



FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

**“Análisis Energético A La Caldera Pirotubular A Carbón Para Reducir
Costos De Producción De Vapor E Impactos Medioambientales En La
Empresa Piel Trujillo SAC”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

AUTOR:

RAUL RISCO ALVAREZ

ASESOR:

ING. RAUL PAREDES ROSARIO

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

GENERACIÓN, TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN

TRUJILLO – PERÚ

2019

PÁGINA DEL JURADO

“Análisis Energético A La Caldera Piro-tubular A Carbón Para Reducir Costos De Producción De Vapor E Impactos Medioambientales En La Empresa Piel Trujillo SAC”

MIEMBROS DEL JURADO

ING. ELI GUAYAN HUACCHA
(SECRETARIO)

Mg. RAÚL PAREDES ROSARIO
(VOCAL)

ING. LUIS JULCA VERASTEGUI
(PRESIDENTE)

DEDICATORIA

Para **Dios**, que me guía hasta ahora, dándome fuerzas y salud para poder seguir en ese camino del crecimiento profesional y personal.

A mi familia, por estar siempre a mi lado aconsejándome para ser un buen profesional y lograr cumplir mis metas.

AGRADECIMIENTO

El agradecimiento al esfuerzo y sacrificio de **mis padres** por apoyarme económicamente para poder cumplir mi meta de ser un profesional competente, el cual será retribuido de igual manera.

A mis **compañeros** de pre grado de la universidad que me apoyaron en este trayecto académico y que se volvieron parte de mi entorno amical, gracias por estar en los buenos y malos momentos.

A mi asesor especialista **Raul Paredes Rosario**, por tener la paciencia de brindarme sus conocimientos y experiencias, el cual me permitió darme un panorama real del crecimiento académico y laboral, que me llevo a la culminación de mi grado académico.

A todos mis **docentes** de la universidad Cesar Vallejo por las enseñanzas en el trayecto de mi formación académica, aprendí mucho de cada uno de ellos, lo que me permitió culminar con éxito.

DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD

Yo Raul Risco Risco Alvarez con DNI N° 46755597, a efecto de cumplir con las disposiciones vigentes consideradas en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, declaro bajo juramento que toda la documentación que acompaño es veraz y auténtica. Así mismo, declaro también bajo juramento que todos los datos e información que se presenta en la presente tesis son auténticos y veraces.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas de la Universidad César Vallejo.

Trujillo, 05 de Abril del 2019.

Raul Risco Risco Alvarez

PRESENTACIÓN

Señores miembros del Jurado:

En cumplimiento del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad César Vallejo presento ante ustedes la Tesis titulada “Análisis Energético A La Caldera Pirotubular A Carbón Para Reducir Costos De Producción De Vapor E Impactos Medioambientales En La Empresa Piel Trujillo SAC”.

La misma que someto a vuestra consideración y espero que cumpla con los requisitos de aprobación para obtener el título Profesional de Ingeniero Mecánico Electricista.

El Autor (Raul Risco Risco Alvarez)

Índice

PÁGINA DEL JURADO.....	II
AGRADECIMIENTO.....	4
DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD.....	5
PRESENTACIÓN.....	6
I. INTRODUCCION.....	11
1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	11
1.2. TRABAJOS PREVIOS.....	13
1.3. TEORÍAS RELACIONADAS AL TEMA.....	15
1.3.1. Calderas pirotubulares.....	15
1.3.2. Rendimiento de la caldera pirotubular.....	16
1.3.3. Ablandamiento de agua por intercambio iónico.....	22
1.3.4. Aislamiento térmico – fibra de vidrio.....	25
1.3.5. Economizador de caldera.....	28
1.3.6. Carbón antracita.....	30
1.4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	32
1.5. JUSTIFICACION DEL ESTUDIO.....	32
1.5.1. Justificación tecnológica.....	32
1.5.2. Justificación económica.....	32
1.5.3. Justificación ambiental.....	32
1.6. HIPOTESIS.....	32
1.7. OBJETIVOS.....	33
1.7.1. Objetivo general.....	33
1.7.2. Objetivos específicos.....	33
II. MÉTODO.....	34
2.1. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: No experimental- descriptivo.....	34
2.2. VARIABLES, OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	35
2.2.1. Variable independiente.....	35
2.2.2. Variables dependientes.....	35
2.2.3. Operacionalización de variables.....	36
2.3. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	37
2.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS, VALIDEZ Y CONFIABILIDAD.....	37
2.5. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DATOS.....	38

2.6.	ASPECTOS ÉTICOS	38
III.	RESULTADOS	39
3.1.	Obtención de datos	39
3.2.	Diagramas del proceso térmico actual y en estado de mejora	41
3.2.1.	Diagrama actual del proceso térmico de la caldera pirotubular	41
3.2.2.	Diagrama del proceso térmico de la caldera pirotubular en estado de mejora 42	
3.3.	Rendimiento actual de la caldera pirotubular	43
3.3.1.	Perdidas fijas y variables de la caldera pirotubular	43
3.3.2.	Rendimiento promedio durante los 3 días de operación de la caldera en estado actual	51
3.4.	Medidas correctivas para reducir pérdidas energéticas e impacto medioambientales	53
3.4.1.	Dimensionamiento de un pre calentador de aire	53
3.4.3.	Ablandador de agua para calderas	63
3.5.	Cálculo del rendimiento de la caldera con las mejoras implementadas ..	66
3.5.1.	Cálculo de calor total “Qtotal” con el aire precalentado	66
3.5.2.	Cálculo de las perdidas fijas y variables en estado de mejora	66
3.5.3.	Rendimiento nuevo	68
3.6.	Análisis económico	68
3.6.1.	Costo de generación de vapor actual	68
3.6.2.	Costo total de generación de vapor después de las mejoras	70
3.7.	Análisis medio ambiental	72
3.7.1.	Balance de combustión actual	72
3.7.2.	Balance de combustión con las mejoras	73
IV.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	75
V.	CONCLUSIONES	77
VI.	REFERENCIAS	79
VII.	ANEXOS	81

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo principal realizar un análisis energético a la caldera pirotubular a carbón, para conocer el estado actual y así proponer la implementación de mejoras que ayuden a reducir los costos de generación de vapor y a su vez reducir las emisiones de gases nocivos al medio ambiente. Se inició con la toma de medidas tales como de presión, temperatura y de diseño de la caldera pirotubular, el cual aplicando un método indirecto se determinó el rendimiento actual en un 55%. Luego se planteó reducir las pérdidas energéticas para aumentar el rendimiento. Se propuso la implementación de un pre calentador de aire para aprovechar la energía que se iba hacia el medio ambiente, con ello se redujo en un 4% las pérdidas por gases residuales. También se propuso que la caldera cuente un sistema de ablandamiento de agua, esto redujo las pérdidas por purga en un 1.5%. A su vez se recomendó la mejora del aislamiento térmico de la caldera, con ello redujo en 5.6% por convección y 0.36% en el hogar en pérdidas energéticas. Con estas mejoras el nuevo rendimiento de la caldera pirotubular se determinó en un 65%, esto se reflejó en los costos de generación obteniendo un beneficio de s/. 6600.00 anuales. Finalmente se realizó un análisis medioambiental, donde las emisiones por CO₂ se redujeron en un 4.1% lo que demuestra un factibilidad tanto ambiental, como económica para esta investigación.

Palabras claves: análisis energético, caldera pirotubular, curtiembre.

ABSTRACT

The main objective of this research was to perform an energy analysis of the coal-fired boiler, in order to know the current status and thus propose the implementation of improvements that help reduce the costs of steam generation and at the same time reduce the emissions of harmful gases to the environment. It began with the taking of measures such as pressure, temperature and design of the pirotubular boiler, which, using an indirect method, determined the current yield by 55%. Then it was proposed to reduce energy losses to increase performance. It was proposed the implementation of an air pre-heater to take advantage of the energy that was going to the environment, thereby reducing losses by residual gases by 4%. It was also proposed that the boiler have a water softening system, this reduced the purge losses by 1.5%. At the same time, the improvement of the thermal insulation of the boiler was recommended, with it reduced in 5.6% by convection and 0.36% in the home in energy losses. With these improvements, the new performance of the pirotubular boiler was determined by 65%, this was reflected in the generation costs obtaining a benefit of s /. 6600.00 per year. Finally, an environmental analysis was carried out, where CO₂ emissions were reduced by 4.1%, which demonstrates both environmental and economic feasibility for this research.

Keywords: energetic analysis, pirotubular boiler, tannery.

I. INTRODUCCION

1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA

En el mundo, la generación de energía es fundamental para el desarrollo industrial de cada país. Según Informe sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo (UNESCO, 2014), El consumo mundial de energía aumentó en un 186 % entre 1973 y el 2010; en el mismo período, el consumo en la industria aumentó en un 157 %. El cual ha reducido los costos de producción, debido al aprovechamiento de los recursos hídricos, que según Informe sobre el desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo (UNESCO, 2014), las oportunidades de ahorro energético en la industria, se traducen en una potencial mejora de un 26 % a nivel mundial y en más de un 75 % en los países en desarrollo o economías en transición. Esto resultaría en un ahorro del 3 % al 4 % en el costo total de producción. El cual ha llevado a implementar múltiples formas que aprovechen los recursos naturales para generar, transmitir y distribuir dicha energía.

Una de estas formas energéticas, son a través de las calderas. El cual tiene un paso fundamental dentro de las industrias, porque permite generar vapor a raíz de un recurso líquido como es el agua y por medio de un combustible que eleva a altas temperaturas, convierte este recurso líquido a vapor, para luego ser transportado por medio de tuberías hasta llegar a su destino final que es el aprovechamiento de este, donde la mezcla aire-combustible es un parámetro muy importante en las calderas. Según datos del estudio de buenas prácticas de ahorro y eficiencia energética (Fondo nacional del ambiente, 2013), lo ideal es tener un 15% a 25% de exceso de aire. Si el nivel mínimo del aire es mayor entonces tendremos un mayor consumo de combustible.

En nuestro país, en el sector manufactura de pieles de ganado, es fundamental contar con un caldero eficiente que permita llevar a cabo los procesos para la elaboración del cuero. Ya que la demanda energética en este sector es bastante alta, tanto en energía eléctrica como en térmica, que según datos del estudio de buenas prácticas de ahorro y eficiencia energética (fondo nacional del ambiente, 2013), el consumo en energía eléctrica en una curtiembre es del 45% del consumo energético total de una empresa, mientras que el 48% es de

energía térmica. Por ellos se debe de reducir costos de producción de vapor aumentando la eficiencia.

En la empresa PIEL TRUJILLO SAC, dedicada al curtido, adobo y teñido de pieles de vacuno, ubicada en El Porvenir, cuenta con un caldero pirotubular a carbón que permite llevar a cabo su proceso de producción de cuero.

Actualmente el rendimiento de la caldera es de 54.16% (tabla 16), esto se debe a las deficiencias que presenta. Uno de ello es que no cuenta con un sistema de tratamiento del agua que se utiliza para la generación de vapor. El agua ingresa con una dureza de 388 ppm y 674 ppm de solidos totales disueltos (anexo 6).

También se puede observar el deterioro de aislamiento térmico en algunos sectores de la caldera. La temperatura de la pared de caldera con el aislamiento actual es de 65°C en promedio (tabla 6,7 y 8).

Otro aspecto importante es que no cuentan con un recuperador de calor de los gases de combustión. Además de que estos gases se expulsan hacia el medio ambiente lo que puede perjudicar, tanto a los trabajadores, como a la población de los alrededores de la empresa. La temperatura de los gases residuales es en promedio de 174 °C (tabla 6,7 y 8).

La caldera quema 5000 kg en promedio de carbón al mes (tabla 6,7 y 8), los costos de producción de vapor en promedio son de s/. 5300.00 al mes.

Por tal motivo, se plantea hacer un análisis energético a la caldera pirotubular a carbón para reducir costos de producción de vapor e impactos medioambientales en la empresa piel Trujillo SAC.

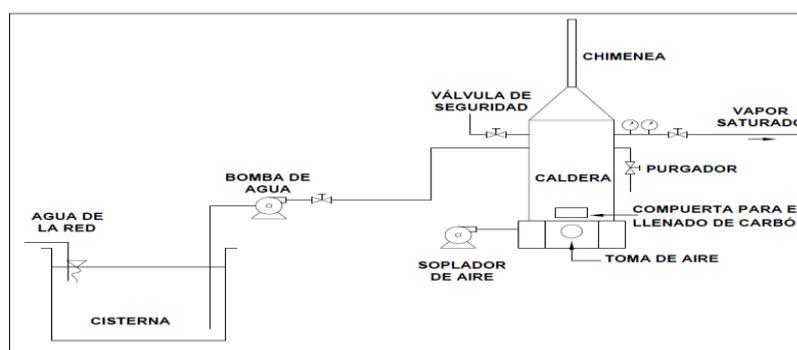


FIGURA 01: esquema actual de la caldera pirotubular de la empresa Piel Trujillo SAC.

1.2. TRABAJOS PREVIOS

GARCÍA, Erick (2011), en su tesis “Ahorro Energético Aplicado al Rediseño de Calderas y la Administración de sus Recursos”, por optar el grado de ingeniero mecánico industrial de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Llegó a la conclusión que el rediseño del aislamiento térmico de la caldera permitió un aumento en la eficiencia en 1%; el cual representa un ahorro de 1.25% en el consumo de combustible.

Por otro lado, IBÁÑEZ, Carlos (2012), en su tesis “Propuesta de mejoras para la actividad de los hornos y calderas de una refinería para reducir el impacto ambiental generado, estableciendo pautas para la implementación de un sistema de gestión ambiental”, por optar el grado de ingeniero industrial de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima. Llegó a la conclusión de que puesto que el consumo de energía no renovable es el aspecto ambiental crítico con mayor impacto, tanto en la actividad empresarial de la planta como en el medio ambiente, en esta tesis se optó por brindar dos propuestas concernientes a este aspecto, además del cambio de matriz energética. Ambas soluciones están relacionadas con el tema de eficiencia energética y se aplicaron una a cada dispositivo objetivo. Para el caso de hornos industriales, la propuesta fue disminuir el calor perdido en las paredes del mismo aplicando capas de aislamiento. Por otra parte, para el caso de las calderas, la propuesta fue la implementación de un sistema economizador capaz de reducir la energía de alimentación aplicando las leyes de la termodinámica. Se dice que ambas propuestas están relacionadas con la eficiencia energética pues el objetivo es que la distribución de la energía en el circuito termodinámico, tanto de las calderas como de los hornos, sea orientado al ahorro de costos. Teniendo en cuenta que, aunque ambos dispositivos son de distinta naturaleza y pertenecen a distintos procesos de la refinación de petróleo, las medidas de eficiencia energética permitieron ahorros considerables en el consumo de combustible. De tal forma, es posible admitir que las medidas de eficiencia energética aplicadas al ahorro de consumo de combustible son de suma utilidad para el trabajo con máquinas y dispositivos industriales.

También, UCEDA, Anthony (2014), en su tesis “Utilización Racional de los Gases Residuales, en el Precaentamiento de Aire de las Calderas Piro tubulares De la Empresa SIDERPERU Con La Finalidad De Reducir El Consumo De Combustible”, por optar el grado de ingeniero mecánico de la Universidad Cesar Vallejo, Trujillo. Llegó a la conclusión que:

En ambas calderas la reducción del consumo de combustible se estimó en 8.942%, considerando pérdidas de calor en las purgas y radiación de las mismas respectivamente.

El desarrollo del cálculo para la caldera de 1100 BHP, permitió precalentar el aire de combustión hasta una temperatura considerable de 120°C, lo que se refleja en la reducción del consumo de combustible y el incremento del rendimiento térmico en 4.43%, para condiciones de trabajo normales, produciendo un ahorro anual de \$ 1065074.82.

Asimismo, CARBAJAL, Roland (2013), en su tesis “Análisis del rendimiento energético de la caldera piro tubular APIN de 400 BHP a través del método indirecto en la empresa ALICORP-Trujillo”, por optar el grado de ingeniero mecánico de la Universidad Cesar Vallejo, Trujillo. Llegó a la conclusión que:

Las pérdidas porcentuales de la caldera en estado actual son: por gases residuales 14.92%, por purgas 3.8%, por hollín 0.78%, combustión incompleta 1.10%, por radiación 0.91%. Obteniendo un rendimiento actual de 78%.

Las pérdidas en mejoras de este estudio son: por gases residuales 7%, por purgas 0.19%, por radiación, 0.9%, por hollín, 0.29%, por combustión incompleta 0.6% y por convección 0.28%. Alcanzando un rendimiento de 90.55%.

1.3. TEORÍAS RELACIONADAS AL TEMA

1.3.1. Calderas pirotubulares

Son aquellas calderas en las que los gases de la combustión circulan por el interior de los tubos y el líquido se encuentra en un recipiente atravesado por dichos tubos. Son de aplicación principalmente cuando la presión de trabajo es inferior a los 22 bar.

Por su diseño, tienen un gran volumen de agua que les permite adaptarse mejor a las variaciones de la instalación que las acuotubulares. (Uceda, 2012)

a. Clasificación:

Según la presión de trabajo las calderas pirotubulares se clasifican en:

- Baja presión: menores a 20kg/cm² ó 19.60 bar
- Media presión: de 20 – 64 kg/cm² ó 19.60 – 62.76 bar.

En nuestro medio, el sector curtiembre normalmente utiliza calderos de baja presión. (Montalvo, 2000)

b. Componentes de las calderas pirotubulares

• Envoltente exterior o virola exterior

Este elemento es de forma cilíndrica y es el encargado de contener los fluidos (agua/vapor) y evitar que salgan al exterior, en la misma va montadas las tubuladuras de control y supervisión, tales como los controles de nivel, los indicadores ópticos de nivel y orificios de inspección del lado de agua, etc. (Uceda, 2012)

• Cámara de combustión u hogar de combustión

La cámara de combustión, de construcción cilíndrica y disposición horizontal, puede fabricarse en ejecución lisa u ondulada, en función del tamaño de la caldera y de la presión de trabajo de la misma. Es la encargada de contener la llama del quemador e iniciar el intercambiador de energía por radiación. (Uceda, 2012)

- **Cenicero**

Es el espacio que queda bajo la parrilla y que sirve para recibir las cenizas que caen de ésta. Los residuos acumulados deben retirarse periódicamente para no obstaculizar el paso de aire necesario para la combustión. En algunas calderas el cenicero es un depósito de agua. (Montalvo, 2000)

- **Chimenea**

Es el conjunto de salida de los gases y humos de la combustión para la atmósfera. Además tiene como función producir el tiro necesario para obtener una adecuada combustión. (Montalvo, 2000)

- **Regulador de tiro o templador**

Consiste en una compuerta metálica instalada en el conducto de humo que comunica con la chimenea o bien en la chimenea misma. Tiene por objeto dar mayor o mejor paso a la salida de los gases y humos de la combustión. (Montalvo, 2000)

Este accesorio es accionado por el operador de la caldera para regular la cantidad de aire en la combustión, al permitir aumentar (al abrir) o disminuir (al cerrar) el caudal. Generalmente, se usa una combinación con la puerta del cenicero. (Montalvo, 2000)

1.3.2. Rendimiento de la caldera pirotubular

El cálculo de rendimiento de los generadores de calor se puede llevar a cabo mediante dos métodos: método directo e indirecto. (Gonzales y otros, 2015)

a. Método directo

Con este método, el rendimiento se obtiene mediante dos mediciones: por un lado, la del caudal del fluido tanto de entrada como a la salida de la caldera y por el otro la de la energía del combustible. (Gonzales y otros, 2015)

$$\eta_{caldera} = \frac{\dot{m}_v * (h_v - h_{agua})}{\dot{m}_{cble} * (PCI + h_{cble} + R_{a-cble} * h_a)} \dots \dots \dots \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

η_{caldera} : Rendimiento energético de la caldera [%]

\dot{m}_v : flujo másico de vapor [$\frac{\text{Kg}}{\text{s}}$]

h_v : Entalpía del vapor producido [$\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$]

h_{agua} : Entalpía del líquido saturado del agua [$\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$]

\dot{m}_{cble} : Flujo másico de combustible [$\frac{\text{Kg}}{\text{s}}$]

PCI: Poder calorífico inferior del combustible [$\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$]

