldera**

La estructura real de una caldera dependerá de su disposición y composición. No obstante, de forma general, se pueden describir las siguientes partes:

Figura 2. Partes principales de la caldera pirotubular



Fuente: Caldecol. Calderas de Colombia. *Partes de una caldera*. [www.caldecol.com/diagramas](http://www.caldecol.com/diagramas).

Consulta: enero de 2017.

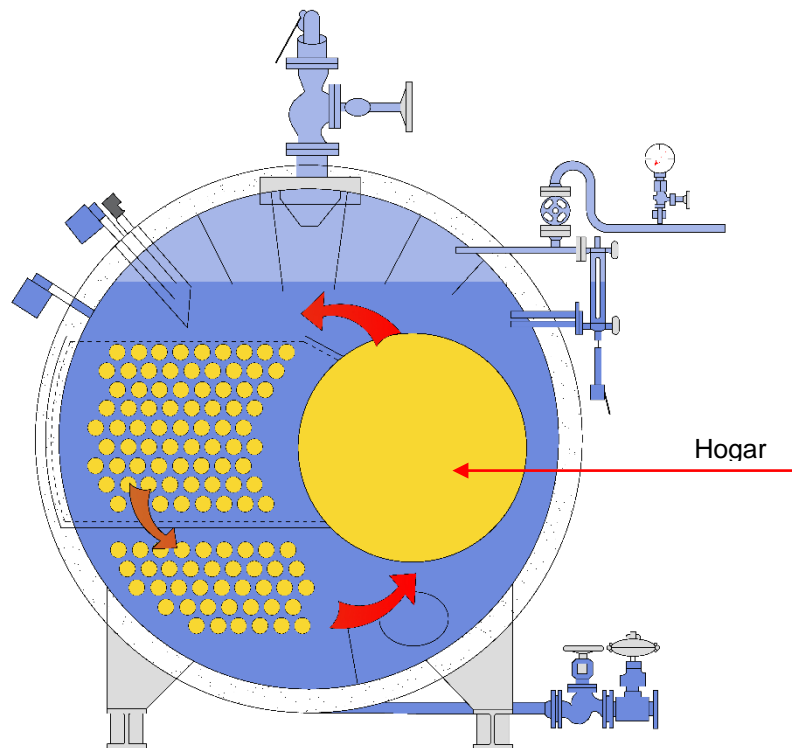
### 2.2.2.1. Hogar o fogón

Lugar en donde se quema el combustible y se produce la generación de los gases calientes. Se le conoce también como cámara de combustión.



En una caldera pirotubular se encuentra ubicado en el centro del cuerpo de esta. El interior del horno está sometido a altas temperaturas, así como a un ambiente corrosivo.

Figura 3. **Corte transversal de una caldera pirotubular**

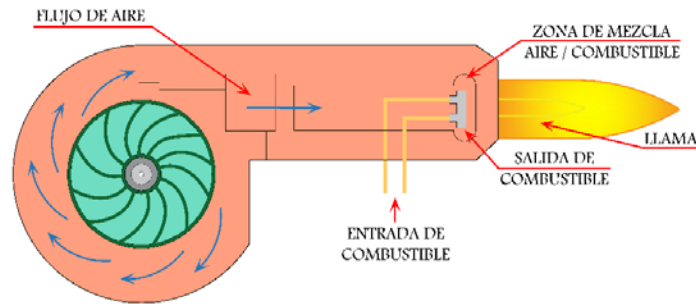


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2018.

#### **2.2.2.2. Quemador**

Mezcla y dirige el flujo de combustible y aire para iniciar y mantener el proceso de combustión.

Figura 4. **Quemador de una caldera**

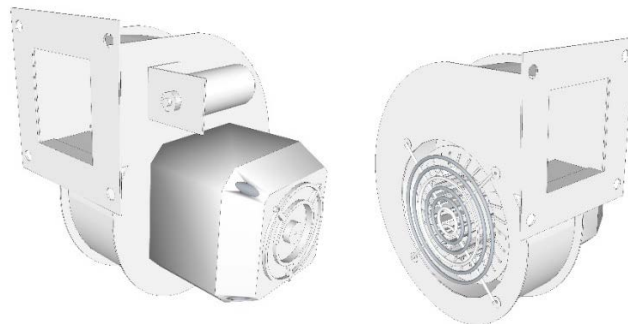


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2018.

### 2.2.2.3. Ventilador

Es el encargado de suministrar aire necesario para efectuar la combustión y de desplazar adecuadamente los gases de combustión desde el hogar hacia la chimenea. Esto se logra creando una corriente de aire a la que se denomina tiro, la cual se obtiene por medios naturales o mecánicos.

Figura 5. **Ventilador de una caldera**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro2017.

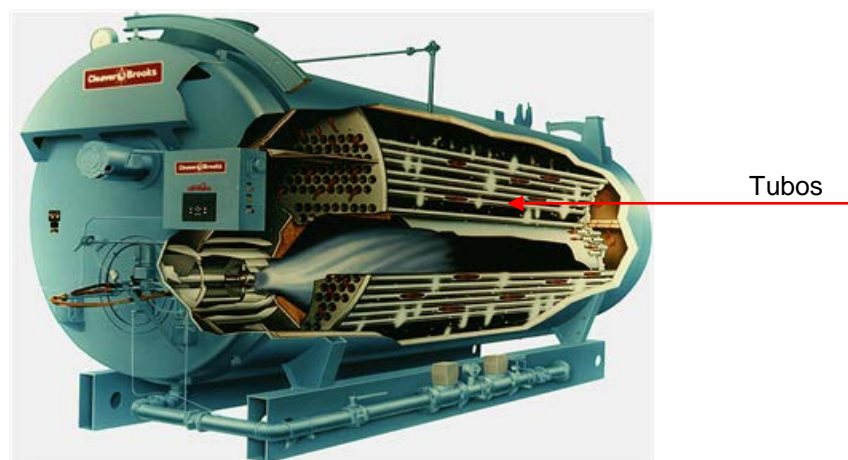
#### 2.2.2.4. Fluxes o tubos de intercambio de calor

El flujo de calor desde los gases hasta el agua tiene lugar a través de la superficie de los fluxes o tubos de intercambio de calor. Conducen los gases calientes a través de la caldera, cede el calor al agua hasta que esta hierva y se convierta en vapor.

En una caldera pirotubular, los gases producidos en la combustión circulan por los tubos, los cuales se ubican dentro de la caldera y realizan varios pasos para entrar en contacto con el agua de la caldera.

Se sugiere que los tubos de intercambio de calor utilizados en las calderas deben ser de cobre tipo “K”, los cuales son empleados para instalaciones industriales. El espesor de su pared es aún más grueso en comparación a otro tipo de tubos. Estos tubos se caracterizan por ser resistentes a altas presiones y temperaturas.

Figura 6. Fluxes de una caldera

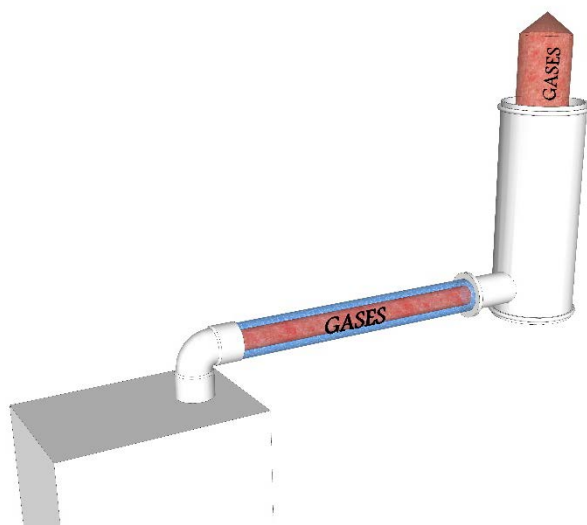


Fuente: EBD Engineering. *Central Boiler Plant Systems*.  
[www.ebdengineering.com/technologies](http://www.ebdengineering.com/technologies). Consulta: mayo de 2017.

### 2.2.2.5. Chimenea

Es la vía de escape de los gases de combustión después de haber cedido la mayor parte de calor al fluido. La chimenea de la caldera puede tener o no una compuerta que permite variar el flujo de salida de los gases.

Figura 7. Chimenea de la caldera



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro2017.

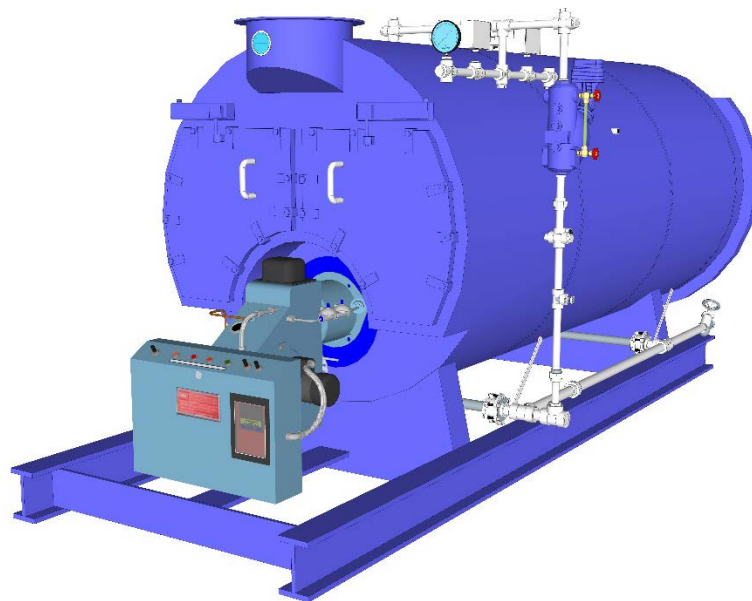
El dióxido de carbono ( $CO_2$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), oxígeno ( $O_2$ ), nitrógeno ( $N_2$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y vapor de agua son gases de combustión que salen de la chimenea de la caldera.

La composición de los gases de combustión se puede expresar en base seca (gases de combustión seca), en la cual se indican las fracciones molares del gas sin considerar el agua, y en base húmeda (gases de combustión húmeda), en la cual se reflejan las fracciones molares de los componentes del mismo gas de combustión considerando el agua.

### **2.2.2.6. Carcasa o cuerpo de caldera**

Contiene el hogar y el sistema de tubos de intercambio de calor. Es el área por donde fluye el agua y el vapor dentro de la caldera. Si se trata de una caldera pirotubular, los productos de la combustión pasan a través de los tubos de la caldera, que transfieren calor al agua circundante de la caldera.

Figura 8. **Carcasa de una caldera**



Fuente: elaboración propia, empleando SketchUp Pro-2017.

### **2.2.3. Partes complementarias**

Las partes complementarias y dispositivos de seguridad que conforman la caldera son las siguientes:

### **2.2.3.1. Válvula de seguridad**

Es uno de los dispositivos más importantes. Se encuentra ubicada en la parte superior de la carcasa y su función es evitar que la caldera no sobrepase la presión máxima de trabajo.

### **2.2.3.2. Válvula de purga**

Se encuentra ubicada en la parte inferior de la caldera con el objetivo de eliminar cierta cantidad de agua con lodos y sedimentos que se han acumulado en la parte interna de la caldera.

También se utiliza para eliminar agua del sistema de la caldera para que pueda añadirse agua nueva, a fin de mantener la cantidad de sólidos disueltos a una baja concentración.

### **2.2.3.3. Indicador de nivel**

Su función es detectar el nivel de agua presente dentro de la caldera, de tal forma que, al bajar el nivel de agua por la producción de vapor, se activa el dispositivo permitiendo el ingreso de agua de alimentación a la caldera.

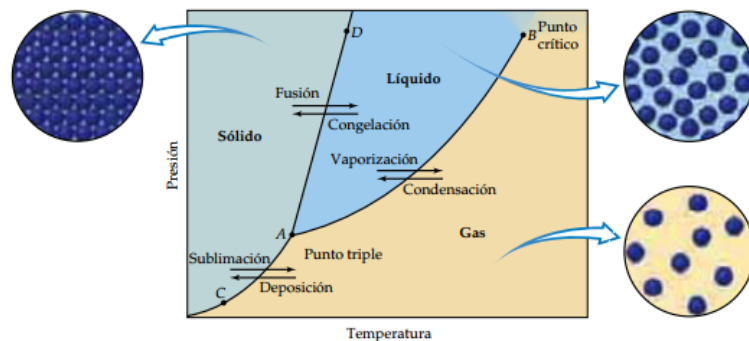
### **2.2.4. Producción de vapor**

Uno de los métodos más efectivos en la transferencia de calor es el vapor. El vapor generado es fácil de transportar y contiene gran cantidad de calor como resultado del cambio de fase al pasar de líquido a vapor. La capacidad calorífica del agua a 25 °C es de 1 915 J/kg °C, que es la cantidad de calor que puede absorber al evaporarse.

El vapor es generado como resultado de suministrar energía a un cuerpo de agua y lograr que su temperatura se eleve sobre el punto de ebullición, para que la presión de vapor del agua sea mayor a la tensión superficial y permita el cambio de fase.

El vapor saturado se obtiene a partir de cierta energía necesaria para elevar la temperatura de un líquido hasta alcanzar su punto de ebullición. Se le conoce como calor sensible, y a la energía necesaria para que ocurra el cambio de fase, se le conoce como calor latente. Si este vapor es posteriormente calentado por arriba del punto de saturación, se convierte en vapor sobrecalentado.

Figura 9. **Diagrama de fases del agua**



Fuente: BROWN, Theodore. *Química, la ciencia central*. p.457.

#### 2.2.4.1. Vapor saturado

El vapor saturado se presenta en rangos de temperatura de 0,01 °C a 374,14 °C y a rangos de presión de 0,6113 MPa a 22,09 MPa en los cuales el vapor y el líquido pueden coexistir juntos. En otras palabras, esto ocurre cuando el rango de vaporización es igual al rango de condensación del agua.

Cuando el vapor es transportado desde su generación hacia el punto en el que se utilizará, existe una pequeña condensación debido al enfriamiento a su paso por la tubería. Aunque esta condensación sea mínima, es importante tomar en cuenta que la cantidad total generada de vapor no será la misma cantidad que llegará a los equipos en los que será utilizado.

#### **2.2.4.2. Vapor sobrecalentado**

Se genera por el sobrecalentamiento del vapor saturado para alcanzar un punto mayor al de saturación. Esto quiere decir que es un vapor que contiene mayor temperatura y menor densidad que el vapor saturado en una misma presión. El vapor sobrecalentado se presenta en rangos de temperatura de 50 °C a 1 300 °C y a rangos de presión de 0,01 MPa a 600 MPa.

Este vapor es usado principalmente para el movimiento e impulso de turbinas y no para aplicaciones de transferencia de calor.

#### **2.2.4.3. Tablas de vapor**

Las tablas de vapor de agua son tablas en donde se encuentran tabuladas diferentes propiedades del agua en estado líquido y estado gaseoso (vapor). Entre las propiedades que se incluyen en dichas tablas se encuentran la temperatura de ebullición del agua a una presión determinada, el volumen específico y las entalpías de vaporización.



### 2.2.5. Proceso de combustión

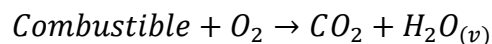
Es una reacción química de oxidación en la que se combinan elementos combustibles (agentes reductores) con el oxígeno del aire en presencia de calor (agente oxidante).

El fuego es el resultado de una reacción química de combustión que genera calor, luz (llama), humo y gases. Todo fuego necesita tres elementos indispensables para iniciarse, los cuales están definidos por el Triángulo de fuego.

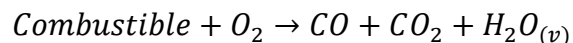
Cuando se quema un combustible, el carbono contenido reacciona para formar dióxido de carbono y/o monóxido de carbono; el hidrógeno forma vapor de agua; el azufre forma óxidos de azufre y el nitrógeno forma óxidos de nitrógeno.

Una reacción de combustión en la que todo el combustible se quema formando dióxido de carbono y vapor de agua, se conoce como combustión completa; mientras que, si se forma adicionalmente monóxido de carbono en la reacción, se conoce como combustión parcial o incompleta.

- Combustión completa



- Combustión incompleta



La combustión completa oxida todo el carbono presente en el hidrocarburo a dióxido de carbono, y todo el hidrógeno a vapor de agua, sin que se tenga presencia en exceso de ningún reactivo. En la combustión incompleta llegará un momento en que el oxígeno se agote y la reacción se detenga o se produzca de forma deficiente.

La proporción ideal de aire y combustible se le conoce como factor estequiométrico ( $\lambda$ ). Solo con esta proporción se garantiza la combustión completa del combustible dentro de la caldera. Con una relación  $\lambda = 1$  se obtiene una combustión perfecta porque el combustible reacciona con la cantidad necesaria de aire. Con una relación  $\lambda < 1$  se tiene escasez de aire, por lo que el combustible no reacciona completamente. Con una relación  $\lambda > 1$  se indica que existe exceso de aire en la combustión.

