

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



**EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE UN CALDERO PARA INCREMENTAR
SU EFICIENCIA EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE VAPOR DE UNA
DESTILERÍA**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

AUTOR

IRVING ALEXIS MANAYAY CABRERA

ASESOR

JONY VILLALOBOS CABRERA

<https://orcid.org/0000-0003-3643-5498>

Chiclayo, 2022

**EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE UN CALDERO PARA
INCREMENTAR SU EFICIENCIA EN EL PROCESO DE
PRODUCCIÓN DE VAPOR DE UNA DESTILERÍA**

PRESENTADA POR:

IRVING ALEXIS MANAYAY CABRERA

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO

APROBADA POR:

Luis Alberto Gonzales Bazan

PRESIDENTE

Lucio Antonio Llontop Mendoza

SECRETARIO

Jony Villalobos Cabrera

VOCAL

Dedicatoria

Le dedico mi trabajo en primer lugar a Dios, que fue el creador de todas las cosas, el que me ha dado fortaleza para continuar con este trabajo. De igual forma a mis padres, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento, depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Los amo con mi vida.

Agradecimientos

Primero y antes que nada, dar gracias a Dios, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Agradecer hoy y siempre a mi familia por el esfuerzo realizado, para darme una buena educación, por ellos todo ha sido posible.

Un agradecimiento especial al Ing. Jony Villalobos Cabrera, por la colaboración, paciencia y apoyo que me brindó en la realización de esta investigación.

Índice

Resumen	10
Abstract	11
I. Introducción.....	12
II. Marco teórico.....	14
2.1 Antecedentes	14
2.2 Bases teóricas	16
2.2.1 Eficiencia Energética.....	16
2.2.2 Sistemas Térmicos.....	16
2.2.2.1 Calderas.....	16
2.2.2.1.1 Tipos de Calderas.....	17
2.2.2.1.2 Rendimiento de la caldera.....	18
2.2.2.1.2.1 Ecuaciones para hallar el Rendimiento de una caldera.....	22
2.2.2.2 Combustión.....	28
2.2.2.2.1 Triangulo de la combustión.....	29
2.2.2.2.2 Tipos de combustión.....	29
2.2.2.3 Combustible.....	30
2.2.2.3.1 Propiedades de los combustibles.....	31
2.2.3 Sistema de vapor.....	32
III. Metodología	39
3.1 Tipo y diseño de investigación.....	38
3.2 Población y Muestra.....	38
3.3 Formulación de Hipótesis.....	39
3.4 Variables - Operacionalización.....	39
3.5 Métodos y técnicas de investigación.....	40
3.6 Descripción de los instrumentos utilizados.....	40
3.7 Análisis estadístico e interpretación de datos.....	40

IV. Resultados	42
4.1 Recolección de datos de la caldera e identificación del proceso de producción de vapor de la destilería de alcohol.....	42
4.1.1 Datos generales de la empresa.....	42
4.1.2 Datos de la caldera y proceso de producción de vapor.....	43
4.1.2.1 Suministro.....	43
4.1.2.2 Conversión.....	45
4.1.2.3 Distribución.....	47
4.1.2.4 Utilización.....	47
4.1.2.5 Recuperación de calor.....	48
4.1.2.6 Eliminación.....	48
4.2 Evaluación energética de la caldera, cálculo de eficiencia.....	50
4.2.1 Composición de la pajilla de arroz.....	50
4.2.2 Cálculo del aire teóricamente necesario para la combustión.....	51
4.2.3 Cálculo de la cantidad de aire necesaria por libra de pajilla de arroz seco.....	52
4.2.4 Cálculo de la cantidad de productos secos de la combustión.....	52
4.2.5 Cálculo de la cantidad de productos húmedos de la combustión.....	52
4.2.6 Cálculo del porcentaje de volumen de CO₂ en gases secos.....	53
4.2.7 Cálculo de la eficiencia (método directo).....	54
4.2.8 Cálculo de la eficiencia (método indirecto).....	54
4.2.8.1 Pérdida debido a la humedad de la pajilla de arroz.....	54
4.2.8.2 Pérdida por hidrógeno del combustible.....	55
4.2.8.3 Pérdida por humedad en el aire.....	56
4.2.8.4 Pérdida por gases secos.....	57
4.2.8.5 Pérdida por combustión incompleta.....	59
4.2.8.6 Pérdida por purgas en la caldera.....	59
4.2.8.7 Pérdidas indeterminadas.....	59
4.2.8.8 Pérdidas por radiación.....	59
4.3 Planteamiento de estrategias de Mejora para incrementar la eficiencia.....	61
4.3.1 Medidas de ahorro de energía sin inversión.....	61
4.3.1.1 Control y riesgo del consumo específico de combustible y costo del vapor.....	61
4.3.1.2 Disminución de la temperatura de los gases de combustión.....	62
4.3.1.3 Prevenir el ensuciamiento de la superficie del quemador.....	63

4.3.1.4 Regulación del tamaño y forma de la llama.....	64
4.3.1.5 Reducción de la frecuencia de purgas.....	64
4.3.2 Medidas de ahorro de energía con inversión.....	66
4.3.2.1 Instalación de aislamiento térmico en tuberías.....	66
4.3.2.2 Reducir u optimizar el exceso de aire para la combustión.....	67
4.3.2.3 Reparación de fugas de vapor.....	70
4.3.2.4 Correcta operación y mantenimiento de las trampas para condensados.....	72
4.4 Evaluacion de la factibilidad Técnico-Económica del proyecto.....	75
V. Conclusiones	79
VI. Referencias.....	80
VII. Anexos	82

Lista de tablas

Tabla 1. Optimización del funcionamiento de la caldea.....	19
Tabla 2. Pérdidas de calor por cada 10m de tubería de vapor sin aislamiento.....	20
Tabla 3. Pérdidas de vapor (método del tamaño del orificio.....	21
Tabla 4. Constantes de Calores Específicos.....	26
Tabla 5. Guía de estándares mínimos de Eficiencia Energética.....	35
Tabla 6. Operacionalización de las variables.....	39
Tabla 7. Composición Química de la pajilla de arroz.....	49
Tabla 8. Análisis de la pajilla de arroz.....	50
Tabla 9. Análisis de la pajilla de arroz quemado.....	51
Tabla 10. Volumen de CO2.....	52
Tabla 11. Cálculo de Entalpías.....	53
Tabla 12. Recomendaciones para ajustar el exceso de aire.....	67
Tabla 13. Selección adecuada de la Trampa para condensados.....	70
Tabla 14. Relación de Producción de vapor y Consumo de combustible (inicial).....	72
Tabla 15. Relación de Producción de vapor y Consumo de combustible (final).....	72
Tabla 16. Inversión del Proyecto.....	73
Tabla 17. Flujo de caja en un periodo de 5 años.....	75
Tabla 18. Resultados del VAN y TIR.....	76

Lista de figuras

Figura 1. Funcionamiento de la caldera.....	17
Figura 2. Triángulo de la combustión.....	29
Figura 3. Esquematización de un sistema de vapor.....	32
Figura 4. Diseño de la investigación.....	38
Figura 5. Ubicación de la Destilería Naylamp EIRL.....	41
Figura 6. Estructura del sistema de producción de vapor de la Destilería Naylamp EIRL.....	42
Figura 7. Combustible: Pajilla de Arroz.....	43
Figura 8. Elevador del combustible.....	43
Figura 9. Estado de la tolva de almacenamiento de la pajilla de arroz.....	44
Figura 10. Motoreductor.....	44
Figura 11. Caldera Acuotubular.....	45
Figura 12. Ventilador de Tiro Forzado.....	45
Figura 13. Electrobomba desplazamiento vertical.....	46
Figura 14. Ventilador de Tiro Inducido.....	48
Figura 15. Multiciclón.....	48
Figura 16. Balance térmico de la caldera.....	58
Figura 17. Pérdidas gases de chimenea vs Exceso de aire.....	66

Resumen

Esta investigación se centra en una evaluación energética de una caldera para incrementar su eficiencia en el proceso de producción de vapor de una destilería de alcohol, debido a las diferentes pérdidas de energía que tiene la caldera, la empresa actualmente tiene un alto gasto de combustible (pajilla de arroz), por lo que nuestra investigación ha iniciado con la recopilación de datos de la caldera y del proceso de producción de vapor, en donde se ha identificado que la caldera es de tipo acuotubular, produce 4000 kg de vapor/hora y tiene un consumo anual de 3000 ton de pajilla de arroz. Posteriormente se realizó una evaluación energética y se obtuvo como resultado una eficiencia de la caldera de 60,17% (método indirecto) y 64,65% (método directo). Luego de haber identificado los sectores con mayores pérdidas de energía, se ha propuesto estrategias para incrementar la eficiencia, como la de instalar aislamiento en las tuberías de distribución, optimizar el exceso de aire, reparar fugas de vapor y darles mantenimiento a las trampas de condensados; con todas estas estrategias aplicadas se podría lograr incrementar la eficiencia de la caldera hasta un 85,3%. Finalmente, se ha propuesto una inversión de S/.10500, con un periodo de recuperación de 5 años, con un TIR de 13% y un VAN de S/. 785,20, por lo tanto, se puede concluir que nuestra investigación es viable económicamente y va a generar un ahorro importante de 1600 a 1200 kg/h de consumo de combustible en la destilería de alcohol.

Palabras clave: evaluación energética, caldera, eficiencia, vapor, destilería.

Abstract

This investigation focuses on an energy evaluation of a boiler to increase its efficiency in the steam production process of an alcohol distillery, due to the different energy losses that the boiler has, the company currently has a high fuel consumption (rice straw), so our research has started with the collection of data from the boiler and the steam production process, where it has been identified that the boiler is of the water-tube type, produces 4000 kg of steam / hour and has an annual consumption of 3000 tons of rice straw. Subsequently, an energy evaluation was carried out and the result was an efficiency of the boiler of 60.17% (indirect method) and 64.65% (direct method). After having identified the sectors with the highest energy losses, strategies have been proposed to increase efficiency, such as installing insulation in distribution pipes, optimizing excess air, repairing steam leaks and maintaining condensate traps; with all these strategies applied, it could be possible to increase the efficiency of the boiler up to 85.3%. Finally, an investment of S / .10500 has been proposed, with a recovery period of 5 years, with an IRR of 13% and a NPV of S /. 785,20, therefore, it can be concluded that our research is economically viable and will generate significant savings of 1600 to 1200 kg / h of fuel consumption in the alcohol distillery.

Keywords: evaluation energetic, boiler, efficiency, steam, distillery.

I. Introducción

La generación de vapor a escala industrial cuenta con más de 200 años de historia. El primer siglo se caracteriza exclusivamente por calderas comparables con las actuales calderas pirotubulares. En el año 1875, es decir, 106 años después de que James Watt inventase la caldera y la máquina de vapor, la empresa Steinmüller diseñó la primera caldera acuotubular, era una caldera con presión de 3 bar y una superficie de calefacción de 2,5 m². [1]

Desde entonces, el desarrollo de las calderas acuotubulares ha sufrido un espectacular cambio de rumbo en lo que se refiere a presión y capacidad. En 1927 entró en servicio la primera caldera Benson con una capacidad de 30 t/h a 180 bar y 450 °C. Ya en los años sesenta, se diseñaron calderas supercríticas, con una presión superior a 350 bar y temperaturas de más de 600°C. En 1970 se consiguió una producción máxima de 1000 t/h, solo 5 años más tarde fue posible fabricar calderas de tubos de agua con capacidades de vapor de más de 2000 t/h. [1]

En la presente investigación se evaluará energéticamente una caldera acuotubular, para poder llegar a proponer mejoras que ayuden a incrementar su eficiencia energética en el proceso de producción de vapor de la Destilería de Alcohol Naylamp E.I.R.L., ya que la necesidad que tienen las empresas es reducir sus costos para mantener un alto nivel de competitividad, frente a empresas nacionales y extranjeras, por eso los obliga a llevar a cabo un mejoramiento continuo de la eficiencia en sus procesos productivos.

Entre los costos más importantes de la mayoría de las empresas figura el consumo de combustible asociado a la generación de vapor en una caldera, por lo que debe existir una constante preocupación por mantener estos equipos operando en condiciones de máxima eficiencia. Esto no solo significa mantener los generadores de vapor en óptimas condiciones operativas, sino que debe existir una atención igualmente importante sobre los sistemas de distribución, consumo de vapor y retorno de condensado.

El mejoramiento de la eficiencia asociado a la generación y manejo del vapor en una empresa debe ser abordado en forma integral, para obtener los mejores resultados en lo que a reducción de los costos operacionales se refiere.

La mejor manera de identificar, cuantificar y definir las alternativas existentes para solucionar las deficiencias que pudieran existir en estos sistemas es la realización de una Evaluación Energética.

Es por eso que se realizará una investigación, en el desarrollo de una evaluación energética en toda el área de producción de vapor, de la Destilería de Alcohol NAYLAMP E.I.R.L, para realizar un análisis energético detallado, y así poder determinar los puntos ineficientes en el proceso de producción de vapor, y finalmente llegar a proponer mejoras que ayuden a incrementar la eficiencia energética de dicho proceso.

Así que en esta investigación se está tomando como objetivo general, realizar la evaluación energética de una caldera para incrementar su eficiencia en el proceso de producción de vapor de una destilería de alcohol. Y como objetivos específicos se están tomando los siguientes:

- Realizar una recopilación de datos de la caldera e identificar el proceso de producción de vapor de la Destilería de Alcohol.
- Desarrollar una evaluación energética sobre la caldera, para poder determinar los valores reales de las diferentes pérdidas de energía, y así poder obtener la eficiencia real de la caldera de manera directa e indirecta en el proceso de producción de vapor.
- Proponer y validar diversas estrategias de mejora que ayuden a incrementar la eficiencia energética de la caldera.
- Evaluar económicamente los ahorros energéticos obtenidos de las estrategias de mejora planteadas.

El motivo por el cual se realizará una evaluación energética de la caldera en el proceso de producción de vapor de la Destilería NAYLAMP E.I.R.L., es debido a que siempre se tiene diferentes problemas con la eficiencia, es por eso que se quiere realizar un diagnóstico energético para luego poder proponer estrategias de mejora que ayuden a incrementar la eficiencia de la caldera; ya que bien sabemos que cuando hablamos de ahorro de energía nos referimos a ahorro de dinero que en este caso se beneficiaría la Destilería de Alcohol NAYLAMP E.I.R.L.

Con la realización de esta investigación, se aportaría más conocimientos de los ya existentes a todos los estudiantes, ingenieros y/o personas interesadas en el tema de incrementar la eficiencia energética de la caldera en los procesos de producción de vapor en todas las destilerías de alcohol de características similares.

II. Marco teórico

2.1 Antecedentes

Internacional

Título: Pérdidas de presión en tuberías de vapor. [2]

Autor (es): Luis Enrique Vega Peña, Luis Enrique Rodríguez González.

Editorial: Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba – Cuba.

Año: 2007

Su objetivo, es el de realizar una metodología de cálculo para la evaluación del comportamiento de las pérdidas de presión por fricción, caídas de presión en tuberías que transportan vapor como medio de calentamiento o generación de energía eléctrica. El método de cálculo descrito es el resultado de un cuidadoso estudio bibliográfico realizado a literaturas técnicas especializadas en el tema de transporte y utilización del vapor; logrando con esto una herramienta de cálculo ingenieril para especialistas en proyectos, proyectistas e ingenieros interesados en el tema.

Título: Evaluación Energética de los Generadores de Vapor F1-2 y BH-109 de una refinería cubana de petróleo. [3]

Autor (es): Anliet Valles Cruz, Lidarsi Acosta Cordero, Alain Pérez González.

Editorial: Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría - Cujae LaHabana, Cuba

Año: 2014

Su objetivo, es realizar la evaluación energética de F1-2 y BH-109 de calderas que utilizan los balances de energía y de masas convencionales. Se obtuvo una eficiencia energética de 61,89% y 77,31% para F1-2 y BH-109 respectivamente. Las principales pérdidas se debieron al calor sensible de los gases de combustión y a la combustión no química. Para reducir éstas pérdidas, mejorar el rendimiento de la caldera y disminuir la temperatura de los gases de salida, se recomienda montar el sistema de control de exceso de aire y volver examinar o cambiar el sistema inyección de aire.

Nacional

Título: Optimización Energética del Generador de Vapor (Caldera) del comedor universitario de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno con capacidad de 150 Kg Vapor/Hora. [4]

Autor (es): Carlos Miguel Mamani Montesinos, Frey Wilson Ramos Velez.

Editorial: Universidad Nacional del Altiplano – Puno, Perú.

Año: 2018

Su objetivo, es realizar un balance térmico de la caldera pirotubular marca “INTESA” de 250 HP del comedor universitario, en donde se midieron parámetros de funcionamiento de la caldera en condiciones de estado estable en base a las cuales se realizaron los cálculos necesarios para cuantificar la distribución de la energía del combustible que se libera por la combustión y establecer si la energía útil o aprovechada y las pérdidas están entre los rangos técnicos prefijados para su funcionamiento eficiente y de no ser así, analizar a que se deben las discrepancias, ver su incidencia en el performance y diagnosticar las fallas de la caldera. Se calculó una eficiencia de la caldera de 66,99%, concluyéndose que es aceptable considerando que la caldera no opera a plena carga.

Local

Título: Análisis comparativo de la eficiencia térmica en la caldera bagacera N° 4 en funcionamiento convencional y con inyector secundario de aire caliente en la empresa Agroindustrial Pomalca S.A.A. [5]

Autor (es): Rodas Flores Edinson Alexander, Vargas Machuca Palacios César Andrés.

Editorial: Universidad Señor de Sipán – Lambayeque, Perú.

Año: 2016

Su objetivo, es demostrar que con la instalación del sistema de inyección secundario de aire caliente se aumenta la eficiencia térmica de la caldera, y se quiere conocer cuáles son los motivos que no permiten que la caldera funcione de manera óptima; es por ello que a través de la investigación se logró una base de datos confiable, y consecuentemente la empresa logre obtener su producción esperada. Se concluyó que el aumento de eficiencia térmica es de 9,5%, además de conocer los parámetros de funcionamiento que limitan a la caldera a trabajar de forma óptima.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Eficiencia Energética

La eficiencia energética es una herramienta que ayuda a reducir el consumo energético de los sistemas eléctricos y térmicos, y a su vez busca optimizar el desempeño de los mismos, evaluando sus parámetros de funcionamiento, sus consumos energéticos, la variación de la carga durante el periodo de trabajo, sus rendimientos, entre otros parámetros específicos de cada equipo. [6]

2.2.2 Sistemas Térmicos

Los sistemas térmicos son equipos cuya función es la generación de calor a través de la combustión de un combustible con el oxígeno del aire. Se utilizan para cubrir necesidades térmicas de calefacción y agua caliente y de procesos productivos tales como el tratamiento térmico de metales, el calentamiento y secado de sustancias en diferentes sectores industriales como el químico, textil, agroindustrial, construcción, metal-mecánica, etc. Los equipos térmicos más representativos son calderas, hornos y secadores.