$R_{\text{a-cble}}$: Relación de aire y combustible [$\frac{\text{kg aire}}{\text{kg cble}}$]

h_a : Entalpía del aire [$\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$]

b. Método indirecto

Determina la eficiencia energética instantánea de la caldera. Para esto se evalúa las principales pérdidas de calor, lo cual permite conocer no solo como se distribuye el calor aportado por el combustible, sino también facilitar la evaluación de las actuaciones para mejorar la eficiencia energética de la caldera. (Carbajal, 2013)

$$\eta_{\text{caldera}} = 100\% - (q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)\% \dots \dots \dots \text{Ec. (2)}$$

Dónde:

q_1 : Pérdidas en el hogar [%]

q_2 : Pérdidas por inquemados [%]

q_3 : Pérdidas por combustión incompleta [%]

q_4 : Pérdidas por purgas [%]

q_5 : Pérdidas por convección [%]

- **Pérdidas en el hogar**

Calor que participa en las paredes del hogar.

$$q_1 = \frac{\dot{Q}_{P-h}}{\dot{Q}_t} * 100 \dots \dots \dots \text{Ec. (2.1)}$$

Dónde:

\dot{Q}_{ph} : Calor perdido en las paredes del hogar [KW]

\dot{Q}_t : calor total producido por la caldera [KW]

(Carbajal, 2013)

El calor perdido en las paredes del hogar está dado por la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{P-h} = S_h * \sigma_B * (T_{llama}^4 - T_p^4) * 10^{-3} \dots \dots \dots \text{Ec. (2.1.1)}$$

Dónde:

S_h : superficie del hogar [m²]

σ_B : constante de Boltzmann [$5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$]

T_{llama} : Temperatura de llama [K]

T_p : Temperatura del la pared del hogar [K]

(Carbajal, 2013)

- **Pérdidas por inquemados**

Cuando la reacción de combustión entre combustible y comburente no se efectúa de forma correcta, se genera monóxido de carbono (CO) en forma de inquemados que suele acarrear pérdidas térmicas en la instalación. (Gonzales y otros, 2015)

$$q_2 = \frac{\dot{Q}_{P-inq}}{\dot{Q}_t} * 100 \dots \dots \dots \text{Ec. (2.2)}$$

Donde el calor perdido por inquemados, está dado por la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{P-inq} = g_c * \dot{m}_{GC} * PCI_C \dots \dots \dots \text{Ec. (2.2.1)}$$

Dónde:

\dot{Q}_{P-inq} : Calor perdido por inquemados [KW]

g_c : participación másica del carbono [%]

\dot{m}_{GC} : Flujo másico de los gases de combustión [$\frac{Kg}{s}$]

PCI_C : Poder calorífico inferior del carbono [$\frac{KJ}{Kg}$]

- **Pérdidas por combustión incompleta**

Es la pérdida asociada a la presencia de productos de combustión incompleta (CO, H₂ y CH₄), en los gases de combustión y que está provocada por la no entrega del poder calorífico de los mismos durante la reacción de combustión. (Carbajal, 2013)

$$q_3 = \frac{\dot{Q}_{P-CO}}{\dot{Q}_t} * 100 \dots \dots \dots \text{Ec. (2.3)}$$

En el cual:

$$\dot{Q}_{P-CO} = g_{CO} * \dot{m}_{GC} * PCI_{CO} \dots \dots \dots \text{Ec. (2.3.1)}$$

Dónde:

\dot{Q}_{P-CO} : Calor perdido por combustion incompleta [KW]

g_{CO} : Participación másica del monoxido de carbono [%]

PCI_{CO} : poder calorifico del moxido de carbono [$\frac{KJ}{Kg}$]

- **Pérdidas por purgas**

La purga que se realiza con el propósito de mantener las condiciones físico-químicas del agua en el interior de un sistema de generación de vapor, puede causar desperdicio de energía bastante significativo. (Carbajal, 2013)

$$q_4 = \frac{\dot{Q}_{P-purgas}}{\dot{Q}_t} * 100 \dots \dots \dots \text{Ec. (2.4)}$$

En el cual:

$$\dot{Q}_{P-purgas} = \dot{m}_{purga} * (h_{liq\ sat} - h_{\infty}) * 10^{-3} \dots \dots \dots \text{Ec. (2.4.1)}$$

Dónde:

$\dot{Q}_{P-purgas}$: Calor perdido por purgas [KW]

\dot{m}_{purga} : Flijo másico de purgas $\left[\frac{Kg}{s}\right]$

$h_{liq\ sat}$: Entalpía del agua a la presión del vapor $\left[\frac{KJ}{Kg}\right]$

h_{∞} : Entalpía del agua a temperatura ambiente $\left[\frac{KJ}{Kg}\right]$

$$\dot{m}_{purga} = \frac{TSD_{oper}}{TSD_{m\acute{a}x} - TSD_{oper}} * \dot{m}_v \dots \dots \dots \text{Ec. (5.4.1.1)}$$

Dónde:

TSD_{oper} : Sólidos totales disueltos en el agua [ppm]

$TSD_{m\acute{a}x}$: Sólidos totales disueltos máximo de la caldera [ppm]

\dot{m}_v : flujo másico de vapor $\left[\frac{Kg}{s}\right]$

- **Pérdidas por convección**

Son las que genera la caldera con su entorno a través de la superficie exterior. (Carbajal, 2013)

$$q_5 = \frac{\dot{Q}_{P\text{-conv}}}{\dot{Q}_t} * 100 \dots \dots \dots \text{Ec. (2.5)}$$

Para ello se utiliza la ecuación de Newton, que está dada por:

$$\dot{Q}_{P\text{-conv}} = h_{p\text{-}\infty} * S_L * (\bar{T}_p - \bar{T}_\infty) * 10^{-3} \dots \dots \dots \text{Ec. (2.5.1)}$$

Dónde:

$\dot{Q}_{P\text{-conv}}$: Calor perdido por convección [KW]

$h_{p\text{-}\infty}$: Coeficiente de transferencia de calor $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

S_L : Superficie lateral exterior de la caldera [m²]

\bar{T}_p : Temperatura media de la pared exterior de la caldera [°C]

\bar{T}_∞ : Temperatura media del ambiente [°C]

Para el coeficiente de transferencia de calor se utiliza la siguiente ecuación:

$$h_{p\text{-}\infty} = 11.6 + 6.96 * \sqrt{\bar{U}_{\text{viento}}} \dots \dots \dots \text{Ec. (2.5.1.1)}$$

Dónde:

\bar{U}_{viento} : Velocidad media del viento $\left[\frac{m}{s} \right]$

La ecuación para la superficie lateral exterior, está dada por:

$$S_L = \pi * D_{\text{ext}} * L \dots \dots \dots \text{Ec. (2.5.1.2)}$$

Dónde:

D_{ext} : Diámetro exterior de la caldera [m]

L: Longitud de la caldera [m]

- **Perdidas por gases residuales**

Es el calor contenido en los productos y subproductos de un proceso de combustión. (Carbajal, 2013)

$$q_6 = \frac{\dot{Q}_{P-GR}}{\dot{Q}_t} * 100 \dots \dots \dots \text{Ec. (2.6)}$$

En el cual:

$$\dot{Q}_{P-GR} = \dot{m}_{GC} * (h_{GR} - h_{\infty}) \dots \dots \dots \text{Ec. (2.6.1)}$$

Dónde:

\dot{Q}_{P-GR} : Calor perdido por los gases residuales [KW]

\dot{m}_{GC} : Flujo másico de los gases residuales $\left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}} \right]$

h_{GR} : Entalpía de los gases residuales $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$

h_{∞} : Entalpía del aire a temperatura ambiente $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$

1.3.3. Ablandamiento de agua por intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso mediante el cual se hace pasar agua dura por la resina de intercambio iónico de tipo catiónica sódica, la resina retiene los iones indeseables (sales de magnesio y calcio divalentes en forma de carbonatos o sulfatos) y cede a cambio un número equivalente de iones de sodio almacenados en su estructura, esto permite reducir la dureza del agua. (MINSAs, 2011)

a. Resinas Intercambiadoras de iones

Una resina es un polímero compuesto de un número elevado de moléculas las resinas pueden ser intercambiadores de cationes, que intercambian iones cargados positivamente (cationes), o intercambiadores de aniones que intercambian iones con carga negativa (aniones). (Agamez, 2014)

b. Descripción del proceso, de tratamiento externo ablandamiento de agua para calderas, a estandarizar

En la planta de tratamiento externo de agua se realizan los procesos de:

- Filtrado de partículas y material orgánico. Se realiza en los filtros.
- Ablandamiento del agua mediante intercambio iónico. Se realiza en los ablandadores.

(MINSAs, 2011)

El procedimiento general, consiste en:

- Hacer pasar el agua por el(los) filtro(s). los mismos que realizan la retención de las impurezas del agua, el material orgánico, partículas y sólidos disueltos y de este modo clarifican el agua.
- El agua filtrada pasa a un segundo tanque llamado ablandador o intercambiador iónico, que en su interior retiene las sales de calcio y magnesio.
- Cuando la resina se encuentra saturada de sales de calcio y magnesio, se realiza el proceso de regeneración, que consiste en hacer pasar por el ablandador, una solución de cloruro de sodio. Para tal objeto, en el tanque salmuera se prepara una solución de agua y sal. Para fines prácticos la proporción a emplear para la regeneración de la resina saturada, es de 7Kg. de sal por pie cúbico de resina existente en el ablandador.

(MINSAs, 2011)

La presión de trabajo adecuada para el correcto funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua, es de 80 PSI (Poundal square inch o Libras por pulgada cuadrada Lb/pulg²) para los filtros y 60 PSI para los ablandadores. Si en la instalación no hubiera esta presión, se debe instalar un sistema hidroneumático que suministre agua con el caudal y presión necesaria. Los ablandadores y/o filtros, pueden usar sistemas de operación manual, combinado, semiautomático con válvula multiport, automático con válvulas de diafragma o multiválvulas. (MINSAs, 2011)

c. Grados de dureza del agua

El grado de dureza es una medida de la concentración total, en peso, del contenido de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} , expresada como equivalente de carbonato de calcio y usualmente medida en partes por millón o miligramos por litro.

Tabla 01: Clasificación del agua según su dureza.

CLASIFICACION DEL AGUA	DUREZA En ppm carbonato de calcio (mg CaCO_3/L)
Blanda	Menor de 17
Levemente dura	De 17 a 60
Moderada	60-120
Dura	120-180
Muy dura	MAS DE 180

FUENTE: MINSA, 2011.

Tabla 02: Limites de concentración de sólidos en calderas

Presión (PSI)	Solido totales (ppm)	Alcalinidad total (ppm)	Solidos suspendidos (ppm)
0 – 300	3500	700	360
301 – 450	3000	600	250
451 - 600	2500	500	150
601 - 750	2000	400	100
751 – 900	1500	300	60
901 – 1000	1250	250	40
1001 – 1500	1000	200	20
1501 – 2000	750	150	10
>2001	500	100	5

FUENTE: Carbajal, 2013.

d. Cálculo relacionado con el tratamiento externo del agua para caldera

- Removerá 30,000 granos de Dureza (calculada como Carbonato de Calcio), cuando es Regenerada con 15 lbs. de sal.
- Capacidad de Intercambio iónico = (# Pies³ de Resina) x 30 (miles de granos inglés). En general:

c = capacidad de intercambio inonico = volumen de resina * poder de intercambio

- Esta capacidad puede variar según el fabricante de la resina y según los años de uso de la resina

$$\text{Caudal} = (\# \text{ Pies}^3 \text{ de Resina}) \times 3 \text{ en GPM}$$

$$V = \frac{17.1 * p^3 \text{RESINA} * 30000 \text{ GPG} - \text{USA}}{\text{Dureza del agua (ppm)}} [\text{Gal. Agua blanda prod.}] \dots \text{Ec. (3)}$$

En general:

$$V = \text{PRODUCCION EN VOLUMEN} = \frac{\text{CAPACIDAD}}{\text{DUREZA}} \dots \dots \text{Ec. (4)}$$

Unidades usuales en la práctica del tratamiento de agua:

- 1 parte por millón = 1ppm = 1mg/l = 1gr/cm³
- 1ppm CaCO₃ = 1mg/l CaCO₃ = 1parte por millón como carbonato de calcio
- 1° Inglés (1 Grado Inglés) =1 Grano por galón UK (°Clar<.) =14.3 ppm CaC03
- 1 Grano por galón USA = 1 GPG - USA = 17.1 ppm CaC03.

1.3.4. Aislamiento térmico – fibra de vidrio

El aislante de fibra de vidrio se forma como resultado de fundir en un horno a 1450° arena natural, aditivos y vidrio reciclado. En el proceso de enfriamiento se generan unas fibras que quedan unidas, de modo que el espacio libre con aire atrapado aumenta la resistencia a la transmisión del calor. (Aislahome, 2015)

a. Cálculo para determinar el aislamiento térmico en una superficie

- **Potencia térmica de convección en superficie desnuda**

Denota la transferencia de calor perdida por las paredes exteriores del caldero al medio ambiente, este calor es significativo cuando una superficie no está aislada. (Carbajal, 2013)

$$Q_{\text{aislado } p \rightarrow \infty} = Q_{\text{desnudo } p \rightarrow \infty} * (1 - \eta_{\text{aislante}}) \dots \dots \text{Ec}(5)$$

Dónde:

$Q_{\text{aislado } p \rightarrow \infty}$: Calor perdido al medio ambiente en tubería aislada [W]

$Q_{\text{desnudo } p \rightarrow \infty}$: Calor perdido al medio ambiente en tubería desnuda [W]

η_{aislante} : Rendimiento del aislante

- **Temperatura promedio entre el aislante**

Es el valor promedio de la temperatura interior de pared y la temperatura exterior de pared del caldero. (Carbajal, 2013)

$$\bar{T} = \frac{T_{p\text{-int}} + T_{p\text{-ext}}}{2} \dots \dots \text{Ec}(6)$$

\bar{T} : Temperatura promedio [°C]

$T_{p\text{-int}}$: Temperatura de pared interior [°C]

$T_{p\text{-ext}}$: Temperatura de pared exterior [°C]

- **Conductividad térmica de la fibra de vidrio**

Hasta el momento se ha descrito la conductividad térmica como propiedad de los materiales que resulta del modelo lineal entre el flujo de calor y gradiente de temperaturas, sin embargo su significado físico puede partir del concepto de temperatura, entendida como magnitud que permite determinar el grado de movilidad de las partículas, por eso la conductividad térmica puede verse

como una capacidad para transmitir dicha movilidad de unas partículas a otras, esto quiere decir que la conductividad térmica varía según su naturaleza del material y la temperatura. (Carbajal, 2013)

$$K_{\text{aislante}} = 0.04176 + 0.000232 * \bar{T} \dots \dots \dots \text{Ec}(7)$$

Dónde:

K_{aislante} : Conductividad termica del aislante $\left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$

\bar{T} : temperatura promedio [$^\circ\text{C}$]

- **Diámetro exterior del aislante**

Es el diámetro expuesto al medio ambiente. (Carbajal, 2015)

$$D_{\text{ext}} = D_{\text{int}} * e^{\frac{2 * \pi * K_{\text{aisl}} * L * (T_{\text{p-int}} + T_{\text{p-ext}})}{Q_{\text{aislado}} \text{ p} \rightarrow \infty}} \dots \dots \dots \text{Ec}(8)$$

Dónde:

D_{ext} : diametro externo con respecto al aislante [m]

D_{int} : diametro interno con respecto al aislante [m]

L: longitud de la superficie [m]

$T_{\text{p-int}}$: Temperatura de pared interior [$^\circ\text{C}$]

$T_{\text{p-ext}}$: Temperatura de pared exterior [$^\circ\text{C}$]

$Q_{\text{aislado}} \text{ p} \rightarrow \infty$: Calor perdido al medio ambiente en tubería aislada [W]

- **Espesor de la fibra de vidrio**

Es el espesor necesario para que la transferencia de calor sea mínima hacia el medio ambiente. (Carbajal, 2013)

$$\delta_{\text{aislante}} = \frac{D_{\text{ext-aisl}} - D_{\text{int-aisl}}}{2} \dots \dots \dots \text{Ec}(9)$$

Dónde:

δ_{aislante} : espesor del aislante [m]

$D_{\text{ext-aisl}}$: Diametro exterior con respecto al aislante [m]

$D_{\text{int-aisl}}$: Diametro interior con respecto al aislante [m]

1.3.5. Economizador de caldera

Son aparatos que facilitan el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes y evitan al mismo tiempo que se mezclen entre sí. (CENGEL, 2007)

a. Balance térmico

$$m_1 * (h_1 - h_2) = m_2 * (h'_1 - h'_2) \dots \dots \dots \text{Ec. (10)}$$

Dónde:

h: entalpía correspondiente al fluido

(Paredes, 2013)

b. Calor útil en un intercambiador de calor

Es la transferencia de calor máxima aprovechada por el fluido frio y cedida por el fluido caliente. (CENGEL, 2007)

$$\dot{Q}_{u-IC} = K_G * S_{IC} * \Delta T_m * 10^{-3} \dots \dots \dots \text{Ec(11)}$$

Dónde:

\dot{Q}_{u-IC} : Calor útil del intercambiador de calor [KW]

K_G : coeficiente global de transferencia de calor $[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}]$

S_{IC} : Superficie del intercambiador de calor [m²]

ΔT_m : Diferencia media logarítmica[°C]

c. Circulación de fluidos en cruz

Los flujos del agente térmico principal y del agente secundario se cruzan en un ángulo de 90°. (Paredes, 2013)

- **Diferencia media logarítmica**

La variación de temperatura media logarítmica tiene dependencia con el tipo de flujo que se tiene en el intercambio de calor de los fluidos. (CENGEL, 2007)

$$\Delta T_{m-cruz} = \frac{T}{\ln \frac{\Delta T_{max} + \Delta T_{min} + T}{\Delta T_{max} + \Delta T_{min} - T}} \dots \dots \dots \text{Ec. (12)}$$

En el cual:

$$T = \sqrt{(T_1 - T_2)^2 + (T'_1 - T'_2)^2} \dots \dots \dots \text{EC. (12.1)}$$

Dónde:

ΔT_{m-cruz} : Diferencia media logarítmica de temperatura para fluido en cruz

ΔT_{max} : $t_1 - t'_1$

ΔT_{min} : $t_2 - t'_2$

d. Coeficiente global de transferencia de calor

$$K_G = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \frac{1}{h_{ext}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta}{k_i}} \dots \dots \dots \text{Ec. (13)}$$

Dónde:

K_G : coeficiente global de transferencia de calor $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

h_{int} : Coeficiente de transferencia de calor interno $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

h_{ext} : Coeficiente de transferencia de calor externo $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$

k_i : Coeficiente de transferencia de calor por conducción del material $[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}]$

δ : Espesor de los tubos del intercambiador de calor [m]

(Paredes, 2013)

e. Superficie de intercambio de calor

Es la superficie lateral total de los tubos del intercambiador de calor.

$$S_{IC} = N_p * N_{\frac{t}{p}} * S_{L-unit} \dots \dots \dots \text{Ec. (14)}$$

Dónde:

S_{IC} : Superficie lateral total de tubos [m²]

N_p : Número de pasos de intercambio de calor

$N_{t/p}$: Número de tubos por paso de intercambio de calor

S_{L-unit} : Superficie unitaria de intercambio de calor para un tubo [m²]

$$S_{L-unit} = \pi * d_{ext} * L_{tubo} \dots \dots \dots \text{Ec. (14.1)}$$

Dónde:

d_{ext} : Diámetro exterior del tubo [m]

L_{tubo} : Longitud del tubo [m]

(Paredes, 2013)

1.3.6. Carbón antracita

Es el carbón de último grado de carbonificación, su color es negro azabache, duro y brillante. Su humedad es baja y el contenido de carbón fijo es elevado presentando un medio y alto poder calorífico. (Montalvo, 2000)

a. Cálculo del Poder calorífico

Se obtiene mediante la suma de los calores desarrollados por cada componente del combustible. Para combustibles sólidos:

$$PCI = 33900 * c + 9250 * s + 120120 \left(h - \frac{o}{8} \right) - 2510 * w \dots \dots \dots \text{Ec. (15)}$$

En el cual:

PCI: Poder calorífico inferior $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$

c: participación másica del carbono

h: participación másica del hidrogeno

o: participación másica del oxigeno

w: participación másica del agua

s: participación másica del azufre

b. Yacimiento de carbón mineral en el norte del Perú

Tabla 03: Yacimiento de carbón mineral en el norte del Perú.