#### **2.2.5.1. Triángulo de fuego**

También conocido como el Triángulo de Combustión, describe los tres elementos necesarios para generar la mayor parte de los fuegos: combustible, comburente (agente oxidante) y energía de activación. Cuando estos factores se combinan en la proporción adecuada, el fuego se desencadena.

- Combustible: cualquier materia capaz de arder. Puede ser sólido, líquido y gaseoso.
- Comburente: aquella sustancia que en combinación con el combustible favorece o permite la combustión. El más común es el oxígeno, que está presente en el aire y que se encuentra en proporción de 21 % y 79 % con el nitrógeno.

- **Energía de activación:** es la energía mínima necesaria para iniciar una reacción química. Aplicada al combustible y en presencia del comburente es capaz de desprender gases del primero y producir su combustión.

Figura 10. **Triángulo de fuego**



Fuente: elaboración propia, utilizando Adobe Illustrator CC 2018.

#### **2.2.5.2. Poder calorífico o potencia calorífica del combustible**

La eficiencia de la caldera se basa en el poder calorífico del combustible, el cual es la cantidad de energía liberada cuando se quema por completo una cantidad unitaria de combustible.

En la tabla II se presenta el poder calorífico de los combustibles más usados para la combustión de calderas.

Tabla II. **Poder calorífico de los principales combustibles**

		<b>Poder calorífico</b>
<b>Combustibles sólidos</b>	Carbón	$(31\ 400 - 33\ 700) \text{ kJ/kg}$
	Turba	$(21\ 300 - 22\ 500) \text{ kJ/kg}$
	Lignito	$(28\ 400 - 29\ 600) \text{ kJ/kg}$
	Hulla	$(30\ 600 - 31\ 400) \text{ kJ/kg}$
	Antracita	$(34\ 300 - 34\ 700) \text{ kJ/kg}$
<b>Combustibles líquidos</b>	Alquitrán	$36\ 420 \text{ kJ/kg}$
	Kerosene	$(43\ 400 - 46\ 500) \text{ kJ/kg}$
	Bunker	$(39\ 765 - 41\ 860) \text{ kJ/kg}$
	Alcohol	$(26\ 790 - 29\ 720) \text{ kJ/kg}$
<b>Combustibles gaseosos</b>	Gas Propano	$(46\ 350 - 50\ 450) \text{ kJ/kg}$
	Gas Butano	$(45\ 790 - 49\ 675) \text{ kJ/kg}$
	Gas Natural	$(39\ 900 - 44\ 000) \text{ kJ/kg}$

Fuente: elaboración propia.

### 2.2.6. Tratamiento de agua de alimentación

El tratamiento del agua de una caldera es fundamental para asegurar una larga vida útil del sistema de generación de vapor, libre de problemas operacionales.

El objetivo principal del tratamiento de agua es evitar problemas de corrosión e incrustaciones, asegurando la calidad del agua de alimentación y del agua contenida en la caldera. En la figura 11 se presenta un diagrama de

flujo general del proceso del tratamiento de agua instalado en el área de calderas.

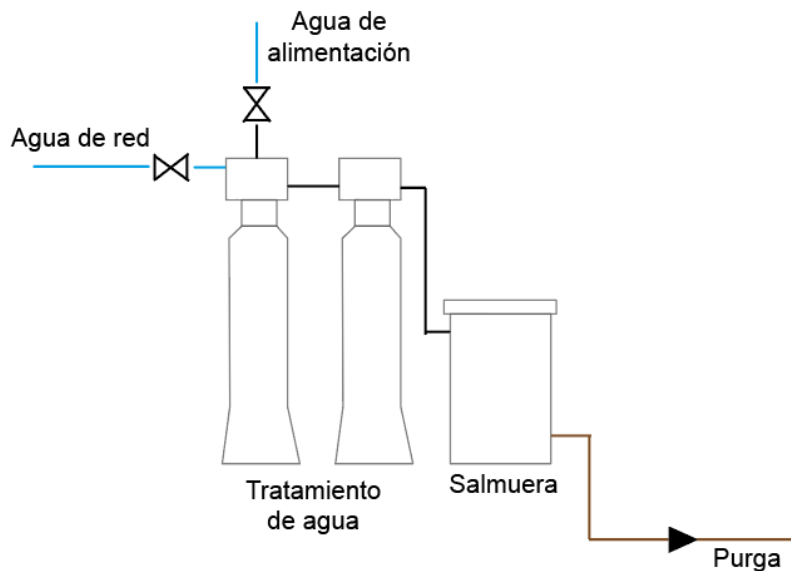
Actualmente, a nivel nacional no existe una norma o reglamento que establezca los criterios a seguir para los parámetros involucrados en el aseguramiento de la calidad del agua de una caldera; sin embargo, existen normas internacionales que definen límites recomendados para dichos parámetros, entre las cuales cabe mencionar la Norma Británica BS-2486:1997 – *Recommendations for treatment of water for steam boilers and water heaters* y la Guía EPA/600/R-12/618 *Guidelines for Water Reuse*, establecida por la US EPA, *Environmental Protection Agency* (por sus siglas en inglés).

La BS-2486:1997 establece recomendaciones para el control de las condiciones del agua de una caldera de vapor y calentadores, así mismo para la preparación del agua de alimentación, con la finalidad de prevenir incrustaciones y corrosión en calderas de baja presión.

En la guía EPA/600/R-12/618 se presentan límites recomendados para agua de alimentación y agua dentro de la caldera establecidos por la US EPA. En esta guía se establecen criterios de calidad del agua para calderas de presión baja, media y alta, ya que los criterios de calidad del agua dependen de la presión a la cual se opera la caldera.

Además de los criterios establecidos por entidades internacionales, se deben considerar las condiciones recomendadas para el agua de alimentación y de caldera por el fabricante, debido a que la calidad del agua para calderas es función de la presión de operación de ella. En general, equipos que trabajan a presiones más altas requieren agua de mayor calidad.

Figura 11. **Diagrama del tratamiento de agua de caldera**



Fuente: elaboración propia, utilizando Adobe Illustrator CC 2018.

### **2.2.6.1. Parámetros de tratamiento de agua de alimentación**

Las principales pruebas caracterizadas del tratamiento del agua para calderas de alta, media o baja presión son las siguientes:

- Prueba de dureza: cuantifica la cantidad de iones de calcio y magnesio presentes en el agua. La dureza favorece la formación de depósitos e incrustaciones difíciles de remover sobre las superficies de transferencia de calor de una caldera.
- pH: representa las características ácidas o alcalinas del agua. La cantidad de hidróxido en el agua de caldera se determina para controlar la corrosión, fragilidad, arrastres o indirectamente el control de incrustaciones.

- Prueba de oxígeno y dióxido de carbono ( $O_2, CO_2$ ): favorecen la corrosión de los componentes metálicos de una caldera.
- Prueba de fosfato ( $PO_4^{3-}$ ): la concentración de fosfatos se controla para producir incrustaciones solubles que puedan purgarse fuera de la caldera. El fosfato se utiliza para controlar el pH y dar protección contra la dureza.
- Prueba de sulfito ( $SO_3^{-2}$ ): la concentración de sulfito, si está ligeramente en exceso, se combinará con el oxígeno disuelto en el agua y así evitará la corrosión.
- Prueba de sólidos: cantidad de impurezas disueltas en el agua y que se sedimentan en el fondo de la caldera, lo que ocasiona que el coeficiente de transferencia de calor disminuya.
- Prueba de alcalinidad: se utiliza para controlar la cantidad de carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos y silicatos o fosfatos en el agua.
- Prueba de sílice: controla las incrustaciones duras o de baja conductividad térmica producidas por la sílice presente en el agua.

### **2.2.7. Eficiencia térmica de la caldera**

Para determinar la eficiencia de una caldera resulta conveniente hacer el análisis de un intercambiador de calor, identificar las entradas y salidas del sistema para dar lugar a la transferencia de energía entre dos flujos de materia. El flujo de combustible que se introduce en la caldera reacciona con aire en la cámara de combustión y produce calor para salir en forma vapor de agua y de humo por la chimenea. El flujo de agua que transita a lo largo de la caldera

absorbe el calor, producto de la combustión, y genera así la elevación de la temperatura y posterior paso al estado de vapor. Este proceso se representa en la figura 12.

El rendimiento energético de una caldera se define como la relación entre la cantidad de calor absorbido por el fluido para calentarse (calor absorbido,  $Q_a$ ) respecto a la cantidad de calor liberado por el combustible utilizado (calor liberado,  $Q_l$ ).

$$\eta = \frac{Q_a}{Q_l} \times 100$$

$$\eta = \frac{P_v(H_v - H_{H_2O})}{C_c PC} \times 100$$

Donde:

$\eta$  = eficiencia térmica de la caldera [%]

$P_v$  = producción de vapor [ $kg/d$ ]

$H_v$  = entalpía del vapor a la presión operación de la caldera [ $kJ/kg$ ]

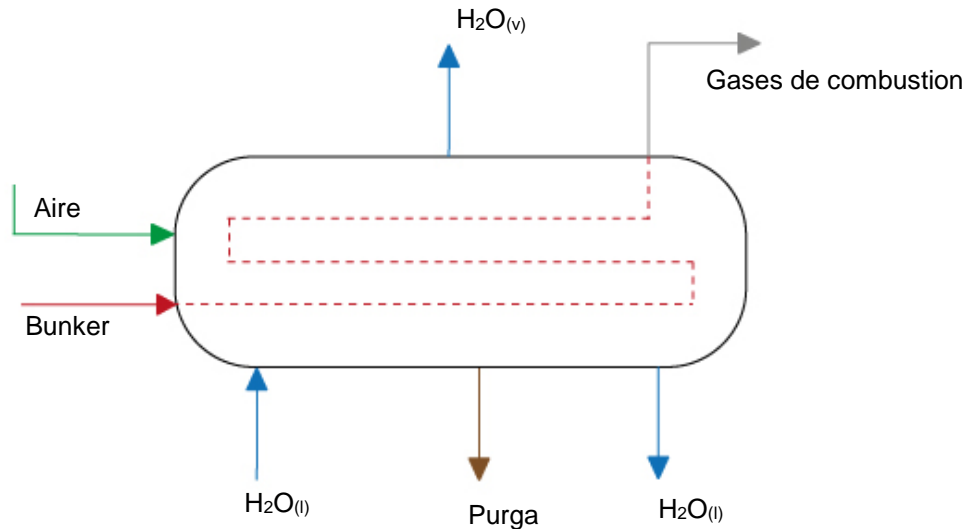
$H_{H_2O}$  = entalpía del agua de alimentación a las condiciones de entrada [ $kJ/kg$ ]

$C_c$  = consumo de combustible [ $L/d$ ]

$PC$  = poder calorífico del combustible [ $kJ/L$ ]



Figura 12. **Diagrama del análisis de la eficiencia térmica**

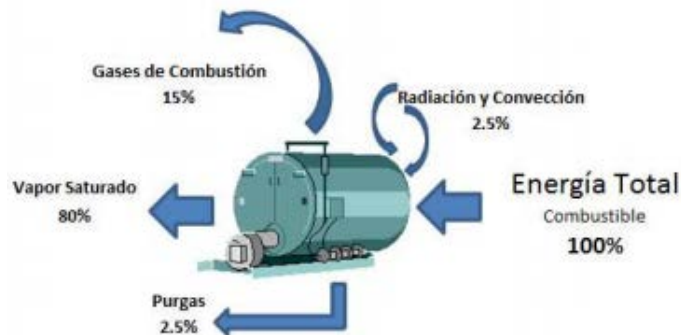


Fuente: elaboración propia, utilizando Adobe Illustrator CC 2018.

El correcto dimensionamiento de las calderas para los procesos de producción a nivel industrial se lleva a cabo con el fin de implementar mejoras en la producción de vapor. El buen dimensionamiento de la caldera está destinado a incrementar la eficiencia térmica y mejorar los costos de operación.

Cuando se habla de optimizar el funcionamiento de una caldera se debe enfocar en sus requerimientos. El combustible utilizado por la caldera ingresa como un 100 % de energía. Su eficiencia es aproximadamente el 80 % para generar vapor, debido que un 15 % de la energía escapará en los gases de combustión y un 5 % entre purgas y pérdidas por radiación y convección.

Figura 13. **Funcionamiento de una caldera**



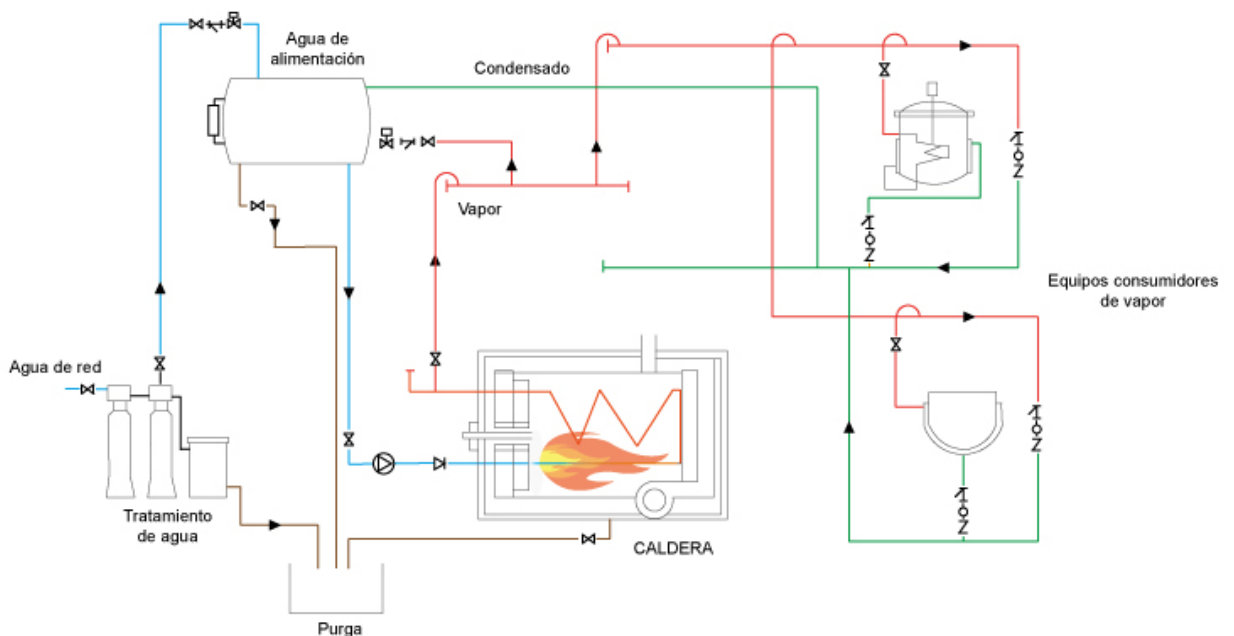
Fuente: HAYWOOD, Richard Wilson. *Ciclos termodinámicos de potencia y refrigeración*. p.60.

### 2.3. **Sistemas de vapor industrial**

El proceso de optimización de sistemas de vapor consiste en comprender el funcionamiento y la gestión actuales del sistema de vapor industrial a optimizar.

Actualmente, el sistema de generación de vapor es una caldera pirotubular Fulton de 100 BHP, horizontal de tres pasos que utiliza Bunker como combustible, con un consumo de 8 150 galones produciendo 300 000 kW al mes de energía con una producción actual aproximada de 12 toneladas de vapor generado al día por metro cubico de combustible. Debido a que la eficiencia de generación de vapor es baja se evaluaron alternativas para obtener una mayor eficiencia a través de un equipo más pequeño que cubra la demanda de producción actual.

Figura 14. Diagrama de flujo de la generación de vapor en una caldera



Fuente: elaboración propia, utilizando Adobe Illustrator CC 2018.

#### 2.4. Impacto ambiental ocasionado por gases de combustión

Las fuentes de impacto ambiental están constituidas por las emisiones y afluentes propios del funcionamiento de la planta. La combustión de hidrocarburos origina una serie de deterioros ambientales importantes en el aire, liberando emisiones hacia la atmósfera.

- Aumento de la temperatura ambiente del planeta.
- Probabilidad de sequías e inundaciones.
- Mayor frecuencia de formación de huracanes.
- Crecimiento del nivel de los océanos.

### **2.4.1. Efecto invernadero**

Es ocasionado por el incremento de  $CO_2$  y otros gases en la atmósfera. Evita que la energía recibida constantemente por el sol vuelva inmediatamente al espacio, lo que ocasiona un incremento de temperatura en la tierra.