El equipo térmico más empleado es la caldera. Estos sistemas utilizan el calor producido durante la combustión de un combustible, para calentar un fluido que posteriormente será utilizado donde existan necesidades térmicas.

En las industrias antes mencionadas, estos sistemas térmicos son generalmente los equipos más importantes en los que se basa el proceso de producción y por lo general son los mayores consumidores de energía en la planta, llegando a alcanzar costos superiores al 50% de la demanda energética total. [6]

2.2.2.1 Calderas

El principio de funcionamiento de las calderas es combustible y comburente (aire) se inyectan en el interior de la caldera a través del quemador y se inflaman con ayuda de la llama que alimentan.

La reacción que tiene lugar entre el combustible y el oxígeno del aire es altamente exotérmica, y genera como productos, residuos sólidos (como cenizas y escorias) y humos o gases a elevadas temperaturas (de 200 a 1000°C). El contenido energético de estos gases se aprovecha en calderas para calentar un fluido (aire, agua o aceite) mediante una superficie de intercambio. El fluido que ha aumentado su temperatura servirá posteriormente para calentar un área, mover una turbina, etc. Finalmente los gases de combustión que han cedido gran parte de su temperatura, son evacuados por una chimenea. [6]



Figura 1 Funcionamiento de la caldera

Fuente: Adaptado de Manual de eficiencia energética para Mypes, J. Fernández, 2012

2.2.2.1.1 Tipos de Calderas

Las calderas se pueden clasificar en función de múltiples criterios. Según el tipo de combustión, las calderas pueden ser de cámara de combustión abierta (atmosférica o tiro natural) o cerrada (presurizada o tiro forzado). Estas últimas presentan multitud de ventajas sobre las atmosféricas como el mejor rendimiento, la estabilidad de la combustión o el mínimo exceso de aire necesario. [6]

De acuerdo con la forma de intercambio de calor, se encuentran calderas Acuotubulares o Piro-tubulares.

- En las **Acuotubulares**, hay una serie de tubos por los que circula el fluido a calentar, y por su exterior circulan los gases que ceden parte de su energía a través de las paredes de los tubos.
- En las **Piro-tubulares**, son los humos calientes los que pasan por los tubos, los cuales están rodeados por el fluido a calentar.

Según el rendimiento pueden ser estándar, de baja temperatura y de condensación.

- La **caldera estándar** es una caldera para la producción de agua caliente, con tubos de pared simple, que trabaja a una temperatura constante del agua a la salida entre 70 y 90°C, el diseño de este tipo de caldera no permite que el vapor de agua contenido en los gases de salida condense en su interior, limitando la temperatura de retorno del agua a la caldera a los 70°C aproximadamente.
- Una **caldera de baja temperatura** permite aprovechar el calor sensible de los humos a través de un recuperador de calor especial, mientras que una caldera de condensación está diseñada para permitir que el vapor de agua de los gases de combustión condense sobre la superficie de los tubos de humos, consiguiendo recuperar el calor latente de los gases de combustión. Las calderas de alta eficiencia (baja temperatura o condensación) pueden suponer un ahorro del 10 al 20% del combustible utilizado especialmente si se trabaja a bajas cargas. [6]

2.2.2.1.2 Rendimiento de la Caldera

Uno de los parámetros más importantes para evaluar el funcionamiento de una caldera es su rendimiento, que se define como la relación entre el calor útil producido (considerando las diversas pérdidas a través de los gases de combustión, las paredes de la caldera y los caudales de purga) y la energía proporcionada por el combustible. [6]

Para evaluar el rendimiento es necesario disponer de un analizador de gases de combustión que proporcione la concentración de gases de O₂, CO₂, CO y la temperatura de los gases, así como un termómetro de superficie para medir la temperatura de las paredes de la caldera.

Los valores adecuados de O₂, CO y temperatura de gases dependen del tipo de combustible, quemador utilizado y del tamaño de la caldera. [6]

Valores de O₂ bajo y CO alto indican que la cantidad de aire de combustión es insuficiente. Esto suele verse reflejado en el color negruzco de los humos que salen por la chimenea. Para nivelar estos valores no hay más que aumentar la compuerta de paso de aire del quemador.

Aunque humos claros y una concentración de O₂ elevada no aseguran de por sí un buen funcionamiento. Podría ser que estuviera utilizando una cantidad excesiva de aire, lo cual implica un gasto energético innecesario, pues el aire “arrastraría” mucho calor por la chimenea impidiendo su aprovechamiento para la calefacción. En este caso debería disminuirse la compuerta de paso del aire hacia el quemador. [6]

El color oscuro de los humos puede implicar también un desajuste en la mezcla aire-combustible debido a una pulverización insuficiente del combustible. [6]

El ahorro de combustible obtenido con una buena regulación de la combustión puede llegar a suponer entre el 5 y 7% del consumo total del equipo. [6]

Las pérdidas de calor a través de las paredes pueden reducirse hasta un 70 u 80%, lo que puede suponer un ahorro del 1 al 2% del combustible. [6]

Si la temperatura de los gases de chimenea supera los 230°C, puede ser debido a un mal intercambio de calor en el interior de la caldera. Para solucionarlo, habría que proceder a una limpieza. Una limpieza periódica de la caldera mejora la transferencia térmica en el interior de la misma, aumentando el calor útil obtenido y disminuyendo la temperatura de los gases de salida. Por cada 20°C que se consiga disminuir la temperatura de los gases, se reduce el consumo de combustible en un 1% aproximadamente. [6]

A continuación, se presentan las pautas a seguir para mejorar la eficiencia en una caldera:

Tabla 1
Optimización del funcionamiento de la caldera

Valores del análisis	Causa	Solución
CO alto y O ₂ bajo	Cantidad de aire introducido en caldera insuficiente	Aumentar la temperatura de la compuerta de paso de aire del quemador
CO ₂ bajo y/o O ₂ alto	Exceso de aire	Disminuir la apertura de la compuerta de paso de aire del quemador Desmontar el inyector, llevar a cabo una limpieza o sustituirlo si fuera necesario y efectuar de nuevo el análisis
CO alto y O ₂ alto	Mezcla aire combustible inadecuada	
Temperatura de paredes > Temperatura ambiente sala	Calderas antiguas o con desperfectos en su aislamiento	Sustitución del aislamiento
Temperatura de gases > 230° C	Intercambio de calor inadecuado	Limpieza del interior de la caldera o instalación de un economizador de calor

Fuente: Adaptado de Manual de eficiencia energética para Mypes, J. Fernández, 2012, p. 4

<https://bit.ly/3lBFhU0>. De dominio público.

Medidas de ahorro generales

A continuación, se describen una serie de medidas adicionales que puedan ayudar a incrementar el rendimiento de la caldera [6]:

- a) Purgar los circuitos para eliminar el aire que pueda haber quedado atrapado en el interior, ya que disminuye la transferencia de calor.
- b) Revisar el estado de los componentes del sistema como bombas, ventiladores, etc. Y proceder a su mantenimiento de ser necesario.
- c) Las pérdidas en las purgas se pueden disminuir racionalizando la cantidad de las mismas y mejorando la calidad del agua de alimentación.

El rendimiento de las calderas a baja carga es menor que a plena carga. Es por esto que en muchos casos resulta más conveniente instalar varias calderas más pequeñas que puedan

entrar en servicio o parar en función de la demanda de calor, trabajando así todas ellas en su punto de máximo rendimiento. [6]

Distribución y Utilización de Vapor

a) Contar con buenos procedimientos de operación

- Reparar cualquier fuga que se presente
- Revisar periódicamente los sistemas de vapor para detectar líneas de vapor usadas con muy poca frecuencia y que pueden ser eliminadas o puestas fuera de servicio. [6]

b) Operar adecuadamente las trampas de vapor

La función de las trampas de vapor es la de permitir el drenado de condensado que se forma en el sistema, sin dejar escapar el vapor, además de permitir la eliminación de aire y gases incondensables. [6]

- Elaborar para cada área operativa, un programa de revisión rutinaria de las trampas de vapor para verificar su operación adecuada. (La frecuencia de la revisión dependerá de la condición de cada área, sin embargo como mínimo deberá realizarse mensualmente). [6]
- Mantener un censo actualizado de las trampas de vapor. (Numerar todas las trampas de vapor y registrar su localización en un croquis para facilitar su revisión y registro).
- Asignar máxima prioridad a la reparación y mantenimiento de trampas. (El aplicar un procedimiento de mantenimiento periódico puede reducir las fallas en trampas hasta un 3% o 5%. Una trampa que no cierra puede presentar pérdidas de vapor entre 22 y 45 Kg de vapor/h.). [6]

c) Mantener aisladas las tuberías, equipos y dispositivos

El aislamiento en tuberías, equipos y accesorios del sistema de distribución de vapor y retorno de condensado, evitará pérdidas de calor hacia el ambiente. Es muy importante instalar, en cada tramo de tubería, el espesor óptimo de aislamiento.

- Inspeccionar periódicamente el aislamiento para reemplazar o reparar los tramos dañados o deteriorados. (Al menos 1 vez por año debe realizarse esta inspección de las líneas de vapor, en donde debe identificarse el daño físico, grietas, bandas y cintas rotas, juntas rotas o dañadas y/o cubiertas dañadas).

A continuación, se presenta una tabla donde se indica el efecto que produce un inadecuado aislamiento. [6]

Tabla 2
Pérdida de calor por cada 10m de tubería de vapor sin aislamiento

Diámetro Nominal	Pérdidas de calor en M BTU/año			
	Presión de vapor (Kg/cm ²)			
	1,05	10,56	12,12	42,25
25,4	45,93	93,50	123,03	162,40
50,8	77,09	157,48	206,69	275,59
101,6	136,15	278,87	367,45	492,12
203,2	232,78	505,25	666,01	894,02
304,8	346,13	721,78	954,72	1286,08

Fuente: Adaptado de Manual de eficiencia energética para Mypes, J. Fernández, 2012, p. 10

<https://bit.ly/3lBFhU0>. De dominio público.

- Un instrumento muy útil para verificar el estado del aislamiento es la revisión termográfica del mismo, mediante un dispositivo capaz de identificar temperaturas y las variaciones de ésta. [6]
- Revisar el aislamiento después de cualquier mantenimiento. (Las áreas donde se han efectuado otros trabajos de mantenimiento, tienen que revisarse para identificar dónde debe repararse el aislamiento). [6]
- Bloquear las líneas de vapor que no estén en operación. [6]

d) Evitar las fugas de vapor

Las fugas de vapor son una forma visible de desprecio de energía y, por lo mismo, también indican una indiferencia por la operación eficiente del sistema. Existen dos (02) métodos para estimar las pérdidas de vapor por fugas: en función del tamaño del orificio y en función de la presión de operación vs altura de pluma. [6]

Tabla 3
Pérdidas de vapor (método del tamaño del orificio)

Presión de vapor		Tamaño del orificio		Pérdida de vapor	
Kg/cm ²	psi	mm	plg	Kg/hr	lb/hr
8,1	115	1,58	1/16	6,82	15
8,1	115	3,17	1/8	27,3	60
8,1	115	6,35	1/4	109,1	240
8,1	115	12,7	1/2	459,1	1010
8,1	115	25,4	1	1772,7	3900
29,2	415	1,58	1/16	659,1	1450
29,2	415	3,17	1/8	2636,4	5800
29,2	415	6,35	1/4	10545,4	23200
29,2	415	12,7	1/2	42181,8	92800
29,2	415	25,4	1	169090	372000

Fuente: Adaptado de Manual de eficiencia energética para Mypes, J. Fernández, 2012, p. 11

<https://bit.ly/3lBFhU0>). De dominio público.

Para evitar pérdidas de energía por fugas de vapor, se recomienda:

- Todas las fugas de vapor deben repararse tan pronto como sea posible. [6]
- En los procedimientos de mantenimiento, especifique las juntas y empaques para las bridas de las válvulas. [6]
- En el diseño del sistema de vapor, se debe evitar el uso de conexiones roscadas. [6]

e) Mantener una presión de vapor adecuada

- Aprovechar el vapor a todos los niveles de presión posible. (En el vapor de alta presión no deben utilizarse válvulas reductoras de presión, y el vapor de baja presión no es conveniente que sea venteadado a la atmósfera.
- Existen grandes ahorros cuando se eliminan los venteos (descargas de vapor) y reducciones de presión. La instrumentación tendrá que considerar, desde su diseño, el monitoreo constante de la presión y los venteos de vapor. [6]

2.2.2.1.2.1 Ecuaciones para hallar el Rendimiento de una Caldera

a) Método Directo

$$\eta = \frac{\text{Calor absorbido}}{\text{Calor suministrado}}$$

$$n = \frac{W(h_i - h_f)}{W_c \times PC}$$

Donde:

h_i : entalpía del vapor a la salida del caldero (KJ/kg)

h_f : entalpía del agua al ingreso del caldero (KJ/kg)

PC: poder calorífico del combustible (Kcal/Kg)

W: caudal de vapor (kg/h)

W_c : caudal de combustible (kg/h)

W/ W_c : Kg de vapor/Kg de combustible

b) Método Indirecto

$$\eta = 100\% - P_{HC} - P_{HIC} - P_{HA} - P_{GS} - P_{PC} - P_I - P_R$$

Donde:

P_{HC} : Pérdida por humedad del combustible

P_{HIC} : Pérdida por hidrógeno del combustible

P_{HA} : Pérdida por humedad del aire

P_{GS} : Pérdida por gases secos

P_{PC} : Pérdida por purgas de la caldera

P_I : Pérdidas indeterminadas

P_R : Pérdidas por radiación

b.1) Pérdidas de calor en una caldera

Se puede considerar que las pérdidas de calor en una caldera Acuotubular utilizando pajilla de arroz son las siguientes:

b.1.1) Pérdida debido a la humedad de la pajilla de arroz

Esta pérdida es de gran importancia y depende esencialmente del contenido de humedad de la pajilla de arroz y de la temperatura de salida de los gases de la chimenea.

Para el cálculo de éstas pérdidas se puede tener en consideración que el agua de la pajilla de arroz se calienta hasta 100°C (212°F), se evapora y posteriormente se calienta hasta la temperatura de salida de los gases de la chimenea. Y como ya lo hemos calculado anteriormente se sabe que por cada libra de pajilla de arroz seco quemado, se tendrá una libra de agua como humedad. [7]

El agua de la pajilla de arroz tiene una temperatura de 30°C (85°F), la pérdida se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$Q = W (212-85) + 970,3*W + WC_P (T_2 - 212)$$

Donde:

W: Peso del agua en libras, en este caso $W = 1$

T_2 : Temperatura de salida de los gases de chimenea

C_P : Calor específico medio del vapor de agua entre 212°F y T_2

El calor específico instantáneo de los gases está dado por las siguientes ecuaciones empíricas:

$$C_P = a + bT + cT^2$$

En consecuencia para obtener los calores específicos medios, que son los que deben emplearse, hacemos la siguiente integración:

$$C_P = \int_{T_1}^{T_2} C_P dT | T_2 - T_1$$

$$C_P = \int_{T_1}^{T_2} (a + bT + cT^2) dT | (T_2 - T_1)$$

$$C_P = a + \frac{b}{2}(T_2 - T_1) + \frac{c}{3}(T_2^2 + T_2T_1 + T_1^2)$$

Donde:

T_2 : temperatura final en K

T_1 : temperatura inicial en K

a,b,c: constantes peculiares de cada gas

Para el vapor de agua los valores de las constantes son:

$$a = 6,89$$

$$b \times 10^3 = 3,283$$

$$c \times 10^3 = 0,343$$

Sustituyendo valores en la forma integrada del calor específico medio obtenemos:

$$C_P = 6,89 + (3,282 \times 10^{-3}/2)(T_2 + 373) - (0,343 \times 10^{-6}/3)(T_2^2 + 373T_2 + 139,129)$$

Ésta ecuación nos da los calores específicos medios molares, así que dividiendo entre 18 (peso molecular del agua), encontraremos los calores específicos medios por libra de vapor de agua. [7]

b.1.2) Pérdida por hidrógeno de combustible

Esta pérdida depende del contenido del hidrógeno de la pajilla de arroz de la temperatura de salida de los gases de la chimenea. El cálculo es análogo al de la pérdida por humedad de la pajilla de arroz. Se puede considerar que el agua producida en la combustión de la pajilla de arroz se forma a 77°F (25°C), se calienta hasta 212 °F (115°C), se evapora y finalmente sube de temperatura hasta alcanzar la de los gases de chimenea. Ésta consideración es lo suficientemente exacta para propósitos prácticos.

Para ello necesitamos calcular el valor W (peso del agua formada por la combustión del hidrógeno en libras). [7]

b.1.3) Pérdida por humedad en el aire

Esta pérdida es proporcional al contenido de humedad y a la cantidad de aire que se emplea. Depende además de la temperatura de salida de gases de la chimenea. Para una determinada cantidad de aire, se llega a un máximo cuando el aire está saturado de humedad.

En las gráficas de humedad de aire encontramos que a 77°F (25°C) y 100% de saturación, el contenido de agua es: [7]

$$H = 0,026 \text{ libras de agua/libra de aire seco}$$

El agua que lleva el aire entra como vapor, en consecuencia, la pérdida puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$Q = WC_P(T_2 - T_1)$$

Donde:

Q: pérdida de calor por humedad en el aire

W: 0,165 lb de agua

T₂: temperatura de salida de gases de chimenea

T₁: temperatura de entrada del aire

Necesitamos obtener calores específicos medios:

$$C_p = a + \frac{b}{2}(T_2 + T_1) + \frac{c}{3}(T_2^2 + T_2T_1 + T_1^2)$$

Donde:

$$T_1: 85^\circ\text{F} = 30^\circ\text{C} = 303 \text{ K}$$

Constantes para el vapor de agua:

$$a = 6,89$$

$$b \cdot 10^3 = 3,283$$

$$c \cdot 10^6 = 0,343$$

$$C_p = 6,89 + \frac{3,282 * 10^{-3}}{2} (T_2 + T_1) + \frac{0,343 * 10^{-6}}{3} (T_2^2 + T_2 T_1 + T_1^2)$$

b.1.4) Pérdida por gases secos

Constituye una de las pérdidas de mayor consideración.