Yacimiento carbonífero	Departamento	CARACTERISTICAS						Clase de carbón
		Humedad %	Material volátil %	Cenizas %	Carbono fijo %	Azufre %	Poder calorífica KJ/kg	
Tumbes	Tumbes	9 - 18	27 - 32	20-36	20 - 30	4-5	11300-18000	lignito
Yanacancha	Cajamarca	8 - 12	28 - 30	8-14	40 - 50	1-2	29300	bituminoso
Piñipata y Tuco	Cajamarca	4 - 4,5	3.5 - 7.9	6-35	52 - 84	0.6-1.2	26800-31800	antracita
Cupisnique	Cajamarca	4 - 6	4 - 8	8-12	70 - 80	0.3-0.8	25100-31400	antracita
Alto Chicama	La libertad	5 - 8	2.5 - 12	6-10	80 - 85	1-2.5	29300-31400	antracita
Santa	Ancash	4 - 6	3 - 6	7-12	80 - 85	0.5-1	25100-31400	antracita

Fuente: eficiencia energética en una pequeña caldera de vapor a carbón antracita en Trujillo MITINCI-COPEI-GTZ-2000.

1.4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿En qué medida se reducirá el costo de operación e impactos medioambientales de una caldera pirotubular a carbón en base a un análisis energético y aplicación de mejoras resultantes en la empresa Piel Trujillo SAC?

1.5. JUSTIFICACION DEL ESTUDIO

1.5.1. Justificación tecnológica

Con un análisis energético se propondrá la implementación de accesorios de medición y control para la correcta operación de la caldera que permita trabajar eficientemente.

1.5.2. Justificación económica

Por medio de un análisis energético se podrá encontrar las deficiencias en la caldera, con la finalidad de mejorar el proceso térmico y a su vez permitirá reducir los costos de producción de vapor.

1.5.3. Justificación ambiental

Debido al impacto ambiental que genera la quema de carbón, con el análisis energético, se propondrá reutilizar los gases residuales con un recuperador de calor, con ello se evitara la que las emisiones de los gases, salgan directamente hacia el medio ambiente.

1.6. HIPOTESIS

Mediante la aplicación de un análisis energético a la caldera pirotubular a carbón se podrá determinar su estado actual, el cual nos permitirá proponer mejoras que reducirán costos de producción de vapor e impactos medioambientales en la empresa Piel Trujillo SAC.

1.7. OBJETIVOS

1.7.1. Objetivo general

Realizar un análisis energético a la caldera pirotubular a carbón para reducir costos de producción de vapor e impactos medioambientales en la empresa Piel Trujillo SAC.

1.7.2. Objetivos específicos

- Recopilar datos de diseño y de operación de la caldera.
- Elaborar un diagrama actual y mejorado del proceso térmico de la caldera.
- Determinar la eficiencia actual de la caldera.
 - _ Determinar las pérdidas fijas y variables de la caldera.
- Determinar las medidas correctivas para disminuir las pérdidas energéticas e impactos medioambientales.
- Determinar la nueva eficiencia de la caldera.
 - _ Determinar las pérdidas fijas y variables, con las nuevas propuestas.
- Realizar un análisis económico.
- Realizar un análisis medio ambiental.

II. MÉTODO

2.1. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: No experimental- descriptivo

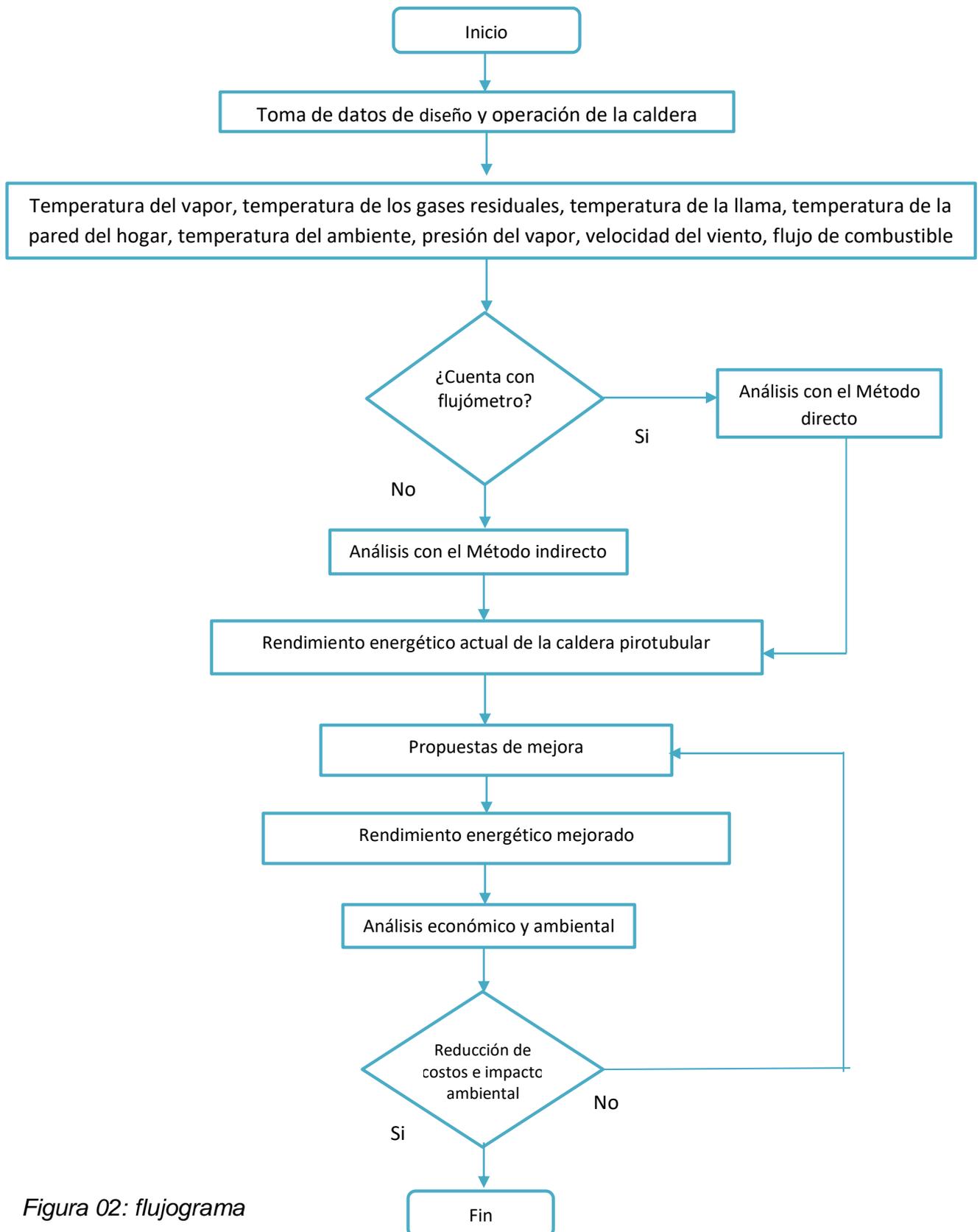


Figura 02: flujograma

2.2. VARIABLES, OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

2.2.1. Variable independiente

- Flujo másico de combustible [Kg/h].
- Presión del vapor [Pa].
- Temperatura del vapor [°C].
- Temperatura de los gases residuales [°C].
- Dimensiones de la caldera [m²].

2.2.2. Variables dependientes

- Propuesta de mejoras
- Costo de generación de vapor
- Rendimiento de la caldera mejorada [%]
- Reducción de impactos ambientales

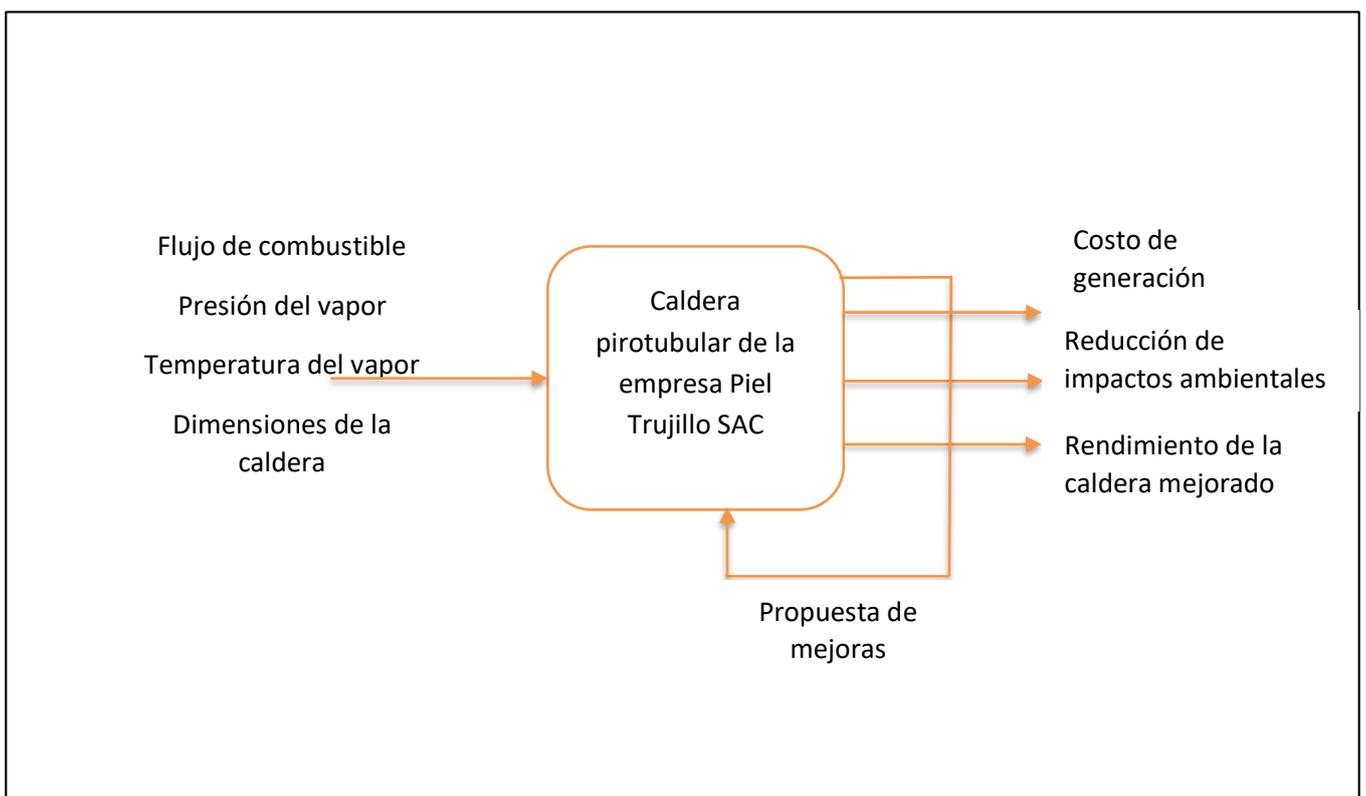


Figura 03: caja negra de variables

2.2.3. Operacionalización de variables

Tabla 04: operacionalización de variables

variables	Definición conceptual	Definición operacional	Indicadores	Escala de medición
Independientes				
Flujo másico de combustible	Es la magnitud física que expresa la variación de la masa con respecto al tiempo en un área específica	Cantidad de combustible que ingresa a la caldera en un determinado tiempo	[Kg/h]	Razón
Temperatura del vapor	Es una magnitud que mide el nivel térmico o calor que un cuerpo posee	Medición que me permite determinar del nivel térmico a la que se encuentra el vapor saturado	[°C]	Intervalo
Presión del vapor	Es la diferencia entre la presión absoluta y la atmosférica.	Medición manométrica a la que se encuentra el vapor saturado	[Pa]	Razón
Dimensiones de la caldera	Es la magnitud que expresa la extensión de un cuerpo	Son las medidas de la superficie exterior de la caldera	[m ²]	Razón
Temperatura de los gases residuales	Es una magnitud que mide el nivel térmico o calor que un cuerpo posee	Medición que me permite determinar del nivel térmico a la que se encuentra los gases de combustión en la chimenea	[°C]	Intervalo
Dependientes				
Propuestas de mejora	Es una alternativa de solución.	Conjunto de alternativas de solución que mejorara las condiciones actuales de operación.	Aumento de rendimiento de la caldera	Razón (0-100%)
Costo de generación de vapor	Es el precio unitario que cuesta el vapor generado	Es la cantidad en soles que cuesta cada kilogramo de vapor	[Soles/kg de vapor]	Razón
Rendimiento de la caldera	Es la relación entre el calor útil y el calor total que produce un generador de vapor.	Es el porcentaje que me indica el estado de la caldera después de haber descontado las pérdidas energéticas fijas y variables.	$\eta_{caldera} = 100\% - (q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)\%$	Razón (0-100%)

2.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

Población: Calderas pirotubulares a carbón en el distrito de El Porvenir.

Muestra: caldera pirotubular a carbón de la empresa Piel Trujillo SAC.

2.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS, VALIDEZ Y CONFIABILIDAD

Tabla 05: técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez.

Técnicas	Instrumento de recolección de datos	Validez
Observación: A través de esta técnica se obtendrá los datos de las mediciones realizadas.(Anexo 01)	Ficha de observación del control y consumo de la caldera pirotubular. (Anexo 01)	Especialista
Análisis documental: Se utilizara los datos de dureza del agua que nos proporcione el laboratorio.(Anexo 06)	Ficha de registro del contenido de solidos totales disueltos	Especialista
Entrevista: Permitirá obtener el consumo de combustible por hora, que se le realizará al operario de caldera.	Cuestionario (Anexo 01)	Especialista

2.5. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE DATOS

- Se tomó 30 mediciones de los indicadores de la caldera por medio de la ficha de observación, tales como, temperatura de gases residuales, temperatura de llama, temperatura de las paredes del hogar, temperatura ambiente, velocidad del viento. Para ello se utilizó una cámara termográfica y un anemómetro. Para el caso de la presión y temperatura del vapor, la caldera cuenta con un manómetro y un medidor de temperatura, de donde se tomó nota. El consumo de combustible se obtendrá por medio de entrevista al operario de caldera por hora. Se mandó a analizar el agua que utiliza el caldero a un laboratorio, para obtener datos de dureza y cantidad de sólidos disueltos en ella, que servirá para los respectivos cálculos.
- Se aplicó estadística descriptiva para los datos obtenidos, donde se tomara el promedio de las mediciones realizadas, para el análisis energético.
- Debido a que no se cuenta con un flujómetro de vapor, se utilizó el cálculo de rendimiento de la caldera por el método indirecto donde se calculara las pérdidas por inquemados, combustión incompleta, en el hogar, por purgas, por convección y por gases residuales.
- Se determinó las mejoras en base a estudios anteriores que ayudaran a la caldera a tener un mejor aprovechamiento de energía y mejorar su rendimiento.
- Se elaboró un análisis económico que nos permita determinar el ahorro luego de hacer una comparación del estado actual y el estado en mejora de la caldera.
- Se realizó un análisis ambiental de los productos de combustión actual y después de las mejoras

2.6. ASPECTOS ÉTICOS

Todo lo que se ha transcrito de otros autores, está referenciado mediante la norma ISO 690, lo que no está referenciado es autoría del investigador.

III. RESULTADOS

3.1. Obtención de datos

Se tomó medidas con la cámara termográfica y anemómetro digital durante 3 días de operación de la caldera pirotubular en la empresa Piel Trujillo SAC. A continuación, los datos obtenidos:

TABLA 06: Promedio del control y consumo horario de la caldera pirotubular durante el primer día de operación.

Muestra	Hora	Presión Vapor [PSI]	Temp. Vapor [°C]	Temp. Llama [°C]	Temp. Pared Hogar [°C]	Temp. Pared de caldera [°C]	Temp. Gas Residual [°C]	Flujo De Combustible [Kg/h]	Temp. Ambiente [°C]	Veloc. Viento [M/S]	Temp. Del agua [°C]
1	08:00:00	40	190	440	420	60	152	12.41	22.5	2.2	22.00
2	09:00:00	41	190	445	425	63	153	12.41	22.65	2.23	22.15
3	10:00:00	45	190	460	440	65	179	12.41	23.05	1.92	23.07
4	11:00:00	45	190	455	435	67	152	12.41	25.45	3.2	24.90
5	12:00:00	55	190	457	437	69	202	12.41	25.95	3.31	25.45
6	13:00:00	50	190	456	436	66	182	12.41	24.05	3.27	23.55
7	14:00:00	50	190	458	438	64	180	12.41	25.05	3.29	24.55
8	15:00:00	47	190	452	432	65	179	12.41	25.1	3.31	24.60
9	16:00:00	48	190	449	429	68	181	12.41	24.9	3.33	24.40
10	17:00:00	45	190	447	427	63	179	12.41	24.73	3.37	24.23
PROMEDIO		46.60	190.00	451.9	431.9	65	173.9	12.41	24.34	2.94	23.89

Fuente: elaboración propia

TABLA 07: Promedio del control y consumo horario de la caldera pirotubular durante el segundo día de operación.

Muestra	Hora	Presión Vapor [PSI]	Temp. Vapor [°C]	Temp. Llama [°C]	Temp. Pared Hogar [°C]	Temp. Pared de caldera [°C]	Temp. Gas Residual [°C]	Flujo De Combustible [Kg]	Temp. Ambiente [°C]	Veloc. Viento [M/S]	Temp. Del agua [°C]
11	08:00:00	41	190	450	430	59	169	12.41	22.49	2.1	21.99
12	09:00:00	43	190	445	425	60	171	12.41	22.65	2.21	22.15
13	10:00:00	45	190	443	423	66	179	12.41	23.05	1.92	22.55
14	11:00:00	43	190	442	422	64	159	12.41	25.5	3	25.00
15	12:00:00	40	190	435	415	67	148	12.41	25.95	2.29	25.45
16	13:00:00	43	190	445	425	66	159	12.41	25.5	3	25.00
17	14:00:00	50	190	452	432	65	180	12.41	25.05	3.29	24.55
18	15:00:00	47	190	451	431	60	179	12.41	25.1	3.31	24.60
19	16:00:00	43	190	450	430	61	159	12.41	25.5	3	24.55
20	17:00:00	40	190	445	425	62	148	12.41	25.95	3.37	25.45
PROMEDIO		43.5	190	445.8	425.8	63	165.1	12.41	24.674	2.749	24.13

TABLA 08: Promedio del control y consumo horario de la caldera pirotubular durante el tercer día de operación.

Muestra	Hora	Presión Vapor [PSI]	Temp. Vapor [°C]	Temp. Llama [°C]	Temp. Pared Hogar [°C]	Temp. Pared de caldera [°C]	Temp. Gas Residual [°C]	Flujo De Combustible [Kg]	Temp. Ambiente [°C]	Veloc. Viento [M/S]	Temp. Del agua [°C]
21	08:00:00	40	190	405	385	65	152	12.41	22.5	2.2	22.00
22	09:00:00	41	190	415	395	66	153	12.41	22.65	2.23	22.15
23	10:00:00	45	190	445	425	67	179	12.41	23.05	1.92	22.55
24	11:00:00	41	190	454	434	62	235	12.41	23.75	2.89	23.75
25	12:00:00	45	190	456	436	65	211	12.41	23.4	3.24	23.40
26	13:00:00	50	190	470	450	69	182	12.41	24.05	3.27	24.00
27	14:00:00	50	190	465	445	70	180	12.41	25.05	3.29	25.00
28	15:00:00	47	190	458	438	69	179	12.41	25.1	3.31	25.00
29	16:00:00	48	190	460	440	68	181	12.41	24.9	3.33	24.90
30	17:00:00	45	190	472	452	69	179	12.41	24.73	3.37	24.55
PROMEDIO		45.2	190	450	430	67	183.1	12.41	23.918	2.905	23.73

Fuente: elaboración propia

Para determinar la dureza y los sólidos totales disueltos en el agua que se utiliza para la generación de vapor, se mandó a analizar en el laboratorio de la facultad de ingeniería química en la universidad Nacional de Trujillo (UNT).

TABLA 09: Informe de análisis del agua que se utiliza para la generación de vapor saturado en la empresa Piel Trujillo SAC.

Determinaciones	Unidades	Resultados
Dureza total	CaCO ₃ mg/L	388
Sólidos disueltos	mg/L	674

Fuente: Laboratorio de la facultad de ingeniería química de la UNT, 2018.