El control de las emisiones debería ser en función del tamaño de la caldera y tipo de combustible. Los denominados gases de efecto invernadero son los principales responsables del calentamiento global, estos gases son:

- Vapor de agua ( $H_2O$ )
- Dióxido de carbono ( $CO_2$ )
- Monóxido de carbono ( $CO$ )
- Óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ )
- Óxidos de azufre ( $SO_x$ )
- Partículas totales suspendidas ( $PTS$ )

Los gases de escape generados en los procesos de combustión contribuyen al efecto invernadero. Muchos de los componentes de los gases de combustión son contaminantes del aire.

### **2.4.2. Límites máximos permisibles**

A nivel nacional no existen normas que regulen las emisiones de gases de combustión específicamente para calderas, sin embargo, existen normas internacionales que establecen límites máximos permisibles de emisiones contaminantes, a efectos de determinar si las industrias cumplen dentro de los

parámetros establecidos. Entre las normas identificadas se encuentran las siguientes:

- Norma de emisiones al aire desde fuentes fijas de combustión (República de Ecuador).
- Norma técnica peruana. Calderas industriales. Estándares de eficiencia térmica (combustible/vapor) y etiquetado – NTP 350.301.

Tabla III. **Límites máximos permisibles de concentraciones de emisión para calderos generadores de vapor (mg/Nm<sup>3</sup>)**

Contaminante	Combustible	Fuente fija existente: con autorización de entrar en funcionamiento antes de enero de 2003	Fuente fija existente: con autorización de entrar en funcionamiento desde enero de 2003 hasta marzo de 2013.	Fuente fija nueva: en funcionamiento a partir de marzo de 2013
<b>Material particulado</b>	Sólido sin contenido de azufre	280	180	70
	Fuel oil	280	180	50
	Diesel	280	180	50
<b>Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)</b>	Sólido sin contenido de azufre	1 100	850	600
	Fuel oil	700	550	400
	Diesel	600	550	400
	Gaseoso	250	140	140
<b>Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)</b>	Fuel oil	2 150 <sup>a</sup> , 3 250 <sup>b</sup>	2 150 <sup>a</sup> , 3 250 <sup>b</sup>	430 <sup>a</sup> , 650 <sup>b</sup>
	Diesel	1 000	1 000	200
<b>Monóxido de carbono (CO)</b>	Sólido sin contenido de azufre	1 800	1 800	1 800
	Fuel oil	200	200	120
	Diesel	200	200	120
	Gaseoso	100	100	80

<sup>a</sup>: límite para fuel oil liviano

<sup>b</sup>: límite para fuel oil pesado

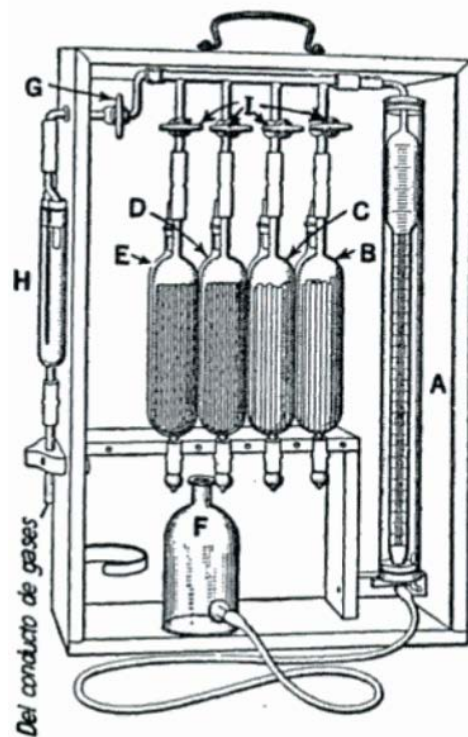
Fuente: Cámara de Industrias y Producción. *Norma de emisiones al aire desde fuentes fijas de combustión*. <http://www.cip.org.ec/attachments/article/401/Anexo%203%20Emisiones%20al%20Aire.pdf>.

Consulta: noviembre de 2016.

Para evaluar las cantidades de contaminantes proveniente de la caldera generados por la combustión de bunker, se puede realizar un análisis por medio del método ORSAT para distinguir los gases de combustión procedentes de la chimenea en base seca.

El método ORSAT, en algunas ocasiones, se lleva a cabo a partir de un dispositivo conocido como aparato ORSAT, el cual permite realizar un análisis volumétrico en base seca de los productos de combustión. Es el método más común utilizado para determinar la concentración de CO, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en los gases provenientes de la reacción de combustión.

Figura 15. **Aparato ORSAT**

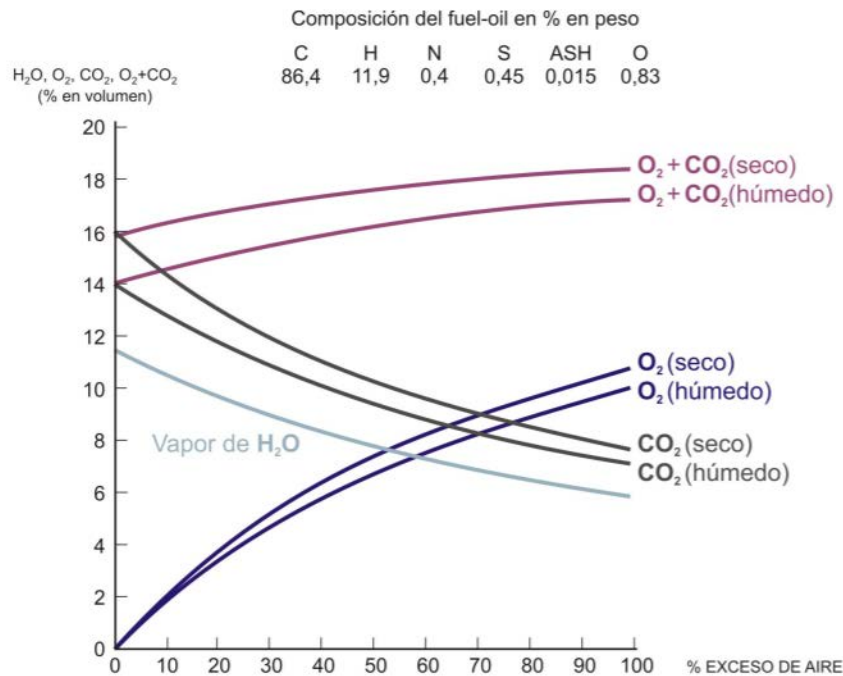


Fuente: SEVERNS, William. *Energía mediante vapor, aire o gas*. p.120.

En la figura 14 se muestra un dispositivo ORSAT de tres reactivos. De lado derecho se encuentra una bureta de medición revestida por una camisa de agua, a fin de evitar variaciones de temperatura durante el análisis. Las pipetas A, B y C contienen soluciones de hidróxido de potasio, (absorbe  $\text{CO}_2$ ), ácido pirogálico (absorbe el  $\text{O}_2$ ) y cloruro de cobre (absorbe el  $\text{CO}$ ), respectivamente.

El término composición en base húmeda indica las fracciones molares de un gas que contiene agua. El término composición en base seca indica las fracciones molares del mismo gas sin agua. El producto gaseoso que sale de la cámara de combustión se conoce como gas de emisión o gas de combustión.

Figura 16. **Composición de los gases de combustión en función del exceso de aire para el bunker**



Fuente: Tiempo Real S.A. Formación en Control de Procesos. *Composición del fuel-oil en % peso.* /[www.tiemporeal.es/archivos/OptimizacionCombustion.pdf](http://www.tiemporeal.es/archivos/OptimizacionCombustion.pdf). Consulta: noviembre de 2016.

## **2.5. Normas Internacionales de Impacto Ambiental**

La serie de normas ISO 14 000 es un conjunto de normas internacionales publicadas por la Organización Internacional de Normalización (ISO), que incluye la norma ISO 14 001 que expresa cómo establecer un Sistema de Gestión Ambiental efectivo.

La norma ISO 14 000 es aplicable a cualquier organización que esté buscando reducir los impactos ambientales y cumplir con la legislación en gestión ambiental. Se basa en la Norma Británica BS-7750, que fue publicada oficialmente por la British Standards Institution (BSI).

La serie de normas ISO 14 000 incluye normas sobre el Sistema de Gestión Ambiental, Huellas Ambientales, Análisis de Ciclo de Vida y del Rendimiento Ambiental.

### **2.5.1. Huellas ambientales**

Para interés del proyecto, la serie de normas ISO 14 000 sobre Huellas Ambientales incluye las siguientes:

- ISO 14064-1:2006: gases de efecto invernadero. Parte 1: Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero.
- ISO 14064-2:2006: gases de efecto invernadero. Parte 2: Especificación con orientación, a nivel de proyecto, para la cuantificación, el seguimiento y el informe de la reducción de emisiones o el aumento en las remociones de gases de efecto invernadero.



- ISO 14064-3:2006: gases de efecto invernadero. Parte 3: Especificación con orientación para la validación y verificación de declaraciones sobre gases de efecto invernadero.
- ISO 14065:2013: gases de efecto invernadero. Requisitos para los organismos que realizan la validación y la verificación de gases de efecto invernadero, para su uso en acreditación u otras formas de reconocimiento.



### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

Para evaluar el consumo energético se determinó la eficiencia térmica de la caldera en el proceso de generación de vapor y se tomaron en cuenta las siguientes variables:

- Consumo de agua de alimentación
- Presión y temperatura del agua de alimentación
- Consumo de combustible
- Presión y temperatura del combustible
- Poder calorífico del combustible
- Presión y temperatura de salida del vapor

Para evaluar el grado de contribución de las emisiones de gases de efecto invernadero se tomó en cuenta lo siguiente:

- Concentración de gases de combustión
- Temperatura de salida
- Eficiencia de combustión

En el análisis económico fue de importancia conocer el costo de una inversión inicial para la evaluación de posibles alternativas.

### **3.2. Delimitación de campo de estudio**

Para la evaluación del consumo energético en la generación de vapor de la planta enfocada a la fabricación de jabones y detergentes para lavandería, se estudió propiamente el área de calderas y la demanda de vapor requerida por parte de las diferentes áreas de producción. El objetivo es implementar oportunidades de mejora que aseguren mayor eficiencia en la caldera al evaluar posibles alternativas de un equipo con capacidad de generación menor al actual y cumplir eficientemente con la demanda de consumo de vapor actual.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

Para la realización de este análisis se tuvo el apoyo e intervención de las siguientes personas:

- Investigadora: Karla Yoselyn Casado Sierra
- Revisor: Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
- Asesor – Supervisor de EPS: Ing. Sergio Alejandro Recinos
- Asesor: Ing. Giancarlo Vitola
- Jefe de Ingeniería: Ing. Francisco Contreras
- Auxiliar de Ingeniería: Rene González
- Calderistas

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

Para la toma y recopilación de datos se utilizó el siguiente recurso material:

- Manómetros ubicados en distintos puntos de la caldera

- Termómetros ubicados en distintos puntos de la caldera y en tanque de alimentación de agua.
- Medidores digitales del sistema de vapor
- Testo para medir la concentración de gases de chimenea.
- Data de meses anteriores recopilados a partir de un análisis diario de consumo de energía eléctrica y medidores implementado por la empresa en base a la certificación de la norma ISO 50 001.

### **3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa**

Se representa en un diagrama de flujo, las entradas y salidas de la caldera, según las condiciones de operación actuales.

Por medio de los medidores digitales se obtuvieron las cantidades de consumo de agua y de combustible, así como la cantidad de vapor de agua generado. Esta información es reunida en un análisis diario de consumo de energía eléctrica implementado en base a la ISO 50 001, la cual establece los requisitos que debe tener un sistema de gestión de energía en una organización para mejorar el desempeño energético, aumentar la eficiencia energética y reducir costos operacionales e impactos ambientales. Por otro lado, se realizaron mediciones manuales de temperatura y presión en diferentes puntos de la caldera, en el tanque de agua de alimentación, en la entrada de alimentación de combustible, a la salida del vapor de agua generado y la temperatura de salida de gases de combustión.

Con la información recopilada se realizó un balance energético para determinar la eficiencia térmica actual del equipo y con ello evaluar el grado de aprovechamiento de la energía del combustible para producir vapor.

Dichas mediciones se realizaron periódicamente y se obtuvieron datos representativos con los cuales se procedió a hacer el análisis respectivo mediante gráficos para determinar la eficiencia del equipo operando a condiciones normales.

Para determinar el grado de contribución de las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de la combustión de la caldera se recurrió al método ORSAT, con el cual se estimaron las concentraciones de los componentes presentes en los gases de combustión en base seca.

Como parte final, se realizó un análisis económico para evaluar posibles alternativas de inversión tomando en cuenta la demanda de vapor para determinar las especificaciones de la caldera.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

La recolección de los datos se realizó de la siguiente manera:

- Los datos de los medidores digitales del sistema de vapor; agua de alimentación, combustible y vapor de agua se obtuvieron a partir del sistema de gestión de energía implementado en años anteriores basado en la ISO 50 001.
- Los datos de presión y temperatura del agua de alimentación se obtuvieron a partir de un manómetro (psi) y un termómetro (°C), respectivamente. El manómetro se encontraba en la entrada del agua de alimentación ubicado en la caldera y el termómetro en la entrada del tanque de alimentación de agua.

- Los datos de presión y temperatura del combustible se obtuvieron a partir de un manómetro (psi) y un termómetro (°C); respectivamente, que se encontraba a la entrada de la caldera.
- La presión y temperatura a la salida del vapor de agua se registró a partir de un manómetro (psi) y un termómetro (°C); respectivamente, que se localizaba en el punto de salida del vapor en la caldera.
- Las concentraciones de los gases de combustión provenientes de la caldera se obtuvieron a partir de un analizador de combustión industrial (testo) y del método ORSAT.
- Tabulación de datos.

### **3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información**

Con la información recopilada a partir del sistema de gestión implementado y del análisis energético realizado, se tabularon y ordenaron los datos obtenidos con base en las tablas de datos de los consumos de agua, de combustible y del vapor diario generado. Ver apéndice C.

Para determinar la eficiencia, la demanda del consumo energético y la contribución de los gases de efecto invernadero a la atmosfera, la información obtenida se manejó en base a un balance energético:

#### **3.7.1. Balance de energía**

El balance general de energía para el sistema se expresó de la siguiente manera en base a la figura 16:

$$\textit{Entrada} = \textit{Salida}$$

$$\textit{Entrada} + \textit{Generación} = \textit{Salida} + \textit{Consumo}$$

$$E_C + E_{H_2O} = E_v + E_G$$

Donde:

$E_C$  = energía en el combustible [kJ]

$E_{H_2O}$  = energía en el agua de alimentación [kJ]

$E_v$  = energía en el vapor de agua [kJ]

$E_G$  = energía en los gases de combustión [kJ]

Para el agua y el vapor, la energía puede expresarse como el producto de la masa por la entalpía a temperatura y presión específicas. En el caso del combustible, se expresa en términos de su poder calorífico.

$$C_C PC + m_{H_2O} H_{H_2O} = P_v H_v + E_G$$

Donde:

$C_C$  = consumo de combustible [L/d]

$PC$  = poder calorífico del combustible [kJ/L]

$m_{H_2O}$  = consumo de agua de alimentación [kg/d]

$P_v$  = producción de vapor [kg/d]

$H_{H_2O}$  = entalpía del agua de alimentación a las condiciones de entrada [kJ/kg]

$H_v$  = entalpía del vapor a presión de operación de la caldera [kJ/kg]

$E_G$  = energía en los gases de combustión [kJ]

Considerando que la caldera opera de forma continua, el total de agua que ingresa es transformado en vapor, por lo tanto:



$$m_{H_2O} = P_v$$

Donde:

$m_{H_2O}$  = consumo de agua de alimentación [kg/d]

$P_v$  = producción de vapor [kg/d]

Esto quiere decir que:

$$C_C PC + P_v H_{H_2O} = P_v H_v + E_G$$

$$C_C PC - E_G = P_v (H_v - H_{H_2O})$$

Donde:

$C_C$  = consumo de combustible [kg/d]

$PC$  = poder calorífico del combustible [kJ/L]

$E_G$  = energía en los gases de combustión [kJ]

$P_v$  = producción de vapor [kg/d]

$H_v$  = entalpía del vapor a la presión de operación de la caldera [kJ/kg]

$H_{H_2O}$  = entalpía del agua de alimentación a las condiciones de entrada [kJ/kg]

Para determinar la eficiencia térmica de la caldera, se considera la energía contenida en los gases de combustión como energía perdida; por lo tanto, si se considera que la eficiencia de la caldera es del 100 %, se tiene:

$$C_C PC = P_v (H_v - H_{H_2O})$$

$$\frac{P_v (H_v - H_{H_2O})}{C_C PC} = 1$$

Donde:

$P_v$  = producción de vapor [ $kg/d$ ]

$H_v$  = entalpía del vapor a la presión de operación de la caldera [ $kJ/kg$ ]

$H_{H_2O}$  = entalpía del agua de alimentación a las condiciones de entrada [ $kJ/kg$ ]

$C_c$  = consumo de combustible [ $kg/d$ ]

$PC$  = poder calorífico del combustible [ $kJ/L$ ]

Debido a que siempre existen pérdidas energéticas en la salida de los gases de combustión, pérdidas de calor por radiación y convección en el cuerpo de la caldera y otras pérdidas que puede haber por fugas de vapor a lo largo de las líneas de producción, al considerar la eficiencia como la relación entre la energía absorbida por el agua y la energía liberada por la combustión del bunker, se toma en cuenta todas las pérdidas que pudieran estar involucradas en la producción de vapor de la caldera.