Esta pérdida depende de la composición de la pajilla de arroz, del exceso de aire empleado, de las condiciones de combustión que influye sobre la composición de los gases y de la temperatura de salida de éstos.

La pérdida de calor para %CO₂ puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$Q = nC_p (T_2 - 85)$$

Donde:

Q: calor perdido en el gas, en BTU por libra de pajilla de arroz seco quemado

n: número de moléculas libras gas

T₂: temperatura de salida de los gases de chimenea

Por cada temperatura de salida de los gases de la chimenea y cada %CO₂ es necesario aplicar la ecuación anterior, para cada gas de los que intervienen en la composición de los gases secos. En consecuencia necesitamos saber los calores específicos medios. Las constantes se muestran en la siguiente tabla 4:

Tabla 4
Constantes de Calores Específicos

	a	b	c
CO₂	6,85	8,533	-2,475
N₂	6,3	1,819	-0,345
O₂	6,13	2,99	-0,806

Fuente: Adaptado de Eficiencia energética en la generación y distribución de vapor, E. Rico, 2018, p. 22

(<https://bit.ly/3DspigP>). De dominio público.

Temperatura base: 77°F = 25°C = 298K

Esto da tres fórmulas para el calor específico medio (C_p) de CO_2 , N_2 y O_2 respectivamente, parecidas a aquellas obtenidas para el vapor de agua.

b.1.5) Pérdida por combustión incompleta de la pajilla de arroz

Estas son difíciles de calcular, conociendo la porción de pajilla de arroz que no se quema. Sin embargo, esto es sumamente difícil por los demás, bajo condiciones razonablemente buenas de operaciones, esta pérdida es casi insignificante y puede despreciarse. [7]

b.1.6) Pérdida por purgas en la caldera

Esta pérdida no debe ser de gran consideración. Depende de las características del agua de alimentación, del tipo de tratamiento de éstas y de la presión de operación de la caldera. Con buenas condiciones de agua de alimentación y un control estricto del tratamiento, esta pérdida no debe pasar de 1% o 2% del poder calorífico de la pajilla de arroz seco. A continuación, se expresará la ecuación para su respectivo cálculo: [7]

Cantidad de agua purgada = agua de alimentación – vapor generado

$$Q = P(T_2 - T_a)$$

Donde:

P: cantidad de agua en libras

T_2 : temperatura de ebullición

T_a : temperatura del agua de alimentación

b.1.7) Pérdidas indeterminadas

Obviamente no son calculables en forma directa, solo se pueden determinar por diferencia entre el calor suministrado y por la pajilla de arroz y las pérdidas que ya se ha mencionado anteriormente, más la correspondiente a la radiación. No obstante, se puede desestimar. Los fabricantes de las calderas dan como dato práctico un calor perdido por este concepto que representa el 1,5% del poder calorífico del combustible. [7]

b.1.8) Pérdidas por radiación

Estas pérdidas son de complicación relativa en virtud de las características de las calderas como equipos de transmisión de calor.

Además, la obtención de datos para su cálculo es bastante imprecisa por los medios de que normalmente se dispone. Bajo las condiciones usuales de operación no pasan de 4% sobre el poder calorífico del combustible y siendo normalmente de 2%.

Utilizando la humedad residual de la pajilla de arroz como sale del molino, y midiendo la temperatura y el CO₂ de los gases de salida a la chimenea de cada caldera, se puede obtener las pérdidas de calor.

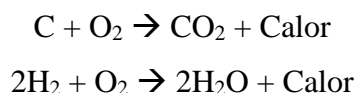
La eficiencia de la caldera es la diferencia entre 100 y la suma de las pérdidas. Conviene utilizar para la composición de pajilla de arroz quemado un análisis promedio obtenido por diversas determinaciones, mientras más representativo sea el análisis, más exacta será la determinación de las pérdidas de calor.

Es evidente que el momento más crítico en la eficiencia de una caldera es el porcentaje de humedad residual de la pajilla de arroz, a mayor humedad requiere mayor exceso de aire y una reducción en %CO₂ con aumento de volumen en los gases. [7]

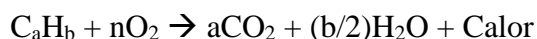
2.2.2.2 Combustión

La combustión es el conjunto de procesos físicos-químicos en los que un elemento combustible se combina con otro elemento comburente (generalmente oxígeno en forma de O₂ gaseoso), desprendiendo luz, calor y productos químicos resultantes de la reacción (oxidación). Como consecuencia de la reacción de combustión se tiene la formación de una llama, dicha llama es una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor.

Las reacciones básicas de combustión corresponden a las reacciones de oxidación del carbono (C) y del hidrógeno (H) mediante oxígeno que puede aportarse de forma pura o mediante el aporte de aire que lo contiene en una proporción media del 21%. Estas reacciones son: [8]



Los combustibles tienen una composición general que se puede expresar como C_aH_b y cuya reacción de combustión es:



2.2.2.2.1 Triángulo de la Combustión

Para que se produzca la combustión, deben encontrarse en el espacio y en el tiempo tres elementos: combustible, comburente y fuente de ignición.

El combustible y el comburente se deben encontrar en unas proporciones adecuadas, no produciéndose la combustión fuera de esas condiciones. Adicionalmente, es precisa una fuente de energía que produzca el inicio de la combustión, lo que se denomina fuente de ignición y que después mantenga esta combustión. [8]



Figura 2 Triángulo de la Combustión

Fuente: Adaptado de Principios Básicos de la combustión, C. Barrera, 2018

2.2.2.2.2 Tipos de Combustión

De acuerdo con el nivel de combustión alcanzada y la cantidad de comburente aportado a la combustión, se pueden dar los siguientes tipos de combustión: [8]

- **Combustión completa:** es aquella reacción en la que el combustible se quema hasta el máximo grado posible de oxidación. En consecuencia, no habrá sustancias combustibles en los humos. En los productos de la combustión se puede encontrar N_2 , CO_2 , H_2O y SO_2 .
- **Combustión incompleta:** es aquella reacción en la que el combustible no se oxida completamente. Se forma sustancias denominados inquemados, que todavía pueden seguir oxidándose, por ejemplo CO . Otros inquemados pueden ser H_2 , C_nH_m , H_2S y C . estas sustancias son los contaminantes más comunes que escapan a la atmósfera en los gases de combustión.
- **Combustión teórica o estequiométrica:** es la combustión realizada con la cantidad teórica de oxígeno estrictamente necesaria para producir la oxidación total del combustible sin que se produzcan inquemados. En consecuencia, no se encuentra O_2 en los humos, ya que el O_2 aportado a la combustión se consume completamente en la misma.

- **Combustión con exceso de aire:** es la combustión que se lleva a cabo con una cantidad de aire superior a la estequiométrica. Esta combustión tiende a no producir inquemados y es típica la presencia de O_2 en los humos. Si bien la incorporación de aire permite evitar la combustión incompleta y la formación de inquemados, trae aparejada la pérdida de calor en los productos de combustión, reduciendo la temperatura de combustión, eficiencia y la longitud de llama.
- **Combustión con defecto de aire:** en esta combustión, el aire disponible es menor que el necesario para que se produzca la oxidación total del combustible. Por lo tanto se producen inquemados.

2.2.2.3 Combustible

Combustible es cualquier material capaz de liberar energía en forma de calor cuando reacciona con el oxígeno, habitualmente el contenido en el aire, transformando su estructura química. Supone la liberación de una energía de su forma potencial a una forma utilizable (por ser una reacción química, se conoce como energía química). De acuerdo con su estado de agregación, los combustibles se clasifican en: [8]

- **Combustibles sólidos:** son aquellas sustancias en las que sus moléculas presentan una gran cohesión entre sí, ya que las fuerzas de atracción son superiores a las que originan los movimientos moleculares. Su característica fundamental es que mantienen una forma y volumen definidos.
- **Combustibles líquidos:** son aquellas sustancias en las que las fuerzas resultantes de los movimientos moleculares son lo suficientemente elevados frente a las fuerzas de atracción para permitir el movimiento de las moléculas entre sí, permitiéndole fluir y adaptarse a la forma del recipiente que las contiene. Su característica fundamental es que no poseen una forma definida, aunque mantienen un volumen determinado.
- **Combustibles gaseosos:** son aquellas sustancias en las que las fuerzas resultantes de los movimientos moleculares son muy superiores a las fuerzas de atracción entre moléculas. Por ello, las moléculas de los gases se distancian ocupando todo el espacio disponible. Su característica fundamental es que tiene forma y volumen variables y ejercen presión sobre las paredes del recipiente que las contiene. Son compresibles.

2.2.2.3.1 Propiedades de los combustibles

a) Poder Calorífico: es la cantidad de energía (calor) desprendida por una unidad de combustible en su combustión completa para unas condiciones determinadas de presión y temperatura de los productos que reaccionan y de los productos resultantes. [8]

Existen dos tipos de poder calorífico según la temperatura final de los gases quemados:

- Poder calorífico superior (Hs): es la cantidad de energía desprendida por una unidad de combustible enfriando los gases quemados hasta 0°C a presión atmosférica. En estas condiciones, el vapor de agua ha condensado, cediendo su calor latente de vaporización (en este caso de condensación).
- Poder calorífico inferior (Hi): es la cantidad de energía desprendida por una unidad de combustible enfriando los gases quemados hasta 0°C a presión atmosférica, pero sin considerar el calor latente de condensación del vapor de agua producido

b) Composición de los combustibles

La composición de un combustible es fundamental para poder determinar los parámetros característicos de su combustión y prever la posible emisión de productos nocivos o contaminantes. De modo genérico, tienen en su composición una serie de elementos químicos que determinan su comportamiento en el proceso de combustión. Estos son los siguientes: [8]

- De modo mayoritario, contienen carbono (C) e hidrógeno (H), sea en forma libre o combinada en forma de hidrocarburos. Son los componentes principales para la obtención de energía térmica.
- Azufre (S), bien en forma libre o combinada. Debido a que en su combustión se producen compuestos de efecto perjudicial para el medio ambiente, se exige cada vez más la reducción de su presencia, aunque en ciertos combustibles esto presenta una gran dificultad.
- Oxígeno (O), bien combinado con el carbono y el hidrógeno o bien presente en estado libre en el combustible (caso de las mezclas aire-propano).
- Inertes son la humedad, las cenizas, el CO₂ y el nitrógeno.

De acuerdo con la composición química del combustible se puede determinar el poder calorífico del mismo, de acuerdo con los calores de formación de sus componentes y las reacciones de combustión que tienen lugar,

2.2.3 Sistema de vapor

El vapor de agua tiene como propiedad el acumular una gran cantidad de energía, lo que lo hace ser un excelente fluido trasmisor de calor, además de contener energía cinética (de movimiento), por lo que otra ventaja de producir vapor es que no requiere de bombeo, sino que fluye por sí mismo al punto de utilización. [9]

Por esto, es necesario contar desde la generación con un sistema de transporte (líneas de vapor) que lo lleven hasta los equipos donde va a ser utilizado y, posteriormente, si el vapor no es mezclado con algún producto (o sea, que no esté contaminado), se retornará su condensado para alimentar de nuevo al generador de vapor, claro, siempre reponiendo la cantidad de agua que se llegue a perder en el ciclo. [9].

Un sistema de vapor se compone de:

- Generador de vapor; se compone de la caldera y sus equipos auxiliares.
- Distribución de vapor; está integrado por las tuberías que transportan al vapor desde la generación hasta el usuario, se incluye los cabezales de distribución de vapor, así como otros elementos de control.
- Usos del vapor; son aquellos equipos y operaciones que utilizan el vapor.
- Retorno de condensados; este sistema colecta el condensado del vapor tanto de las líneas de vapor como de los equipos que utilizan el vapor.

En la figura 3 nos muestra de forma más ilustrativa un sistema de vapor.

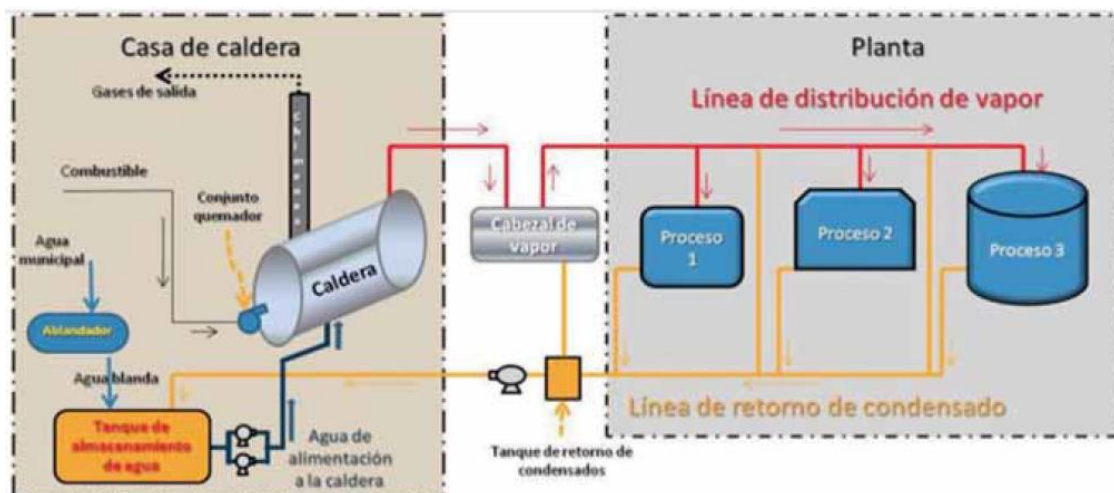


Figura 3 Esquemización de un sistema de vapor

Fuente: Adaptado de Guía de buenas prácticas en eficiencia energética para sistemas de vapor, S. Vega, C. Arze, 2011

a) Generación de Vapor

En términos generales, el sistema de generación de vapor se compone de los siguientes elementos: [9]:

- Caldera; es un equipo donde se transmite el calor de los gases de combustión hacia el agua que contiene en su interior, para producir vapor. Existen diversas clasificaciones de generadores de vapor de acuerdo a sus diferentes características.

La más común, que es la que se utiliza en la presente guía, los clasifica de acuerdo a la forma en que circulan los gases y el agua en sus tuberías. Como se describe a continuación:

- ✓ **Calderas Pirotubulares** Son aquellas en las que los gases de combustión circulan al interior de los tubos, los cuales se encuentran sumergidos en el agua, la que a su vez se encuentra en un gran recipiente, lo que limita la presión de generación, ya que a mayor presión de la caldera, más gruesas deberían ser las paredes del recipiente y, por lo tanto, más costosas, lo que las haría inviables económicamente. Este tipo de calderas es el llamado tipo paquete. Existen de dos, tres y cuatro pasos. Por lo general son de capacidades bajas y medianas, van desde 20 CC hasta 900 CC.
- ✓ **Calderas acuotubulares** Son aquellas en las que el agua circula al interior de los tubos, mientras que por el exterior pasan los gases de combustión. Este tipo de calderas es de mayor capacidad que las pirotubulares, ya que se pueden lograr presiones más altas que en las calderas pirotubulares, gracias a que el agua/vapor están contenidos en tubos que pueden soportar altas presiones. Las calderas de este tipo son usadas inclusive en la generación de energía eléctrica. Se caracterizan por trabajar a altas presiones, normalmente a más de 15 kg/cm², aunque también las hay de baja presión.
- Sistema de alimentación de agua a la caldera; este sistema debe estar integrado por: tanque de agua de ingreso a la caldera, pero antes tratada mediante ablandadores⁴ y además debe tener un tanque de agua de reposición.
- Hogar de la caldera; es la zona donde se lleva a cabo la combustión y donde se transfiere el calor de la flama a las paredes del recipiente o tuberías que contienen al agua. En el hogar se encuentran los quemadores y es el lugar de mayor temperatura en la caldera.

El quemador, es uno de los componentes fundamentales de la caldera de vapor y su función es realizar la mezcla del aire con el combustible para conseguir su combustión y la liberación del calor necesario para la generación de vapor.

Un factor importante de la eficiencia de combustión es la correcta pulverización del combustible que permita mezclarse íntimamente con el aire y facilitar la reacción del carbono e hidrógeno del combustible con el oxígeno del aire, produciendo así un mínimo de inquemados (CO, hollín, etc.). Otro factor importante es el exceso de aire, esto es la cantidad de aire usado en el quemador por encima del valor estequiométrico (aire mínimo para completar las reacciones de combustión). Si el exceso de aire es muy bajo se produce una mala combustión (alta presencia de CO y hollín); y si el exceso de aire es muy alto, se gasta parte del combustible para calentar el aire excedente, habiendo en ambos casos ineficiencia en la caldera.

- Sistema de alimentación de combustible; los equipos que se requieren se definen en función del tipo de combustible a quemar. Algunos de los combustibles más conocidos/usados son el diesel y el bunker, ambos en estado líquido y el gas LP y el gas natural, ambos en estado gaseoso. También hay combustibles sólidos como el carbón de madera, el bagazo de caña, la cáscara de maní, etc. En general, para combustibles líquidos y gaseosos, siempre se utiliza un conjunto quemador integrado por tuberías donde se transporta y calienta el combustible, y posteriormente se realiza la mezcla del combustible con el aire, en condiciones adecuadas de temperatura y proporciones para asegurar una buena combustión. Para el caso de los combustibles sólidos, como el carbón de madera o el bagazo de caña, se requieren bandas transportadoras para conducir el combustible hasta el hogar, para ser quemado. [9].

En conclusión, podemos decir que en relación a los sistemas de generación de vapor, una evaluación energética considera la determinación de la eficiencia térmica de las calderas, la cuantificación de las pérdidas de calor principales, la verificación del estado de conservación y el análisis de las condiciones y procedimientos de operación.

La determinación de la eficiencia térmica de una caldera permitirá comprobar si existen diferencias respecto de los antecedentes entregados por el fabricante y la cuantificación de las pérdidas de calor ayudará a identificar las causas de las diferencias que pudieran detectarse en la eficiencia térmica.