3.2. Diagramas del proceso térmico actual y en estado de mejora

3.2.1. Diagrama actual del proceso térmico de la caldera pirotubular

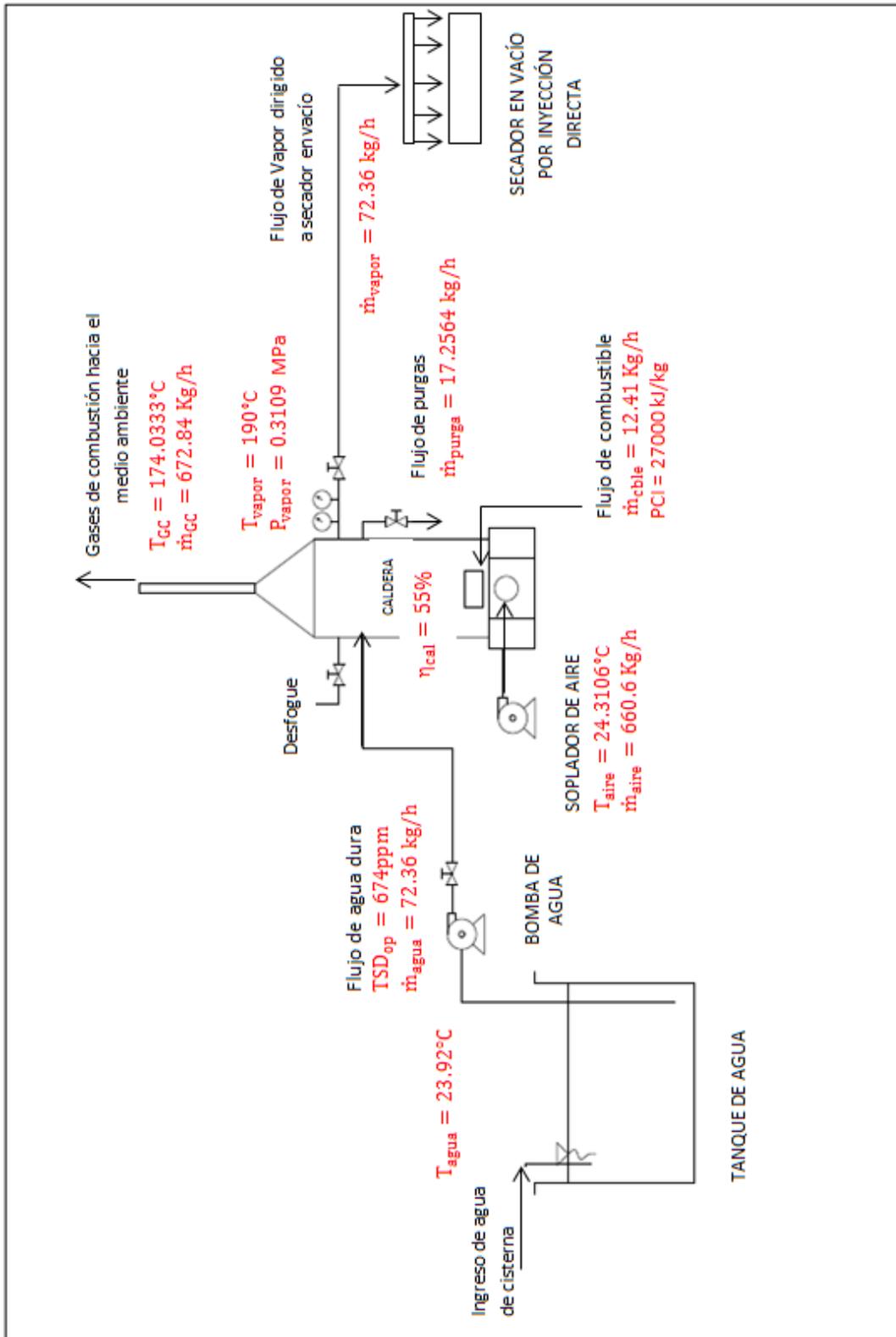


Figura 04: Esquema actual del proceso térmico de la caldera pirotubular en la empresa piel Trujillo SAC.

3.2.2. Diagrama del proceso térmico de la caldera piro-tubular en estado de mejora

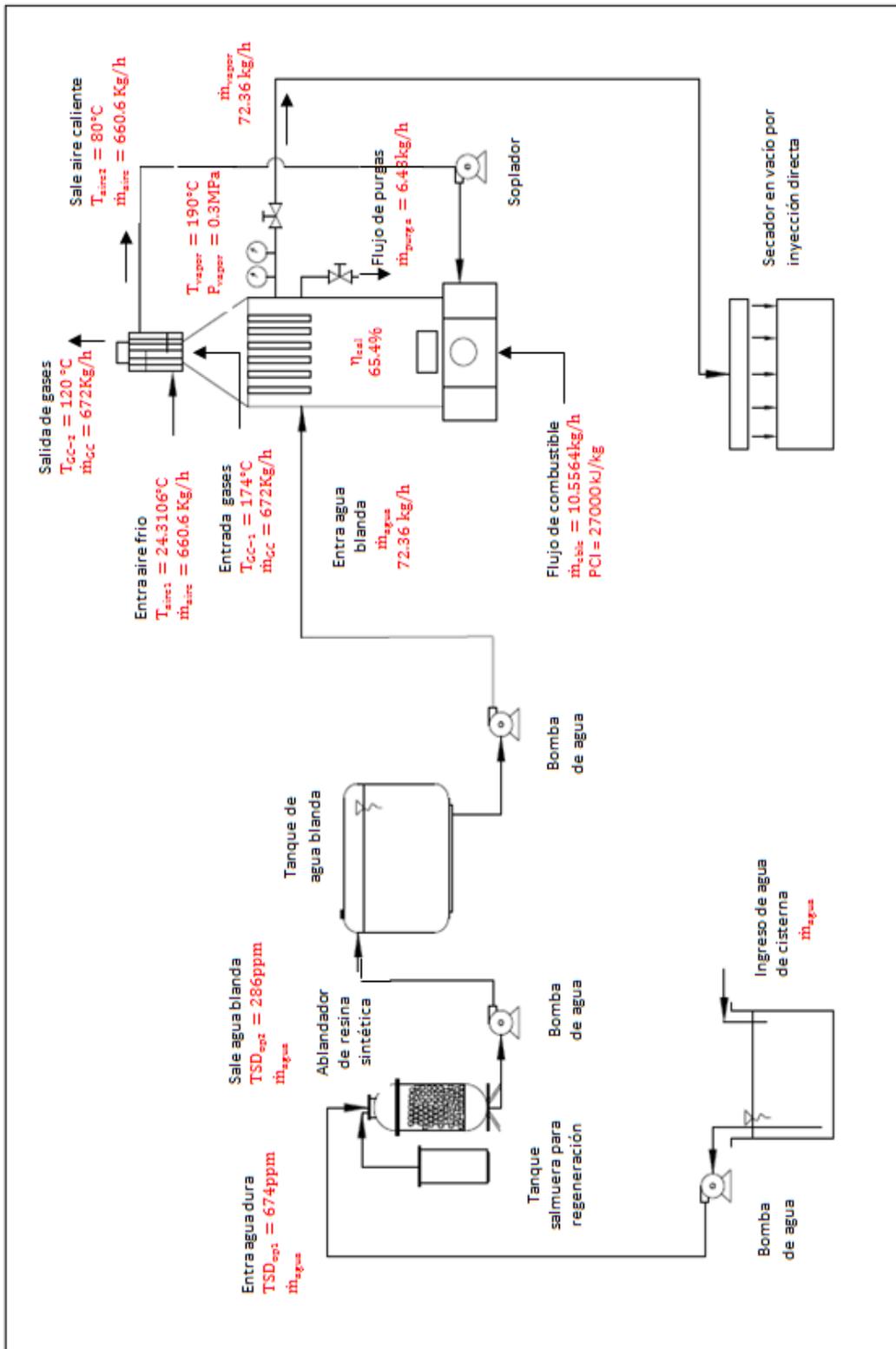


Figura 05: Esquema actual del proceso térmico de la caldera piro-tubular en la empresa piel Trujillo SAC.

3.3. Rendimiento actual de la caldera pirotubular

3.3.1. Perdidas fijas y variables de la caldera pirotubular

a. Primer día de operación

- **Cálculo de la relación de aire combustible “ R_{a-cble} ”**

Primero se determina la entalpía de los gases de combustión “ h_{GC} ” del hogar y entalpía del aire “ h_{aire} ”. (Temperatura de gases de combustión “ T_{GC} ” y del medio ambiente “ T_{∞} ”, tomada de tabla 06).

$$h_{GC} = T_{GC} * C_p = 451.9^{\circ}\text{C} * 1.165 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * ^{\circ}\text{C}} = 526.4635 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$h_{aire} = T_{\infty} * C_p = 24.34^{\circ}\text{C} * 1.006 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * ^{\circ}\text{C}} = 24.49 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Se determina la relación de aire combustible “ R_{a-cble} ” a partir de la siguiente ecuación.

$$R_{a-cble} = \frac{PCI - h_{GC}}{h_{GC} - h_{aire}} = \frac{27000 - 526.4635}{526.4635 - 24.49} = 52.7389 \frac{\text{Kg}_{aire}}{\text{Kg}_{cble}}$$

De la tabla 06, obtenemos el consumo horario de combustible de la caldera, el cual determinamos el consumo de combustible por segundo.

$$\dot{m}_{cble} = 12.41 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} * \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} = 0.003447 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

- **Cálculo del flujo másico del aire “ \dot{m}_{aire} ”.**

$$\dot{m}_{aire} = R_{a-cble} * \dot{m}_{cble} = 52.7389 \frac{\text{Kg}_{aire}}{\text{Kg}_{cble}} * 0.003447 \frac{\text{Kg}_{cble}}{\text{s}} = 0.1818 \frac{\text{Kg}_{aire}}{\text{s}}$$

Determinamos el flujo másico de los gases de combustión de la caldera “ \dot{m}_{GC} ”.

$$\dot{m}_{GC} = \dot{m}_{aire} + \dot{m}_{cble} = 0.1818 \frac{\text{Kg}_{aire}}{\text{s}} + 0.003447 \frac{\text{Kg}_{cble}}{\text{s}} = 0.1852 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

- **Cálculo del calor total de la caldera “ \dot{Q}_{total} ”.**

$$\dot{Q}_{total} = \dot{m}_{cble}(PCI + R_{a-cble} * h_{aire})$$

$$\dot{Q}_{\text{total}} = 0.003447 \frac{\text{Kg}_{\text{cble}}}{\text{s}} \left(27000 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 52.7389 \frac{\text{Kg}_{\text{aire}}}{\text{Kg}_{\text{cble}}} * 24.49 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right)$$

$$= 97.5211 \text{ KW}$$

- **Calor perdido por gases residuales “ \dot{Q}_{GR} ”. (Pérdidas variables)**

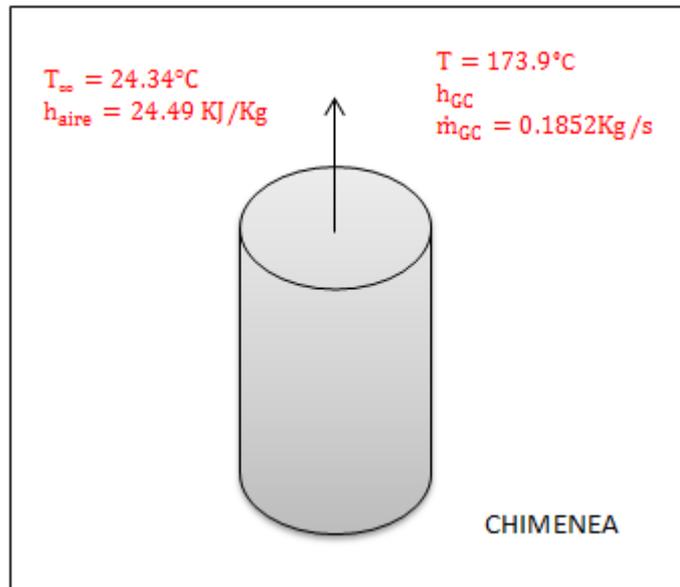


Figura 06: esquema de la chimenea de la caldera.

Para determinar el Calor perdido por gases residuales “ \dot{Q}_{GR} ”, determinamos la entalpia de los gases que salen por la chimenea “ h_{GC} ”, de acuerdo a temperatura que se muestra en la tabla 06.

$$h_{\text{GC}} = T^{\circ} * C_p = 173.9^{\circ}\text{C} * 1.06 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * ^{\circ}\text{C}} = 184.3340 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Luego se calcula el calor perdido por los gases residuales “ \dot{Q}_{GR} ”.

$$\dot{Q}_{\text{GR}} = \dot{m}_{\text{GC}} * (h_{\text{GR}} - h_{\infty}) = 0.1852 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \left(184.3340 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - 24.49 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right)$$

$$= 29.6031 \text{ KW}$$

Determinamos el porcentaje que representa las pérdidas por los gases residuales “ \dot{Q}_{GR} ”, del calor total producido por la caldera “ \dot{Q}_{total} ”.

$$q_{\text{GR}} = \frac{\dot{Q}_{\text{GR}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} * 100\% = \frac{29.6031\text{KW}}{97.5211\text{KW}} * 100\% = 30.3556\%$$

- Cálculo de calor perdido por convección “ $\dot{Q}_{p\text{-conv}}$ ”. (Pérdida fija).

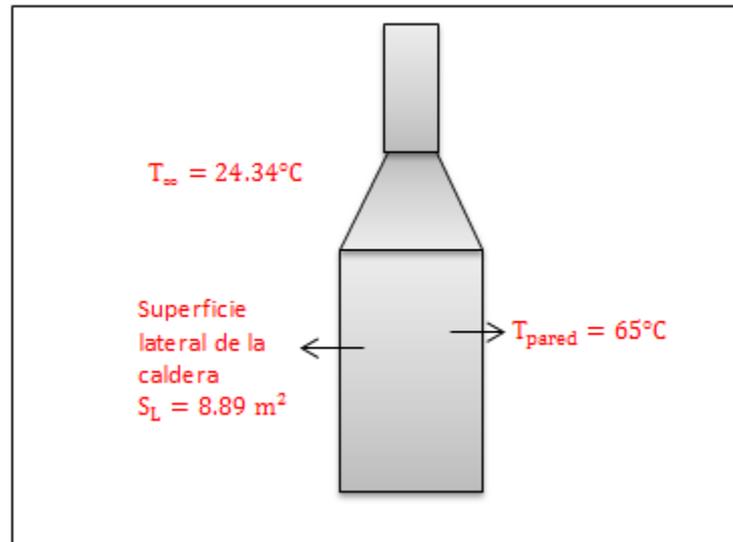


Figura 07: esquema de la superficie lateral de la caldera.

Determinamos el coeficiente de transferencia de calor “ $h_{p-\infty}$ ”, que está dada por la siguiente ecuación.

$$h_{p-\infty} = 11.6 + 6.96 * \sqrt{U_{\text{viento}}} = 11.6 + 6.96 \sqrt{2.94} = 23.53 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°C}}$$

Calculamos el calor perdido por convección “ $\dot{Q}_{p\text{-conv}}$ ”, donde la superficie lateral de la caldera es $S_L = 8.89 \text{ m}^2$

$$\dot{Q}_{p\text{-conv}} = h_{p-\infty} * S_L * (\bar{T}_p - \bar{T}_{\infty}) * 10^{-3}$$

$$\dot{Q}_{p\text{-conv}} = 23.53 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°C}} * 8.89 \text{ m}^2 (65^{\circ}\text{C} - 24.34^{\circ}\text{C}) * 10^{-3} = 8.505 \text{ KW}$$

Determinamos el porcentaje que representa las pérdidas por convección “ $\dot{Q}_{p\text{-conv}}$ ”, del calor total producido por la caldera “ \dot{Q}_{total} ”.

$$q_{\text{conv}} = \frac{\dot{Q}_{\text{GR}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} * 100\% = \frac{8.505 \text{ KW}}{97.5211 \text{ KW}} * 100 = 8.7212\%$$

- Cálculo del calor perdido en el hogar “ $\dot{Q}_{P-hogar}$ ”. (Pérdida fija).

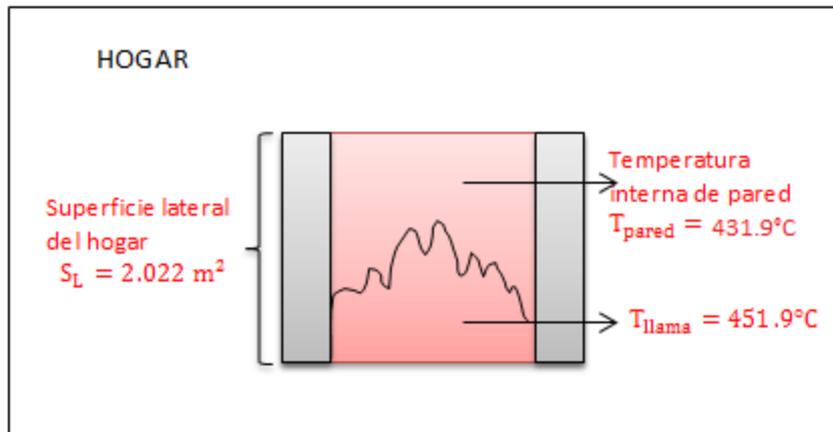


Figura 08: esquema del hogar de la caldera.

Constante de Boltzmann:

$$\sigma_B = 5.75 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4}$$

$$S_h = 2.022 \text{ m}^2$$

Calculamos el calor perdido en el hogar “ $\dot{Q}_{p-hogar}$ ”, de la caldera.

$$\dot{Q}_{P-hogar} = S_h * \sigma_B * (T_{llama}^4 - T_p^4) * 10^{-3}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{p-hogar} &= 2.022\text{m}^2 * 5.75 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} (724.9^4\text{K}^4 - 704.9^4\text{K}^4) * 10^{-3} \\ &= 3.3991 \text{ KW} \end{aligned}$$

Determinamos el porcentaje que representa las pérdidas en el hogar “ $\dot{Q}_{P-hogar}$ ”, del calor total producido por la caldera “ \dot{Q}_{total} ”.

$$q_{hogar} = \frac{\dot{Q}_{P-hogar}}{\dot{Q}_{total}} * 100\% = \frac{3.3991 \text{ KW}}{97.5211 \text{ KW}} * 100 = 3.4855\%$$

- Cálculo de calor perdido por purgas “ $\dot{Q}_{p-purga}$ ”. (Pérdida fija).

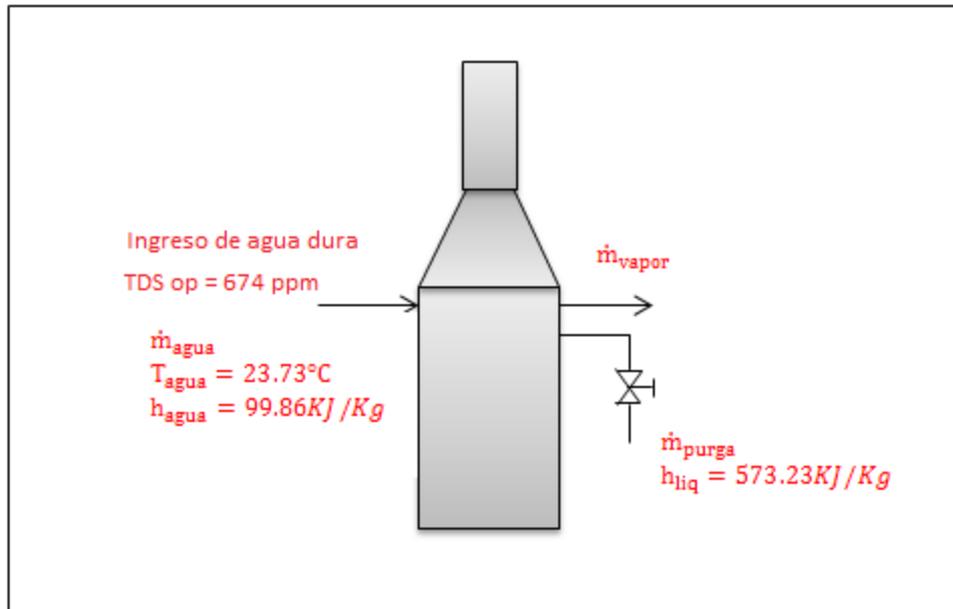


Figura 09: esquema de las purgas de la caldera.