De lo anterior, se obtiene que la eficiencia térmica de la caldera se puede determinar de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{P_v(H_v - H_{H_2O})}{C_c PC} \times 100$$

Donde:

$\eta$  = eficiencia térmica de la caldera [%]

$P_v$  = producción de vapor [ $kg/d$ ]

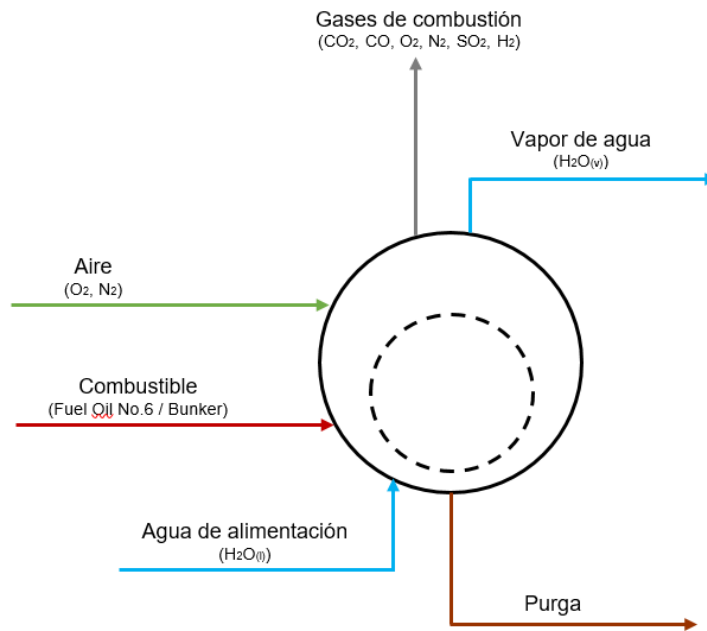
$H_v$  = entalpía del vapor a la presión de operación de la caldera [ $kJ/kg$ ]

$H_{H_2O}$  = entalpía del agua de alimentación a las condiciones de entrada [ $kJ/kg$ ]

$C_c$  = consumo de combustible [ $kg/d$ ]

$PC = \text{poder calorífico del combustible [kJ/L]}$

Figura 17. Diagrama del sistema



Fuente: elaboración propia, utilizando Adobe Illustrator CC 2018.

### 3.7.2. Demanda de generación de vapor

La caldera produce vapor cuando es requerido por los consumos de la planta. En ocasiones, la demanda de consumo es baja, por lo tanto, la caldera no genera vapor a su máxima eficiencia.

El cálculo de generación de vapor de una caldera está dado por:

$$\text{Generación} = \frac{BHP \times 31\,728,17 \text{ kJ/h}}{H_v - H_{H_2O}}$$

Donde:

$BHP = \text{boiler horse power} [BHP = 31\,728,17 \text{ kJ/h}]$

$H_v = \text{entalpía del vapor a la presión de operación [kJ/kg]}$

$H_{H_2O} = \text{entalpía del agua de alimentación a las condiciones de entrada [kJ/kg]}$

Por la baja eficiencia térmica de la caldera, se realizó un análisis comparativo del consumo energético del equipo para determinar si el sistema actual cumple adecuadamente con la generación de vapor real de la caldera.

El análisis comparativo de demanda contra capacidad de generación de la caldera se encuentra en la figura 19, en la sección de Resultados y en el apéndice E.

### **3.7.3. Grado de contribución a emisiones de gases de efecto invernadero**

Se utilizó un analizador digital de gases de combustión (testo) para determinar los parámetros de operación referente a la combustión en la caldera. Algunos de los parámetros son los siguientes:

- Temperatura de gases de chimenea
- Porcentaje del contenido de  $O_2$
- Porcentaje del contenido de  $CO_2$
- Porcentaje de exceso de aire
- Porcentaje del contenido de  $CO$
- Porcentaje de eficiencia de combustión

Los rangos aceptables de los parámetros anteriores para la caldera de 100 BHP establecidos por el fabricante son:

- Temperatura de gases de chimenea = 175 – 345 °C
- Contenido de  $O_2$  = 3,8 % – 5,7 %
- Contenido de  $CO_2$  = 11,5 % – 14,5 %
- Exceso de aire = 20 % – 35 %
- Eficiencia de combustión > 80 %
- Contenido de  $CO$  < 75 ppm

### **3.8. Análisis estadístico**

Los datos de interés en este estudio son el consumo de agua, de combustible y la cantidad de generación de vapor al día en la caldera; por lo tanto, con la ayuda del análisis energético implementado a partir de la certificación ISO 50 001 se recopilaban los datos durante la temporada de producción promedio. Se tomaron datos de presión y temperatura una vez al día durante 30 días.

Se determinó la eficiencia térmica de la caldera utilizando información de los consumos del mes de febrero. Ver figura 17 en la sección de Resultados y en el apéndice D. De igual forma, se calculó la capacidad de generación de vapor de la caldera con base en los datos de temperaturas y presiones de la caldera en funcionamiento y la demanda de vapor de agua generado, con el objeto de hacer una comparación entre ambos.

Por último, se realizó un cálculo estequiométrico y balances de masa para determinar las concentraciones faltantes de los componentes de los gases de

combustión generados por la caldera. Ver figura 20 en la sección de Resultados y en el apéndice F.

## 4. RESULTADOS

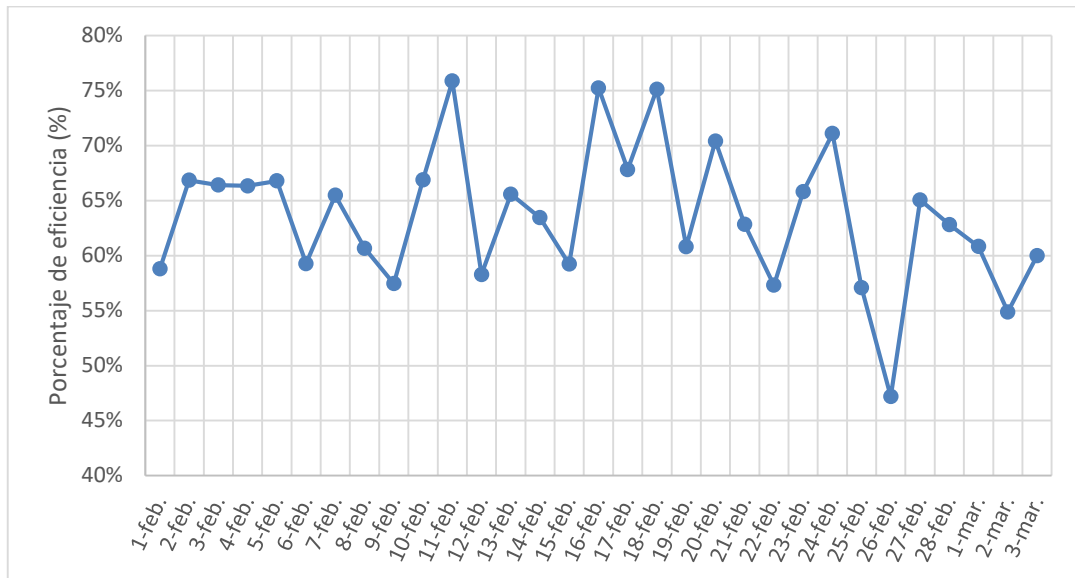
Por medio de este estudio se logró obtener los siguientes resultados a partir del balance energético realizado:

$$\text{Entrada} + \text{Generación} = \text{Salida} + \text{Consumo}$$

$$E_C + E_{H_2O} = E_v + E_G$$

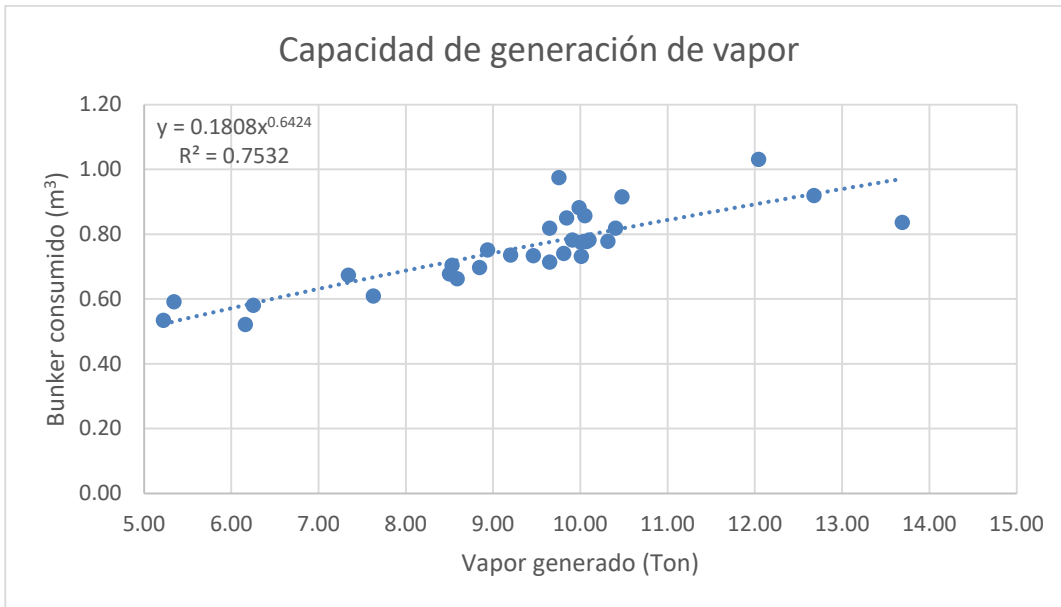
$$\eta = \frac{P_v(H_v - H_{H_2O})}{C_C PC} \times 100$$

Figura 18. **Eficiencia térmica de la caldera en condiciones actuales de operación**



Fuente: elaboración propia.

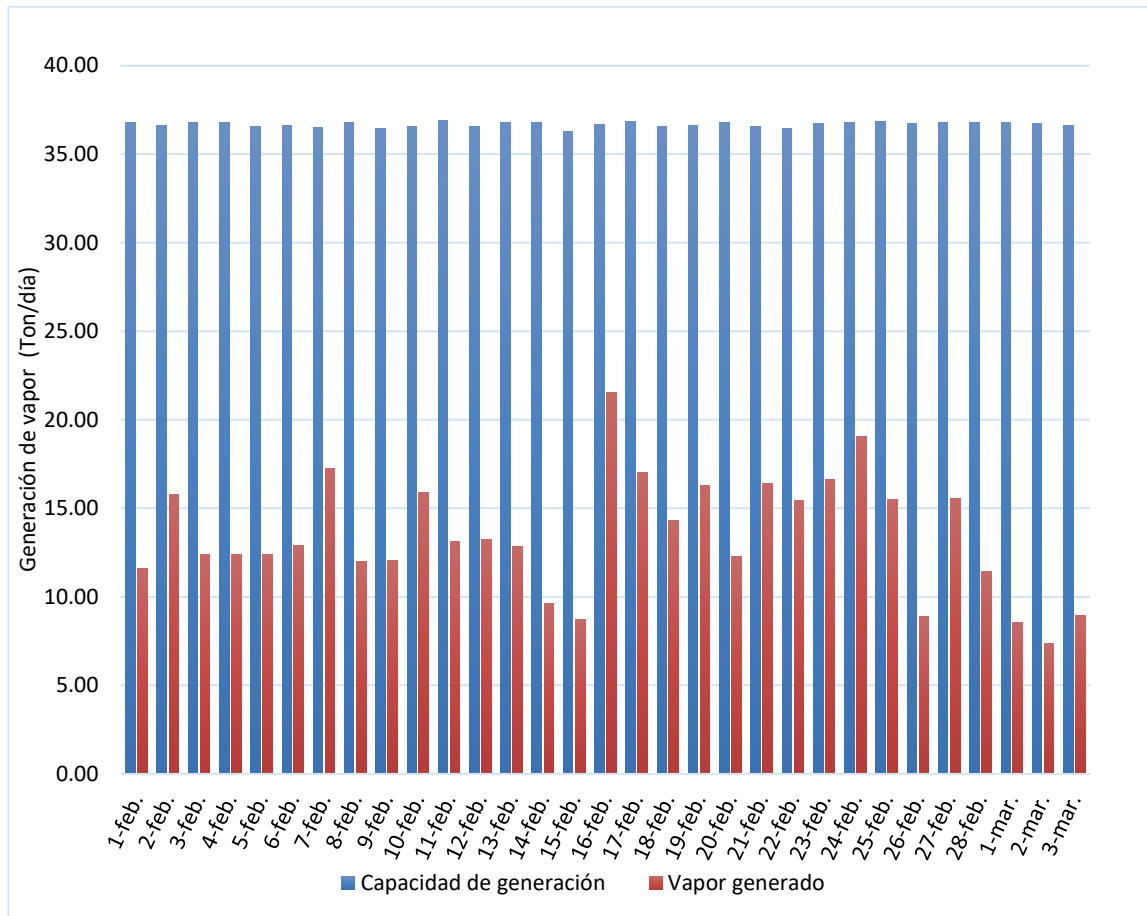
Figura 19. Capacidad de generación de vapor de agua



Fuente: elaboración propia.



Figura 20. **Análisis comparativo de la demanda de consumo de vapor contra la capacidad de generación de la caldera**



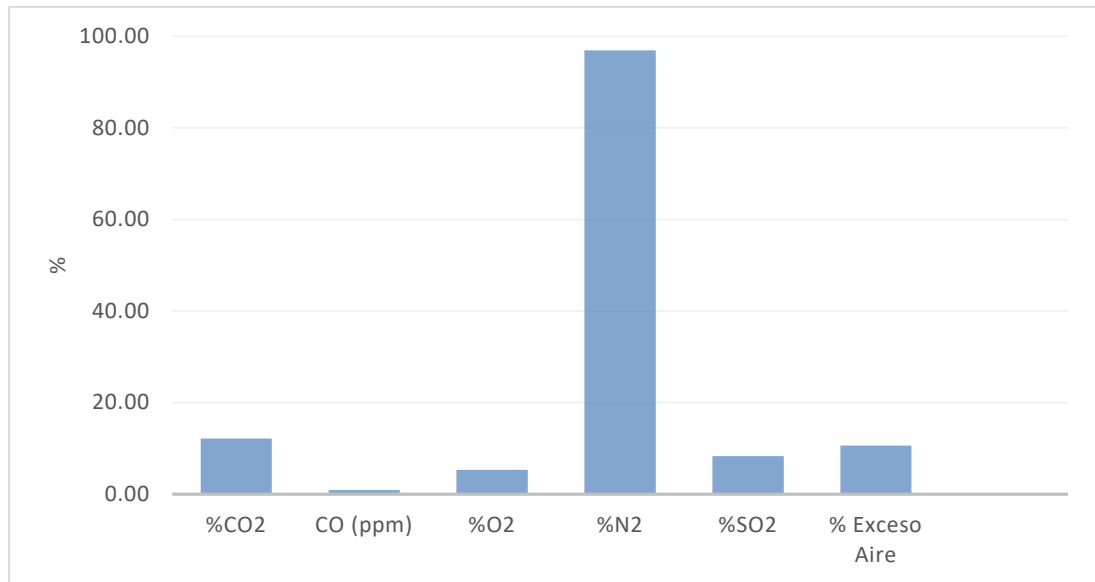
Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Costo de inversión inicial para otras alternativas**

<b>Inversión No. 1</b>	<b>Inversión No. 2</b>
<p data-bbox="305 495 651 527"><u>Caldera Clayton 15 BHP</u></p> <p data-bbox="217 604 675 968">                     Tipo acuotubular, vertical                      Suministro de vapor: 234,8 <i>kg/h</i>                      Presión de operación: 0,7 <i>MPa</i>                      Presión de diseño: 1,0 <i>MPa</i>                      Combustible: diésel                      Eficiencia térmica:                      Al 100 % de carga de vapor 83 %                 </p> <p data-bbox="217 1045 740 1129">Tanque para purgas con capacidad de 75 L.</p> <p data-bbox="391 1209 565 1241" style="text-align: center;"><b>\$ 40 366,37</b></p>	<p data-bbox="854 495 1200 527"><u>Caldera Clayton 20 BHP</u></p> <p data-bbox="771 604 1229 968">                     Tipo acuotubular, vertical                      Suministro de vapor: 313,0 <i>kg/h</i>                      Presión de operación: 0,7 <i>MPa</i>                      Presión de diseño: 1,0 <i>MPa</i>                      Combustible: diésel                      Eficiencia térmica:                      Al 100 % de carga de vapor 83 %                 </p> <p data-bbox="771 1045 1294 1129">Tanque para purgas con capacidad de 75 L.</p> <p data-bbox="945 1209 1118 1241" style="text-align: center;"><b>\$ 49 946,10</b></p>

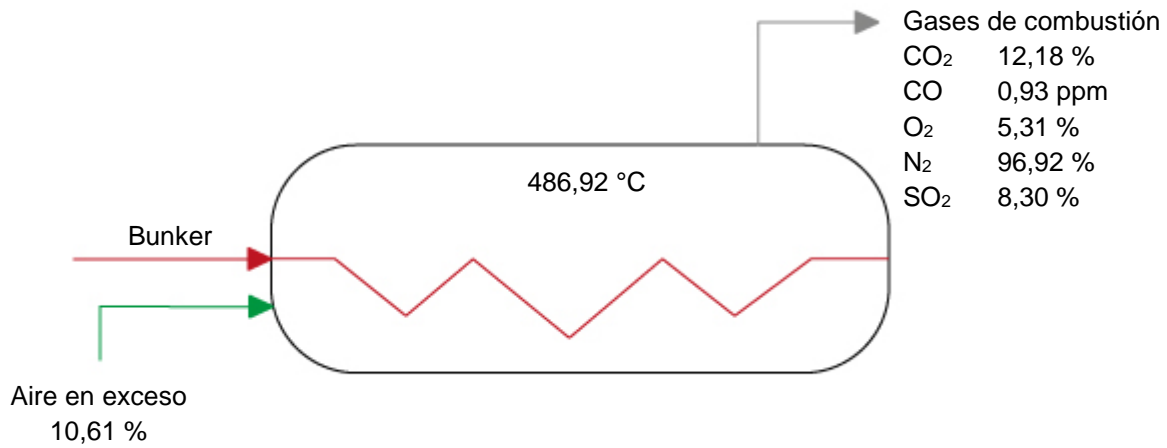
Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Grado de contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de la combustión de la caldera**



Fuente: elaboración propia.