En las calderas industriales se debe tener en cuenta el estándar mínimo de su eficiencia energética, como se muestra en la tabla 5. [10]

Tabla 5
Guía de Estándares Mínimos de Eficiencia Energética

Ítem	Características	Estándar de eficiencia térmica (combustible/vapor)		Bajo condiciones
		Categoría	Rango de Eficiencia Térmica (n)	
1	Potencia: 98 a 11772 kw 10 a 1200 BHP	A	Mayor de 82%	Estándares de Temperatura 25 °C y Presión 101,32 kPa
	Presión manométrica Para calderas de tubos de humo hasta 2069 kPa 300psig	B	80 < n < 82	
	Temperatura de saturación	C	78 < n < 80	

Fuente: Adaptado de Ministerio de Energía y Minas, 2009, p. 4 (<https://bit.ly/3orLSCe>). De dominio público.

También tiene una importancia significativa en la eficiencia térmica de una caldera la cantidad de agua eliminada a través de la purga, para satisfacer los requerimientos del tratamiento de agua. Esto dependerá de las características del agua de alimentación y las condiciones que debe satisfacer el agua de la caldera para evitar problemas de incrustaciones y corrosión.

Por cada 10 % de purga, la eficiencia térmica de una caldera disminuirá en aproximadamente un 3 % (para las presiones de operación y temperaturas de agua de alimentación más comunes de las calderas pirotubulares industriales).

Por esta razón, el análisis de las purgas es sumamente relevante, ya que, debe ser suficiente para prevenir problemas en las calderas, pero no debe ser excesivo para evitar un incremento de las pérdidas de calor. [11].

b) Distribución de Vapor

Respecto de la distribución de vapor, la Evaluación Energética considera la verificación del aislamiento térmico del casco de la mayoría de las calderas es de lana de vidrio. Casi en la totalidad de calderas dicho aislamiento no ha sido cambiado desde la adquisición del equipo. En relación al estado del aislamiento, en la mayoría de los casos se encuentra en buen estado, habiendo algunos casos en los que está deteriorado por deformación mecánica debido a golpes, deterioro por la humedad, etc., habiendo en tales casos pérdida de la eficiencia del aislante y aumento de las pérdidas de calor, aunque ello no es muy significativo.

El buen estado de la aislación de las líneas de distribución de vapor es sumamente importante, ya que, permitirá reducir la condensación del vapor. A modo de referencia, la pérdida de calor de una cañería aislada es inferior al 25 % de la pérdida de una cañería sin aislación.

También la incorrecta instalación de accesorios (válvulas o instrumentos) puede provocar problemas de operación y mayores gastos de energía. Por ejemplo, un sensor de temperatura mal instalado provocará una deficiente operación de la válvula de control que pudiera estar comandando. [11].

c) Consumo de Vapor

En relación a los centros de consumo de vapor, la Evaluación Energética considera la verificación del suministro de vapor en las condiciones de presión requeridas por los equipos, la correcta instalación y operación de los sistemas de control, la existencia de separadores de condensado cuando sean requeridos y la confirmación de que la recuperación de condensado se realizará cuando sea posible.

La confirmación de que el vapor es suministrado en las condiciones (presión y humedad) requeridas por los equipos consumidores de vapor es fundamental para asegurar el correcto funcionamiento del sistema productivo.

También resulta muy importante verificar que los sistemas de control y evacuación de condensado existentes en cada equipo, fueron seleccionados e instalados correctamente y se encuentran operando de acuerdo a los requerimientos de los consumidores de vapor. [11].

d) Retorno de condensado

En relación al retorno de condensado desde los equipos que consumen vapor, la Evaluación Energética considera la verificación de la adecuada selección de las trampas de vapor (tipo y capacidad), los sistemas para el “bombeo” o impulsión del condensado hacia el estanque de alimentación de agua de las calderas y el adecuado tratamiento de las líneas para evitar corrosión.

La recuperación de condensado es un excelente mecanismo para aumentar la eficiencia y reducir los costos operacionales de los sistemas de generación y consumo de vapor.

Por ejemplo, al recuperar sobre un 80 % del condensado, se reduce en un 14% aproximadamente el consumo de combustible.

Este significativo ahorro de combustible hace que la recuperación de condensado resulte sumamente interesante y cualquier inversión asociada sea recuperada en un breve lapso.

En aquellas empresas que cuenten con un sistema de recuperación de condensado, es indispensable verificar que se encuentre operando correctamente, para que el ahorro de energía sea efectivo. [11].

- ❖ Además de la identificación de las deficiencias de los sistemas de generación, distribución y consumo de vapor, los resultados de la Evaluación Energética entregarán una definición de los trabajos requeridos para mejorar estos sistemas, una estimación de la inversión asociada y la determinación de la recuperación de la inversión. La recuperación de la inversión asociada a la solución de las deficiencias detectadas por una Evaluación Energética, tiene relación con la valorización de los ahorros correspondientes a la reducción de los costos operacionales y mejoramiento de la eficiencia. [11].

III. Metodología

3.1 Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación es: No-experimental, prospectivo-transversal.

- No-experimental, porque no se manipulan deliberadamente variables, se observa fenómenos tal y como se dan en su contexto natural, para luego analizarlos.
- Prospectivo, porque intenta predecir un posible escenario futuro.
- Transversal, porque se limita a la toma de datos en un único momento de tiempo.

El diseño de investigación lo apreciamos en la siguiente figura.

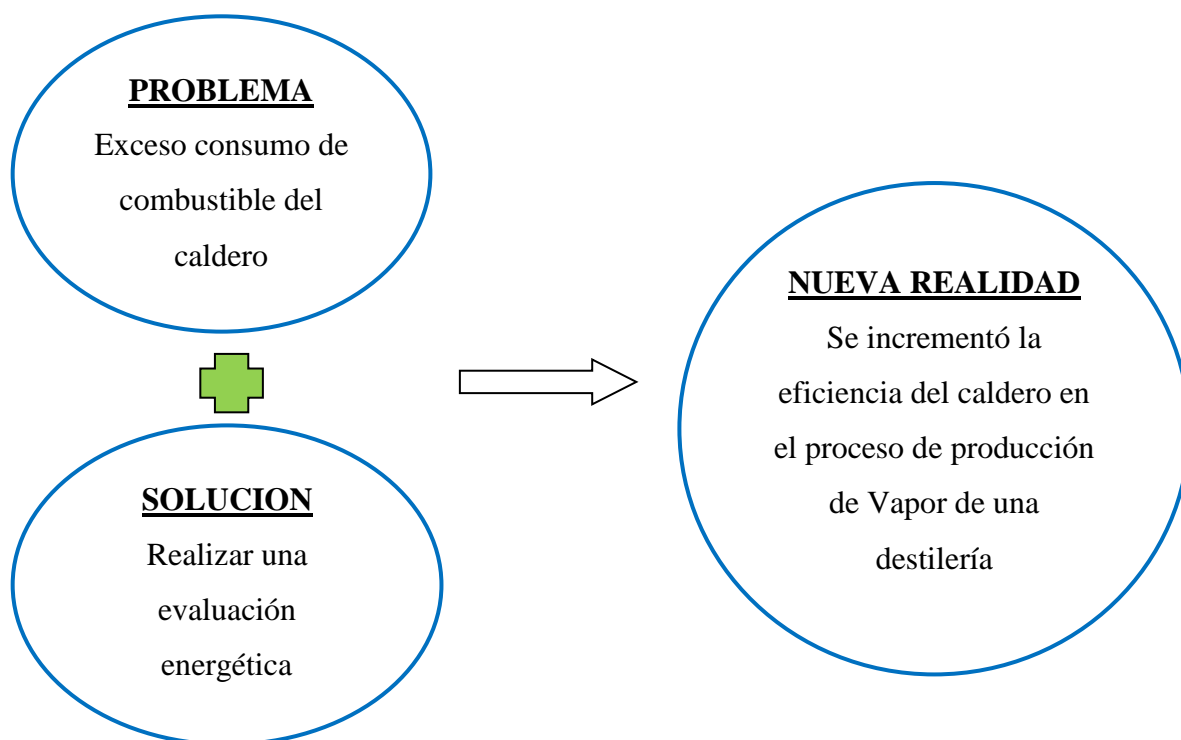


Figura 4 Diseño de la investigación

Fuente: Elaboración propia

3.2 Población y Muestra

Para la presente investigación la población es igual a la muestra y está dada por las instalaciones de la Destilería Naylamp E.I.R.L.

3.3 Formulación de Hipótesis

Mediante la evaluación energética del caldero se incrementará su eficiencia en el proceso de producción de vapor de la Destilería Naylmap E.I.R.L.

3.4 Variables – Operacionalización

Variable dependiente

Eficiencia energética

Variable independiente

Evaluación energética

Operacionalización de variables

Tabla 6
Operacionalización de las variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional
Evaluación Energética	Consiste en un análisis de los sistemas de generación, distribución, consumo de vapor y retorno de condensado.	El propósito de ésta evaluación es la identificación y cuantificación de las deficiencias existentes y los procedimientos requeridos para resolverlas.
Eficiencia Energética	Es una herramienta que ayuda a reducir el consumo energético de los sistemas térmicos y optimizar el desempeño de los mismos.	El propósito es evaluar sus parámetros de funcionamiento, sus consumos energéticos, la variación de la carga durante el periodo de trabajo, sus rendimientos y otros parámetros específicos de cada equipo.

Fuente: Elaboración propia

3.5 Métodos y Técnicas de Investigación

El método a emplear en la presente investigación es el Método Descriptivo Analítico Cuantitativo.

Es cuantitativa porque nos va a permitir otorgar un valor al problema de investigación a resolver.

Las técnicas a utilizar son: Búsqueda bibliográfica y encuesta.

3.6 Descripción de los instrumentos utilizados

3.6.1 Ficha de búsqueda bibliográfica ésta ficha tiene el propósito de introducir algunas claves para orientar la búsqueda bibliográfica y recuperar contenido académico evaluado por pares, de relevancia en el campo de trabajo a investigar. Asimismo, se realiza una síntesis de las formas de citado y armado de referencias.

3.6.2 Hojas de encuesta: está constituido por un conjunto de preguntas cuya finalidad es obtener respuestas relacionadas a un tema.

3.7 Análisis estadístico e interpretación de datos

En la presente investigación se utilizó estadística descriptiva, ya que vamos a recolectar un conjunto de datos que nos va a brindar la destilería Naylamp, y así poder analizarlos mediante cuadros resúmenes, tablas o gráficos.

IV. Resultados

4.1 Recopilación de datos de la caldera e identificación del proceso de producción de vapor de la destilería de alcohol

4.1.1 Datos Generales de la Empresa

Nombre: Destilería Naylamp EIRL.

Dirección: Au. Panamericana Norte 776, Chosica del Norte.

Ubicación: Se ubica en la siguiente figura:

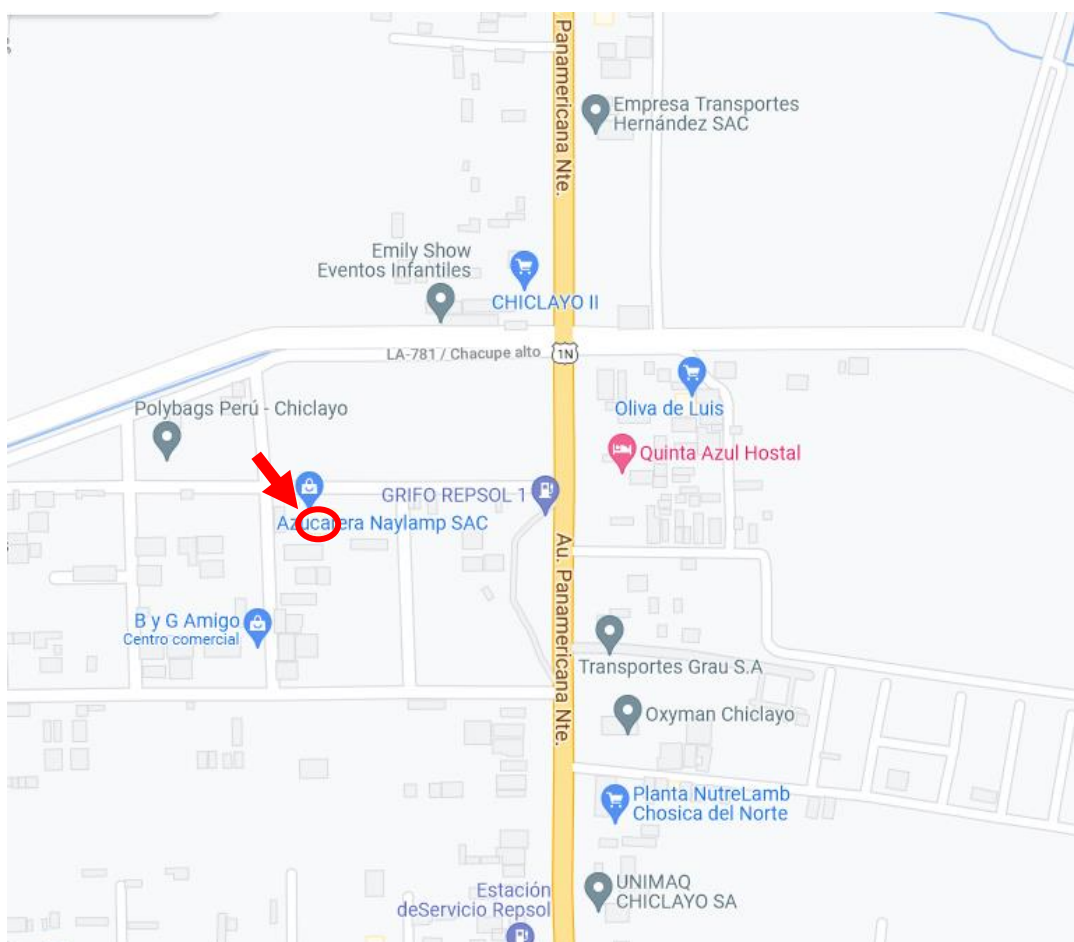


Figura 5 Ubicación de la Destilería Naylmap EIRL

Fuente: Adaptado de Google Maps, 2021

4.1.2 Datos de la caldera y proceso de producción de vapor

Se comenzó realizando la recolección de información sobre las características de la caldera y de todo el proceso de producción de vapor de la Destilería de Alcohol Naylamp E.I.R.L.

Datos de la Caldera:

- Caldera Tipo Acuotubular
- Trabaja a una Presión Máx de 120 Psi
- Tiene una producción Máx de 9000 kg de Vapor/Hora

Luego se ha identificado que el área de producción de vapor, está conformado de la siguiente manera: suministro, conversión, distribución, utilización y recuperación de calor. A continuación, en la siguiente figura se grafica la estructura de un sistema de vapor, además para un mayor detalle se anexa el proceso actual de la Destilería de Alcohol Naylamp E.I.R.L. (Ver Anexo N°1).

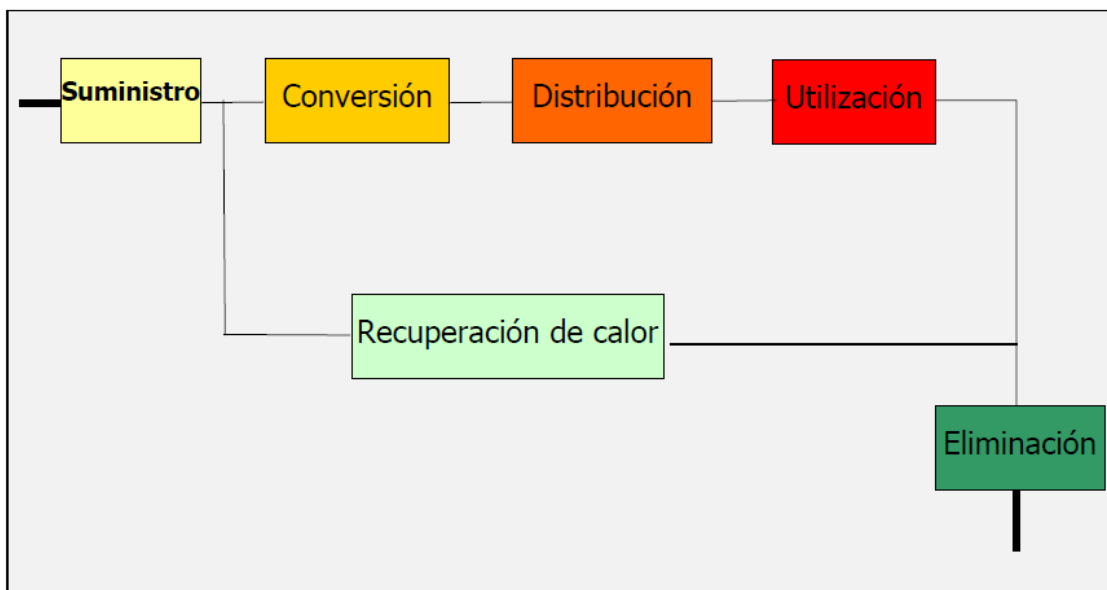


Figura 6 Estructura del Sistema de producción de vapor de la destilería Naylamp EIRL

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2.1 Suministro

- El combustible que se utiliza es la pajilla de arroz por su excelente poder calorífico (15067 KJ/Kg) y por el bajo costo que tiene este residuo que proviene de los Molinos de Arroz. El consumo de este tipo de combustible es de 2,5 kg de vapor/kg de combustible.
- La pajilla de arroz se encuentra a la intemperie, es decir a una posible contaminación (pajilla se mezcle con otros elementos o aumente su humedad), esto puede disminuir su poder calorífico y posteriormente no llegaría a combustionar de la forma que se espera.



Figura 7 Pajilla de arroz en la destilería Naylamp EIRL

Fuente: Elaboración Propia

- La pajilla de arroz es transportada por un elevador de combustible (Figura 8) hasta una tolva, este elevador se encuentra en buenas condiciones ya que trabaja sin ningún problema.



Figura 8 Elevador de la pajilla de arroz

Fuente: Elaboración Propia

- En la tolva es almacenada la pajilla de arroz, en donde se ha verificado que cuenta con varios orificios, debido a las corrosiones por la humedad del ambiente y las posibles lluvias.



Figura 9 Estado de la tolva de almacenamiento de la pajilla de arroz

Fuente: Elaboración Propia

- Posteriormente la pajilla de arroz va ingresando al hogar de la combustión de forma controlada mediante dos sinfines con sus respectivos motoredutores. Estos sinfines están en buen estado, pero los motoredutores ya están con muy poca vida útil (debido a los 5 años de trabajo continuo).