De tabla de vapor saturado (anexo). Determinamos la entalpía del líquido saturado “ h_{liq} ”, que fluye a través de la purgas.

$$h_{liq} = 573.23 \text{ KJ/Kg}$$

De tabla de líquido saturado (anexo) determinamos la entalpía del agua a temperatura ambiente que ingresa a la caldera.

$$h_{agua} = 23.89^{\circ}C * 4.18 \frac{KJ}{Kg * ^{\circ}C} = 99.86 \frac{KJ}{Kg}$$

De tabla 02, para calderas de baja presión, la concentración de los sólidos totales disueltos máximo “ TSD_{max} ”, es:

$$TSD_{max} = 3500 \text{ ppm}$$

De análisis del agua que se utiliza para la generación de vapor saturado en la empresa Piel Trujillo SAC, que se hizo en un laboratorio se obtuvo la concentración de los sólidos totales disueltos. Anexo

$$TSD_{operacion} = 674 \text{ ppm}$$

Determinamos el flujo másico de purga “ \dot{m}_{purga} ”, donde queda como variable el flujo másico de vapor “ \dot{m}_v ” que genera la caldera.

$$\dot{m}_{purga} = \frac{674 \text{ ppm}}{3500 \text{ ppm} - 674 \text{ ppm}} * \dot{m}_v = 0.2385 * \dot{m}_v \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Se calcula el calor perdido por purgas “ $\dot{Q}_{p-purga}$ ”, quedando como variable el flujo másico de vapor “ \dot{m}_v ”.

$$\dot{Q}_{p-purga} = 0.2385 * \dot{m}_v (573.23 - 99.86) = 112.8987 * \dot{m}_v \text{ KW}$$

Aplicamos el método indirecto para determinar el flujo másico de vapor “ \dot{m}_v ” que produce la caldera, igualando con la ecuación del calor útil “ \dot{Q}_u ”.

$$\dot{Q}_{total} - (\dot{Q}_{GR} + \dot{Q}_{p-conv} + \dot{Q}_{p-hogar} + \dot{Q}_{p-purga}) = \dot{Q}_u$$

$$97.5211 \text{ KW} - (29.6031 \text{ KW} + 8.505 \text{ KW} + 3.3991 \text{ KW} + 112.8987 * \dot{m}_v \text{ KW}) = \dot{m}_v (2729 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - 99.86 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}})$$

$$\dot{m}_v = 0.0204 \text{ Kg/s}$$

Reemplazamos el flujo másico de vapor \dot{m}_v , para determinar el flujo másico de purgas \dot{m}_{purga}

$$\dot{m}_{purga} = 0.2385 * \dot{m}_v \frac{\text{Kg}}{\text{s}} = 0.2385 * 0.0204 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} = 0.004865 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Luego reemplazamos el flujo másico de vapor \dot{m}_v en la ecuación del Calor perdido por purgas “ $\dot{Q}_{p-purga}$ ”

$$\dot{Q}_{p-purga} = 0.2385 * 0.0204 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \left(573.23 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - 99.86 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right) = 2.3031 \text{ KW}$$

Determinamos el porcentaje que representa las pérdidas por purgas “ $\dot{Q}_{p-purgas}$ ”, del calor total producido por la caldera “ \dot{Q}_{total} ”.

$$q_{purgas} = \frac{\dot{Q}_{p-purgas}}{\dot{Q}_{total}} * 100 = \frac{2.3031 \text{ KW}}{97.5211 \text{ KW}} * 100 = 2.3616 \%$$

- **Calor útil de la caldera “ \dot{Q}_u ”**

$$\dot{Q}_u = 0.0204 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \left(2729 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - 99.86 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right) = 53.6344 \text{ KW}$$

- **Rendimiento actual “ η_{cal} ” de la caldera durante el primer día de operación**

$$\eta_{\text{cal}} = \frac{\dot{Q}_u}{\dot{Q}_{\text{total}}} * 100\% = \frac{53.6344 \text{ KW}}{97.5211 \text{ KW}} * 100\% = 54.9978\%$$

b. Segundo y tercer día de operación

Durante el segundo y tercer día de operación, se aplica la misma metodología de cálculo que la del primer día de operación, tomando como referencia los datos de tabla 07 y 08 y se obtuvieron los siguientes resultados.

TABLA 10: resultados de entalpías del proceso térmico de los días 2 y 3.

Entalpías	DÍA 2	DÍA 3
Gases de combustión “ h_{GC} ” (hogar)	517.1280 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$	522 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$
Entalpía del aire “ h_{aire} ”	24.8180 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$	24.0615 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$
Gases de combustión “ h_{GC} ” (chimenea)	178.3080 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$	197.7480 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$
Del agua “ h_{agua} ”	100.86 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$	99.1914 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$
Líquido saturado “ $h_{\text{líq}}$ ”	573.23 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$	573.2300 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$
Del vapor saturado “ h_{vapor} ”	2729 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$	2729 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right]$

Fuente: elaboración propia

TABLA 11: Resultados de flujos máscicos del proceso térmico y la relación de aire combustible de los días 2 y 3.

Flujos máscicos	DÍA 2	DÍA 3
Flujo de combustible “ \dot{m}_{cble} ”	0.003447 $\left[\frac{Kg}{s}\right]$	0.003447 $\left[\frac{Kg}{s}\right]$
Flujo máscico de aire “ \dot{m}_{aire} ”	0.1854 $\left[\frac{Kg}{s}\right]$	0.1833 $\left[\frac{Kg}{s}\right]$
Flujo máscico de gases de combustión “ \dot{m}_{GC} ”	0.1888 $\left[\frac{Kg}{s}\right]$	0.1867 $\left[\frac{Kg}{s}\right]$
Flujo de purgas “ \dot{m}_{purga} ”	0.004984 $\left[\frac{Kg}{s}\right]$	0.004531 $\left[\frac{Kg}{s}\right]$
Flujo máscico de vapor “ \dot{m}_{vapor} ”	0.0209 $\left[\frac{Kg}{s}\right]$	0.0190 $\left[\frac{Kg}{s}\right]$
Relación de aire-combustible “ R_{a-cble} ”	53.7930 $\frac{Kg_{aire}}{Kg_{cble}}$	53.1752 $\frac{Kg_{aire}}{Kg_{cble}}$

Fuente: elaboración propia

- Pérdidas fijas y variables del primer y segundo día de operación

TABLA 12: Resultados de los calores que produce la caldera de los días 2 y 3

Indicadores de calor “ \dot{Q} ”	DÍA 2	DÍA 3
Calor total de la caldera “ \dot{Q}_{total} ”	97.6708[KW]	97.4793[KW]
Calor perdido por gases residuales	28.9789 [KW]	32.4272 [KW]
Calor perdido por convección	7.8545[KW]	8.9562[KW]
Calor perdido en el hogar	3.3128 [KW]	4.063 [KW]
Calor perdido por purgas	2.3571[KW]	2.1481[KW]
Calor útil de la caldera	54.9281 [KW]	49.9663 [KW]

Fuente: elaboración propia

3.3.2. Rendimiento promedio durante los 3 días de operación de la caldera en estado actual

TABLA 13: entalpías promedio de los 3 días de operación.

Entalpías	DÍA1	DÍA 2	DÍA 3	PROMEDIO
Gases de combustión "h _{GC} " (hogar)	526.4635 $\frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$	517.1280 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$	522 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$	521.8638 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$
Entalpía del aire "h _{aire} "	24.49 $\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$	24.8180 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$	24.0615 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$	24.4565 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$
Gases de combustión "h _{GC} " (chimenea)	184.3340 $\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$	178.3080 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$	197.7480 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$	186.7966 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$
Del agua "h _{agua} "	99.86 $\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$	100.86 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$	99.1914 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$	99.9704 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$
Líquido saturado "h _{líq} "	573.23 $\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$	573.23 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$	573.2300 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$	573.2300 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$
Del vapor saturado "h _{vapor} "	2729 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$	2729 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$	2729 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$	2729 $\left[\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right]$

Fuente: elaboración propia

TABLA 14: Flujos máxicos promedio de los 3 días de operación.

Flujos máxicos	DÍA1	DÍA 2	DÍA 3	PROMEDIO
Flujo de combustible $\dot{m}_{\text{cble}} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right]$	0.003447	0.003447	0.003447	0.003447
Flujo máxico de aire $\dot{m}_{\text{aire}} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right]$	0.1818	0.1854	0.1833	0.1835
Flujo máxico de gases de combustión $\dot{m}_{\text{GC}} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right]$	0.1852	0.1888	0.1867	0.1869
Flujo de purgas $\dot{m}_{\text{purga}} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right]$	0.004865	0.004984	0.004531	0.004793
Flujo máxico de vapor $\dot{m}_{\text{vapor}} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right]$	0.0204	0.0209	0.0190	0.0201
Relación de aire-combustible $R_{\text{a-cble}} \left[\frac{\text{Kg}_{\text{aire}}}{\text{Kg}_{\text{cble}}}\right]$	52.7389	53.7930	53.1752	53.2357

Fuente: elaboración propia

TABLA 15: calores de la caldera promedio de los 3 días de operación.

Indicadores de calor “ \dot{Q} ”	DÍA1	DÍA 2	DÍA 3	PROMEDIO
Calor perdido por gases residuales \dot{Q}_{GR} [KW]	29.6031	28.9789	32.4272	30.3364
Calor perdido por convección \dot{Q}_{conv} [KW]	8.505	7.8545	8.9562	8.4385
Calor perdido en el hogar \dot{Q}_{hogar} [KW]	3.3991	3.3128	4.063	3.5916
Calor perdido por purgas \dot{Q}_{purgas} [KW]	2.3031	2.3571	2.1481	2.2694
Calor útil de la caldera $\dot{Q}_{\acute{u}til}$ [KW]	53.6344	54.9281	49.9663	52.8429
Calor total de la caldera \dot{Q}_{total} [KW]	97.5211	97.6708	97.4793	97.557

Fuente: elaboración propia

Se obtuvieron los siguientes rendimientos durante los 3 días de operación.

TABLA 16: Promedio de las pérdidas porcentuales y rendimiento actual de la caldera durante 3 días de operación.

Perdidas de calor de la caldera	DIA 1	DIA 2	DIA 3	PROMEDIO
Gases residuales	30.3556%	29.6699%	33.2658%	31.0971%
Por convección	8.7212%	8.0418%	9.1878%	8.6503%
En el hogar	3.4855%	3.3918%	4.1680%	3.6817%
Por purgas	2.3616 %	2.4170 %	2.2036 %	2.3274%
RENDIMIENTO	54.9978%	56.2380%	51.2584%	54.1647%

Fuente: elaboración propia

3.4. Medidas correctivas para reducir pérdidas energéticas e impacto medioambientales

3.4.1. Dimensionamiento de un pre calentador de aire

Realizamos un esquema del pre calentador de aire donde por medio de un balance de masa y energía, se determinará las temperaturas de entrada y salida tanto del aire como de los gases de combustión que sale por la chimenea.

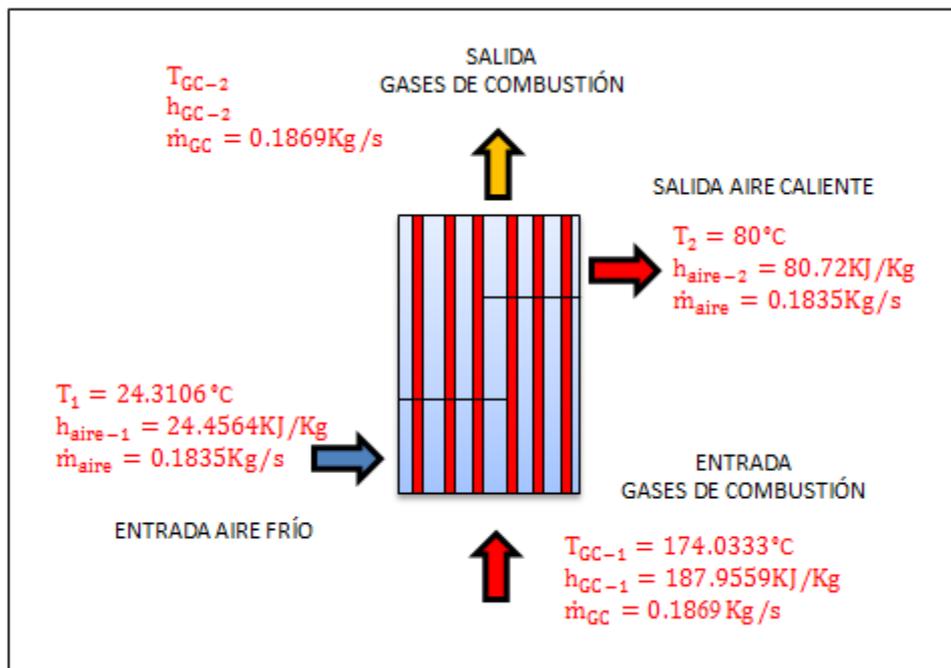


Figura 10: esquema del pre calentador de aire de la caldera.

- **Cálculo del Coeficiente global de transferencia de calor “K_G”**

Realizamos un balance de masa y energía para determinar la temperatura de salida de los gases residuales. Para ello asumimos un rendimiento del pre calentador $\eta_{\text{pre}} = 95\%$ inicialmente.

$$\dot{m}_{\text{GC}} * h_{\text{GC-1}} + \dot{m}_{\text{aire}} * h_{\text{aire-1}} = \dot{m}_{\text{GC}} * h_{\text{GC-2}} + \dot{m}_{\text{aire}} * h_{\text{aire-2}}$$

$$\dot{m}_{\text{GC}}(h_{\text{GC-1}} - h_{\text{GC-2}})\eta_{\text{pre}} = \dot{m}_{\text{aire}}(h_{\text{aire-2}} - h_{\text{aire-1}})$$

$$0.1869 * (187.9559 - h_{\text{GC-2}}) * 0.95 = 0.1835 * (80.72 - 24.3106)$$

$$h_{\text{GC-2}} = 129.6980$$

De acuerdo a las tablas termodinámicas (anexo), determinamos el calor específico “Cp₂” para poder calcular la temperatura a la que sale los gases de combustión “T_{GC-2}”.

$$T_{GC-2} = \frac{h_{GC-2}}{Cp_2} = \frac{129.6980}{1.0741} = 120.7503 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Determinamos la temperatura media del aire “T_{aire}” que ingresa y sale del pre calentador

$$\bar{T}_{aire} = \frac{24.3106 + 80}{2} = 52.1553 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Lo mismo con los gases de combustión, determinamos la temperatura media “T_{GC}” que ingresa y sale del pre calentador

$$\bar{T}_{GC} = \frac{174.0333 + 120.7503}{2} = 147.3918 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Determinamos los parámetros promedios térmicos de los gases de combustión y del aire a temperatura media

TABLA 17: Parámetros promedios de los gases de combustión y del aire

$\bar{T}_{GC} = 147.3918 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\bar{T}_{aire} = 52.1553 \text{ } ^\circ\text{C}$
$v_{GC} = 26.8763 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$	$v_a = 18.19 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$
$k_{GR} = 0.0354 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ\text{C}}$	$k_a = 0.02751 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ\text{C}}$
$Pr_{GR} = 0.6805$	$Pr_a = 0.7222$
$\rho_{GR} = 0.8543 \frac{kg}{m^3}$	$\rho_a = 1.0849 \frac{kg}{m^3}$

Fuente: Yunus A. Cengel, 2007.

Como no se conoce la velocidad de los gases residuales “V_{GR}”, calculamos con la sección transversal de la chimenea

$$\dot{m}_{GR} = \rho_{GR} * V_{GR} * S_{chimenea}$$

$$V_{GR} = \frac{0.1869}{0.02918m^2 * 0.8005} = 8 \frac{m}{s}$$

Calculamos el flujo másico de los gases residuales unitario “ \dot{m}_{GR-u} ” que pasa por cada tubo

$$\dot{m}_{GR-u} = \frac{\dot{m}_{GR}}{N} = \frac{0.1869}{N}$$

Para calcular el diámetro de los tubos del pre calentador de aire, partimos de la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{GR-u} = \rho_{GR} * V_{GR} * S_{tub}$$

Reemplazando con la ecuación de la sección transversal de una tubería “ S_{tub} ”

$$S_{tub} = \frac{\pi * d_{int}^2}{4}$$

Igualando las ecuaciones obtenemos el número de tubo “ N ” en función del diámetro “ d_{int} ”.

$$\frac{\left(0.1869 \frac{kg}{s}\right)}{N} = \left(0.8543 \frac{kg}{m^3}\right) \left(8 \frac{m}{s}\right) \left(\frac{\pi * d_{int}^2}{4} m^2\right)$$

$$N = \frac{0.03481}{d_{int}^2}$$

Determinamos el Número de Reynolds de los gases residuales “ Re_{GR} ” en función del diámetro

$$Re_{GR} = \frac{V_{aire} * dh}{\gamma_{aire}} = \frac{\left(8 \frac{m}{s}\right) (d_{int})}{26.8763 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}} = 297660.0202 * d_{int}$$

Determinamos el número de Nusselt de los gases residuales “ Nu_{GR} ”, en función del diámetro

$$Nu_{GR} = 0.023 * (Re_{GR})^{0.8} * (Pr_{GR})^{0.3}$$

$$Nu_{GR} = 0.023 * (297660.0202 * d_{int})^{0.8} * (0.6805)^{0.3} = 471.8842 * d_{int}^{0.8}$$

Luego se determina el coeficiente de transferencia por convección interno “ h_{GR} ” para los gases residuales, en función del diámetro.

$$h_{GR} = \frac{k_{GR} * Nu_{GR}}{d} = \frac{0.0354 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * 471.8842 * d_{int}^{0.8}}{d} = \frac{16.7047}{d^{0.2}}$$

Hallamos el diámetro hidráulico

$$dh = \frac{4S}{P} = \frac{4 * B * H - N \left(\frac{\pi d^2}{4} \right)}{2 * B + H + N * \pi * d}$$

Reemplazamos el número de tubos “N” en la ecuación del diámetro hidráulico

$$dh = \frac{2 * 0.80 * 1 - N * \frac{\pi d^2}{4}}{0.80 + 1 + N * \pi * d} = \frac{2 * 0.80m * 1m - \frac{0.03715}{d_{int}^2} * \frac{\pi d^2}{4}}{0.80m + 1m + \frac{0.03715}{d_{int}^2} * \pi * d}$$

$$dh = \frac{1.5708}{1.8 + \frac{0.1167}{d}}$$

Determinamos el área por donde pasara el aire

$$A_{p\text{-aire}} = B * H - N * \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A_{p\text{-aire}} = 0.80 * 1 - \left(\frac{0.03715}{d^2} \right) \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) = 0.7708m^2$$

Determinamos la velocidad del aire “ V_{aire} ”

$$\dot{m}_{aire} = \rho_{aire} * V_{aire} * A_{p\text{-aire}}$$

$$V_{aire} = \frac{\dot{m}_{aire}}{\rho_{aire} * A_{p\text{-aire}}} = \frac{0.1835 \frac{Kg}{s}}{1.0849 \frac{kg}{m^3} * 0.7708m^2} = 0.2194 \frac{m}{s}$$

Calculamos el número de Reynolds exterior “Re_{aire}”, para el aire

$$Re_{aire} = \frac{V_{aire} * dh}{\gamma_{aire}} = \frac{0.2194 \frac{m}{s} * \frac{1.5708}{1.8 + \frac{0.1167}{d}}}{18.19 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}}$$

$$Re_{aire} = \frac{18946.3177}{1.8 + \frac{0.1167}{d}}$$

Con el número de Reynolds “Re_{aire}” en función del diámetro, Calculamos el número de Nusselt “Nu_{aire}”, para el aire

$$Nu_{aire} = \varepsilon * C * Re_{aire}^m * Pr^{0.36}$$

Dónde: ε = Coeficiente de correlación.

$\varepsilon = 1$ (tabla)

Escogemos la ubicación del banco de tubos en tres bolillos por ser los más eficientes en cuanto a transferencia de calor

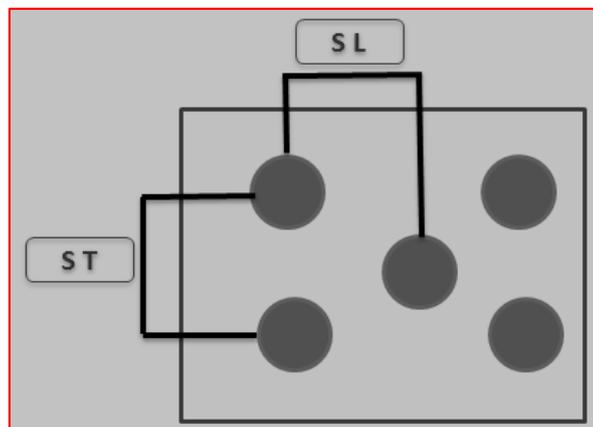


Figura 11: esquema de la ubicación en tres bolillo de los tubos del pre calentador de aire de la caldera.