Figura 22. **Composición de los gases de combustión (base seca) de la caldera 100 BHP**



Fuente: elaboración propia, utilizando Adobe Illustrator CC 2018.

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Para obtener los resultados de la eficiencia térmica se realizó un balance de energía, considerando que la caldera opera de forma continua para cuantificar las entradas y salidas en la caldera. Involucra la relación entre el combustible, el agua de alimentación, el aire, el vapor de salida y los gases de combustión.

De acuerdo con los resultados obtenidos, en la figura 17 se presenta la eficiencia térmica diaria de la caldera de 100 BHP en la generación de vapor de agua. El promedio de la eficiencia térmica actual de la caldera es de 64 % aproximadamente, en condiciones normales de operación, la cual se determina a partir de la relación entre la energía absorbida por el agua y la energía liberada por la reacción de combustión. Según el manual de la caldera, esta debe trabajar a un 80 % de eficiencia.

La eficiencia térmica del equipo se determinó con base en la norma mexicana NOM-002-ENER-1995, la cual requiere la cantidad de vapor producido, el consumo de combustible, el consumo de agua de alimentación y las temperaturas y presiones de agua de alimentación y de vapor.

El motivo de una baja eficiencia térmica se debe a un sobredimensionamiento del equipo, ya que la demanda de vapor requerida por la línea de producción ha ido disminuyendo. Actualmente, la demanda evaporativa promedio es de 12 toneladas de vapor al día, considerando que la caldera es capaz de generar 36 toneladas en su máxima potencia. Sin mencionar otros parámetros que pueden afectar la eficiencia de una caldera, ya

que la suciedad y las incrustaciones en las superficies de transferencia de calor se acumulan en la parte interna del equipo, y ocasionan una menor área de transferencia.

Así mismo, existe un exceso de aire promedio del 10,61 % para evitar la combustión incompleta, por lo que es inevitable la pérdida de calor en los productos de combustión, lo que reduce la eficiencia térmica y la temperatura de combustión. Dichas pérdidas de energía repercuten en un mayor consumo de combustible, las cuales se ven reflejadas en el factor económico de la empresa. De igual forma, si el consumo de combustible incrementa por pérdidas de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero al ambiente también aumentan.

En la figura 18 se muestra la capacidad de generación de vapor de la caldera en función del consumo de combustible en metros cúbicos y el vapor generado en toneladas por día.

En la figura 19 se hace una comparación entre la demanda de consumo de vapor contra la capacidad de generación si la caldera trabajara a su máxima potencia. Se observa que actualmente la demanda de vapor de la línea de producción está entre 7 a 20 toneladas de vapor producidas al día. La capacidad de generación de vapor se encuentra en un promedio de 36 toneladas al día que la caldera puede llegar a generar si se aprovechara al máximo su rendimiento. La demanda máxima de vapor se ha calculado tomando en cuenta los consumos a plena carga de los equipos que utilizan vapor para su funcionamiento.

En la tabla IV se plantean dos inversiones para otras alternativas de generadores de vapor. Se detallan las principales especificaciones del equipo y

eficiencia térmica dependiendo de la carga de vapor. De igual forma, cada opción cuenta con un tanque para purgas con una capacidad de 75 litros.

La diferencia entre las dos alternativas se encuentra en el suministro de vapor de cada una de las opciones. Estas opciones han sido evaluadas a partir de la demanda de vapor actual de la planta y proporcionadas por la empresa.

Por último, en las figuras 20 y 21, se demuestra la contribución de los gases de combustión provenientes de la caldera. Las concentraciones de los gases se determinaron a partir de un analizador de combustión básico, el cual mide el %  $\text{CO}_2$ , CO en ppm, %  $\text{O}_2$ , el % de exceso de aire, la eficiencia de la combustión y la temperatura de los gases. Para los porcentajes de  $\text{N}_2$ , y  $\text{SO}_2$ , se determinaron por medio de cálculos de estequiometría y balances de masa en base al método ORSAT (ver Anexo F). Se observa que la contribución de  $\text{CO}_2$ , CO,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , y  $\text{SO}_2$  al ambiente es de 12,18 %, 0,93 ppm, 5,31 %, 96,92 %, y 8,30 %, respectivamente, lo cual indica que se da una reacción de combustión incompleta; es decir, que la caldera no quema adecuadamente el combustible que se alimenta. Lo anterior sucede por exceso de aire que entra a la caldera. Una razón por la cual el porcentaje de  $\text{N}_2$  es alto puede deberse al momento en el cual los gases de combustión son determinados con el testo, ya que estos datos se miden al inicio de operación de la caldera, por lo cual el equipo no ha tenido el tiempo suficiente para calentarse y quemar el combustible correctamente.





## CONCLUSIONES

1. El sistema de generación de vapor en la planta de producción de jabones y detergentes tiene una eficiencia térmica actual de 64 %.
2. La capacidad de generación máxima de la caldera es de 36 toneladas de vapor al día. El vapor generado debido a la demanda de la línea de producción se encuentra entre 7 a 20 toneladas de vapor al día. Por tanto, la demanda de vapor actual de la planta se encuentra por debajo de la demanda de vapor nominal que puede generar la caldera.
3. Las inversiones iniciales presentadas se establecen a partir de las necesidades actuales de operación. El buen dimensionamiento de la caldera está destinado a incrementar la eficiencia de la misma a un 83 % y a mejorar los costos de operación.
4. La contribución de los gases de combustión está determinada a partir del 12,18 % de CO<sub>2</sub>, 0,93 ppm de CO, 5,31 % de O<sub>2</sub>, 96,92 % de N<sub>2</sub> y 8,30 % de SO<sub>2</sub>.



## RECOMENDACIONES

1. Tomar en cuenta la instalación de un equipo de transferencia de calor que cumpla con los requerimientos actuales de las líneas de producción de la planta para evitar la pérdida de recursos.
2. Implementar un sistema de control de purgas automático con la finalidad de prolongar la vida útil de los filtros. El ahorro de costos innecesarios al reducir significativamente las pérdidas de agua, de productos químicos para tratar el agua, de combustible y el ahorro de tiempo mediante el drenaje automático y no de forma manual, los cuales representan una suma importante de dinero anual.
3. Adaptar un filtro o dispositivo en la chimenea de la caldera con la finalidad de impedir la propagación de los gases de combustión. Los filtros poseen elevada eficiencia en la reducción del flujo de los gases, siendo capaces de remover y disminuir el nivel de contaminación en el ambiente. Así mismo, existen métodos para la recirculación de los gases de combustión por medio de un ventilador independiente al ventilador del aire de combustión.



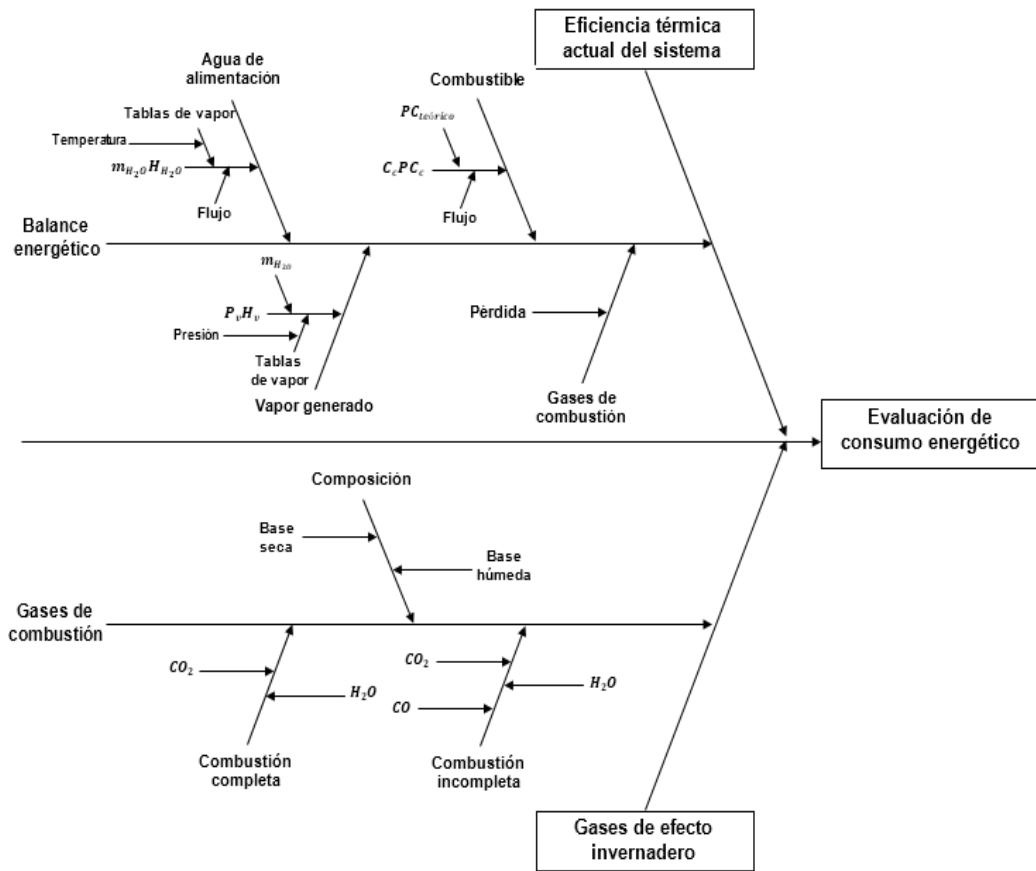
## BIBLIOGRAFÍA

1. BROWN, Theodore. *Química, la ciencia central*. 11a ed. México: Pearson Educación, 2009. 457 p.
2. ÇENGEL, Yunus; GHAJAR, Afshin. *Transferencia de calor y masa*. 4a ed. México: McGraw-Hill, 2011. 915 p.
3. McCABE, Warren; SMITH, Julian; HARRIOTT, Peter. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 7a ed. México: McGraw-Hill, 1995. 311 p.
4. PERRY, Robert. *Manual del Ingeniero Químico*. 8a ed. Japón: McGraw-Hill, 1984. 1 225 p.
5. SAENZ, Manuel; PATIÑO María Rosario. *Manual práctico del operador de calderas industriales*. 2a ed. España: Paraninfo, 2004. 232 p.
6. SMITH, Julian; VAN NESS, Hendrick. & ABBOTT, Michael. *Introducción a la termodinámica en ingeniería química*. 7a ed. México: McGraw-Hill, 2007. 290 p.
7. The Fulton Companies. *FB-S Series 100 – 800 HP. Installation, Operation and Maintenance Manual*. Versión 2010-0820. 2013. 101 p.

8. ZEPEDA, Sergio. *Manual de instalaciones hidráulicas, sanitarias, aire, gas y vapor*. México: Limusa, 2017. 689 p.

# APÉNDICE

## Apéndice 1. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 2. Toma de datos en la caldera

Condiciones de Operación	Agua de alimentación				Combustible			Aire de atomización	Gases de combustión		Vapor		
	P		T		P	T		P	T		P		T
	[psi]	[Mpa]	[°C]	[K]	[psi]	[°C]	[K]	[psi]	[°C]	[K]	[psi]	[Mpa]	[°C]
99	90	0.62	81	354.15	79	90	363.15	16	195	468.15	99	0.68	163.79
102	96	0.66	80	353.15	78	90	363.15	15	270	543.15	102	0.70	164.97
99	90	0.62	81	354.15	79	91	364.15	11	150	423.15	99	0.68	163.79
100	86	0.59	85	358.15	79	90	363.15	15	150	423.15	100	0.69	164.38
90	92	0.63	86	359.15	79	90	363.15	10	215	488.15	90	0.62	160.11
93	88	0.61	70	343.15	79	90	363.15	12	205	478.15	93	0.64	161.38
89	90	0.62	77	350.15	79	90	363.15	15	270	543.15	89	0.61	159.48
99	94	0.65	87	360.15	79	90	363.15	14	250	523.15	99	0.6826	163.92
85	95	0.66	81	354.15	79	90	363.15	16	176	449.15	85	0.59	158.18
90	100	0.69	80	353.15	79	90	363.15	16	210	483.15	90	0.62	160.11
105	102	0.7033	71	344.15	79	82	355.15	16	310	583.15	105	0.72	166.09
89	100	0.6895	81	354.15	79	92	365.15	14	200	473.15	89	0.61	150.48
99	86	0.5929	80	353.15	79	90	363.15	16	195	468.15	99	0.68	163.79
99	91	0.6274	87	360.15	79	90	363.15	15	220	493.15	99	0.68	163.79
80	90	0.6205	91	364.15	79	90	363.15	16	250	523.15	80	0.55	155.48
94	97	0.6688	84	357.15	79	90	363.15	11	160	433.15	94	0.65	162.01
102	87	0.5998	81	354.15	79	90	363.15	16	220	493.15	102	0.70	164.97
90	89	0.6136	76	349.15	79	90	363.15	15	265	538.15	90	0.62	160.11
91	95	0.655	71	344.15	79	90	363.15	12	175	448.15	91	0.63	160.75
99	96	0.6619	82	355.15	79	90	363.15	14	205	478.15	99	0.68	163.79
90	82	0.5654	89	362.15	79	90	363.15	16	215	488.15	90	0.62	160.11
85	88	0.6067	91	364.15	79	90	363.15	15	255	528.15	85	0.59	158.18
95	96	0.6619	85	358.15	79	90	363.15	12	205	478.15	95	0.66	162.6
100	90	0.6205	79	352.15	79	90	363.15	10	180	453.15	100	0.69	164.38
102	96	0.6619	86	359.15	79	90	363.15	11	250	523.15	102	0.70	164.67
96	94	0.6481	83	356.15	79	90	363.15	15	300	573.15	96	0.66	162.6
98	90	0.6205	81	354.15	79	90	363.15	15	255	528.15	98	0.68	163.79
100	90	0.6205	87	360.15	79	90	363.15	14	270	543.15	100	0.69	164.38
99	92	0.6343	82	355.15	79	90	363.15	16	295	568.15	99	0.68	163.79
95	96	0.6619	79	352.15	79	90	363.15	15	190	463.15	95	0.66	162.6
93	88	0.6067	76	349.15	79	90	363.15	12	305	578.15	93	0.64	161.38