Figura 10 Motoreductor

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.2 Conversión

- En la parte de la conversión encontramos la Caldera (Figura 11), esta caldera está en buen estado y trabaja normalmente (fue comprada hace 8 años). Esta caldera es de tipo Acuotubular y tiene una capacidad de 9000 Kg de Vapor/hora y trabaja a una presión máx de 120 Psi.

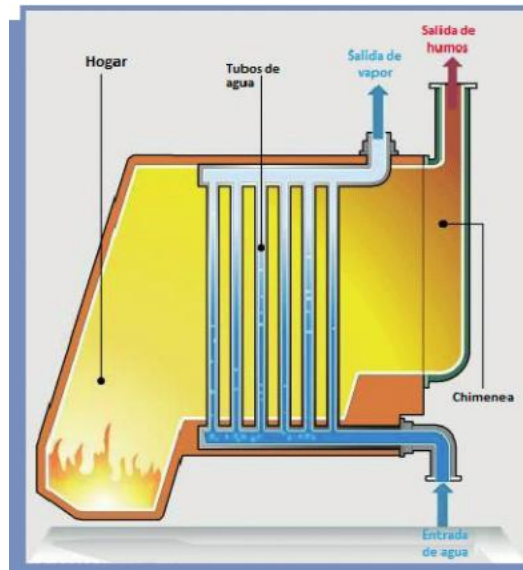


Figura 11 Esquema Caldera Acuotubular

Fuente: Adaptado de Energías Industriales, 2019

- También encontramos un ventilador de tiro forzado (Figura 12), este ventilador se encarga de aportar el aire necesario para la combustión y además de mantener la misma combustión. Este ventilador se encuentra en buen estado, pero el motor al cual está conectado está en buen estado (ya que su vida útil ha disminuido).



Figura 12 Ventilador de tiro forzado

Fuente: Elaboración Propia

- Luego encontramos el tanque de tratamiento de agua dura (donde mide: GPh, dureza, hierro, alcalinidad, etc.). Este tanque se encuentra en mal estado, debido al alto GPh del agua potable.

Tanque de almacenamiento de agua tratada, este tanque se encuentra bien, pero se ha verificado que sufre de pequeñas corrosiones. Además, el aislamiento está deteriorado.

- Las electrobombas de desplazamiento vertical (se utilizan para desplazar los fluidos). Estas bombas se encuentran en buen estado (fueron compradas hace 4 años). Así como se muestra en la Figura 13.



Figura 13 Electrobomba desplazamiento vertical

Fuente: Elaboración Propia

4.1.2.3 Distribución

- En la parte de distribución encontramos las tuberías. Hay tuberías que unen el tanque de tratamiento del agua al tanque de almacenamiento del agua tratada, como también desde el tanque de almacenamiento hasta la caldera. Estas tuberías se encuentran medianamente bien, debido a que aún existe ph, dureza, etc. en el agua.
- También existen las tuberías de la caldera a la zona donde se utiliza el vapor, estas tuberías se encuentran en un buen estado, pero lo que preocupa es el aislamiento, debido a que se tiene que mantener una temperatura constante del vapor. Así que se ha verificado que falta aislamiento en algunas partes de las tuberías, ya que se ven espacios por donde se disiparía la temperatura.

4.1.2.4 Utilización

- En esta parte el vapor que se utiliza es de 4000 Kg de Vapor/hora a una presión de 60 Psi, en esta zona se debe estar controlando la presión de forma manual, es decir si es que la presión es menor a 60 Psi, tendremos que aumentar la velocidad de los motoreductores para

que ingrese más pajilla de arroz y así aumente la presión; y también ocurre de forma contraria, si la presión es mayor a 60 Psi tendremos que parar los motoredutores de alimentación por unos segundos para que deje de entrar la pajilla de arroz y así disminuir la presión.

- Existe un tablero de control para las bombas, motoredutores y motores. Este sistema está en muy buen estado (fue adquirido hace 4 años).

4.1.2.5 Recuperación de calor

- En esta zona la recuperación de calor se realiza con dos intercambiadores de calor, en donde tratan de aprovechar la máxima temperatura con la que llega el vapor para calentar una determinada cantidad de agua tratada y redireccionarlo por unas tuberías aisladas al tanque de almacenamiento; y así cuando entre el agua tratada a cierta temperatura a la caldera, podrá consumir menos energía para transformarla a vapor.
- Estos intercambiadores de calor están en buen estado, ya que su funcionamiento es normal y su vida útil es alta (fueron comprado hace 5 años).

4.1.2.6 Eliminación

En esta parte del proceso se ha identificado lo siguiente:

- Las cenizas que se producen luego de la combustión, son llevadas desde el hogar de combustión por medio de sinfines (conectados a un motoredutor) hasta un elevador que las desplaza hasta una tolva, donde son almacenadas hasta que un medio transporte las recoja. Los sinfines y los motoredutores están en buen estado (fueron adquiridos hace 5 años) y la tolva esta con algunos orificios por la corrosión del mismo clima.
- Además, se ha identificado un ventilador de tiro inducido, que se encarga de evacuar los humos del hogar, pero antes debe pasar por un Multiciclón, para separar las partículas sólidas. Necesitan de un motor para su funcionamiento.



Figura 14 Ventilador de tiro inducido

Fuente: Elaboración Propia

- También se ha identificado un Multiciclón de captación de cenizas el humo cargado de cenizas entra tangencialmente por la parte superior cilíndrica. La corriente de humo sigue una trayectoria en espiral que primero se dirige hacia el fondo del tronco de cono, ascendiendo después por el centro del mismo. El humo, una vez depurado, abandona el ciclón por la parte superior. Las partículas separadas se descargan por el fondo del ciclón

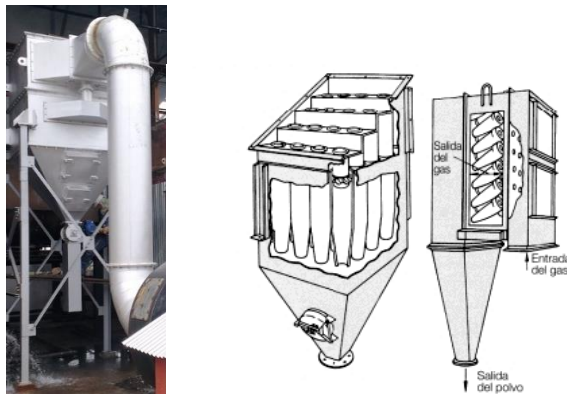


Figura 15 Multiciclón

Fuente: Elaboración Propia

4.2 Evaluación energética de la caldera, cálculo de eficiencia

4.2.1 Composición Química de la Pajilla de Arroz

Primero comenzaremos analizando el tipo de combustible que se está utilizando, y lo más importante es poder saber cuál es su poder calorífico, ya que este parámetro nos indica la cantidad de calor que se desprende en la combustión completa. Así que realizaremos el análisis elemental de la pajilla de arroz, que se mostrará a continuación:

Tabla 7

Composición química de la pajilla de arroz

Componentes	Valores (%)
C	38,7
H	4,7
O	31,37
N	0,5
S	0,01
H ₂ O	6,6
Cenizas	18,12

Fuente: Elaboración propia

Luego tendremos que calcular el poder calorífico inferior húmedo $(PCI)_h$, ya que este poder calorífico nos dirá la cantidad de calor que se desprende en la combustión completa de la unidad de combustible quedando finalmente el agua en forma de vapor (Kcal/kg). Para esto se podrá calcular con la siguiente fórmula aproximada:

$$(PCI)_h = 8,14 C + 29 \left(H - \frac{O}{8} \right) + 2,22 S - 600 M \frac{Kcal}{Kg \text{ comb.}}$$

$$(PCI)_h = 8.14 (38,7) + 29 \left(4,7 - \frac{31,37}{8} \right) + 2,22 (0,01) - 600 (6,6)$$

$$(PCI)_h = 3622 \text{ kcal/kg}$$

4.2.2 Cálculo de aire teóricamente necesario para la combustión de la pajilla de arroz

Base: 100 lbs de Pajilla de arroz seco

Tabla 8
Análisis de la pajilla de arroz

	Análisis de la Pajilla de Arroz (seco), lb	Peso Molecular	Número de Libras
C	41,7	12	3,475
H₂	4,7	2	2,35
O₂	34,97	32	1,093
N	0,5	28	0,018
S	0,01	32	Despreciable
Cenizas	18,12		

Fuente: Elaboración propia

Como el carbono tomó igual número de moléculas de oxígeno para pasar a CO₂ y el aire contiene 21% de oxígeno, la cantidad de aire requerida para el carbono del combustible es:

$$(3,475 \cdot 100) / 21 = 16,54 \text{ mol de aire}$$

Por razonamiento análogo, la cantidad de aire requerida para el hidrógeno del combustible es:

$$[(2,35/2) - 1,093] \cdot 100/21 = 0,39 \text{ mol de aire}$$

El número de moles de aire requerido por lb de pajilla de arroz seco es:

$16,54 + 0,39 = 16,93$ moléculas libra de aire necesarias por 100 libras de pajilla de arroz seco o también es igual a, $16,93 \cdot 28,9 = 489,27$ lbs

- En la práctica la combustión no puede realizarse consumiendo únicamente cantidad de aire teórico, pero está en el interés de la buena eficiencia de las calderas llevarla a cabo con la mínima cantidad de exceso de aire.

4.2.3 Cálculo de la cantidad de aire necesaria por libra de pajilla de arroz seco para diversos porcentajes de exceso de aire

Para 0% de exceso de aire se requiere 4,89 lbs de aire por libra de pajilla de arroz seco

4.2.4 Cálculo de la cantidad de productos secos de la combustión por libra de pajilla de arroz

Es claro que los productos de la combustión de pajilla de arroz serán CO₂ y N₂ cuando la combustión es perfecta y no exista por tanto exceso de aire. Cuando éste se manifieste además de los productos mencionados existirá O₂, se considera que no hay existencia de CO. Por lo demás, este producto se encuentra en cantidades despreciables en los gases de combustión de calderas de pajilla de arroz.

Para 0% de exceso de aire, la cantidad de productos secos de la combustión por libra de pajilla de arroz seco será:

$$\text{CO}_2 = (3,475 \text{ lb}/100) * 44 = 1,529 \text{ libras}$$

$$\text{N}_2 \text{ de la pajilla de arroz} = (0,018 \text{ lb}/100) * 28 = 0,0050 \text{ libras}$$

$$\text{N}_2 \text{ del aire} = 0,25 \text{ lb} * 0,79 \text{ lb} * 28 = 5,53 \text{ libras}$$

Entonces el total de productos secos por libra de pajilla de arroz será: 7,064 libras.

4.2.5 Cálculo de la cantidad de productos húmedos de la combustión por libra de pajilla de arroz seco

Es evidente que el aire introducido para efectuar la combustión lleva una cierta cantidad de agua que tiene que salir con los gases de la chimenea, pero esta cantidad no es tan significativa.

Para 0% de exceso de aire tendremos por libra de pajilla de arroz seco quemado, lo siguiente:

Tabla 9
Análisis de pajilla de arroz quemado

	Número de libras
C	0,417
H	0,047
N	0,005
O	0,3497

Fuente: Elaboración Propia

Humedad = 1 libra

Aire para la combustión = 4,89 libras

Entonces los productos húmedos por libra de pajilla de arroz seco serán:

$$0,8187 + 1 + 4,89 = 6,7 \text{ libras}$$

Cuando la pajilla de arroz que estamos considerando se quema con la cantidad de aire teóricamente necesario, los gases de combustión a temperatura ordinaria contienen 15,2 volúmenes de CO₂ por cada cien volúmenes de gases secos (valor real medido por un Analizador Orsat).

4.2.6 Cálculo del porcentaje de Volumen de CO₂ en gases secos para diversos porcentajes de exceso de aire

Por cada libra de pajilla de arroz seco quemado para 0% de exceso de aire se obtendrá o siguiente:

Tabla 10
Volumen de CO₂

	Libras	Moles
C	0,417	0,03475
N(combustible)	0,005	0,00018
N(aire) 0,25*0,79		0,1975
Moles Totales gases secos		0,23243
%CO₂=(0,03475*100)/0,2324		14,95%

Fuente: Elaboración propia

Así que el CO₂ para diversos porcentajes de exceso de aire estará dado por la siguiente ecuación:

$$\%CO_2 \text{ (volúmenes)} = (0,03475*100)/(0,2324+0,1693E)$$

Donde: **E** es el exceso de aire promedio

4.2.7 Cálculo de la Eficiencia (Método Directo)

$$n = \frac{\text{calor absorbido}}{\text{calor suministrado}}$$

$$n = \frac{W(h_i - h_f)}{W_c \times PC}$$

Donde:

h_i : entalpía del vapor a la salida del caldero (Ver Anexo N°7) [12]

h_f : entalpía del agua al ingreso del caldero tn vapor/tn pajilla de arroz (Ver Anexo N°8) [12]

PC: poder calorífico del combustible: 3622 Kcal/Kg

W: caudal de vapor (kg/h)

W_c : caudal de combustible (kg/h)

W/ W_c : 2,5 Kg de vapor/Kg de combustible

Tabla 11
Cálculo de Entalpías

Cálculo de Entalpías: Usando Tablas de termodinámica			
Vapor	Presión	60 psi = 4,14 bar	1210,42 KJ/Kg
sobrecalentado	Temperatura	115°C	
Agua de	Presión	68 psi = 4,68 bar	273,77 KJ/Kg
Alimentación	Temperatura	55°C	

Fuente: Elaboración Propia

$$\eta = \left(2,5 \frac{\text{Kg Vapor}}{\text{Kg Comb}}\right) \frac{\left(1210,42 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - 273,77 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right)}{3622 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}} = 64,65\%$$

4.2.8 Cálculo de la Eficiencia (Método Indirecto)

4.2.8.1 Pérdida debido a la humedad de la pajilla de arroz

Datos:

Capacidad producción de vapor: 4000 kg/h = 8816 lb/h

Temperatura Ambiente: 25°C / 77°F

Temperatura de la Salida de gases: 75°C / 167°F

Combustible: pajilla de arroz

Poder calorífico de la pajilla de arroz: 6516 BTU/lb

$$Q_1 = W (212 - T_1) + 970,3*W + WC_P (T_2 - 212) \dots\dots(1)$$

Donde:

W: 1 lb

T ambiente (T₁): 25°C / 298K / 77°F

T salida gases (T₂): 75°C / 348 K / 167°F

$$C_P = a + \frac{b}{2}(T_2 + T_i) + \frac{c}{3}(T_2^2 + T_2T_1 + T_i^2) \dots\dots(2)$$

Donde:

a: 6,89

b: 3,283 x 10⁻³

c: -0,343 x 10⁻⁶

T_i: 298 K

T₂: 348 K

$$C_P = 7,28$$

$$C_{pm} = 0,4047 \text{ BTU/lb}^\circ\text{F}$$

De la ecuación (1), calcularemos la pérdida por humedad de la pajilla de arroz:

$$Q_1 = 1087,09 \text{ BTU/lb pajilla de arroz}$$

Pérdida por humedad de Pajilla de arroz será de 16,68%

4.2.8.2 Pérdida por hidrógeno del combustible

Por cada libra de pajilla de arroz seco quemado tenemos 0,047 libras de hidrógeno. Como por cada libra de hidrógeno se pueden obtener 9 libras de agua, la cantidad de agua será, $W = 9 * 0,047 = 0,423$ libras.

Ahora calcularemos la pérdida debida al agua formada por la combustión del hidrógeno de la pajilla de arroz:

$$Q_2 = W(212 - T_1) + 970,3W + WC_p(T_2 - 212)$$

Donde:

W: 0,423 lb

T ambiente (T_1): $25^\circ\text{C} = 77^\circ\text{F}$

T salida gases (T_2): $75^\circ\text{C} = 167^\circ\text{F}$

$$Q_2 = 459,83 \text{ BTU/lb pajilla de arroz}$$

Pérdida por hidrógeno de Pajilla de Arroz: 7,05%

4.2.8.3 Pérdida por humedad en el aire

Sabíamos que por libra de pajilla de arroz seco quemado se necesitan 4,89 libras de aire para 0% de exceso de aire. Por lo tanto, la cantidad de aire seco a 30% de exceso de aire será: $4,89 * 1,3 = 6,35$ lb.