C, m = Factores según geometría (TABLA. Transferencia de Calor: Yunus Cengel)

$$\frac{ST}{D} = \frac{SL}{D} = 1.5 \text{ (TABLA. Transferencia de Calor: Yunus Cengel)}$$

$$C = 0.518$$

$$m = 0.556$$

Reemplazando los datos tenemos:

$$Nu_{\text{aire}} = 1 * 0.518 * \left(\frac{18946.3177}{1.8 + \frac{0.1167}{d}} \right)^{0.556} * 0.7222^{0.36}$$

$$Nu_{\text{aire}} = \frac{110.0906}{\left(1.8 + \frac{0.1167}{d} \right)^{0.556}}$$

Luego se determina el coeficiente de transferencia por convección externo “ h_{aire} ” para el aire, que nos quedará en función del diámetro.

$$h_{\text{aire}} = \frac{k_{\text{aire}} * Nu_{\text{aire}}}{dh} = \frac{0.02751 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * \frac{110.0906}{\left(1.8 + \frac{0.1167}{d} \right)^{0.556}}}{\frac{1.5708}{1.8 + \frac{0.1167}{d}}}$$

Para simplificar la ecuación utilizamos una variable (A) para representar:

$$A = 1.8 + \frac{0.1167}{d}$$

Reemplazando nos quedara de la siguiente manera:

$$h_{\text{aire}} = \frac{0.02751 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} * \frac{110.0906}{(A)^{0.556}}}{A}$$

$$h_{\text{aire}} = 1.9280 * A^{0.444}$$

$$h_{\text{aire}} = 1.9280 * \left(1.8 + \frac{0.1167}{d} \right)^{0.444}$$

Con los datos obtenidos, calculamos el Coeficiente global de transferencia de calor “ K_G ”:

$$K_G = \frac{1}{\frac{1}{h_{G.R.}} + \frac{1}{h_{\text{aire}}} + \frac{\delta_{\text{tub.}}}{K_{\text{material}}} + R^\circ}$$

Dónde:

$\delta_{\text{tub.}}$ = Espesor del tubo del recuperador de calor = 2 mm

K_{material} = Conducctividad térmica del material = $50 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$

$$R^\circ = \text{Resistencia térmica de ensuciamiento} = 0.002 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ } ^\circ\text{C}$$

Finalmente nos quedara el coeficiente global de transferencia de calor “ K_G ”, en función del diámetro.

$$K_G = \frac{1}{\frac{1}{\frac{16.7047}{d^{0.2}}} + \frac{1}{1.9280 * \left(1.8 + \frac{0.1167}{d}\right)^{0.444}} + \frac{0.002}{50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}} + 0.002 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \text{ } ^\circ\text{C}}$$

- **Cálculo del rendimiento real del pre calentador de aire “ $\eta_{\text{real-pre}}$ ”**

Calculamos el Rendimiento real del pre calentador de aire con los nuevos parámetros.

$$\eta_{\text{real-pre}} = \frac{\dot{m}_{\text{aire}} * C_{p\text{aire}}(T_{\text{aire-2}} - T_{\text{aire-1}})}{\dot{m}_{\text{GC}} * C_{p\text{GC}}(T_{\text{GC-1}} - T_{\text{GC-2}})} * 100\%$$

$$\eta_{\text{real-pre}} = \frac{0.1835 * 1.007 * (80 - 24.3160)}{0.1869 * 1.0795 * (174.0333 - 120.7503)} * 100\% = 95.7232\%$$

- **Cálculo del calor útil del pre calentador de aire “ $\dot{Q}_{\text{pre-aire}}$ ”**

$$\dot{Q}_{\text{pre-aire}} = \dot{m}_{\text{GC}} * C_{p\text{GC}}(T_{\text{GC-1}} - T_{\text{GC-2}})\eta_{\text{real-pre}}$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{pre-aire}} &= 0.1869 * 1.0795 * (174.0333 - 120.7503) * 0.957232 \\ &= 10.2905 \text{ KW} \end{aligned}$$

- **Cálculo de la diferencia de temperatura media logarítmica**

Debido a que el flujo de gases del precalentado es corriente en cruz, utilizamos el siguiente diagrama

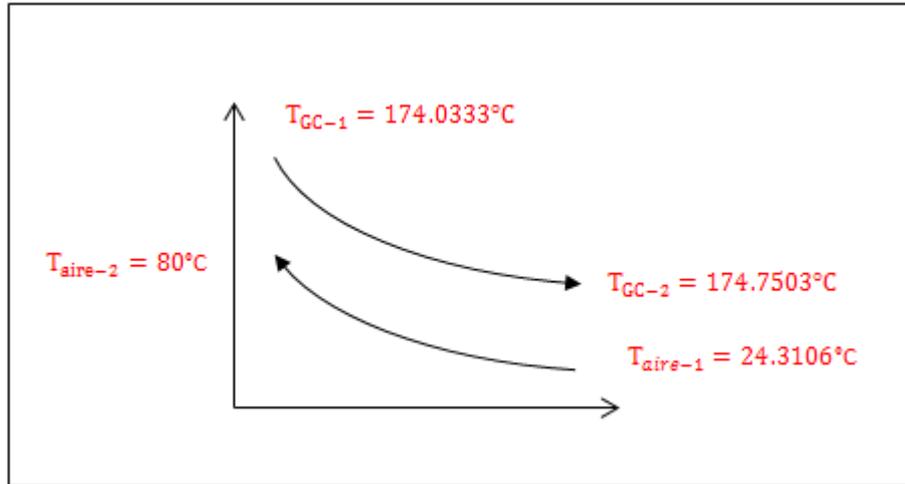


Figura 12: diagrama de la temperatura media logarítmica del pre calentador de aire corriente en cruz

$$T = \sqrt{(174.0333 - 120.7503)^2 + (80 - 24.3106)^2} = 77.9907 \text{ °C}$$

Calculamos la temperatura máxima y mínima de los gases

$$\Delta T_{\text{máx}} = 120.7503 - 24.3106 = 96.4397 \text{ °C}$$

$$\Delta T_{\text{mín}} = 174.0333 - 80 = 94.0333 \text{ °C}$$

Finalmente calculamos la temperatura media logarítmica

$$\Delta T_m = \frac{T}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{máx}} + \Delta t_{\text{mín}} + t}{\Delta t_{\text{máx}} + \Delta t_{\text{mín}} - t}\right)}$$

$$\Delta t_m = \frac{77.9907 \text{ °C}}{\ln\left(\frac{96.4397 \text{ °C} + 94.0333 \text{ °C} + 77.9907 \text{ °C}}{96.4397 \text{ °C} + 94.0333 \text{ °C} - 77.9907 \text{ °C}}\right)} = 89.6527 \text{ °C}$$

- **Cálculo de la superficie del pre calentador de aire**

Hallamos la superficie del pre calentador de aire

$$S_{pre} = A_{unitaria-tubo} * N_{tubos} * N_{pasos}$$

Pero:

$$A_{unitaria-tubo} = \pi * d * L$$

Dónde:

L: longitud de los tubos = 0.90m

N_{pasos}: numero de pasos = 3

La superficie del pre calentador de aire “S_{pre.}”, nos quedará en función del diámetro

$$S_{pre} = \pi * d * 0.90m * \frac{0.03715}{d_{int}^2} * 3$$

$$S_{pre} = \frac{0.3151}{d} m^2$$

- **Cálculo del diámetro de los tubos del pre calentador de aire**

De la siguiente ecuación del calor útil del pre calentador de aire:

$$\dot{Q}_{pre-aire} = K_G * S_{IC} * \Delta T_{ml}$$

Reemplazando todos los datos la ecuación nos quedara en función del diámetro

$$10290.5 W = \left(\frac{1}{\frac{1}{16.7047} + \frac{1}{1.9280 * \left(1.8 + \frac{0.1167}{d}\right)^{0.444} + \frac{0.002}{50 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}} + 0.002 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}}} \right) \left(\frac{0.3151}{d} m^2 \right) (89.6527^\circ C)$$

$$d = 0.0131731m$$

Finalmente determinamos el número de tubos que va a contener el pre calentador de aire, reemplazando en la siguiente ecuación:

$$N = \frac{0.03481}{d^2} = \frac{0.03481}{0.0131731^2} = 200.59 \cong 201 \text{ tubos}$$

$$S_{pre} = \frac{0.3151}{d} \text{ m}^2 = \frac{0.3151}{0.0131731\text{m}} = 23.92 \text{ m}^2$$

3.4.2. Aislamiento térmico de la caldera

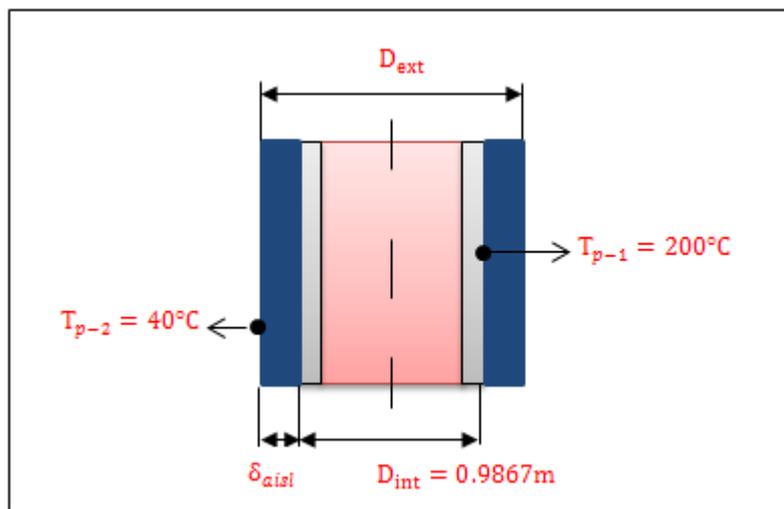


Figura 13: esquema del aislamiento térmico de la caldera

- **Cálculo de la temperatura media**

Consideramos:

T_{p-2} : temperatura de la caldera aislada = 40°C

De las mediciones realizadas (tabla 06 07y 08) se determinó:

T_{p-1} : temperatura de la caldera sin aislar = 200°C

Calculamos la Temperatura media:

$$\bar{T} = \frac{T_{p-1} + T_{p-2}}{2} = \frac{200 + 40^\circ\text{C}}{2} = 120^\circ\text{C}$$

- **Cálculo del coeficiente de conductividad térmica de la fibra de vidrio**

Se escogió el aislante de fibra de vidrio por ser más eficiente, que la lana mineral, para ello calculamos el Coeficiente de conductividad térmica del aislante de fibra de vidrio.

$$K_{FV} = 0.04176 + 0.000232 * \bar{T} = 0.04176 + 0.000232 * 120^{\circ}\text{C} = 0.0696^{\circ}\text{C}$$

De cálculos anteriores se sabe que el calor perdido por convección es

$$\dot{Q}_{p\text{-conv}} = 8438.5 \text{ W}$$

- **Cálculo del espesor del aislante térmico**

De la ecuación de Fourier despejamos el diámetro exterior aislado de la caldera

$$D_{\text{ext}} = D_{\text{int}} * e^{\frac{2 * \pi * K_{\text{aisl}} * L * (T_{p\text{-int}} - T_{p\text{-ext}})}{\dot{Q}_{p\text{-conv}}}}$$

$$D_{\text{ext}} = 0.9867 * e^{\frac{2 * \pi * 0.0696^{\circ}\text{C} * 2.61\text{m} * (200 - 40)}{8438.5 \text{ W}}} = 1.00828 \text{ m}$$

Por lo tanto el espesor de aislante térmico de la caldera para que la temperatura de la caldera aislada sea 40°C, es:

$$\delta_{\text{aisl}} = D_{\text{ext}} - D_{\text{int}} = 1.00828\text{m} - 0.9867\text{m} = 0.02158\text{m} = 21.58\text{mm}$$

3.4.3. Ablandador de agua para calderas

Como no se cuenta con vapor condensado de ingreso al tanque de ablandador de agua, El flujo másico de vapor que produce la caldera será igual al flujo másico agua que ingresa a la caldera, por lo tanto:

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = \dot{m}_{\text{agua}} = 72.36 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

De la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{\text{agua}} = \dot{V}_{\text{agua}} * \rho_{\text{agua}}$$

Dónde:

\dot{m}_{agua} : flujo masico de agua

\dot{V}_{agua} : flujo volumétrico del agua

ρ_{agua} : densidad del agua a temperatura ambiente

Despejamos y calculamos el flujo volumétrico del agua " \dot{V}_{agua} ":

$$\dot{V}_{\text{agua}} = \frac{\dot{m}_{\text{agua}}}{\rho_{\text{agua}}} = \frac{72.36 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}}{997.2160 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}} = 0.072562 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Convertimos a galones por hora

sabiendo que 1 Gal = 3.785 L

$$\dot{V}_{\text{agua}} = 0.072562 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{1000\text{L}}{1\text{m}^3} = 72.5620 \frac{\text{L}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ Gal}}{3.785 \text{ L}} = 19.1709 \frac{\text{Gal}}{\text{h}}$$

- **Cálculo de dureza, como CaCO₃ y MgCO₃ a retirar**

Según análisis de laboratorio de la universidad nacional de Trujillo (anexo)

Dureza total del agua = 388 ppm.

Convertimos a granos por galón $\left[\frac{\text{granos}}{\text{Gal}}\right]$:

$$\text{Dureza total} = \frac{388 \text{ ppm}}{17.1} = 22.69 \frac{\text{granos}}{\text{Gal}}$$

Calculamos la dureza a retirar:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{agua}} \left[\frac{\text{Gal}}{\text{h}}\right] * \text{Dureza} \left[\frac{\text{granos}}{\text{Gal}}\right] &= 19.1709 \frac{\text{Gal}}{\text{h}} * 22.69 \frac{\text{granos}}{\text{Gal}} \\ &= 434.9877 \frac{\text{granos}}{\text{h}} \end{aligned}$$

- **Cálculo de dureza compensada:**

$$\text{Dureza}_{\text{comp}} = 1.2 * 22.69 \frac{\text{granos}}{\text{Gal}} = 27.228 \frac{\text{granos}}{\text{Gal}}$$

- **Cálculo del volumen de resina sintética**

Primero Convertimos el flujo volumétrico del agua " \dot{V}_{agua} " a galones por minuto

$$\dot{V}_{\text{agua}} = 19.1709 \frac{\text{Gal}}{\text{h}} * \frac{1\text{h}}{60 \text{ min}} = 0.3195 \frac{\text{Gal}}{\text{min}}$$

Luego calculamos el volumen de resina sintética “ V_{resina} ”

$$V_{\text{resina}} = \frac{\dot{V}_{\text{agua}}}{V_{\text{resina-u}}} = \frac{0.3195 \frac{\text{Gal}}{\text{min}}}{3.5 \frac{\text{pie}^3}{\frac{\text{Gal}}{\text{min}}}} = 0.09129 \text{ pie}^3$$

- **Cálculo de la captura total de resina**

El tiempo de operación de caldera por día es de 15 h/d

Captura total de resina según su capacidad de intercambio iónico en función de la cantidad de sal para salmuera:

Según MINSA, medida estandarizada

$$15 \frac{\text{Lb sal}}{\text{pie}^3} = 30000 \frac{\text{granos hasta saturación}}{\text{pie}^3 \text{ de resina}}$$

Calculamos la captura total de resina

$$\text{Captura total de resina} = V_{\text{resina}} * 30000 \frac{\text{granos}}{\text{pie}^3}$$

$$\text{Captura total de resina} = 0.09129 \text{ pie}^3 * 30000 \frac{\text{granos}}{\text{pie}^3} = 2738.7 \text{ granos}$$

- **Cálculo del volumen de agua entre regeneraciones**

$$V_{\text{agua-reg}} = \frac{\text{Captura total de resina}}{\text{Dureza compensada del agua}} = \frac{2738.7 \text{ granos}}{27.228 \frac{\text{granos}}{\text{Gal}}} = 100.5839 \text{ Gal}$$

- **Intervalo de tiempo entre regeneración**

$$\Delta\text{tiempo} = \frac{V_{\text{agua-reg}}}{\dot{V}_{\text{agua}}} = \frac{100.5839 \text{ Gal}}{19.1709 \frac{\text{Gal}}{\text{h}}} = 5.2466 \text{ h}$$

$$\Delta\text{tiempo} = \frac{8 \frac{\text{h}}{\text{turno}}}{5.2466 \text{ h}} = \frac{1.5248}{\text{turno}} * 0.09129 \text{ pie}^3 = 0.1392 \frac{\text{pie}^3}{\text{turno}}$$

$$\Delta \text{tiempo} = 0.1392 \frac{\text{pie}^3}{\text{turno}} * 15 \frac{\text{Lb sal}}{\text{pie}^3} * \frac{0.4536}{1 \text{ Lb}} = 0.9471 \frac{\text{Kg}}{\text{turno}}$$

3.5. Cálculo del rendimiento de la caldera con las mejoras implementadas

3.5.1. Cálculo de calor total “ \dot{Q}_{total} ” con el aire precalentado

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{m}_{\text{cble}}(\text{PCI} + R_{\text{a-cble}} * h_{\text{aire}})$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{total}} &= 0.003447 \frac{\text{Kg}_{\text{cble}}}{\text{s}} \left(27000 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 52.2357 \frac{\text{Kg}_{\text{aire}}}{\text{Kg}_{\text{cble}}} * 80.72 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right) \\ &= 107.8814 \text{ KW} \end{aligned}$$

3.5.2. Cálculo de las pérdidas fijas y variables en estado de mejora

- Cálculo de pérdidas porcentuales de los gases residuales “ q_{GR} ”

Determinamos el porcentaje que representa las perdidas por los gases residuales “ \dot{Q}_{GR} ”, del calor total producido por la caldera “ \dot{Q}_{total} ”, en estado de mejora.

$$q_{\text{GR}} = \frac{\dot{Q}_{\text{GR}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} * 100\% = \frac{29.6031 \text{ KW}}{107.8814 \text{ KW}} * 100\% = 27.4404\%$$

- Cálculo de las pérdidas porcentuales por convección “ q_{conv} ”

La velocidad promedio del aire

$$\text{Vel}_{\text{aire}} = 2.87 \text{ m/s}$$

Hallamos el coeficiente de transferencia de calor “ h_p ”, con la velocidad promedio

$$h_{p-\infty} = 11.6 + 6.96 * \sqrt{\bar{U}_{\text{viento}}} = 11.6 + 6.96 \sqrt{2.87 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 23.3909 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Determinamos el calor perdido por convección $\dot{Q}_{p-\text{conv}}$

$$\dot{Q}_{p-\text{conv}} = h_{p-\infty} * S_L * (\bar{T}_p - \bar{T}_\infty) * 10^{-3}$$

$$\dot{Q}_{p-\text{conv}} = 23.3909 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} * 8.89 \text{ m}^2 (40^\circ\text{C} - 24.31^\circ\text{C}) * 10^{-3} = 3.2626 \text{ KW}$$

Determinamos el porcentaje que representa las pérdidas por convección “ \dot{Q}_{p-conv} ”, del calor total producido por la caldera “ \dot{Q}_{total} ”, en estado de mejora

$$q_{conv} = \frac{\dot{Q}_{GR}}{\dot{Q}_{total}} * 100\% = \frac{3.2626 \text{ KW}}{107.8814 \text{ KW}} * 100 = 3.0243\%$$

- **Cálculo de las pérdidas porcentual en el hogar “ q_{hogar} ”**

Determinamos el porcentaje que representa las pérdidas en el hogar “ $\dot{Q}_{P-hogar}$ ”, del calor total producido por la caldera “ \dot{Q}_{total} ”, en estado de mejora

$$q_{hogar} = \frac{\dot{Q}_{P-hogar}}{\dot{Q}_{total}} * 100\% = \frac{3.5916 \text{ KW}}{107.8814 \text{ KW}} * 100 = 3.3292\%$$

- **Cálculo de pérdidas porcentual por purgas “ q_{purgas} ”**

Debido a que ingresa flujo másico de agua blanda a la caldera, los sólidos totales disueltos son:

$$TSD_{operacion} = 674\text{ppm} - 388\text{ppm} = 286\text{ppm}$$

Determinamos el flujo másico de purga “ \dot{m}_{purga} ”, en estado de mejora.

$$\begin{aligned} \dot{m}_{purga} &= \frac{286 \text{ ppm}}{3500\text{ppm} - 286\text{ppm}} * \dot{m}_v = 0.08898 * 0.0201 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \\ &= 1.7886 * 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Calculamos el Calor perdido por purgas “ $\dot{Q}_{p-purga}$ ”

$$\dot{Q}_{p-purga} = 1.7886 * 10^{-3} \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \left(573.23 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - 99.9704 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \right) = 0.8464 \text{ KW}$$

Determinamos el porcentaje que representa las pérdidas por purgas “ $\dot{Q}_{P-purgas}$ ”, del calor total producido por la caldera “ \dot{Q}_{total} ”, en estado de mejora

$$q_{\text{purgas}} = \frac{\dot{Q}_{\text{P-purgas}}}{\dot{Q}_{\text{total}}} * 100 = \frac{0.8464 \text{ KW}}{107.8814 \text{ KW}} * 100 = 0.7846 \%$$

3.5.3. Rendimiento nuevo

$$\eta_{\text{caldera}} = 100\% - (q_{\text{GR}} + q_{\text{conv}} + q_{\text{hogar}} + q_{\text{purgas}})\%$$

$$\eta_{\text{caldera}} = 100\% - (27.4404 + 3.0243 + 3.3292 + 0.7846)\% = 65.4215\%$$

Hacemos una comparación de los valores porcentuales de la caldera en estado actual y con las mejoras.