Fuente: elaboración propia



Apéndice 3. **Data recopilada a partir del análisis energético diario**

Caldera		TOTAL VAPOR PLANTA
Agua (m3)	Bunker (m3)	(ton/día)
18.56	0.99	11.62
12.08	1.19	15.79
8.71	0.94	12.40
8.71	0.94	12.40
8.71	0.94	12.40
15.14	1.10	12.92
15.13	1.33	17.22
12.93	0.99	11.99
13.59	1.06	12.06
14.68	1.20	15.89
7.92	0.86	13.11
1.21	1.15	13.25
14.20	0.98	12.83
6.66	0.76	9.63
8.12	0.75	8.70
16.59	1.44	21.53
12.04	1.26	17.03
8.84	0.96	14.34
0.96	1.35	16.26
15.43	0.88	12.27
13.49	1.32	16.38
16.20	1.37	15.45
12.88	1.27	16.63
12.60	1.35	19.05
16.32	1.36	15.48
10.41	0.95	8.88
14.36	1.20	15.56
10.68	0.91	11.42
9.15	0.70	8.53
7.73	0.67	7.34
12.82	0.75	8.94

Fuente: Elaboración propia

#### Apéndice 4. Cálculos de la eficiencia térmica de la caldera

Vapor generado		Entalpía de vapor	Entalpía de agua	CALOR ÚTIL		Consumo de Combustible			Poder Calorífico Combustible	CALOR DISPONIBLE		EFICIENCIA
[Ton/día]	[kg/día]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kJ/día]	[kW h]	[m3/día]	[gal/día]	[L/día]	[kJ/L]	[kJ/día]	[kW h]	[%]
11.62	11616.13	2762.22	692.02	24047716.47	6679.92	0.99	262.25	992.72	41200	40900111.38	11361.14	58.80%
15.79	15788.94	2763.50	684.26	32829003.81	9119.17	1.19	314.87	1191.91	41200	49106527.69	13640.70	66.85%
12.40	12403.77	2762.22	692.02	25678277.00	7132.85	0.94	247.92	938.47	41200	38665022.52	10740.28	66.41%
12.40	12403.77	2762.86	694.61	25654089.66	7126.14	0.94	247.92	938.47	41200	38665022.52	10740.28	66.35%
12.40	12403.77	2758.20	676.03	25826750.09	7174.10	0.94	247.92	938.47	41200	38665022.52	10740.28	66.80%
12.92	12918.17	2759.60	681.52	26844993.92	7456.94	1.10	290.42	1099.36	41200	45293704.84	12581.58	59.27%
17.22	17220.36	2760.50	673.28	35942679.80	9984.08	1.33	351.92	1332.17	41200	54885200.70	15245.89	65.49%
11.99	11985.82	2762.33	692.60	24807402.95	6890.95	0.99	262.17	992.43	41200	40887927.12	11357.76	60.67%
12.06	12055.22	2756.00	667.61	25175994.21	6993.33	1.06	280.98	1063.64	41200	43821896.03	12172.75	57.45%
15.89	15889.04	2758.20	676.03	33083690.75	9189.91	1.20	317.16	1200.56	41200	49463206.67	13739.78	66.89%
13.11	13105.75	2764.66	702.10	27031404.80	7508.72	0.86	228.44	864.73	41200	35626765.28	9896.32	75.87%
13.25	13250.00	2757.50	673.28	27615915.00	7671.09	1.15	303.80	1150.00	41200	47380000.00	13161.11	58.29%
12.83	12825.43	2762.22	692.02	26551204.36	7375.33	0.98	259.59	982.67	41200	40485846.67	11246.07	65.58%
9.63	9626.64	2762.22	692.02	19929075.10	5535.85	0.76	201.39	762.34	41200	31408575.76	8724.60	63.45%
8.70	8704.47	2752.90	655.91	18253194.09	5070.33	0.75	197.61	748.03	41200	30818857.76	8560.79	59.23%
21.53	21533.19	2760.30	684.26	44703761.28	12417.71	1.44	380.90	1441.88	41200	59405559.77	16501.54	75.25%
17.03	17026.67	2763.50	697.20	35182214.01	9772.84	1.26	332.56	1258.88	41200	51865942.01	14407.21	67.83%
14.34	14337.28	2758.20	676.03	29852650.97	8292.40	0.96	254.80	964.51	41200	39737733.33	11038.26	75.12%
16.26	16260.00	2758.90	678.77	33822913.80	9395.25	1.35	356.63	1350.00	41200	55620000.00	15450.00	60.81%
12.27	12273.85	2762.22	692.02	25409328.41	7058.15	0.88	231.36	875.79	41200	36082456.46	10022.90	70.42%
16.38	16378.48	2758.20	676.03	34102776.37	9472.99	1.32	347.94	1317.08	41200	54263803.64	15073.28	62.85%
15.45	15452.23	2756.02	667.61	32270585.81	8964.05	1.37	361.06	1366.77	41200	56310758.69	15641.88	57.31%
16.63	16628.87	2760.94	686.85	34489763.85	9580.49	1.27	336.05	1272.07	41200	52409359.83	14558.15	65.81%
19.05	19054.72	2762.86	694.61	39409921.33	10947.20	1.35	355.37	1345.24	41200	55423744.83	15395.48	71.11%
15.48	15481.71	2763.50	697.20	31989859.85	8886.07	1.36	359.37	1360.38	41200	56047578.75	15568.77	57.08%
8.88	8875.14	2760.94	686.85	18407834.14	5113.29	0.95	250.17	947.00	41200	39016425.36	10837.90	47.18%
15.56	15560.18	2762.22	692.02	32212692.92	8947.97	1.20	317.47	1201.75	41200	49511943.70	13753.32	65.06%
11.42	11417.00	2762.86	694.61	23613213.56	6559.23	0.91	241.00	912.28	41200	37585993.68	10440.55	62.82%
8.53	8530.29	2762.22	692.02	17659408.84	4905.39	0.70	186.12	704.56	41200	29027772.09	8063.27	60.84%
7.34	7339.59	2760.94	686.85	15222972.71	4228.60	0.67	177.87	673.33	41200	27741114.63	7705.86	54.88%
8.94	8937.17	2759.60	681.52	18572155.06	5158.93	0.75	198.51	751.46	41200	30960195.13	8600.05	59.99%

Fuente: elaboración propia

Apéndice 5. **Cálculos de la capacidad de generación**

Entalpía de vapor	Entalpía de agua	CAPACIDAD DE GENERACIÓN DE VAPOR MÁXIMA		Vapor generado (Demanda)
		[kg/h]	Ton/día	Ton/día
2762.22	692.02	1532.61	<b>36.78</b>	11.62
2763.50	684.26	1525.94	<b>36.62</b>	15.79
2762.22	692.02	1532.61	<b>36.78</b>	12.40
2762.86	694.61	1534.05	<b>36.82</b>	12.40
2758.20	676.03	1523.79	<b>36.57</b>	12.40
2759.60	681.52	1526.79	<b>36.64</b>	12.92
2760.50	673.28	1520.11	<b>36.48</b>	17.22
2762.33	692.60	1532.95	<b>36.79</b>	11.99
2756.00	667.61	1519.26	<b>36.46</b>	12.06
2758.20	676.03	1523.79	<b>36.57</b>	15.89
2764.66	702.10	1538.28	<b>36.92</b>	13.11
2757.50	673.28	1522.30	<b>36.54</b>	13.25
2762.22	692.02	1532.61	<b>36.78</b>	12.83
2762.22	692.02	1532.61	<b>36.78</b>	9.63
2752.90	655.91	1513.03	<b>36.31</b>	8.70
2760.30	684.26	1528.29	<b>36.68</b>	21.53
2763.50	697.20	1535.50	<b>36.85</b>	17.03
2758.20	676.03	1523.79	<b>36.57</b>	14.34
2758.90	678.77	1525.29	<b>36.61</b>	16.26
2762.22	692.02	1532.61	<b>36.78</b>	12.27
2758.20	676.03	1523.79	<b>36.57</b>	16.38
2756.02	667.61	1519.24	<b>36.46</b>	15.45
2760.94	686.85	1529.73	<b>36.71</b>	16.63
2762.86	694.61	1534.05	<b>36.82</b>	19.05
2763.50	697.20	1535.50	<b>36.85</b>	15.48
2760.94	686.85	1529.73	<b>36.71</b>	8.88
2762.22	692.02	1532.61	<b>36.78</b>	15.56
2762.86	694.61	1534.05	<b>36.82</b>	11.42
2762.22	692.02	1532.61	<b>36.78</b>	8.53
2760.94	686.85	1529.73	<b>36.71</b>	7.34
2759.60	681.52	1526.79	<b>36.64</b>	8.94

Fuente: elaboración propia

## Apéndice 6. Concentración de los gases de combustión

Combustible (Búnker)						Aire de combustión								Balances de masa				GASES DE COMBUSTIÓN							
Consumido		Composición (kmol)				O <sub>2</sub> necesario - teórico (kmol)				O <sub>2</sub> real	N <sub>2</sub> real	Aire real	n <sub>r</sub>	n <sub>i</sub>	n <sub>2</sub>	n <sub>3</sub>	T (°F)	%CO <sub>2</sub>	CO (ppm)	%O <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>	%SO <sub>2</sub>	ppm H <sub>2</sub>	% Exceso Aire	
m <sup>3</sup>	Kg	C	H	S	N	O	S	H	C	TOTAL	(kmol)	(kmol)	(kmol)	(kmol)	(kmol)	(kmol)	(kmol)	(kmol)	(kmol)	(kmol)	(kmol)	(kmol)	(kmol)	(kmol)	
0.99	972.87	69.99	115.77	0.14	0.28	0.50	0.14	28.94	104.98	134.06	147.87	556.27	704.14	644.78	556.41	44.19	0.09	470.90	10.84	1.12	5.27	86.29	6.85	139	10.30
1.19	1168.07	84.03	139.00	0.16	0.33	0.61	0.16	34.75	126.05	160.96	177.39	667.34	844.73	709.59	667.51	53.62	0.10	519.00	11.83	1.21	5.65	94.07	7.56	138	10.21
0.94	919.70	66.16	109.44	0.13	0.26	0.48	0.13	27.36	99.25	126.74	139.79	525.87	665.66	575.50	526.00	39.54	0.10	528.07	11.48	1.33	5.97	91.40	6.87	165	10.30
0.94	919.70	66.16	109.44	0.13	0.26	0.48	0.13	27.36	99.25	126.74	139.79	525.87	665.66	558.34	526.00	43.18	0.10	531.00	11.84	1.00	5.50	94.21	7.73	176	10.30
0.94	919.70	66.16	109.44	0.13	0.26	0.48	0.13	27.36	99.25	126.74	138.59	521.34	659.93	522.00	521.48	46.30	0.10	481.35	12.68	0.00	5.05	99.90	8.87	201	9.35
1.10	1077.37	77.51	128.21	0.15	0.31	0.56	0.15	32.05	116.26	148.46	163.69	615.80	779.50	619.31	615.96	55.50	0.10	490.95	12.52	0.00	5.00	99.46	8.96	167	10.26
1.33	1305.52	93.92	155.36	0.18	0.37	0.68	0.18	38.84	140.88	179.90	198.83	747.97	946.80	791.23	748.15	62.92	0.10	478.95	11.87	0.00	5.35	94.56	7.95	124	10.52
0.99	972.58	69.97	115.74	0.14	0.28	0.50	0.14	28.93	104.95	134.02	149.03	560.64	709.68	584.68	560.78	46.17	0.10	504.93	11.97	0.00	5.67	95.91	7.90	169	11.20
1.06	1042.37	74.99	124.04	0.15	0.30	0.54	0.15	31.01	112.48	143.64	158.49	596.23	754.72	575.50	596.38	49.83	0.11	506.10	13.03	0.33	5.90	103.63	8.66	187	10.34
1.20	1176.55	84.64	140.01	0.17	0.34	0.61	0.17	35.00	126.96	162.13	178.76	672.49	851.26	614.83	672.66	57.54	0.11	510.67	13.77	0.00	6.00	109.41	9.36	185	10.26
0.86	847.43	60.96	100.84	0.12	0.24	0.44	0.12	25.21	91.45	116.78	128.99	485.25	614.24	487.24	485.37	43.91	0.10	479.90	12.50	1.21	5.00	99.62	9.01	212	10.46
1.15	1127.00	81.08	134.11	0.16	0.32	0.58	0.16	33.53	121.61	155.30	171.30	644.40	815.70	651.16	644.56	55.73	0.10	476.70	12.44	1.60	5.35	98.99	8.56	158	10.30
0.98	963.01	69.28	114.60	0.14	0.27	0.50	0.14	28.65	103.92	132.70	146.73	551.99	698.72	517.78	552.12	49.78	0.11	508.33	13.37	1.33	5.40	106.63	9.61	214	10.57
0.76	747.10	53.75	88.90	0.10	0.21	0.39	0.10	22.23	80.62	102.95	113.69	427.68	541.37	441.63	427.79	35.00	0.10	497.10	12.16	1.50	5.70	96.87	7.92	228	10.43
0.75	733.07	52.74	87.24	0.10	0.21	0.38	0.10	21.81	79.11	101.02	111.26	418.55	529.81	408.02	418.66	39.35	0.11	478.20	12.92	1.00	4.75	102.61	9.64	262	10.14
1.44	1413.04	101.65	168.15	0.20	0.40	0.73	0.20	42.04	152.48	194.72	215.40	810.30	1025.70	790.47	810.51	75.83	0.11	496.30	12.85	1.50	4.85	102.53	9.59	135	10.62
1.26	1233.70	88.75	146.81	0.17	0.35	0.64	0.17	36.70	133.13	170.00	187.35	704.78	892.12	709.07	704.95	63.52	0.10	561.10	12.50	1.67	5.00	99.42	8.96	146	10.20
0.96	945.22	68.00	112.48	0.13	0.27	0.49	0.13	28.12	102.00	130.25	143.69	540.56	684.25	530.83	540.70	50.76	0.11	471.50	12.80	1.50	4.75	101.86	9.56	200	10.32
1.35	1323.00	95.18	157.44	0.19	0.38	0.69	0.19	39.36	142.77	182.31	201.12	756.61	957.73	830.87	756.80	68.55	0.09	508.80	11.44	1.50	4.55	91.08	8.25	114	10.32
0.88	858.27	61.74	102.13	0.12	0.25	0.45	0.12	25.53	92.62	118.27	130.35	490.35	620.69	471.87	490.47	47.39	0.11	505.30	13.07	1.50	4.55	103.94	10.04	229	10.21
1.32	1290.74	92.86	153.60	0.18	0.37	0.67	0.18	38.40	139.28	177.86	195.85	736.76	932.60	838.08	736.94	60.89	0.09	526.40	11.07	1.29	5.07	87.93	7.27	109	10.11
1.37	1339.43	96.36	159.39	0.19	0.38	0.69	0.19	39.85	144.54	184.57	203.09	763.99	967.08	844.69	764.18	57.34	0.08	471.30	10.19	1.00	5.27	80.89	6.07	89	10.03
1.27	1246.63	89.68	148.35	0.17	0.36	0.65	0.17	37.09	134.52	171.79	189.55	713.06	902.61	752.37	713.24	59.37	0.10	144.57	11.91	1.00	5.43	94.80	7.89	131	10.34
1.35	1318.33	94.84	156.88	0.18	0.38	0.68	0.18	39.22	142.26	181.67	199.96	752.23	952.19	788.85	752.42	65.46	0.10	518.27	12.00	1.94	5.08	95.38	8.30	126	10.07
1.36	1333.17	95.91	158.65	0.19	0.38	0.69	0.19	39.66	143.86	183.71	202.91	763.33	966.23	726.58	763.52	64.51	0.11	521.54	13.19	1.00	5.90	105.08	8.88	150	10.45
0.95	928.06	66.76	110.44	0.13	0.26	0.48	0.13	27.61	100.15	127.89	140.97	530.32	671.29	550.08	530.45	43.40	0.10	471.35	12.13	1.23	5.65	96.43	7.89	182	10.23
1.20	1177.71	84.72	140.15	0.17	0.34	0.61	0.17	35.04	127.09	162.29	179.39	674.86	854.26	624.10	675.03	64.61	0.11	480.96	13.57	1.05	4.87	108.16	10.35	180	10.54
0.91	894.04	64.32	106.39	0.13	0.26	0.46	0.13	26.60	96.48	123.20	136.21	512.40	648.61	570.69	512.53	40.59	0.09	479.62	11.27	0.00	5.53	89.81	7.11	163	10.56
0.70	690.47	49.67	82.17	0.10	0.20	0.36	0.10	20.54	74.51	95.15	104.97	394.87	499.84	423.10	394.97	31.27	0.10	505.46	11.74	0.00	5.72	93.35	7.39	229	10.32
0.67	659.86	47.47	78.52	0.09	0.19	0.34	0.09	19.63	71.21	90.93	100.21	376.99	477.20	414.95	377.09	30.78	0.09	480.59	11.44	0.00	5.34	90.87	7.42	228	10.21
0.75	736.43	52.98	87.64	0.10	0.21	0.38	0.10	21.91	79.47	101.48	112.25	422.27	534.51	471.76	422.37	32.92	0.09	489.45	11.22	1.00	5.63	89.53	6.98	197	10.61