La cantidad de agua en el aire será: $6,35 * 0,026 = 0,165$ lb

Luego calcularemos la pérdida debida a la humedad en el aire:

$$Q_3 = WC_p (T_2 - T_1)$$

Donde:

W: 0,165 lb de agua

T ambiente: $25^\circ\text{C} = 77^\circ\text{F}$

T salida gases: $75^{\circ}\text{C} = 167^{\circ}\text{F}$

$$C_p = a + \frac{b}{2}(T_2 + T_i) + \frac{c}{3}(T_2^2 + T_2T_i + T_i^2)$$

Donde:

a: 6,89

b: $3,283 \times 10^{-3}$

c: $-0,343 \times 10^{-6}$

T_i : $25^{\circ}\text{C} = 298 \text{ K}$

T_2 : $75^{\circ}\text{C} = 348 \text{ K}$

$C_p = 7,91$

$C_{pm} = 0,44 \text{ BTU/lb}^{\circ}\text{F}$

$Q_3 = 6,53 \text{ BTU/lb}$ pajilla de arroz

Pérdida por humedad en el aire: 0,1 %

4.2.8.4 Pérdida por gases secos

Pérdida por gases secos:

$$Q_4 = Q(\text{CO}_2) + Q(\text{N}_2) + Q(\text{O}_2)$$

Primero calcularemos la pérdida en el CO_2 :

$$Q(\text{CO}_2) = nC_p(T_2 - T_1)$$

Donde:

n: 0,03475 moles de CO_2

T_1 : $25^{\circ}\text{C} = 77^{\circ}\text{F}$

T_2 : $75^{\circ}\text{C} = 167^{\circ}\text{F}$

$$C_p = a + \frac{b}{2}(T_2 + T_i) + \frac{c}{3}(T_2^2 + T_2T_i + T_i^2)$$

Donde:

a: 6,85

b: $8,533 \times 10^{-3}$

c: $-2,475 \times 10^{-6}$

T_i: 25°C = 298 K

T₂: 75°C = 348 K

$$C_p = 9,34 \text{ BTU/lb}^\circ\text{F}$$

$$Q(\text{CO}_2) = 29,21 \text{ BTU/lb pajilla de arroz}$$

Luego calcularemos la pérdida en el N₂:

$$Q(\text{N}_2) = nC_p(T_2 - T_1)$$

Donde:

n: 0,9865

T₁: 25°C = 77°F

T₂: 75°C = 167°F

$$C_p = a + \frac{b}{2}(T_2 + T_i) + \frac{c}{3}(T_2^2 + T_2T_i + T_i^2)$$

Donde:

a: 6,3

b: $1,819 \times 10^{-3}$

c: $-0,345 \times 10^{-6}$

T_i: 25°C = 298 K

T₂: 75°C = 348 K

$$C_p = 6,85 \text{ BTU/lb}^\circ\text{F}$$

$$Q(\text{N}_2) = 608,17 \text{ BTU/lb pajilla de arroz}$$

Luego calcularemos la pérdida en el O_2 :

$$Q(\text{O}_2) = nC_p (T_2 - T_1)$$

Donde:

$$n: 0,123$$

$$T_1: 25^\circ\text{C} = 77^\circ\text{F}$$

$$T_2: 75^\circ\text{C} = 167^\circ\text{F}$$

$$C_p = a + \frac{b}{2}(T_2 + T_i) + \frac{c}{3}(T_2^2 + T_2T_i + T_i^2)$$

Donde:

$$a: 6,13$$

$$b: 2,99 \times 10^{-3}$$

$$c: -0,806 \times 10^{-6}$$

$$T_i: 25^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$$

$$T_2: 75^\circ\text{C} = 348 \text{ K}$$

$$C_p = 7,012 \text{ BTU/lb}^\circ\text{F}$$

$$Q(\text{O}_2) = 77,62 \text{ BTu/lb pajilla de arroz}$$

$$Q_4 = 715 \text{ BTU/lb pajilla de arroz}$$

Pérdida por gases secos: 11%

4.2.8.5 Pérdida por combustión incompleta de la pajilla de arroz

Despreciable

4.2.8.6 Pérdida por purgas en la caldera

2%

4.2.8.7 Pérdidas indeterminadas

1,5%

4.2.8.8 Pérdidas por radiación

1,5%

Por lo tanto, la Eficiencia (Método Indirecto), será:

$$100\% - 16,68\% - 7,05\% - 0,1\% - 11\% - 2\% - 1,5\% - 1,5\% = \mathbf{60,17\%}$$



Figura 16 Balance Térmico de la caldera

Fuente: Elaboración propia

4.3 Planteamiento de Estrategias de Mejora para incrementar la Eficiencia de la caldera

El análisis del presente capítulo se efectuará en base a una Caldera Acuotubular que genera 4000 kg de vapor/hora y trabaja a una presión de 60 Psi.

El objetivo de esta investigación es tratar de establecer las condiciones necesarias en la generación de vapor, utilizando solamente pajilla de arroz como combustible.

4.3.1 Medidas de ahorro de energía sin inversión

En la operación normal de una caldera industrial, siempre se presentan posibilidades de ajustes o mejoras que sin requerir más inversión que un adecuado análisis y un correcto tratamiento del problema planteado permiten conseguir principalmente la no disminución de la eficiencia de la caldera.

A continuación se presentará una lista de siete técnicas de ahorro de energía, expuestas de forma simple y objetiva de cómo se debe enfocar en la práctica industrial.

4.3.1.1 Control y registro del consumo específico de combustible y costo del vapor generado

▪ Fundamento

La experiencia mundial ha demostrado que la primera y quizás la más importante medida de conservación de energía, en cualquier tipo de planta industrial, consiste en preocuparse por el consumo de energía.

Para los operadores, el hecho de que se evalúe el rendimiento energético durante su turno, crea cierto nivel de preocupación que elimina automáticamente los desperdicios de energía que se producen normalmente por la simple falta de interés en evitarlos.

El establecer controles y registros efectivos de los consumos específicos de combustible por turno, día, mes y año, así como el costo real de cada kilogramo de vapor producido, permiten lograr importante ahorros sin efectuar ninguna modificación en el sistema.

▪ Procedimiento

Implementar en el cálculo rutinario de operación el cálculo de consumo específico de combustible en Kcal/Kg de vapor producido. Este vapor debe ser calculado y registrado por los propios operadores en el reporte de cada turno, promediado a niveles diarios y mensuales

en las partes de producción y graficado en un lugar visible del área de la caldera. El costo del vapor debe ser calculado y registrado en forma diaria.

▪ **Discusión**

El principal problema que se presenta en la práctica para implementar estos controles, lo constituyen las dificultades para contabilizar correctamente los consumos y volúmenes de producción

Aunque no existe sistema de control y registro de flujo que proporcionen lecturas directas, siempre resultará posible conocer tanto el consumo de combustible como la producción de vapor efectuando un adecuado control de inventarios, registrando la altura de vacío de los tanques de combustible y agua de alimentación al caldero.

4.3.1.2 Disminución de la temperatura de los gases de combustión

▪ **Fundamento**

El calor producido por las reacciones de combustión y no transferido al agua, será eliminado por la chimenea sin ninguna utilidad al proceso, provocando una disminución del rendimiento energético y de la capacidad de producción de la caldera.

Las causas de la mala transferencia de calor, y por tanto la elevación de la temperatura de los gases, pueden ser las siguientes:

- El volumen de gases producidos es muy alto obligando que circulen con excesiva velocidad por el sistema, reduciendo sus posibilidades de transferir calor al agua de la caldera a través de tubos.
- Las superficies de transferencia de calor se encuentran sucias por el lado de los humos (hollín) o del agua (incrustaciones o caliche), dificultando el paso del calor.
- Las reacciones de combustión no se completan en el hogar, produciéndose una post-combustión en zonas cercanas a la chimenea.
- Fugas de calor sensible de los gases que pasan directamente a la chimenea por defectuosa colocación o fallas del refractario (descolocación, agrietamiento, etc.) durante la operación.

- **Procedimiento**

Como regla práctica se puede establecer que la temperatura de los gases de la chimenea debe estar entre 50°C y 70°C por encima de la temperatura correspondiente a la presión de vapor saturado producido por la caldera.

- **Discusión**

El límite inferior para las temperaturas de salida de los gases de combustión por la chimenea lo establece el riesgo de llegar al punto de rocío que se produzca corrosión ácida al condensar los gases provenientes de combustibles con contenido de azufre.

Una buena temperatura para minimizar la corrosión del ácido sulfúrico es 150 a 180 °C (300-350°F), debe utilizarse temperaturas más altas en la medida que se usen combustibles con contenidos de azufre mayores a 2%.

4.3.1.3 Prevenir el ensuciamiento de la superficie del quemador

- **Fundamento**

El quemador, como creador, vigilante y mantenedor de la llama, ya que es el protagonista principal de la combustión y por tanto, su adecuada operación resulta el factor más importante para lograr una eficiente combustión.

La coquización del propio combustible o la presencia de impurezas en el mismo, ensucian la boquilla de inyección de combustible en el quemador, deformando la llama y provocando una mala atomización.

- **Procedimiento**

Ubicar la llama del quemador en la posición correcta, estabilizar el frente de llama y efectuar la limpieza periódica.

- **Discusión**

La formación de coque se produce por el craqueo del combustible al ser expuesto violentamente a temperaturas muy altas. Esto sucede exactamente cuando se introduce demasiado combustible a la cámara de combustión.

4.3.1.4 Regulación del tamaño y forma de la llama

▪ **Fundamento**

La llama es el proceso donde se realiza la combustión, cuando se emplea combustibles sólidos o líquidos, una manifestación visible de las reacciones de combustión.

Para conseguir la máxima eficiencia en la operación de las calderas, el tamaño y la forma de la llama deben ser adecuados a la cámara de combustión (hogar).

▪ **Procedimiento**

Regular la forma, tamaño y apariencia de la llama actuando sobre el quemador. Resulta importante controlar el equilibrio que debe existir entre la velocidad con que ingresa la mezcla del combustible y la velocidad con que se quema (velocidad de propagación del frente de llama).

▪ **Discusión**

La llama debe ser del tamaño que permita el máximo aprovechamiento del espacio disponible en la cámara de combustión, sin impactar con las paredes o cualquier otro punto frío, lo cual producirá el apagado de la llama, produciendo inquemados sólidos que podrían ser arrastrados por los gases de chimenea o formar depósitos y ensuciamiento interior.

Una llama demasiado pequeña, no llegará a calentar en forma adecuada al aire y los gases contenidos en la cámara, circulando por los tubos con el menor contenido de calor, disminuyendo la capacidad de producción y la eficiencia de la caldera.

4.3.1.5 Reducción de la frecuencia de purgas

▪ **Fundamento**

La purga de las calderas se define como la operación de extracción de una cierta cantidad de agua del interior de la caldera en forma periódica, con el fin de evitar la concentración excesiva de los sólidos que se encuentran disueltos y en suspensión en el agua de alimentación.

Durante esta operación se pierde energía, ya que el agua se encuentra a la misma temperatura del vapor generado en la caldera.

Una reducción de la frecuencia de purgas, controlando que el nivel de sólidos totales en el agua de la caldera no exceda los límites recomendados, reduce las pérdidas de energía y aumenta la eficiencia de la caldera.

▪ **Procedimiento**

Determinar mediante el análisis químico el contenido de sólidos disueltos en el agua de alimentación y de purga, así como también registrar la frecuencia de purga y el tiempo que dura ésta.

En caso de existir un bajo contenido de sólidos en el agua de las calderas (3000 ppm), reducir la frecuencia hasta alcanzar el nivel.

▪ **Discusión**

La frecuencia de purgas debe ser minimizada para evitar pérdidas de energía y aumentar la eficiencia de la caldera.

Para calderas que operen entre 0 y 20 Kg/cm² (300 lb/pulg²) manométricos, la Asociación Americana de Fabricantes de Calderas, recomienda una concentración máxima de 3500 ppm de sólidos disueltos en el agua de purga. Si la concentración del agua de purga está por debajo de este nivel, pueden espaciarse las purgas sin causar ningún efecto de obstrucción.

El tratamiento de agua de alimentación mediante ablandadores o desmineralizadores de agua, disminuye el nivel de sólidos disueltos haciendo posible la reducción de la frecuencia de purgas sin afectar el nivel de concentración máximo permitido.

El uso de aditivos para evitar incrustaciones, permitiendo mayor concentración de sólidos disueltos, reduce también la frecuencia de purgas.

El uso de estos aditivos debe ser recomendado por un especialista en tratamiento de agua con el fin de garantizar el uso apropiado sin causar daños ni alteraciones operacionales en la caldera.

4.3.2 Medidas de ahorro de energía con inversión

4.3.2.1 Instalación de aislamiento térmico en tuberías

▪ **Fundamento**

En las zonas de distribución de vapor se ha llegado a encontrar que algunas tuberías no cuentan con un aislamiento térmico o por cuestiones de operación cotidiana el aislamiento se ha dañado y no ha sido reparada.

La carencia de aislamiento térmico en las tuberías que conducen el vapor ocasiona pérdidas de energía, además de otros problemas, tanto operativos como de seguridad laboral. Algunos de ellos se nombrarán a continuación:

- Condensación excesiva en las tuberías de distribución de vapor, disminuyendo substancialmente su capacidad de distribución y por ende su capacidad térmica.
- Golpes de ariete en las líneas y una mayor corrosión en las mismas debido a la condensación.
- Mayor demanda de vapor para compensar la condensación formada.

- Superficies expuestas con una temperatura mayor a 60°C, por lo que incrementa el riesgo laboral, tanto por la posibilidad de quemadura directa, como para crear condiciones ambientales con temperaturas altas que perjudican el desempeño laboral.

▪ **Procedimiento**

Un buen aislamiento térmico puede reducir las pérdidas de energía entre un 70% y un 90%, así como disminuir los problemas de golpe de ariete, mantener la presión requerida y reducir el riesgo laboral. Por todo lo anterior, se recomienda llevar a cabo un programa de inspección para evaluar si el aislamiento térmico tiene que ser sustituido parcialmente o totalmente en la línea de vapor. Este programa debe estar enmarcado en el programa de mantenimiento semanal o mensual.

Ahora calcularemos las pérdidas de calor en las tuberías sin aislamiento en el proceso de producción de vapor.

En este caso la caldera de vapor funciona 8560 h/año y existen 6m de tubo de 75mm de diámetro sin aislar. La temperatura exterior de los tubos es de 115°C y la temperatura ambiente es de 25°C. El rendimiento de la caldera es.

Para este cálculo utilizaremos la tabla llamada ábaco de Wrede. Ver Anexo N°6

$$Q_{\text{tubos}} = 6\text{m} \times 260 \text{ Kcal/m.h} = 1560 \text{ Kcal/h}$$

Ahora calcularemos el factor que se debe multiplicar a la pérdida de calor para temperaturas ambientes diferentes a 20°C.

$$50^\circ\text{C} \text{ --- } 0.870$$

$$90^\circ\text{C} \text{ --- } X$$

$$100^\circ\text{C} \text{ --- } 0.874$$

$$\text{Factor será: } X = 0,8732$$

$$Q_{\text{tubos}} = 1560 \text{ Kcal/h} (0,8732) = 1362,2 \text{ Kcal/h}$$

Entonces el ahorro de combustible será:

$$A = \frac{1362,2 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \times 8560 \frac{\text{h}}{\text{año}}}{0,6 \times 3622 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}}} = 5365,5 \text{ Kg/año}$$

El tipo de aislamiento térmico que se utilizará será el de Fibra de Vidrio, ya que se utiliza usualmente para temperaturas regulares (hasta 400°C) y además que tiene un bajo costo. Ver Anexo N°3

4.3.2.2 Reducir u optimizar el exceso de aire para la combustión

▪ Fundamento

En la operación de las calderas es normal encontrar en la relación aire-combustible siempre un exceso de aire, esto derivado de que por regla es necesario inyectar un poco más del aire teórico con el propósito de asegurar que todo el combustible sea quemado y se pueda aprovechar su energía de combustión.

El exceso de aire también se puede dar como resultado en las infiltraciones que se presenten en la caldera, cuestión que provoca reducción en la temperatura de los gases de combustión y hace que la eficiencia en la combustión no sea la adecuada.

En caso contrario, un bajo nivel de aire provoca que la combustión sea incompleta y se produzca hollín e inquemados. En el hogar de las calderas o en la superficie de los tubos de la caldera se pueden presentar depósitos de hollín, reduciendo con esto la eficiencia de transferencia de calor al agua. Una forma sencilla de apreciar el bajo nivel de aire en la combustión es cuando el color de los gases en la salida de la chimenea se ve oscuros, esto es señal de una mala combustión.

Al reducir el exceso de aire se cumplen varias condiciones:

- Cuando los gases salen de la caldera llevan un alto potencial de desperdicio de energía que puede reducirse al disminuir el exceso de aire.
- A menor exceso de aire, menor velocidad y mayor estada y transferencia de calor en el hogar de la caldera.

Para tener una mayor claridad de los efectos que puede tener el exceso de aire en las pérdidas de energía en los gases de la chimenea, se grafica en la siguiente figura, en donde muestra que al incrementarse el exceso de aire se disminuyen las pérdidas por combustible no quemado pero se incrementan las pérdidas de energía en los gases de chimenea.

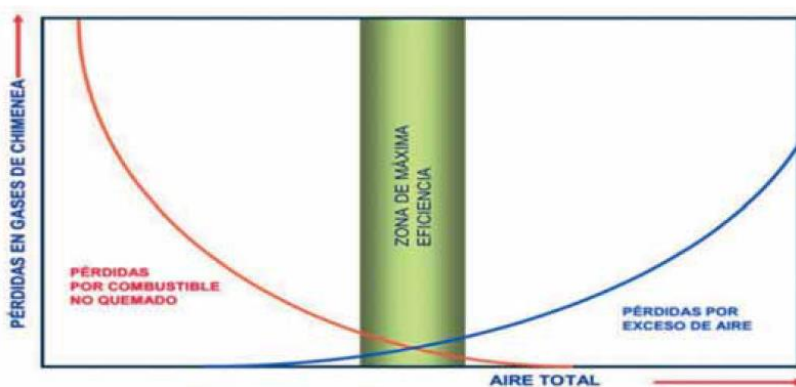


Figura 17 Pérdidas gases de chimenea vs Exceso de aire

Fuente: Adoptado de Guía de buenas prácticas en eficiencia energética para sistemas de vapor, C. Arze, S. Vega, 2011.

▪ Procedimiento

La siguiente tabla nos mostrará las recomendaciones para ajustar los niveles de exceso de aire requeridos, y para poder llevar a cabo estas acciones primero se debe de capacitar al personal y además de contar con un analizador de gases. Ver Anexo N°4.

Tabla 12
Recomendaciones para ajustar el exceso de aire

N°	Actividad	Desarrollo	Sitio
1	Revisión de controles de la caldera y sistema eléctrico	Es necesario revisar los controles y el sistema eléctrico de la caldera, para asegurar que ésta va a operar de manera adecuada y segura.	Caldera
2	Revisión del sistema de inyección del combustible	Se requiere revisar las boquillas de inyección del combustible, ya que deberán limpiarse y sobre todo verificar que se encuentre dentro del diámetro recomendado por el fabricante. Es recomendable cambiar al menos 1 vez al año las boquillas.	Sistema de inyección del combustible
3	Revisión del estado del combustible	Es importante asegurar que las condiciones del combustible sean las óptimas, principalmente controlar su humedad y además controlar que no se mezcle con otro elemento. Se efectúa el análisis de los gases de combustión en la salida de la chimenea mediante un Analizador de Gases. Éste debe contar con todos sus aditamentos y además debe estar calibrado.	Sistema de acondicionamiento del combustible

4	Realizar un análisis de gases	La calibración tiene un costo de \$150 a \$250 y los aditamentos entre \$50 y \$100.	Chimenea de la Caldera
5	Realizar el ajuste	Una vez efectuada la medición y determinado el exceso de aire, se deberá realizar el ajuste necesario de la alimentación del aire. Se recomienda entre un 5 a 10% de exceso de aire para la pajilla de arroz.	Chimenea de la caldera

Fuente: Adoptado de Guía de buenas prácticas en eficiencia energética para sistemas de vapor, C. Arze, S. Vega, 2011

Así que no es recomendable que el exceso de aire para la pajilla de arroz sea mayor al 10%, porque se producen pérdidas de energía y por ende una reducción en la eficiencia de la caldera. Si se siguen todos estos pasos para ajustar el exceso de aire se tendrán ahorros que van desde 0,33% y 20% con respecto al consumo del combustible.