TABLA 18: Comparación del rendimiento en estado actual y después de las mejoras

Pérdidas de calor de la caldera	Estado actual	Con las mejoras
Gases residuales	31.0971%	27.4404%
Por convección	8.6503%	3.0243%
En el hogar	3.6817%	3.3292%
Por purgas	2.3274%	0.7846%
RENDIMIENTO	54.1647%	65.4215%

Fuente: elaboración propia

3.6. Análisis económico

3.6.1. Costo de generación de vapor actual

Tabla 19: costo de compra de insumos, repuestos, materiales y mano de obra de la empresa piel Trujillo SAC

Costo de agua de cisterna	15 soles/m ³
Costo de carbón	0.45 soles/kg
Costo de repuestos y materiales para el mantenimiento de caldera	300 soles/mes
sueldo de operario de caldera	1200 soles/mes
Sueldo de personal técnico.	1200 soles/mes

Fuente: Piel Trujillo SAC, 2018.

- **Costos de Insumos**

Costo de agua

Actualmente la empresa piel Trujillo SAC, compra el agua de cisterna que le cuesta 15 soles el m³, por lo tanto determinamos el flujo volumétrico del agua " \dot{V}_{agua} " por hora.

$$\dot{V}_{\text{agua}} = \frac{\dot{m}_{\text{agua}}}{\rho_{\text{agua}}} = \frac{72.36 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.0725 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\text{Costo de agua} = 0.0725 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 15 \frac{\text{soles}}{\text{m}^3} * 360 \frac{\text{h}}{\text{mes}} = 391.50 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}$$

Costo del carbón " $C_{\text{CARBÓN}}$ "

$$C_{\text{CARBÓN}} = 12.41 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 0.45 \frac{\text{soles}}{\text{kg}} * 360 \frac{\text{h}}{\text{mes}} = 2010.42 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}$$

Costo total de insumos " CT_{INSUMOS} ".

$$CT_{\text{INSUMOS}} = 391.50 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} + 2010.42 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} = 2401.92 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}$$

- **Costo total de mantenimiento**

Generalmente 1 vez por semana se le hace mantenimiento a la caldera

Costo de material

$$C_{\text{material}} = 300.00 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}$$

Costo de mano de obra de reparación

$$CMO_{\text{reparación}} = \frac{1200 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}}{192 \frac{\text{h}}{\text{mes}}} * 8 \frac{\text{h}}{\text{vez}} * 4 \frac{\text{vez}}{\text{mes}} = 200 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}$$

Costo total de mantenimiento “CT_{MANT.}”

$$CT_{MANT.} = 300.00 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} + 200 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} = 500 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}$$

- **Costo de mano de obra de operación**

Costo de mano de obra de operación de la caldera “CMO_{op}”

$$CMO_{op} = 1200 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} * 2 = 2400 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}$$

- **Costo total de generación de vapor “CT_{GEN-VAPOR}”**

$$CT_{GEN-VAPOR-1} = 2401.92 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} + 500 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} + 2400 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} = 5301.92 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}$$

3.6.2. Costo total de generación de vapor después de las mejoras

- **Costo de insumos**

Determinamos el consumo de combustible luego de las mejoras, utilizando la ecuación del calor total “ \dot{Q}_{total} ”

$$\dot{Q}_{total} = \dot{m}_{cble}(PCI + R_{a-cble} * h_{aire})$$

$$\dot{m}_{cble} = \frac{\dot{Q}_{total}}{(PCI + R_{a-cble} * h_{aire})} = \frac{97.5211 \text{ KW}}{\left(29000 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 52.7389 \frac{\text{Kg}_{aire}}{\text{Kg}_{cble}} * 80.72 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}\right)}$$

$$\dot{m}_{cble} = 0.002932 \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 10.5564 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

El costo de carbón al mes sería:

$$C_{CARBÓN} = 10.5564 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 0.45 \frac{\text{soles}}{\text{kg}} * 360 \frac{\text{h}}{\text{mes}} = 1710.1368 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}$$

El costo de del agua se mantiene.

$$\text{Costo de agua} = 0.0725 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 15 \frac{\text{soles}}{\text{m}^3} * 360 \frac{\text{h}}{\text{mes}} = 391.50 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}$$

Por lo tanto el costo total de insumos será:

$$CT_{\text{INSUMOS}} = 1710.1368 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} + 391.50 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} = 2101.64 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}$$

- **Costo de mantenimiento**

Debido a que se utilizara agua blanda para la generación de vapor, la limpieza de tuberías por las incrustaciones se hará 2 veces por mes.

$$CMO_{\text{reparación}} = \frac{1200 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}}{192 \frac{\text{h}}{\text{mes}}} * 8 \frac{\text{h}}{\text{vez}} * 2 \frac{\text{vez}}{\text{mes}} = 100 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}$$

El costo de material se reducirá a la mitad

$$C_{\text{material}} = 150.00 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}$$

Por lo tanto el costo total de mantenimiento será:

$$CT_{\text{MANT.}} = 100.00 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} + 150.00 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} = 250.00 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}$$

- **Costo de mano de obra de operación**

Costo de mano de obra de operación de la caldera "CMO_{op}", se mantiene.

$$CMO_{\text{op}} = 1200 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} * 2 = 2400 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}$$

$$CT_{\text{GEN-VAPOR-2}} = 2101.64 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} + 250.00 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} + 2400 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} = 4751.64 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}$$

3.6.3. Beneficio económico

$$\text{BENEFICIO} = CT_{\text{GEN-VAPOR-1}} - CT_{\text{GEN-VAPOR-2}}$$

$$\text{BENEFICIO} = 5301.92 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} - 4751.64 \frac{\text{soles}}{\text{mes}} = 550.28 \frac{\text{soles}}{\text{mes}}$$

3.7. Análisis medio ambiental

3.7.1. Balance de combustión actual

Tomamos una muestra de 100 kg que representa el 100%, por lo tanto usamos la siguiente fórmula para determinar el número de moles "n":

$$n = \frac{m}{M}$$

Dónde:

m: masa

M: peso molecular

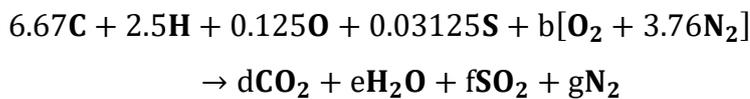
$$n_{\text{carbono}} = \frac{m}{M} = \frac{80}{12} = 6.67 \text{ kmol}$$

$$n_{\text{hidrogeno}} = \frac{m}{M} = \frac{2.5}{1} = 2.5 \text{ kmol}$$

$$n_{\text{oxigeno}} = \frac{m}{M} = \frac{2}{16} = 0.125 \text{ kmol}$$

$$n_{\text{azufre}} = \frac{m}{M} = \frac{1}{32} = 0.03125 \text{ kmol}$$

Ecuación estequiométrica:



Del Balance se obtiene los siguientes valores:

$$b = 7.26$$

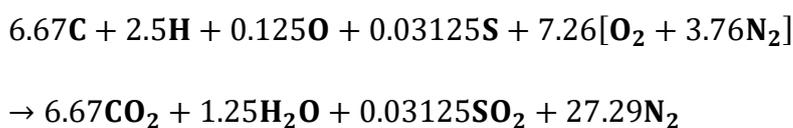
$$d = 6.67$$

$$e = 1.25$$

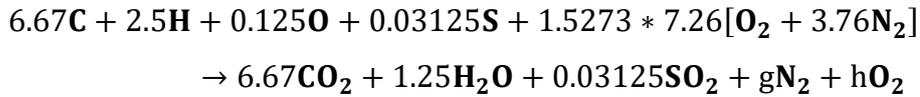
$$f = 0.03125$$

$$g = 27.29$$

Entonces la ecuación queda de la siguiente manera:



La relación de aire combustible tiene un exceso de 152.73%, por lo tanto calculamos la ecuación real:



Del balance se obtiene:

$$g = 41.69$$

$$h = 3.8237$$

Finalmente la ecuación real queda de la siguiente manera

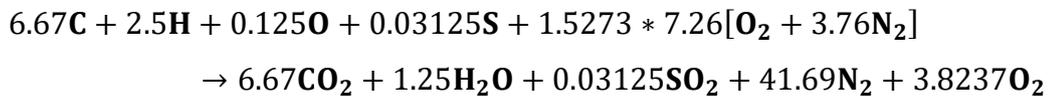


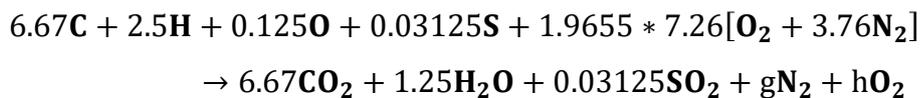
Tabla 20: balance de productos de combustión actual

Producto	N(kmoles)	M molar (kg/kmol)	M(kg)	% relativo
CO ₂	6.67	44	293.48	18.25%
H ₂ O	1.25	18	22.5	1.40%
SO ₂	0.03125	64	2	0.12%
N ₂	41.69	28	1167.32	72.61
O ₂	3.8237	32	122.35	7.61%
total			1607.65	100%

Fuente: elaboración propia

3.7.2. Balance de combustión con las mejoras

La relación de aire combustible en estado de mejora tiene un exceso de 196.55%, por ello calculamos los nuevos productos de la combustión



Del balance se obtiene:

$$g = 53.65$$

$$h = 7$$

Por lo tanto la ecuación real queda de la siguiente manera:

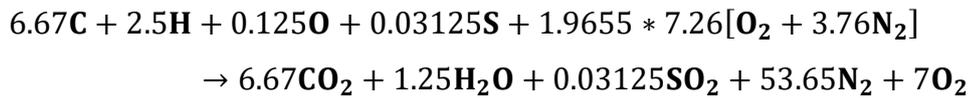


Tabla 21: balance de productos de combustión en mejora

Producto	N(kmoles)	M molar (kg/kmol)	M(kg)	% relativo
CO ₂	6.67	44	293.48	14.35%
H ₂ O	1.25	18	22.5	1.10%
SO ₂	0.03125	64	2	0.098%
N ₂	53.65	28	1502.2	73.49
O ₂	7	32	224	10.96%
total			2044.18	100%

Fuente: elaboración propia

Finalmente hacemos una comparación de los balances de los productos de combustión, el cual se detalla a continuación.

Tabla 22: comparación del balance de productos de combustión actual y en estado de mejora

Producto	% relativo actual	% relativo en mejora
CO ₂	18.25%	14.35%
H ₂ O	1.40%	1.10%
SO ₂	0.12%	0.098%
N ₂	72.61	73.49%
O ₂	7.61%	10.96%

Fuente: elaboración propia

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- La aplicación del mejoramiento del aislante térmico en la caldera pirotubular logro aumentar en un 3% al rendimiento total, esto se corrobora con el estudio de GARCÍA, Erick (2011), en su tesis “Ahorro Energético Aplicado al Rediseño de Calderas y la Administración de sus Recursos”, que logró aumentar la eficiencia en 1%. Esto demuestra que, se puede reducir perdidas energéticas con un buen dimensionamiento de aislante térmico.
- La aplicación de un pre calentador de aire a la caldera pirotubular, calentado el aire hasta 80°C, redujo el consumo de combustible en un 15%, esto permite ahorrar s/. 3603.40 anuales. Comparando con la tesis de Uceda, Anthony (2014), titulada “Utilización Racional de los Gases Residuales, en el Pre calentamiento de Aire de las Calderas Pirotubulares De la Empresa SIDERPERU Con La Finalidad De Reducir El Consumo De Combustible”, también logro una reducción de combustible de 8.94%, calentando el aire de ingreso a la caldera hasta 120°C, produciendo un ahorro anual de \$ 1065074.82.
- CARBAJAL, Roland (2013), en su tesis “Análisis del rendimiento energético de la caldera pirotubular APIN de 400 BHP a través del método indirecto en la empresa ALICORP-Trujillo”, determinó un rendimiento actual de 78%. Mientras que en este estudio se determinó un rendimiento de 55%, aplicando la misma metodología.

Tabla 23: comparación del resultado en estado actual entre nuestro estudio y el CARBAJAL, Roland (2013).

ESTADO ACTUAL DE CALDERA		
Pérdidas de calor de la caldera	Piel Trujillo SAC	ALICORP-Trujillo
Gases residuales	31.0971%	14.92%
Por convección	8.6503%	0.47%
En el hogar	3.6817%	0.91%
Por purgas	2.3274%	3.8%
RENDIMIENTO	54.1647%	78%

Fuente: Elaboración propia

Asimismo aplicando las mejoras propuestas, se puede apreciar un aumento en el rendimiento como se aprecia a continuación:

Tabla 24: comparación del resultado en estado de mejora entre nuestro estudio y el CARBAJAL, Roland (2013).

EN ESTADO DE MEJORA		
Pérdidas de calor de la caldera	Piel Trujillo SAC	ALICORP-Trujillo
Gases residuales	27.4404%	7%
Por convección	3.0243%	0.28%
En el hogar	3.3292%	0.90%
Por purgas	0.7846%	0.19%
RENDIMIENTO	65.4215%	90.55%

Fuente: Elaboración propia

V. CONCLUSIONES

- Se logró obtener los datos necesarios para la elaboración del análisis energético, para ello se utilizó una cámara termográfica, un anemómetro digital y la consultoría al operador de caldera, el cual se registró en la ficha de observación del anexo 01 y que detalla en las tablas 06, 07 y 08. Adicionalmente se realizó un análisis de agua en el laboratorio de química en la universidad nacional de Trujillo, en donde nos indica la dureza del agua y de los sólidos disueltos totales, el cual detalla en el anexo 06.
- Se realizó un esquema actual y en estado de mejora del proceso térmico de la caldera, donde se pudo llegar a la conclusión de que sí era necesario la elaboración de esta, ya que nos muestra un panorama más detallado de las deficiencias que presenta y de cómo se podría mejorar. Detalles en figura 04 y 05.
- En cuanto al rendimiento actual de la caldera, luego de aplicar la metodología de cálculos se logró determinar en un 55%, debido a las altas pérdidas energéticas fijas y variables que posee. En pérdidas fijas se obtuvo: por convección un 8.65%, por purgas un 2.33%, en el hogar 3.68; en pérdidas variables como la de los gases de chimenea se obtuvo un 31.09% de pérdidas. Detalles en tabla 16.
- Se logró determinar las mejoras correspondientes para aumentar el rendimiento de la caldera. se logró determinar la implementación de un intercambiador de calor, que ayudará al aprovechamiento de la energía de los gases residuales de la chimenea, para pre calentar el aire que ingresa a la caldera. También se llegó a la conclusión de la implementación un sistema de ablandamiento de agua por resina sintética, ya que el agua no es tratada y entra con altos índice de dureza (anexo 06), con ello se evitará las pérdidas por purgas. Por otro lado, se llegó a la conclusión del mejoramiento del aislamiento térmico de la caldera, ya que el que posee, está en mal estado, con ello reduciremos las pérdidas por convección.
- Con las mejoras propuestas y aplicando los métodos de cálculos detallada en las teorías relacionadas al tema, se concluye el aumento

del rendimiento de la caldera pirotubular de un 55.16% a un 65.42%. la comparación detalla en la tabla 18.

- Se llegó a la conclusión que el beneficio económico que obtendrá la empresa Piel Trujillo SAC al implementar las mejoras descritas en este estudio en cuanto a producción de vapor, será de S/ 6603.36 anuales.
- Con la reducción del consumo de combustible en un 15%, la reducción de los gases de CO₂ pasaron de 18.35% a 14.25% y de SO₂ de 0.12% a 0.098%. Lo cual se concluye que se redujo en un 4% en gases de CO₂ y 0.022% en SO₂, confirmando así la reducción de impactos ambientales.

VI. REFERENCIAS

ABARCA BAHAMONDES, Pedro. descripción de calderas y generadores de vapor. *achs*. [En línea] [Citado el: 20 de octubre de 2017.] <http://www.achs.cl/portalqa/trabajadores/Capacitacion/CentrodeFichas/Documents/descripcion-de-caldera-y-generadores-de-vapor.pdf>.

CARBAJAL, Roland. 2013. *Análisis del rendimiento energético de la caldera pirotubular APIN de 400 BHP a través del método indirecto en la empresa ALICORP-TRUJILLO*. Facultad de ingeniería, Universidad Cesar Vallejo. Trujillo : s.n., 2013. pág. 80, Tesis.

CENGEL, Yunus A. 2007. *transferencia de calor y masa*. [ed.] Pablo roig. [trad.] jose perez y Brito enriquez. tercera. Reno : MCGRAW-HILL, 2007. pág. 930. ISBN: 978-970-10-6173-2.

DOMINGUEZ, Jose, y otros. 2012. *Guía básica de calderas industriales eficientes*. Madrid : Gráficas Arias Montano, S.A., 2012. pág. 162.

GARCÍA GODÍNE, Erick. 2011. *Ahorro energético aplicado al rediseño de calderas y la administración de sus recursos*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala : s.n., 2011. pág. 222, tesis.

GARCÍA, Erick. 2012. *Ahorro energético aplicado al rediseño de calderas y la administración de sus recursos*. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala : s.n., 2012. pág. 222, Tesis.

GONZALES, Alberto, y otros. 2015. *Eficiencia energética en instalaciones de calefacción y ACS en los edificios*. s.l. : ediciones Paraninfo SA, 2015. pág. 218. ISBN: 978-84-283-9721-6.

IBAÑEZ ESTEBAN, Carlos. 2012. *Propuesta de mejoras para la actividad de los hornos y calderas de una*. Lima, Universidad Peruana de ciencias aplicadas. Lima : s.n., 2012. pág. 124, tesis.

KREITH, Frank. 1970. *Principios de transferencia de calor*. [ed.] Fernando Vasquez. [trad.] Fernando Vasquez. Mexico : Herrero hermanos, sucesores, S.A., 1970. pág. 672.

PAREDES, Raul. 2013. *Termodinámica para ingeniería industrial*. primera. Lima : s.n., 2013. pág. 302. ISBN: 978-9972-2516-5-8.

UCEDA, Anthony. 2014. *Utilización racional de los gases residuales, en el precalentamiento de aire de las calderas pirotubulares de la empresa SIDERPERU con la finalidad de reducir consumo de combustible*. Facultad de Ingeniería, Universidad Cesar Vallejo. Trujillo : s.n., 2014. pág. 135, Tesis.

UNESCO. 2014. Desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. [En línea] 2014. [Citado el: 21 de octubre de 2017.] <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002269/226961S.pdf>.

VASQUEZ CARRASCO, jorge. 2015. *Disminución del consumo de energía calorífica en el proceso de destilación- rectificación para la recuperación de alcohol etílico en solución acuosa, incrementando su eficiencia.* La Libertad, Universidad Nacional de Trujillo. Trujillo : s.n., 2015. pág. 70, Tesis .