Fuente: elaboración propia

## ANEXOS

### Anexo 1. Propiedades del agua saturada (líquido – vapor) – presiones

Presión bar	Temp. °C	Volumen específico m <sup>3</sup> /kg		Energía interna kJ/kg		Entalpía kJ/kg			Entropía kJ/kg, K	
		Líquido sat,	Vapor sat,	Líquido sat,	Vapor sat,	Líquido sat,	Vapor vaporiz,	Vapor sat,	Líquido sat,	Vapor sat,
		$v_f \times 10^3$	$v_g$	$u_f$	$u_g$	$h_f$	$h_{fg}$	$h_g$	$s_f$	$s_g$
0,04	28,96	1,0040	34,800	121,45	2415,2	121,46	2432,9	2554,4	0,4226	8,4746
0,06	36,16	1,0064	23,739	151,53	2425,0	151,53	2415,9	2567,4	0,5210	8,3304
0,08	41,51	1,0084	18,103	173,87	2432,2	173,88	2403,1	2577,0	0,5926	8,2287
0,10	45,81	1,0102	14,674	191,82	2437,9	191,83	2392,8	2584,7	0,6493	8,1502
0,20	60,06	1,0172	7,649	251,38	2456,7	251,40	2358,3	2609,7	0,8320	7,9085
0,30	69,10	1,0223	5,229	289,20	2468,4	289,23	2336,1	2625,3	0,9439	7,7686
0,40	75,87	1,0265	3,993	317,53	2477,0	317,58	2319,2	2636,8	1,0259	7,6700
0,50	81,33	1,0300	3,240	340,44	2483,9	340,49	2305,4	2645,9	1,0910	7,5939
0,60	85,94	1,0331	2,732	359,79	2489,6	359,86	2293,6	2653,5	1,1453	7,5320
0,70	89,95	1,0360	2,365	376,63	2494,5	376,70	2283,3	2660,0	1,1919	7,4797
0,80	93,50	1,0380	2,087	391,58	2498,8	391,66	2274,1	2665,8	1,2329	7,4346
0,90	96,71	1,0410	1,869	405,06	2502,6	405,15	2265,7	2670,9	1,2695	7,3949
1,00	99,63	1,0432	1,694	417,36	2506,1	417,46	2258,0	2675,5	1,3026	7,3594
1,50	111,4	1,0528	1,159	466,94	2519,7	467,11	2226,5	2693,6	1,4336	7,2233
2,00	120,2	1,0605	0,8857	504,49	2529,5	504,70	2201,9	2706,7	1,5301	7,1271
2,50	127,4	1,0672	0,7187	535,10	2537,2	535,37	2181,5	2716,9	1,6072	7,0527
3,00	133,6	1,0732	0,6058	561,15	2543,6	561,47	2163,8	2725,3	1,6718	6,9919
3,50	138,9	1,0786	0,5243	583,95	2546,9	584,33	2148,1	2732,4	1,7275	6,9405
4,00	143,6	1,0836	0,4625	604,31	2553,6	604,74	2133,8	2738,6	1,7766	6,8959
4,50	147,9	1,0882	0,4140	622,25	2557,6	623,25	2120,7	2743,9	1,8207	6,8565
5,00	151,9	1,0926	0,3749	639,68	2561,2	640,23	2108,5	2748,7	1,8607	6,8212
6,00	158,9	1,1006	0,3157	669,90	2567,4	670,56	2086,3	2756,8	1,9312	6,7600
7,00	165,0	1,1080	0,2729	696,44	2572,5	697,22	2066,3	2763,5	1,9922	6,7080
8,00	170,4	1,1148	0,2404	720,22	2576,8	721,11	2048,0	2769,1	2,0462	6,6628
9,00	175,4	1,1212	0,2150	741,83	2580,5	742,83	2031,1	2773,9	2,0946	6,6226
10,0	179,9	1,1273	0,1944	761,68	2583,6	762,81	2015,3	2778,1	2,1387	6,5863
15,0	198,3	1,1539	0,1318	843,16	2594,5	844,84	1947,3	2792,2	2,3150	6,4448
20,0	212,4	1,1767	0,09963	906,44	2600,3	908,79	1890,7	2799,5	2,4474	6,3409
25,0	224,0	1,1973	0,07998	959,11	2603,1	962,11	1841,0	2803,1	2,5547	6,2575
30,0	233,9	1,2165	0,06668	1004,8	2604,1	1008,4	1795,7	2804,2	2,6457	6,1869
35,0	242,6	1,2347	0,05707	1045,4	2603,7	1049,8	1753,7	2803,4	2,7253	6,1253
40,0	250,4	1,2522	0,04978	1082,3	2602,3	1087,3	1714,1	2801,4	2,7964	6,0701
45,0	257,5	1,2692	0,04406	1116,2	2600,1	1121,9	1676,4	2798,3	2,8610	6,0199
50,0	264,0	1,2859	0,03944	1147,8	2597,1	1154,2	1640,1	2794,3	2,9202	5,9734
60,0	275,6	1,3187	0,03244	1205,4	2589,7	1213,4	1571,0	2784,3	3,0267	5,8892
70,0	285,9	1,3513	0,02737	1257,6	2580,5	1267,0	1505,1	2772,1	3,1211	5,8133
80,0	295,1	1,3842	0,02352	1305,6	2569,8	1316,6	1441,3	2758,0	3,2068	5,7432
90,0	303,4	1,4178	0,02048	1350,5	2557,8	1363,3	1378,9	2742,1	3,2858	5,6772
100	311,1	1,4524	0,01803	1393,0	2544,4	1407,6	1317,1	2724,7	3,3596	5,6141
110	318,2	1,4886	0,01599	1433,7	2529,8	1450,1	1255,5	2705,6	3,4295	5,5527
120	324,8	1,5267	0,01426	1473,0	2513,7	1491,3	1193,6	2684,9	3,4962	5,4924
130	330,9	1,5671	0,01278	1511,1	2496,1	1531,5	1130,7	2662,2	3,5606	5,4323
140	336,8	1,6107	0,01149	1548,6	2476,8	1571,1	1066,5	2637,6	3,6232	5,3717
150	342,2	1,6581	0,01034	1585,6	2455,5	1610,5	1000,0	2610,5	3,6848	5,3098
160	347,4	1,7107	0,009306	1622,7	2431,7	1650,1	930,6	2580,6	3,7461	5,2455
170	352,4	1,7702	0,008364	1660,2	2405,0	1690,3	856,9	2547,2	3,8079	5,1777
180	357,1	1,8397	0,007489	1698,9	2374,3	1732,0	777,1	2509,1	3,8715	5,1044
190	361,5	1,9243	0,006657	1739,9	2338,1	1776,5	688,0	2464,5	3,9388	5,0228
200	365,8	2,036	0,005834	1785,6	2293,0	1826,3	583,4	2409,7	4,0139	4,9269
220,9	374,1	3,155	0,003155	2029,6	2029,6	2099,3		2099,3	4,4298	4,4298

Fuente: KEENAN, Joseph; KEYES, Frederick. *Thermodynamic properties of steam*.

Anexo 2. Propiedades del agua saturada (líquido – vapor) - temperaturas

Temp. °C	Presión bar	Volumen específico m <sup>3</sup> / kg		Energía interna kJ / kg		Entalpía kJ / kg			Entropía kJ / kg . K	
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor vaporiz.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.
		$v_f \times 10^4$	$v_g$	$u_f$	$u_g$	$h_f$	$h_{fg}$	$h_g$	$s_f$	$s_g$
.01	0,00611	1,0002	208,138	0,00	2375,3	0,01	2501,3	2501,4	0,0000	9,1582
4	0,00813	1,0001	157,232	16,77	2380,9	16,78	2491,9	2508,7	0,0610	9,0514
5	0,00872	1,0001	147,120	20,97	2382,3	20,98	2489,6	2510,6	0,0761	9,0257
6	0,00935	1,0001	137,734	25,19	2383,6	25,20	2487,2	2512,4	0,0912	9,0003
8	0,01072	1,0002	120,917	33,59	2386,4	33,60	2482,5	2518,1	0,1212	8,9501
10	0,01228	1,0004	108,379	42,00	2389,2	42,01	2477,7	2519,8	0,1510	8,9008
11	0,01312	1,0004	99,857	48,20	2390,5	48,20	2475,4	2521,6	0,1658	8,8765
12	0,01402	1,0005	93,784	50,41	2391,9	50,41	2473,0	2523,4	0,1806	8,8524
13	0,01497	1,0007	88,124	54,60	2393,3	54,60	2470,7	2525,3	0,1953	8,8285
14	0,01598	1,0008	82,948	58,79	2394,7	58,80	2468,3	2527,1	0,2099	8,8048
15	0,01705	1,0009	77,928	62,99	2396,1	62,99	2465,9	2528,9	0,2245	8,7814
16	0,01818	1,0011	73,333	67,18	2397,4	67,19	2463,6	2530,8	0,2390	8,7582
17	0,01938	1,0012	69,044	71,38	2398,8	71,38	2461,2	2532,6	0,2535	8,7351
18	0,02064	1,0014	65,038	75,57	2400,2	75,58	2458,8	2534,4	0,2679	8,7123
19	0,02198	1,0016	61,293	79,76	2401,6	79,77	2456,5	2536,2	0,2823	8,6897
20	0,02339	1,0018	57,791	83,95	2402,9	83,96	2454,1	2538,1	0,2966	8,6672
21	0,02487	1,0020	54,514	88,14	2404,3	88,14	2451,8	2539,9	0,3109	8,6450
22	0,02645	1,0022	51,447	92,32	2405,7	92,33	2449,4	2541,7	0,3251	8,6229
23	0,02810	1,0024	48,574	96,51	2407,0	96,52	2447,0	2543,5	0,3393	8,6011
24	0,02985	1,0027	45,883	100,70	2408,4	100,70	2444,7	2545,4	0,3534	8,5794
25	0,03169	1,0029	43,380	104,88	2409,8	104,89	2442,3	2547,2	0,3674	8,5580
26	0,03363	1,0032	40,994	109,06	2411,1	109,07	2439,9	2549,0	0,3814	8,5367
27	0,03567	1,0035	38,774	113,25	2412,5	113,25	2437,6	2550,8	0,3954	8,5156
28	0,03782	1,0037	36,690	117,42	2413,9	117,43	2435,2	2552,6	0,4093	8,4946
29	0,04008	1,0040	34,733	121,60	2415,2	121,61	2432,8	2554,5	0,4231	8,4739
30	0,04246	1,0043	32,894	125,78	2416,6	125,79	2430,5	2556,3	0,4369	8,4533
31	0,04496	1,0046	31,165	129,96	2418,0	129,97	2428,1	2558,1	0,4507	8,4329
32	0,04759	1,0050	29,540	134,14	2419,3	134,15	2425,7	2559,9	0,4644	8,4127
33	0,05034	1,0053	28,011	138,32	2420,7	138,33	2423,4	2561,7	0,4781	8,3927
34	0,05324	1,0056	26,571	142,50	2422,0	142,50	2421,0	2563,5	0,4917	8,3728
35	0,05628	1,0060	25,216	146,67	2423,4	146,68	2418,6	2565,3	0,5053	8,3531
36	0,05947	1,0063	23,940	150,85	2424,7	150,86	2416,2	2567,1	0,5188	8,3336
38	0,06632	1,0071	21,602	159,20	2427,4	159,21	2411,5	2570,7	0,5458	8,2950
40	0,07384	1,0078	19,523	167,56	2430,1	167,57	2406,7	2574,3	0,5725	8,2570
45	0,09593	1,0099	15,258	188,44	2436,8	188,45	2394,8	2583,2	0,6387	8,1648
50	0,1235	1,0121	12,032	209,32	2443,5	209,33	2382,7	2592,1	0,7038	8,0763
55	0,1576	1,0146	9,568	230,21	2450,1	230,23	2370,7	2600,9	0,7679	7,9913
60	0,1994	1,0172	7,671	251,11	2456,6	251,13	2358,5	2609,8	0,8312	7,9096
65	0,2503	1,0199	6,197	272,02	2463,1	272,06	2346,2	2618,3	0,8935	7,8310
70	0,3119	1,0228	5,042	292,95	2469,6	292,98	2333,8	2626,8	0,9549	7,7553
75	0,3858	1,0259	4,131	313,90	2475,9	313,93	2321,4	2635,3	1,0155	7,6824
80	0,4739	1,0291	3,407	334,86	2482,2	334,91	2308,8	2643,7	1,0753	7,6122
85	0,5783	1,0325	2,828	355,84	2488,4	355,90	2296,0	2651,9	1,1343	7,5445
90	0,7014	1,0360	2,361	376,85	2494,5	376,92	2283,2	2660,1	1,1925	7,4791
95	0,8455	1,0397	1,982	397,88	2500,6	397,96	2270,2	2668,1	1,2500	7,4159
100	1,014	1,0435	1,673	418,94	2506,5	419,04	2257,0	2676,1	1,3069	7,3549
110	1,433	1,0516	1,210	461,14	2518,1	461,30	2230,2	2691,5	1,4185	7,2387
120	1,985	1,0603	0,8919	503,50	2529,3	503,71	2202,6	2706,3	1,5276	7,1296
130	2,701	1,0697	0,6685	546,02	2539,9	546,31	2174,2	2720,5	1,6344	7,0269
140	3,613	1,0797	0,5089	588,74	2550,0	589,13	2144,7	2733,9	1,7391	6,9299
150	4,758	1,0905	0,3928	631,68	2560,5	632,20	2114,3	2746,5	1,8418	6,8379
160	6,178	1,1020	0,3071	674,86	2568,4	675,55	2082,6	2758,1	1,9427	6,7502
170	7,917	1,1143	0,2428	718,33	2576,5	719,21	2049,5	2768,7	2,0419	6,6683
180	10,02	1,1274	0,1941	762,09	2583,7	763,22	2015,0	2778,2	2,1396	6,5857
190	12,54	1,1414	0,1565	806,19	2590,0	807,62	1979,8	2786,4	2,2359	6,5079
200	15,54	1,1565	0,1274	850,65	2595,3	852,45	1940,7	2793,2	2,3309	6,4323
210	19,06	1,1726	0,1044	895,53	2599,5	897,76	1900,7	2798,5	2,4248	6,3585
220	23,18	1,1900	0,08619	940,87	2602,4	943,62	1858,5	2802,1	2,5178	6,2861
230	27,95	1,2088	0,07158	986,74	2603,9	990,12	1813,8	2804,0	2,6099	6,2146
240	33,44	1,2291	0,05976	1033,2	2604,0	1037,3	1768,5	2803,8	2,7015	6,1437
250	39,73	1,2512	0,05013	1080,4	2602,4	1085,4	1716,2	2801,5	2,7927	6,0730
260	46,88	1,2755	0,04221	1128,4	2599,0	1134,4	1662,5	2798,6	2,8838	6,0019
270	54,99	1,3023	0,03564	1177,4	2593,7	1184,5	1608,2	2795,7	2,9751	5,9301
280	64,12	1,3321	0,03017	1227,5	2586,1	1236,0	1543,6	2791,6	3,0668	5,8571
290	74,36	1,3656	0,02567	1278,9	2576,0	1289,1	1477,1	2786,2	3,1594	5,7821
300	85,81	1,4036	0,02167	1332,0	2563,0	1344,0	1404,9	2779,0	3,2534	5,7045
320	112,7	1,4988	0,01549	1444,6	2525,5	1461,5	1238,6	2700,1	3,4480	5,5382
340	145,9	1,6379	0,01080	1570,3	2464,6	1594,2	1027,9	2622,0	3,6594	5,3357
360	186,5	1,8925	0,006945	1725,2	2351,5	1760,5	720,5	2481,0	3,9147	5,0526
374,14	220,9	3,155	0,003155	2029,6	2029,6	2099,3	0	2099,3	4,4298	4,4298

Fuente: KEENAN, Joseph; KEYES, Frederick. *Thermodynamic properties of steam.*

### Anexo 3. Propiedades del agua (líquido sobrecalentado)

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K
$P = 0,06 \text{ bar} = 0,006 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 36,16^\circ\text{C}$ )				
Sat.	23,739	2425,0	2567,4	8,3304
80	27,132	2487,3	2650,1	8,5804
120	30,219	2544,7	2726,0	8,7840
160	33,302	2602,7	2802,5	8,9693
200	36,383	2661,4	2879,7	9,1398
240	39,462	2721,0	2957,8	9,2982
280	42,540	2781,5	3036,8	9,4464
320	45,618	2843,0	3116,7	9,5859
360	48,696	2905,5	3197,7	9,7180
400	51,774	2969,0	3279,6	9,8435
440	54,851	3033,5	3362,6	9,9633
500	59,467	3132,3	3489,1	10,1336