En este caso el ahorro de energía promedio es de 5% del consumo anual de combustible, es decir si se consume anualmente 3000 toneladas, el 5% será 150 ton/año.

4.3.2.3 Reparación de fugas de Vapor

▪ Fundamento

Uno de los problemas que se presentan en el sistema de distribución de vapor, válvulas, bridas, uniones, es la presencia de fugas de vapor, llamados por algunos “vapor vivo”, que es casi invisible pero ruidoso y con altas temperaturas. El mantener dichas fugas en el sistema de vapor produce pérdidas de energía que afectan a la eficiencia de la caldera, pérdidas del agua tratada y problemas de seguridad laboral.

▪ **Procedimiento**

Para reparar las fugas de vapor se tiene que llevar a cabo un programa de inspección para detectar fugas en la línea de vapor y/o en los equipos del proceso. Esto debe estar enmarcado en un programa de mantenimiento.

En la reparación de las fugas se realizan las siguientes actividades:

- Cambio de juntas, ajuste de vástagos, sustitución de accesorios (válvula, regulador de presión, etc.)
- Cambio de la sección de la tubería o únicamente soldar la sección.

Para calcular las pérdidas de vapor se necesitará una tabla. Ver Anexo N°7

En este caso, en el proceso de esta Empresa se han localizado 7 fugas de vapor, 4 de 3mm y 5 de 5mm de diámetro. La empresa funciona 8560 h/anuales con una producción de 2,5 kg vapor/kg pajilla a 60 psi (4 atm).

Orificios de 3mm: 15 kg/h

Orificios de 5 mm: 42 kg/h

El caudal total de vapor perdido será:

$$Q = 4 \times 15 + 5 \times 42 = 270 \text{ kg/h}$$

Entonces el ahorro de energía por eliminar las fugas de vapor, se calculará con la siguiente ecuación:

$$A = \frac{Q \times H}{X} (\text{Kg comb./año})$$

Donde:

Q: caudal de vapor perdido (kg/h)

H: tiempo de la fuga de vapor (h/año)

X: producción de vapor en relación al combustible (kg vapor/kg comb.)

$$A = \frac{270 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \times 8560 \frac{\text{h}}{\text{año}}}{2,5 \frac{\text{Kg Vapor}}{\text{Kg Comb}}} = 924480 \text{ kg/año}$$

4.3.2.4 Correcta operación y mantenimiento de las trampas para condensados

▪ Fundamento

El mantener en condiciones óptimas la operación de las trampas para condensados, trae como beneficio que el proceso de transferencia de calor se lleve a cabo de manera eficiente. La correcta operación depende de una buena selección del tipo de trampa, una correcta instalación y un programa de mantenimiento.

Cuando el vapor ingresa a los equipos del proceso, el calor es transferido a través de las paredes al fluido para su calentamiento, como el vapor cede calor éste se condensa. Entonces el condensado comienza a acumularse en el espacio destinado para el vapor en el equipo. Sin embargo, el mismo vapor va empujando al condensado recién formado aguas arriba. El uso de las trampas para condensados justamente es para drenar el condensado formado sin permitir fugas de vapor.

Las tres importantes funciones de las trampas para condensados son:

- Descargar condensado
- No permitir escape de vapor
- Ser capaces de desalojar aire y gases

Existen varios tipos de trampas para condensados: termostáticas, termodinámicas, flotador, termostática de presión balanceada y cubeta invertida. A continuación se presentará la tabla con la selección de la trampa adecuada.

Tabla 13
Selección adecuada de la trampa para condensados

Aplicación	Gama FT (boya termostática)	TD (termodinámico)	BPT (presión equilibrada)	Flotador	Cubeta invertida
Intercambiador de calor	X				

Fuente: Elaboración Propia

Las trampas llegan a presentar fallas muy típicas, las cuáles pueden ser de dos tipos: abiertas y cerradas. En ambos casos los motivos por los cuales se presentan las fallas son por desgaste, suciedad, corrosión con condensado ácido y golpe de ariete.

La falla cerrada se da de un 15 a 30% de las trampas, esto debido a que los sistemas de vapor no reciben mantenimiento por más de tres años. Las repercusiones que provocan son de pérdidas del producto y bajo rendimiento en la transferencia de calor.

La falla abierta en el sistema de trampeo provoca principalmente fugas de vapor. En este caso presenta los siguientes riesgos:

- Altos costos por pérdidas de vapor vivo, es decir costo del combustible
- Seguridad laboral en el proceso

▪ **Procedimiento**

Se sugiere el establecimiento de un programa de revisión para detectar oportunamente las trampas que fallan y poder repararlas. Existen cuatro formas básicas para revisar el funcionamiento de las trampas: por temperatura, sonido, visualmente y electrónicamente. Y se recomienda utilizar un equipo de ultrasonido para poder detectar las trampas que fallan de manera más eficiente. Ver Anexo N°5

Los intervalos recomendados para la revisión del sistema de trampeo son las siguientes:

- Sistema de alta presión (más de 10 kg/cm²): Semana o Mensual
- Sistema de presión media (de 2 a 10 kg/cm²): Mensual o Trimestral
- Sistema de baja presión (menor a 2 kg/cm²): Anual

En este caso el proceso trabaja con una presión de 4 kg/cm², así que se recomienda que su mantenimiento sea trimestral.

La inversión requerida es principalmente en capacitar al personal y la adquisición de equipos de medición (ultrasonido).

Esta revisión y corrección de las trampas para condensados trae como beneficios ahorros energéticos de aproximadamente un 3,8% con respecto al consumo de combustible de la caldera.

Sabemos que anualmente se consume 3000 ton de pajilla de arroz, es decir el 3,8% será 114 ton /año de ahorro de pajilla de arroz.

Aplicando todas estas estrategias de mejora se disminuirá el consumo de pajilla de arroz y por ende se incrementará la eficiencia del caldero, a continuación se compara la eficiencia inicial y final de la caldera.

Tabla 14
Relación Producción de vapor y consumo combustible (inicial)

	Producción de vapor (Tn/h)	Masa de Pajilla de Arroz (Ton/h)	Ton vapor/Ton pajilla de arroz
Caldero	4	1,6	2,5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15
Relación Producción de vapor y consumo combustible (final)

	Producción de vapor (Tn/h)	Masa de Pajilla de Arroz (Ton/h)	Ton vapor/Ton pajilla de arroz
Caldero	4	1,2	3,3

Fuente: Elaboración propia

Eficiencia Inicial:

$$\eta = \left(2,5 \frac{Kg \text{ Vapor}}{Kg \text{ Comb}}\right) \frac{(1210,42 \frac{KJ}{Kg} - 273,77 \frac{KJ}{Kg})}{3622 \frac{Kcal}{Kg}} = 64,65\%$$

Eficiencia Final:

$$\eta = \left(3,3 \frac{Kg \text{ Vapor}}{Kg \text{ Comb}}\right) \frac{(1210,42 \frac{KJ}{Kg} - 273,77 \frac{KJ}{Kg})}{3622 \frac{Kcal}{Kg}} = 85,3\%$$

4.4 Evaluación de la Factibilidad Técnico-Económica del proyecto

Para poder realizar este proyecto debemos de tener en cuenta los medios y la tecnología para que se pueda llevar a cabo, y como hemos visto anteriormente si tenemos todos los instrumentos necesarios para este proyecto, eso quiere decir que si es viable técnicamente.

Ahora se evaluará el aspecto económico, en donde se calculará el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), y para ello primero se calculará la inversión:

Tabla 16
Inversión del proyecto

Equipos y Materiales	Cantidad	Costo Unitario (S/.)	Costo Total (S/.)
Aislamiento (Fibra de vidrio)	6 m	7,40 /m	45
Instalación del aislamiento	1	300	300
Analizador de Gases (aditamentos y calibración)	1	1455	1455
Capacitación del personal para el uso del Analizador de gases	1	700	700
Mantenimiento de reparación de fugas	1	2500	2500
Equipo de Ultrasonido	1	2500	2500
Capacitación del personal para el uso del Equipo de Ultrasonido	1	500	500
Mantenimiento de trampa de condensado	1	2500	2500
Total a invertir			10500

Ahora calcularemos los ahorros totales:

- Aislamiento térmico en las tuberías: el ahorro de combustible es de 5,365 Ton/año, y teniendo en cuenta que la Tonelada de pajilla de arroz tiene un costo de S/80, entonces:
El ahorro económico será de S/.430 /año

- Optimizar el exceso de aire para la combustión: el ahorro de combustible es de 150 ton/año y teniendo en cuenta que la Tonelada de pajilla de arroz tiene un costo de S/80, entonces:
El ahorro económico será de S/.12000 /año

- Reparación de fugas de vapor: el ahorro de combustible es de 924,48 ton/año y teniendo en cuenta que la Tonelada de pajilla de arroz tiene un costo de S/80, entonces:
El ahorro económico será de S/.73920,00 /año

- Correcta operación y mantenimiento de la trampa de condensados: el ahorro de combustible es de 114 ton/año y teniendo en cuenta la tonelada de pajilla de arroz tiene un costo de S/.80,00, entonces:
El ahorro económico será de S/.9120 /año

Entonces el total del ahorro económico será de S/.95470 /año

Se consume anualmente 3000 ton de pajilla de arroz, es decir se gasta S/240000/año, y si le disminuimos el ahorro, ahora el gasto será de S/.144530/año.

Los ingresos están dados por el costo del vapor producido, en este caso se produce 4000 kg de vapor/h x 8560 h/año (horas de trabajo) = 34240 Ton de vapor/año.

Primero Calcularemos el costo unitario de Energía, con la siguiente ecuación:

$$C_e = \frac{C_f}{\frac{H_f \times n}{100}} = \frac{80 \frac{\text{soles}}{\text{ton}}}{\frac{15068 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \times 60 \%}{100\%}} = S/0,008848$$

Donde:

C_f : costo unitario de la pajilla de arroz: S/.80 /ton

H_f : poder calorífico de la pajilla de arroz: 15068 KJ/kg

n : eficiencia de la caldera: 60,17%

Ahora calcularemos el costo unitario del Vapor, con la siguiente ecuación:

$$C_s = (h_s - h_f) \times C_e = (1210,42 - 273,77) \times 0,008848 = S/.8,28/ton$$

Por lo tanto el ingreso total será de: 34240 ton vapor/año x (S/.8,28 /ton de vapor) = S/.283507 /año.

Luego determinaremos un flujo de caja para un periodo de 5 años, en la siguiente tabla 17:

Tabla 17
Flujo de caja en un periodo de 5 años

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Inversión	-10500					
Combustible		-144530	-144530	-144530	-144530	-144530
Mano de Obra (Mante. Reparación de fugas) – Semestral		- 5000	-5000	-5000	-5000	-5000
Mano de Obra (Mante. Trampas de condensados) – Trimestral		-10000	-10000	-10000	-10000	-10000
Agua y Electricidad		-120000	-120000	-120000	-120000	-120000
Otros gastos		-1000	-1000	-1000	-1000	-1000
Total de Egresos (S/.)		-280530	-280530	-280530	-280530	-280530
Total de Ingresos (S/.)		283507	283507	283507	283507	283507
Flujo Efectivo Neto (S/.)		2977	2977	2977	2977	2977

Fuente: Elaboración Propia

Para calcular el Valor Actual Neto (VAN), se utiliza la siguiente ecuación:

$$VAN = -Inversión + \sum \frac{Flujo}{(1+i)^n}$$

Donde:

i: tasa de interés, en este caso tomaremos 10% (0,1)

El VAN también se puede calcular mediante un comando en el programa Excel llamado: “=vna (tasa de interés, sumatoria de los flujos) - inversión”

Y para calcular la Tasa de Interna de Retorno (TIR), se utiliza un comando en el Programa Excel llamado: “=TIR (sumatoria de flujos efectivos netos y la inversión)”.

Por lo tanto aplicando las fórmulas en el Programa Excel se obtuvo los siguientes resultados, se muestra en la siguiente tabla 18:

Tabla 18
Resultados del VAN y TIR

VAN	TIR
S/.785,20	13%

Fuente: Elaboración propia

V. Conclusiones

- Inicialmente se realizó la identificación del proceso de producción de vapor en la Destilería Naylamp EIRL, en donde se utiliza una caldera tipo acuotubular, el agua ablandada que ingresa es a 68 psi y 55°C, el combustible que se utiliza es la pajilla de arroz por su excelente poder calorífico (3622 kcal/kg), y actualmente la caldera produce 4000 kg vapor/hora a 60 psi y 115°C, y se tiene una relación de 2,5 kg de vapor/kg de pajilla de arroz. Además se identificó que tienen un consumo alto de pajilla de arroz de 3000 ton/año. Finalmente, el vapor se utiliza en el rectificado de la Melaza para que se obtenga como producto el Alcohol Eílico rectificado 96°GL.
- Posteriormente se realizó satisfactoriamente el análisis de todas las pérdidas de energía que tiene la caldera, en donde se identificó: pérdidas por humedad en la pajilla de arroz (16,68%), pérdidas por hidrógeno en la pajilla de arroz (7,5%), pérdidas por humedad en el aire (0,1%), pérdidas por purgas de la caldera (2%), pérdidas por gases secos de escape (11%), pérdidas indeterminadas (1,5%) y pérdidas por radiación (1,5%). Finalmente la evaluación energética de la caldera, nos dio como resultado una eficiencia de 60,17% (método indirecto) y 64,65% (método directo).
- Además se ha identificado los sectores con más pérdidas de energía, y se ha propuesto las siguientes estrategias de mejora: instalar 6 m de aislamiento (fibra de vidrio) en las tuberías de distribución, reducir el exceso de aire < 10%, reparar los 7 orificios de las tuberías donde presenta fugas de vapor y darle mantenimiento trimestral a las trampas de condensados. Aplicando dichas estrategias, se logrará disminuir el consumo de combustible (pajilla de arroz) de 1600 a 1200 Kg/h y se incrementará la eficiencia de la caldera de un 64,65% hasta un 85,30%.
- Finalmente para aplicar las estrategias de mejora antes mencionadas, se requiere de una inversión de S/. 10 500, en donde se ha demostrado que se puede disminuir el consumo del combustible (pajilla de arroz), y por ende su costo anual de S/. 240 000 a S/. 144 530; se ha calculado que el periodo de recuperación de la inversión es de 5 años, obteniéndose un TIR de 13% y un VAN de S/. 785,20. Por lo tanto podemos concluir que la propuesta es viable económicamente.

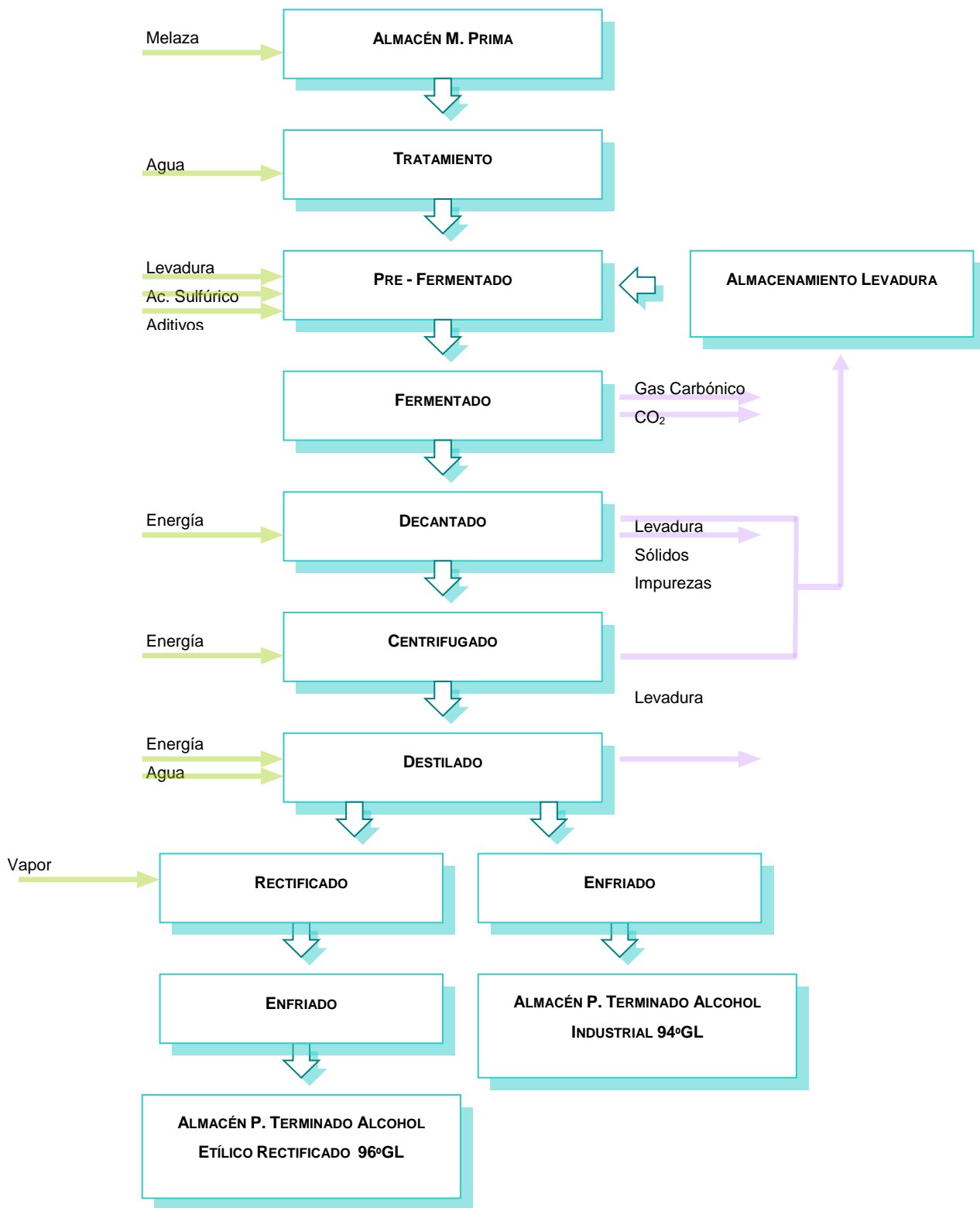
VI. Referencias

- [1] Franz, E. (2021). *Dos modelos de generación de vapor: comparación de calderas pirotubulares y calderas acuotubulares* [En línea]. Available: <https://docer.com.ar/doc/xs1x0c8>. [Último acceso: el 10 de Setiembre del 2021].
- [2] Vega, L.; Rodríguez L. (2007). *Pérdidas de presión en tuberías de vapor* [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/pdf/1815/181518011004.pdf>. [Último acceso: el 20 de Octubre del 2021].
- [3] Valles, A.; Acosta, L.; Pérez, A. (2014). *Evaluación energética de los generadores de vapor F1-2 y BH-109 de una refinería cubana de petróleo* [En línea]. Available: <https://bit.ly/3xMG9K8>. [Último acceso: el 20 de Octubre del 2021].
- [4] Mamani, C.; Ramos, F. (2018). *Optimización energética del generador de vapor (caldera) del comedor universitario de la universidad nacional del altiplano de Puno con capacidad de 150 kg de vapor/hora* [En línea]. Available: <https://bit.ly/3GbXeJx>. [Último acceso: el 20 de Octubre del 2021].
- [5] Rodas, E.; Vargas, C. (2016). *Análisis comparativo de la eficiencia térmica en la caldera bagacera N° 4 en funcionamiento convencional y con inyector secundario de aire caliente en la empresa agroindustrial Pomalca S.A.A.* [En línea]. Available: <https://bit.ly/3ogJhuN>. [Último acceso: el 20 de Octubre del 2021].
- [6] Fernández, J. (2012). *Manual de eficiencia energética para Mypes* [En línea]. Available: <https://bit.ly/3lBFhU0>. [Último acceso: el 01 de Noviembre del 2021].
- [7] Rico, E. (2018). *Eficiencia energética en la generación y distribución de vapor* [En línea]. Available: <https://bit.ly/3DspigP>. [Último acceso: el 15 de Noviembre del 2021].