$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K
$p = 0,35 \text{ bar} = 0,035 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 72,69^\circ\text{C}$ )			
4,526	2473,0	2631,4	7,7158
4,625	2483,7	2645,6	7,7564
5,163	2542,4	2723,1	7,9644
5,696	2601,2	2800,6	8,1519
6,228	2660,4	2878,4	8,3237
6,758	2720,3	2956,8	8,4828
7,287	2780,9	3036,0	8,6314
7,815	2842,5	3116,1	8,7712
8,344	2905,1	3197,1	8,9034
8,872	2968,6	3279,2	9,0291
9,400	3033,2	3362,2	9,1490
10,192	3132,1	3488,8	9,3194

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K
$p = 0,70 \text{ bar} = 0,07 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 89,95^\circ\text{C}$ )				
Sat.	2,365	2494,5	2680,0	7,4797
100	2,434	2509,7	2680,0	7,5341
120	2,571	2539,7	2719,6	7,6375
160	2,841	2599,4	2798,2	7,8279
200	3,108	2659,1	2876,7	8,0012
240	3,374	2719,3	2955,5	8,1611
280	3,640	2780,2	3035,0	8,3162
320	3,905	2842,0	3115,3	8,4504
360	4,170	2904,6	3196,5	8,5828
400	4,434	2968,2	3278,6	8,7086
440	4,698	3032,9	3361,8	8,8286
500	5,095	3131,8	3488,5	8,9991

$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K
$p = 1,0 \text{ bar} = 0,10 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 99,63^\circ\text{C}$ )			
1,694	2506,1	2675,5	7,3594
1,696	2506,7	2676,2	7,3614
1,793	2537,3	2716,6	7,4668
1,984	2597,8	2796,2	7,6597
2,172	2658,1	2875,3	7,8343
2,359	2718,5	2954,5	7,9949
2,546	2779,6	3034,2	8,1445
2,732	2841,5	3114,6	8,2849
2,917	2904,2	3195,9	8,4175
3,103	2967,9	3278,2	8,5435
3,288	3032,6	3361,4	8,6636
3,565	3131,6	3488,1	8,8342

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K
$p = 1,5 \text{ bar} = 0,15 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 111,37^\circ\text{C}$ )				
Sat.	1,159	2519,7	2693,6	7,2233
120	1,188	2533,3	2711,4	7,2693
160	1,317	2595,2	2792,8	7,4665
200	1,444	2656,2	2872,9	7,6433
240	1,570	2717,2	2952,7	7,8052
280	1,695	2778,6	3032,8	7,9555
320	1,819	2840,6	3113,5	8,0964
360	1,943	2903,5	3195,0	8,2293
400	2,067	2967,3	3277,4	8,3555
440	2,191	3032,1	3360,7	8,4757
500	2,376	3131,2	3487,6	8,6466
600	2,685	3301,7	3704,3	8,9101

$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K
$p = 3,0 \text{ bar} = 0,30 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 133,55^\circ\text{C}$ )			
0,606	2543,6	2725,3	6,9919
0,651	2587,1	2782,3	7,1276
0,716	2650,7	2865,5	7,3115
0,781	2713,1	2947,3	7,4774
0,844	2775,4	3028,6	7,6299
0,907	2838,1	3110,1	7,7722
0,969	2901,4	3192,2	7,9061
1,032	2965,6	3275,0	8,0330
1,094	3030,6	3358,7	8,1538
1,187	3130,0	3486,0	8,3251
1,341	3300,8	3703,2	8,5892

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K
$P = 5,0 \text{ bar} = 0,50 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 151,86^\circ\text{C}$ )				
Sat.	0,3749	2561,2	2748,7	6,8213
180	0,4045	2609,7	2812,0	6,9656
200	0,4249	2642,9	2855,4	7,0592
240	0,4646	2707,6	2939,9	7,2307
280	0,5034	2771,2	3022,9	7,3865
320	0,5416	2834,7	3105,6	7,5308
360	0,5796	2898,7	3188,4	7,6660
400	0,6173	2963,2	3271,9	7,7938
440	0,6548	3028,6	3356,0	7,9152
500	0,7109	3128,4	3483,9	8,0873
600	0,8041	3299,6	3701,7	8,3522
700	0,8969	3477,5	3925,9	8,5952

$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg K
$p = 7,0 \text{ bar} = 0,70 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 164,97^\circ\text{C}$ )			
0,2729	2572,5	2763,5	6,7080
0,2847	2599,8	2799,1	6,7880
0,2999	2634,8	2844,8	6,8865
0,3292	2701,8	2932,2	7,0641
0,3574	2768,9	3017,1	7,2233
0,3852	2831,3	3100,9	7,3697
0,4126	2895,8	3184,7	7,5063
0,4397	2960,9	3268,7	7,6350
0,4667	3026,6	3353,3	7,7571
0,5070	3128,8	3481,7	7,9299
0,5738	3298,5	3700,2	8,1956
0,6403	3476,6	3924,8	8,4391

Continuación anexo 3.

T	v	u	h	s
°C	m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg K
<b>p = 10,0 bar = 1,0 MPa (T<sub>sat</sub> = 179,91 °C)</b>				
Sat	0,1944	2583,6	2778,1	6,5865
200	0,2060	2621,9	2827,9	6,6940
240	0,2275	2692,9	2920,4	6,8817
280	0,2480	2760,2	3008,2	7,0465
320	0,2678	2826,1	3093,9	7,1962
360	0,2873	2891,6	3178,9	7,3349
400	0,3066	2957,3	3263,9	7,4651
440	0,3257	3023,6	3349,3	7,5883
500	0,3541	3124,4	3478,5	7,7622
540	0,3729	3192,6	3565,6	7,8720
600	0,4011	3296,8	3697,9	8,0290
640	0,4198	3367,4	3787,2	8,1290

T	v	u	h	s
<b>p = 20,0 bar = 2,0 MPa (T<sub>sat</sub> = 212,42 °C)</b>				
Sat	0,0996	2600,3	2799,5	6,3409
240	0,1085	2659,6	2876,5	6,4952
280	0,1200	2736,4	2976,4	6,6828
320	0,1308	2807,9	3069,5	6,8452
360	0,1411	2877,0	3159,3	6,9917
400	0,1512	2945,2	3247,6	7,1271
440	0,1611	3013,4	3335,5	7,2540
500	0,1757	3116,2	3467,6	7,4317
540	0,1853	3185,6	3556,1	7,5434
600	0,1996	3290,9	3690,1	7,7024
640	0,2091	3362,2	3780,4	7,8035
700	0,2232	3470,9	3917,4	7,9487

T	v	u	h	s
<b>p = 40 bar = 4,0 MPa (T<sub>sat</sub> = 250,4 °C)</b>				
Sat	0,04978	2602,3	2801,4	6,0701
280	0,05546	2680,0	2901,8	6,2568
320	0,06199	2767,4	3015,4	6,4553
360	0,06788	2845,7	3117,2	6,6215
400	0,07341	2919,9	3213,6	6,7690
440	0,07872	2992,2	3307,1	6,9041
500	0,08643	3099,5	3445,3	7,0901
540	0,09145	3171,1	3536,9	7,2056
600	0,09885	3279,1	3674,4	7,3688
640	0,1037	3351,8	3766,6	7,4720
700	0,1110	3462,1	3905,9	7,6198
740	0,1157	3536,6	3999,6	7,7141

T	v	u	h	s
<b>p = 80 bar = 8,0 MPa (T<sub>sat</sub> = 295,06 °C)</b>				
Sat	0,02352	2569,8	2758,0	5,7432
320	0,02682	2662,7	2877,2	5,9489
360	0,03089	2772,7	3019,8	6,1819
400	0,03432	2863,8	3138,3	6,3634
440	0,03742	2946,7	3246,1	6,5190
480	0,04034	3025,7	3348,4	6,6586
520	0,04313	3102,7	3447,7	6,7871
560	0,04582	3178,7	3545,3	6,9072
600	0,04845	3254,4	3642,0	7,0206
640	0,05102	3330,1	3738,3	7,1283
700	0,05481	3443,9	3882,4	7,2812
740	0,05729	3520,4	3978,7	7,3782

T	v	u	h	s
<b>p = 120 bar = 12,0 MPa (T<sub>sat</sub> = 324,75 °C)</b>				
Sat	0,01426	2513,7	2684,9	5,4924
360	0,01811	2678,4	2895,7	5,8361
400	0,02108	2798,3	3051,3	6,0747
440	0,02355	2896,1	3178,7	6,2586
480	0,02576	2984,4	3293,5	6,4154
520	0,02781	3068,0	3401,8	6,5556
560	0,02977	3149,0	3506,2	6,6840
600	0,03164	3228,7	3608,3	6,8037
640	0,03345	3307,5	3709,0	6,9164
700	0,03610	3425,2	3858,4	7,0749
740	0,03781	3503,7	3957,4	7,1746

v	u	h	s
m <sup>3</sup> /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg K
<b>p = 15,0 bar = 1,5 MPa (T<sub>sat</sub> = 198,32 °C)</b>			
0,1318	2504,5	2792,2	6,4448
0,1325	2598,1	2796,8	6,4546
0,1483	2676,9	2899,3	6,6628
0,1627	2748,6	2992,7	6,8381
0,1765	2817,1	3081,9	6,9938
0,1899	2884,4	3169,2	7,1363
0,2030	2951,3	3255,8	7,2690
0,2160	3018,5	3342,5	7,3940
0,2352	3120,3	3473,1	7,5698
0,2478	3189,1	3560,9	7,6805
0,2668	3293,9	3694,0	7,8385
0,2793	3364,8	3783,8	7,9391

v	u	h	s
<b>p = 30,0 bar = 3,0 MPa (T<sub>sat</sub> = 233,90 °C)</b>			
0,0667	2604,1	2799,2	6,1869
0,0682	2619,7	2824,3	6,2265
0,0771	2709,9	2941,3	6,4462
0,0850	2788,4	3043,4	6,6245
0,0923	2861,7	3138,7	6,7801
0,0994	2932,8	3230,9	6,9212
0,1062	3002,9	3321,5	7,0520
0,1162	3108,0	3456,5	7,2338
0,1227	3178,4	3546,6	7,3474
0,1324	3285,0	3682,3	7,5085
0,1388	3357,0	3773,5	7,6106
0,1484	3466,5	3911,7	7,7571

v	u	h	s
<b>p = 60 bar = 6,0 MPa (T<sub>sat</sub> = 257,64 °C)</b>			
0,03244	2589,7	2784,3	5,8892
0,03317	2605,2	2804,2	5,9252
0,03876	2720,0	2952,6	6,1846
0,04331	2811,2	3071,1	6,3782
0,04739	2892,9	3177,2	6,5408
0,05122	2970,0	3277,3	6,6853
0,05665	3082,2	3422,2	6,8803
0,06015	3156,1	3517,0	6,9999
0,06525	3266,9	3658,4	7,1677
0,06859	3341,0	3752,6	7,2731
0,07352	3453,1	3894,1	7,4234
0,07677	3528,3	3989,2	7,5190

v	u	h	s
<b>p = 100 bar = 10,0 MPa (T<sub>sat</sub> = 311,06 °C)</b>			
0,01803	2544,4	2724,7	5,6141
0,01925	2588,8	2781,3	5,7103
0,02331	2729,1	2962,1	6,0060
0,02641	2832,4	3096,5	6,2120
0,02911	2922,1	3213,2	6,3805
0,03160	3005,4	3321,4	6,5282
0,03394	3085,6	3425,1	6,6622
0,03619	3164,1	3526,0	6,7864
0,03837	3241,7	3625,3	6,9029
0,04048	3318,9	3723,7	7,0131
0,04358	3434,7	3870,5	7,1687
0,04560	3512,1	3968,1	7,2670

v	u	h	s
<b>p = 140 bar = 14,0 MPa (T<sub>sat</sub> = 336,75 °C)</b>			
0,01149	2476,8	2637,6	5,3717
0,01422	2617,4	2816,5	5,6802
0,01722	2760,9	3001,9	5,9448
0,01954	2868,6	3142,2	6,1474
0,02157	2962,5	3264,5	6,3143
0,02343	3049,8	3377,8	6,4610
0,02517	3133,6	3486,0	6,5941
0,02683	3215,4	3591,1	6,7172
0,02843	3296,0	3694,1	6,8326
0,03075	3415,7	3846,2	6,9939
0,03225	3495,2	3946,7	7,0952



Continuación anexo 3.

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ / kg	$h$ kJ / kg	$s$ kJ / kg K
$P = 160 \text{ bar} = 16,0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 347,44^\circ\text{C}$ )				
Sat	0,00931	2431,7	2580,6	5,2455
360	0,01105	2539,0	2715,8	5,4614
400	0,01426	2719,4	2947,6	5,8175
440	0,01652	2839,4	3103,7	6,0429
480	0,01842	2939,7	3234,4	6,2215
520	0,02013	3031,1	3353,3	6,3752
560	0,02172	3117,8	3465,4	6,5132
600	0,02323	3201,8	3573,5	6,6399
640	0,02467	3284,2	3678,9	6,7580
700	0,02674	3406,0	3833,9	6,9224
740	0,02808	3486,7	3935,9	7,0251

$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ / kg	$h$ kJ / kg	$s$ kJ / kg K
$p = 180 \text{ bar} = 18,0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 357,06^\circ\text{C}$ )			
0,00749	2374,3	2509,1	5,1044
0,00809	2418,9	2564,5	5,1922
0,01190	2672,8	2887,0	5,6887
0,01414	2808,2	3062,8	5,9428
0,01596	2915,9	3203,2	6,1345
0,01757	3011,8	3378,0	6,2960
0,01904	3101,7	3444,4	6,4392
0,02042	3188,0	3555,6	6,5696
0,02174	3272,3	3663,6	6,6905
0,02362	3396,3	3821,5	6,8580
0,02483	3478,0	3925,0	6,9623

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ / kg	$h$ kJ / kg	$s$ kJ / kg K
$p = 200 \text{ bar} = 20,0 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 365,81^\circ\text{C}$ )				
Sat	0,00583	2293,0	2409,7	4,9269
400	0,00994	2619,3	2818,1	5,5540
440	0,01222	2774,9	3019,4	5,8450
480	0,01399	2891,2	3170,8	6,0518
520	0,01551	2992,0	3302,2	6,2218
560	0,01689	3085,2	3423,0	6,3705
600	0,01818	3174,0	3537,6	6,5048
640	0,01940	3260,2	3648,1	6,6286
700	0,02113	3386,4	3809,0	6,7993
740	0,02224	3469,3	3914,1	6,9052

$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ / kg	$h$ kJ / kg	$s$ kJ / kg K
$p = 240 \text{ bar} = 24,0 \text{ MPa}$			
0,00673	2477,8	2639,4	5,2393
0,00929	2700,6	2923,4	5,6506
0,01100	2838,3	3102,3	5,8950
0,01241	2950,5	3248,5	6,0842
0,01366	3051,1	3379,0	6,2448
0,01481	3145,2	3500,7	6,3875
0,01588	3235,5	3616,7	6,5174
0,01739	3366,4	3783,8	6,6947
0,01835	3451,7	3892,1	6,8038

$T$ °C	$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ / kg	$h$ kJ / kg	$s$ kJ / kg K
$p = 280 \text{ bar} = 28,0 \text{ MPa}$				
400	0,00383	2223,5	2330,7	4,7494
440	0,00712	2613,2	2812,6	5,4494
480	0,00885	2780,8	3028,5	5,7446
520	0,01020	2906,8	3192,3	5,9566
560	0,01136	3015,7	3333,7	6,1307
600	0,01241	3115,6	3463,0	6,2823
640	0,01338	3210,3	3584,8	6,4187
700	0,01473	3346,1	3758,4	6,6029
740	0,01558	3433,9	3870,0	6,7153
800	0,01680	3563,1	4033,4	6,8720
900	0,01873	3774,3	4298,8	7,1084

$v$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ / kg	$h$ kJ / kg	$s$ kJ / kg K
$p = 320 \text{ bar} = 32,0 \text{ MPa}$			
0,00236	1980,4	2055,9	4,3239
0,00544	2509,0	2683,0	5,2327
0,00722	2718,1	2949,2	5,5968
0,00853	2860,7	3133,7	5,8357
0,00963	2979,0	3287,2	6,0246
0,01061	3085,3	3424,6	6,1858
0,01150	3184,5	3552,5	6,3290
0,01273	3325,4	3732,8	6,5203
0,01350	3415,9	3847,8	6,6361
0,01460	3548,0	4015,1	6,7966
0,01633	3762,7	4285,1	7,0372

Fuente: KEENAN, Joseph; KEYES, Frederick. *Thermodynamic properties of steam.*

#### Anexo 4. Propiedades del agua

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

Fuente: KEENAN, Joseph; KEYES, Frederick. *Thermodynamic properties of steam*.