- [8] Barrera, C. (2018). *Principios básicos de la combustión* [En línea]. Available: <https://bit.ly/3DoKnsI>. [Último acceso: el 16 de Noviembre del 2021].
- [9] Vega, S; Arze, C. (2011). *Guía de buenas prácticas en eficiencia energética para sistemas de vapor* [En línea]. Available: <https://bit.ly/3DoQfCc>. [Último acceso: el 20 de Noviembre del 2021].
- [10] Ministerio de energía y minas (2009). *Guía de estándares mínimos de eficiencia energética* [En línea]. Available: <https://bit.ly/3orLSCe>. [Último acceso: el 20 de Noviembre del 2021].
- [11] Oelker, A. (2011). *Auditorías energéticas* [En línea]. Available: <https://bit.ly/3lF78m9>. [Último acceso: el 20 de Noviembre del 2021].
- [12] Slideshare (2015). *Tablas de propiedades termodinámicas* [En línea]. Available: <https://bit.ly/3pzhDIW>. [Último acceso: el 25 de Noviembre del 2021].

VII. Anexos

Anexo N°1: Esquema del proceso de la Destilería de Alcohol Naylamp E.I.R.L



Fuente: Destilería NAYLAMP E.I.R.L.

Anexo N°2: Especificaciones Técnicas de la Fibra de Vidrio

Fuente: Proveedor (Hongli Insulation And Building Material Factory)

Marca: Huamei

Número de Modelo: CW-09

Ancho: 1200 mm

Densidad: 10 kg/m³ – 48 kg/m³

Longitud: 2000 mm – 20000 mm

Grosor: 25 mm – 200 mm

Anexo N°3: Especificaciones técnicas del Analizador de Gases

Fuente: <http://www.pce-instruments.com/> (consultado el 20 octubre, 2021)

Rango medición de CO₂: 0 – 9999 ppm

Temperatura: -10°C – 80°C

Humedad relativa: 0.1% - 99.9%

Precisión CO₂: +50 ppm + 5% de lectura

Tiempo de respuesta < 30 seg.

Pantalla LCD 26 x 44 mm

Anexo N°4: Especificaciones técnicas del Equipo Ultrasonido

Fuente: www.cyti.com (consultado 15 octubre, 2021)

Marca: Panametrics NDT

Modelo: Epoch III

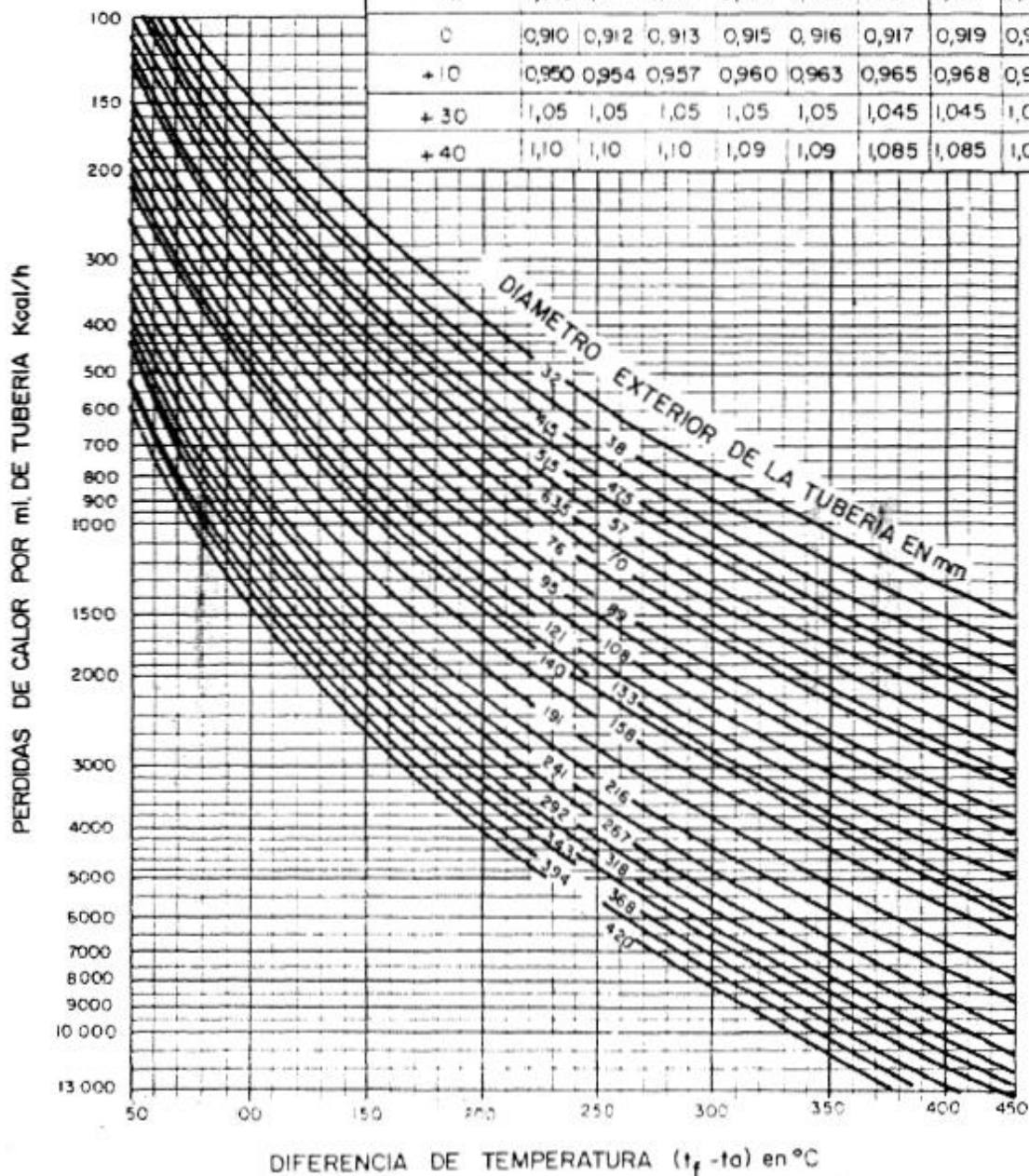
Rango de medición: 1.5 mm a 5 mm mm

Resolución de medición: 5ns

Anexo N°5: Ábaco de Wrede

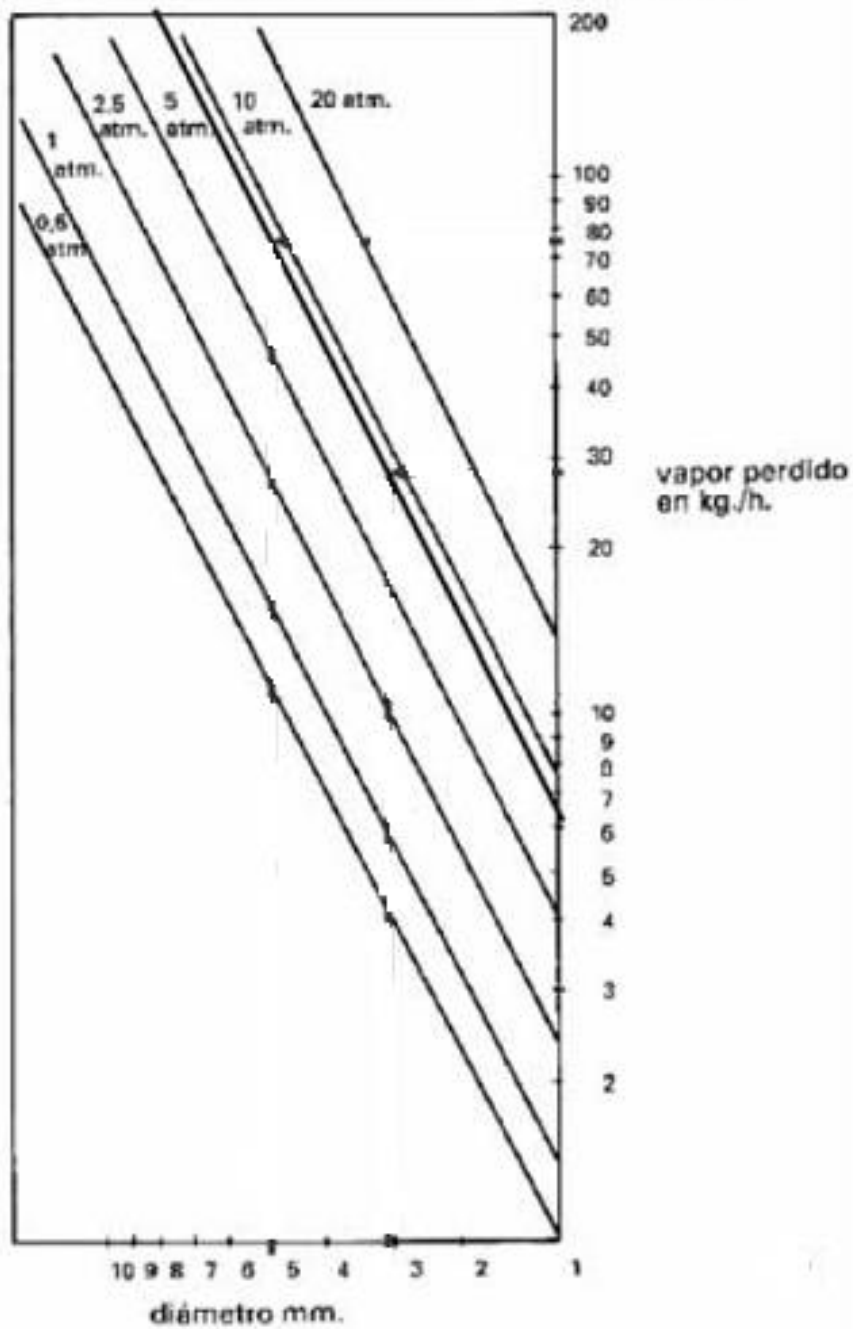
FACTOR POR EL CUAL SE DEBE MULTIPLICAR LA PERDIDA DE CALOR PARA TEMPERATURAS AMBIENTES DIFERENTES DE 20°C

TEMPERATURA DEL AIRE EN °C	DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE EL FLUIDO Y EL AIRE AMBIENTE EN °C								
	50	100	150	200	250	300	350	400	450
- 10	0,870	0,874	0,877	0,880	0,883	0,885	0,887	0,890	0,892
0	0,910	0,912	0,913	0,915	0,916	0,917	0,919	0,920	0,921
+ 10	0,950	0,954	0,957	0,960	0,963	0,965	0,968	0,970	0,972
+ 30	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,045	1,045	1,04	1,04
+ 40	1,10	1,10	1,10	1,09	1,09	1,085	1,085	1,08	1,08



Anexo N°6: Tabla fugas de vapor

Fugas de vapor a la atmósfera a través de un orificio



Anexo N°7: Tabla de Propiedades Vapor de Agua sobrecalentado

TABLA A-6

Vapor de agua sobrecalentado

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$P = 0.01 \text{ MPa (45.81°C)*}$				$P = 0.05 \text{ MPa (81.32°C)}$				$P = 0.10 \text{ MPa (99.61°C)}$				
Sat. ¹	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	3.5655	3132.2	3488.7	8.8362
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201	4.0279	3302.8	3705.6	9.0999
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056	8.9813	3480.6	3929.7	9.6626	4.4900	3480.4	3929.4	9.3424
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312	9.9047	3665.2	4160.4	9.8883	4.9519	3665.0	4160.2	9.5682
900	54.143	3856.9	4398.3	10.8429	10.8280	3856.8	4398.2	10.1000	5.4137	3856.7	4398.0	9.7800
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429	11.7513	4055.2	4642.7	10.3000	5.8755	4055.0	4642.6	9.9800
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326	12.6745	4259.9	4893.7	10.4897	6.3372	4259.8	4893.6	10.1698
1200	67.989	4470.9	5150.8	11.4132	13.5977	4470.8	5150.7	10.6704	6.7988	4470.7	5150.6	10.3504
1300	72.604	4687.4	5413.4	11.5857	14.5209	4687.3	5413.3	10.8429	7.2605	4687.2	5413.3	10.5229
$P = 0.20 \text{ MPa (120.21°C)}$				$P = 0.30 \text{ MPa (133.52°C)}$				$P = 0.40 \text{ MPa (143.61°C)}$				
Sat.	0.88578	2529.1	2706.3	7.1270	0.60582	2543.2	2724.9	6.9917	0.46242	2553.1	2738.1	6.8955
150	0.95986	2577.1	2769.1	7.2810	0.63402	2571.0	2761.2	7.0792	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306
200	1.08049	2654.6	2870.7	7.5081	0.71643	2651.0	2865.9	7.3132	0.53434	2647.2	2860.9	7.1723
250	1.19890	2731.4	2971.2	7.7100	0.79645	2728.9	2967.9	7.5180	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804
300	1.31623	2808.8	3072.1	7.8941	0.87535	2807.0	3069.6	7.7037	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677
400	1.54934	2967.2	3277.0	8.2236	1.03155	2966.0	3275.5	8.0347	0.77265	2964.9	3273.9	7.9003
500	1.78142	3131.4	3487.7	8.5153	1.18672	3130.6	3486.6	8.3271	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933
600	2.01302	3302.2	3704.8	8.7793	1.34139	3301.6	3704.0	8.5915	1.00558	3301.0	3703.3	8.4580
700	2.24434	3479.9	3928.8	9.0221	1.49580	3479.5	3928.2	8.8345	1.12152	3479.0	3927.6	8.7012
800	2.47550	3664.7	4159.8	9.2479	1.65004	3664.3	4159.3	9.0605	1.23730	3663.9	4158.9	8.9274
900	2.70656	3856.3	4397.7	9.4598	1.80417	3856.0	4397.3	9.2725	1.35298	3855.7	4396.9	9.1394
1000	2.93755	4054.8	4642.3	9.6599	1.95824	4054.5	4642.0	9.4726	1.46859	4054.3	4641.7	9.3396
1100	3.16848	4259.6	4893.3	9.8497	2.11226	4259.4	4893.1	9.6624	1.58414	4259.2	4892.9	9.5295
1200	3.39938	4470.5	5150.4	10.0304	2.26624	4470.3	5150.2	9.8431	1.69966	4470.2	5150.0	9.7102
1300	3.63026	4687.1	5413.1	10.2029	2.42019	4686.9	5413.0	10.0157	1.81516	4686.7	5412.8	9.8828
$P = 0.50 \text{ MPa (151.83°C)}$				$P = 0.60 \text{ MPa (158.83°C)}$				$P = 0.80 \text{ MPa (170.41°C)}$				
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1	6.8207	0.31560	2566.8	2756.2	6.7593	0.24035	2576.0	2768.3	6.6616
200	0.42503	2643.3	2855.8	7.0610	0.35212	2639.4	2850.6	6.9683	0.26088	2631.1	2839.8	6.8177
250	0.47443	2723.8	2961.0	7.2725	0.39390	2721.2	2957.6	7.1833	0.29321	2715.9	2950.4	7.0402
300	0.52261	2803.3	3064.6	7.4614	0.43442	2801.4	3062.0	7.3740	0.32416	2797.5	3056.9	7.2345
350	0.57015	2883.0	3168.1	7.6346	0.47428	2881.6	3166.1	7.5481	0.35442	2878.6	3162.2	7.4107
400	0.61731	2963.7	3272.4	7.7956	0.51374	2962.5	3270.8	7.7097	0.38429	2960.2	3267.7	7.5735
500	0.71095	3129.0	3484.5	8.0893	0.59200	3128.2	3483.4	8.0041	0.44332	3126.6	3481.3	7.8692
600	0.80409	3300.4	3702.5	8.3544	0.66976	3299.8	3701.7	8.2695	0.50186	3298.7	3700.1	8.1354
700	0.89696	3478.6	3927.0	8.5978	0.74725	3478.1	3926.4	8.5132	0.56011	3477.2	3925.3	8.3794
800	0.98966	3663.6	4158.4	8.8240	0.82457	3663.2	4157.9	8.7395	0.61820	3662.5	4157.0	8.6061
900	1.08227	3855.4	4396.6	9.0362	0.90179	3855.1	4396.2	8.9518	0.67619	3854.5	4395.5	8.8185
1000	1.17480	4054.0	4641.4	9.2364	0.97893	4053.8	4641.1	9.1521	0.73411	4053.3	4640.5	9.0189

Anexo N°8: Tabla de Propiedades Agua saturada

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $kJ/kg \cdot K$		
		Líquido, v_f	Vapor sat., v_g	Líquido, u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líquido, h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líquido, s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.00	0.001108	0.27344	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.9	1.9922	4.7142	6.7067