VII. ANEXOS

Anexo 01: Ficha de observación

Muestra	Hora	Presión Vapor [PSI]	Temp. Vapor [°C]	Temp. Llama [°C]	Temp. Pared Hogar [°C]	Temp. Pared de caldera [°C]	Temp. Gas Residual [°C]	Flujo De Combustible [Kg/h]	Temp. Ambiente [°C]	Veloc. Viento [M/S]	Temp. Del agua [°C]
1	08:00:00										
2	09:00:00										
3	10:00:00										
4	11:00:00										
5	12:00:00										
6	13:00:00										
7	14:00:00										
8	15:00:00										
9	16:00:00										
10	17:00:00										
PROMEDIO											

Anexo 02: Ficha técnica de la caldera pirotubular de la empresa piel Trujillo SAC.

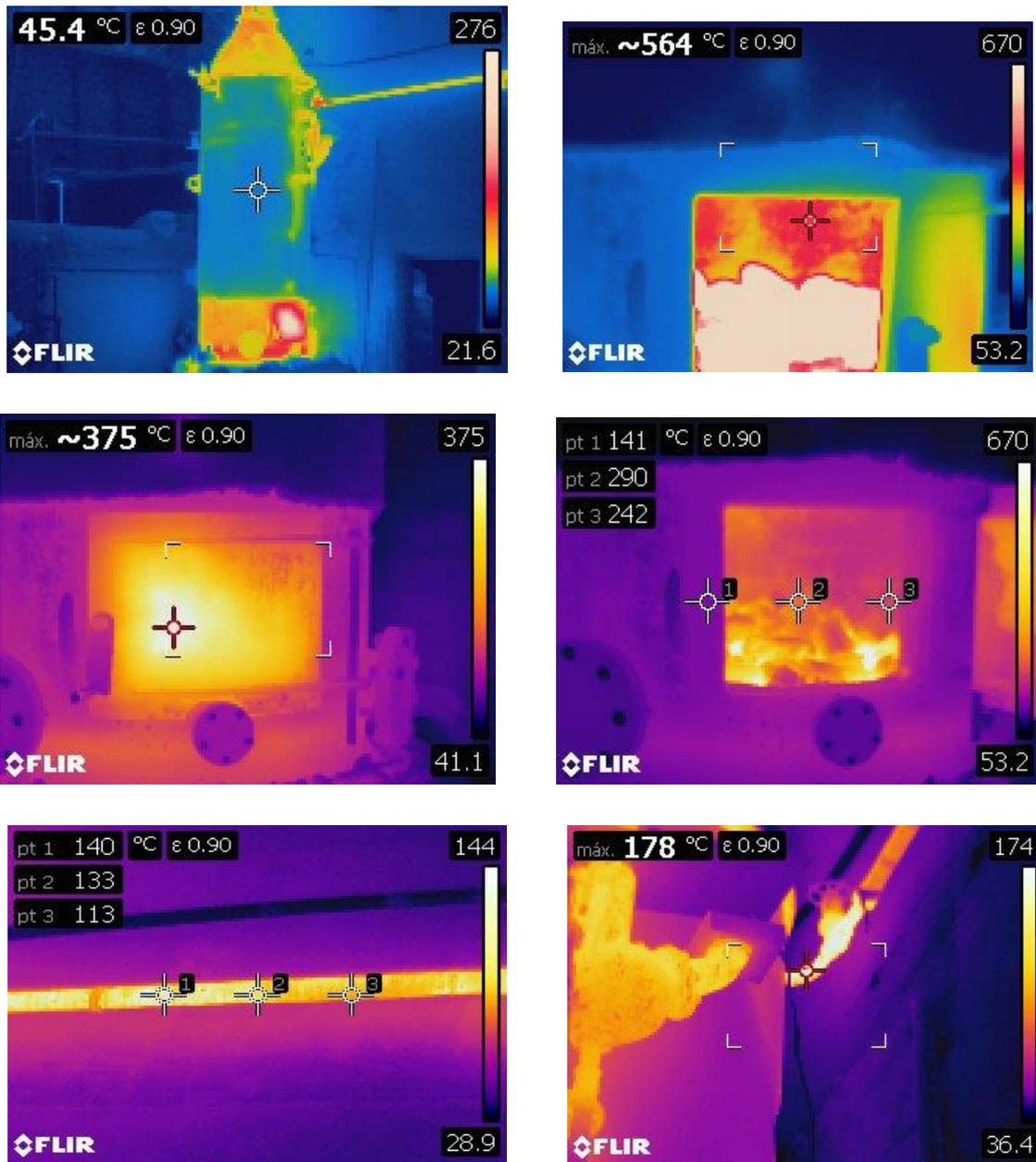
Marca		Fabricación por Industrias Y Negocios Del Norte SAC
Año de fabricación		1998
potencia	BHP	19
Superficie de calentamiento	Pie ²	95.72
Potencia calorífica máxima	BTU/h KJ/h	636025 671006
Presión de diseño	lib/Pulg ²	125
Presión de trabajo	lib/Pulg ²	90
Generación de vapor	Lib/h Ton/h	655 0.297
Combustible utilizado		carbón antracita
Consumo de combustible	Kg/h	27.8

Fuente: eficiencia energética en una pequeña caldera de vapor a carbón antracita en Trujillo MITINCI-COPEI-GTZ, 2000.

Anexo 03: imágenes del estado actual de la caldera



Anexo 04: fotos térmicas de la caldera medida con la cámara termográfica



Anexo 05: fotos de las mediciones con el anemometro



Anexo 06: Informe de análisis del agua que se utiliza para la generación de vapor saturado en la empresa Piel Trujillo SAC.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO
LABORATORIO DE SERVICIOS A LA COMUNIDAD E INVESTIGACION



LASACI

INFORME DE ANÁLISIS
LASACI N°062-2018-IQUNT

SOLICITANTE	: RAUL RISCO ALVAREZ
MUESTRA	: AGUA
FECHA DE INGRESO	: 19 DE ABRIL DEL 2018
MUESTRA RECIBIDA EN LABORATORIO	

DETERMINACIONES	Unidades	Resultados
DUREZA TOTAL	CaCO ₃ , mg/L	388
CALCIO	Ca mg/L	77.6
MAGNESIO	Mg mg/L	46.56
SOLIDOS DISUELTOS	mg/L	674

TRUJILLO 23 DE ABRIL DEL 2018



LASACI
Trujillo, 23 de Abril del 2018

AGUAS - SUELOS - ALIMENTOS - MINERALES - ACEITE - CARBON - CAL

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA
☎ 949959632 / 933623974

Fuente: Laboratorio de la Facultad de Ingeniería Química, UNT.

Anexo 07: Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., $T, ^\circ\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Fuente: Yunus A. Cengel, 2007.

Anexo 08: Propiedades del agua saturada a 1 atm de presión.

Temp., T °C	Presión de saturación, P _{sat} , kPa	Densidad, ρ kg/m ³		Entalpía de vaporización, h _{fg} , kJ/kg	Calor específico, c _p , J/kg · K		Conductividad térmica, k W/m · K		Viscosidad dinámica, μ kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	1.792 × 10 ⁻³	0.922 × 10 ⁻⁵	13.5	1.00	-0.068 × 10 ⁻³
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	1.519 × 10 ⁻³	0.934 × 10 ⁻⁵	11.2	1.00	0.015 × 10 ⁻³
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	1.307 × 10 ⁻³	0.946 × 10 ⁻⁵	9.45	1.00	0.733 × 10 ⁻³
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 186	1 863	0.589	0.0179	1.138 × 10 ⁻³	0.959 × 10 ⁻⁵	8.09	1.00	0.138 × 10 ⁻³
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	1.002 × 10 ⁻³	0.973 × 10 ⁻⁵	7.01	1.00	0.195 × 10 ⁻³
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	0.891 × 10 ⁻³	0.987 × 10 ⁻⁵	6.14	1.00	0.247 × 10 ⁻³
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	0.798 × 10 ⁻³	1.001 × 10 ⁻⁵	5.42	1.00	0.294 × 10 ⁻³
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	0.720 × 10 ⁻³	1.016 × 10 ⁻⁵	4.83	1.00	0.337 × 10 ⁻³
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	0.653 × 10 ⁻³	1.031 × 10 ⁻⁵	4.32	1.00	0.377 × 10 ⁻³
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	0.596 × 10 ⁻³	1.046 × 10 ⁻⁵	3.91	1.00	0.415 × 10 ⁻³
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	0.547 × 10 ⁻³	1.062 × 10 ⁻⁵	3.55	1.00	0.451 × 10 ⁻³
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	0.504 × 10 ⁻³	1.077 × 10 ⁻⁵	3.25	1.00	0.484 × 10 ⁻³
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	0.467 × 10 ⁻³	1.093 × 10 ⁻⁵	2.99	1.00	0.517 × 10 ⁻³
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	0.433 × 10 ⁻³	1.110 × 10 ⁻⁵	2.75	1.00	0.548 × 10 ⁻³
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	0.404 × 10 ⁻³	1.126 × 10 ⁻⁵	2.55	1.00	0.578 × 10 ⁻³
75	38.58	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	0.378 × 10 ⁻³	1.142 × 10 ⁻⁵	2.38	1.00	0.607 × 10 ⁻³
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	0.355 × 10 ⁻³	1.159 × 10 ⁻⁵	2.22	1.00	0.653 × 10 ⁻³
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	0.333 × 10 ⁻³	1.176 × 10 ⁻⁵	2.08	1.00	0.670 × 10 ⁻³
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	0.315 × 10 ⁻³	1.193 × 10 ⁻⁵	1.96	1.00	0.702 × 10 ⁻³
95	84.55	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	0.297 × 10 ⁻³	1.210 × 10 ⁻⁵	1.85	1.00	0.716 × 10 ⁻³
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282 × 10 ⁻³	1.227 × 10 ⁻⁵	1.75	1.00	0.750 × 10 ⁻³
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	0.255 × 10 ⁻³	1.261 × 10 ⁻⁵	1.58	1.00	0.798 × 10 ⁻³
120	198.53	943.4	1.121	2 203	4 244	2 120	0.683	0.0275	0.232 × 10 ⁻³	1.296 × 10 ⁻⁵	1.44	1.00	0.858 × 10 ⁻³
130	270.1	934.6	1.496	2 174	4 263	2 177	0.684	0.0288	0.213 × 10 ⁻³	1.330 × 10 ⁻⁵	1.33	1.01	0.913 × 10 ⁻³
140	361.3	921.7	1.965	2 145	4 286	2 244	0.683	0.0301	0.197 × 10 ⁻³	1.365 × 10 ⁻⁵	1.24	1.02	0.970 × 10 ⁻³
150	475.8	916.6	2.546	2 114	4 311	2 314	0.682	0.0316	0.183 × 10 ⁻³	1.399 × 10 ⁻⁵	1.16	1.02	1.025 × 10 ⁻³
160	617.8	907.4	3.256	2 083	4 340	2 420	0.680	0.0331	0.170 × 10 ⁻³	1.434 × 10 ⁻⁵	1.09	1.05	1.145 × 10 ⁻³
170	791.7	897.7	4.119	2 050	4 370	2 490	0.677	0.0347	0.160 × 10 ⁻³	1.468 × 10 ⁻⁵	1.03	1.05	1.178 × 10 ⁻³
180	1 002.1	887.3	5.153	2 015	4 410	2 590	0.673	0.0364	0.150 × 10 ⁻³	1.502 × 10 ⁻⁵	0.983	1.07	1.210 × 10 ⁻³
190	1 254.4	876.4	6.388	1 979	4 460	2 710	0.669	0.0382	0.142 × 10 ⁻³	1.537 × 10 ⁻⁵	0.947	1.09	1.280 × 10 ⁻³
200	1 553.8	864.3	7.852	1 941	4 500	2 840	0.663	0.0401	0.134 × 10 ⁻³	1.571 × 10 ⁻⁵	0.910	1.11	1.350 × 10 ⁻³
220	2 318	840.3	11.60	1 859	4 610	3 110	0.650	0.0442	0.122 × 10 ⁻³	1.641 × 10 ⁻⁵	0.865	1.15	1.520 × 10 ⁻³
240	3 344	813.7	16.73	1 767	4 760	3 520	0.632	0.0487	0.111 × 10 ⁻³	1.712 × 10 ⁻⁵	0.836	1.24	1.720 × 10 ⁻³
260	4 688	783.7	23.69	1 663	4 970	4 070	0.609	0.0540	0.102 × 10 ⁻³	1.788 × 10 ⁻⁵	0.832	1.35	2.000 × 10 ⁻³
280	6 412	750.8	33.15	1 544	5 280	4 835	0.581	0.0605	0.094 × 10 ⁻³	1.870 × 10 ⁻⁵	0.854	1.49	2.380 × 10 ⁻³
300	8 581	713.8	46.15	1 405	5 750	5 980	0.548	0.0695	0.086 × 10 ⁻³	1.965 × 10 ⁻⁵	0.902	1.69	2.950 × 10 ⁻³
320	11 274	667.1	64.57	1 239	6 540	7 900	0.509	0.0836	0.078 × 10 ⁻³	2.084 × 10 ⁻⁵	1.00	1.97	—
340	14 586	610.5	92.62	1 028	8 240	11 870	0.469	0.110	0.070 × 10 ⁻³	2.255 × 10 ⁻⁵	1.23	2.43	—
360	18 651	528.3	144.0	720	14 690	25 800	0.427	0.178	0.060 × 10 ⁻³	2.571 × 10 ⁻⁵	2.06	3.73	—
374.14	22 090	317.0	317.0	0	∞	∞	∞	∞	0.043 × 10 ⁻³	4.313 × 10 ⁻⁵	—	—	—

Fuente: Yunus A. Cengel, 2007.

Anexo 09: Propiedades físicas de los gases de combustión a 1 atm de presión

Tabla: Propiedades físicas de los gases de combustión a $p = 101325\text{Pa}$, con composición volúmica de los gases

$\text{CO}_2 = 13\%$; $\text{H}_2\text{O} = 11\%$; $\text{N}_2 = 76\%$

t [°C]	ρ [Kg/m ³]	Cp [KJ/Kg*°C]	$k \cdot 10^{-2}$ [W/m*K]	$a \cdot 10^{-2}$ [m ² /h]	$\mu \cdot 10^{-6}$ [N*s/m ²]	$\nu \cdot 10^{-6}$ [m ² /s]	Pr
0	1,2950	1,05	2,28	6,08	15,78	12,20	0,72
100	0,9500	1,07	3,13	11,10	20,39	21,54	0,69
200	0,7480	1,09	4,01	17,6	24,49	32,80	0,67
300	0,6170	1,12	4,84	25,16	28,23	45,81	0,65
400	0,5250	1,15	5,7	35,04	31,68	60,38	0,64
500	0,4570	1,18	6,5593	43,61	43,85	76,30	0,63
600	0,4050	1,21	7,42	54,32	37,86	93,61	0,62
700	0,3630	1,24	8,27	66,17	40,69	112,10	0,61
800	0,3290	1,26	9,15	79,09	43,37	131,80	0,60
900	0,3010	1,29	10,01	92,87	45,91	152,50	0,59
1000	0,2750	1,31	10,89	109,21	48,36	174,30	0,58
1110	0,2570	1,32	11,75	124,37	50,70	197,10	0,57
1200	0,2400	1,34	12,62	141,27	52,99	221,00	0,56
1300	0,221	1,36	13,58	160,04	55,53	247,55	0,55
1400	0,202	1,37	14,55	178,82	58,07	274,11	0,54
1500	0,183	1,39	15,53	197,61	60,61	300,67	0,53
1600	0,164	1,41	16,50	216,61	63,14	327,23	0,52
1700	0,145	1,43	17,46	235,19	65,68	353,79	0,51
1800	0,126	1,45	18,43	253,98	68,22	380,36	0,50
1900	0,107	1,47	19,40	272,77	70,76	406,94	0,49
2000	0,088	1,48	20,34	291,56	73,30	433,53	0,48

Fuente: KREITH Frank, 1970.

Anexo 10: Características generales del carbón en el peru

CARACTERÍSTICAS DEL CARBÓN Y RESERVAS	CUENCA DEL ALTO CHICAMA	CUENCA DEL SANTA	CUENCA DE OYÓN - GAZUNA		CUENCAS DE GOYLLARISQUISGA Y JATUNHUASI		PIÑA-PATA Y TUCO	YACIMIENTO DE TUMBES
			OYÓN	GAZUNA	GOYLLAR	JATUN.		
Tipo de carbón (ASTM)	Antracita	Antracita - metantracita	Semi bituminoso	Antracita - semi antracita	bituminoso y sub-bituminoso		Antracita	Lignito
Humedad (%)	4,0 - 12,0	4,0 - 6,0	6	6		6,0 - 10,0	4,0 - 4,5	9,0 - 18,0
Materia volátil (%)	2,5 - 12	3,0 - 6,0	16 - 22	6,0 - 14,0	23,4	32,0 - 38,0	4,0 - 8,0	27,0 - 32,0
Cenizas (%)	8,0 - 10,0	7,0 - 12,0	6,0 - 12,0	5,0 - 10,0	54	6,0 - 20,0	6,0 - 35,0	20,0 - 36,0
Azufre (%)	1,0 - 2,5	0,5 - 1,0			12,1	0,60 - 2,0	0,6 - 1,2	4,0 - 5,0
Carbón fijo (%)	80 - 85	80 - 85	65 - 75	70 - 80	22,6	40 - 60	52,0 - 85,0	20,0 - 30,0
Poder calorífico (kcal/Kg)	7000-7500	6000-7500	7000-7600	6500 - 7500		5000-7000	6400-7600	2700-4300
Densidad (TM/m ³)	1,6							
Reservas (TM)	Probadas + probables	59000000	48800000	26000000		1251000	813000	
	Possible	250000000	1.058E+09	42000000		5000000	60000000	50000000

Fuente : revista del instituo de investigacion FIGMMG de la UNMSM, 2008.

Anexo 11: Constantes para alineamiento de tubos en los IC.

S/D	St/D							
	1.25		1.5		2		3	
	C1	m	C1	m	C1	m	C1	m
Alineado								
1.25	0.348	0.592	0.275	0.608	0.1	0.704	0.0633	0.752
1.5	0.367	0.586	0.25	0.62	0.101	0.702	0.0678	0.744
2	0.418	0.57	0.299	0.602	0.229	0.632	0.198	0.648
3	0.29	0.601	0.357	0.584	0.374	0.581	0.286	0.608
Escalonado								
0.6	-	-	-	-	-	-	0.213	0.636
0.9	-	-	-	-	0.446	0.571	0.401	0.581
1	-	-	0.497	0.558	-	-	-	-
1.125	-	-	-	-	0.478	0.565	0.518	0.56
1.25	0.518	0.556	0.505	0.554	0.519	0.556	0.522	0.562
1.5	0.451	0.568	0.46	0.562	0.452	0.568	0.488	0.568
2	0.404	0.572	0.416	0.568	0.482	0.556	0.449	0.57
3	0.31	0.592	0.356	0.58	0.44	0.562	0.428	0.574

Fuente: KREITH Frank, 1970.

Anexo 12: Gastos de Mantenimiento del 2016

MANTENIMIENTO DE MAQUINARIA				
Mes	Repuestos	Insumos	Servicios Externo	TOTAL
Enero	S/. 7,339.40	S/. 646.20	S/. 2,464.00	S/. 10,449.60
Febrero	S/. 888.50	S/. 4,563.50	S/. 2,129.00	S/. 7,581.00
Marzo	S/. 7,140.00	S/. 259.50	S/. 2,354.00	S/. 9,753.50
Abril	S/. 8,399.00	S/. 0.00	S/. 2,311.00	S/. 10,710.00
Mayo	S/. 14,989.07	S/. 32.40	S/. 2,200.00	S/. 17,221.47
Junio	S/. 3,295.25	S/. 0.00	S/. 4,040.40	S/. 7,335.65
Julio	S/. 5,308.87	S/. 32.00	S/. 2,380.00	S/. 7,720.87
Agosto	S/. 5,520.00	S/. 669.00	S/. 1,850.00	S/. 8,039.00
Septiembre	S/. 5,518.10	S/. 112.00	S/. 1,070.00	S/. 6,700.10
Octubre	S/. 5,565.30	S/. 0.00	S/. 700.00	S/. 6,265.30
Noviembre	S/. 2,109.50	S/. 393.20	S/. 2,550.00	S/. 5,052.70
Diciembre	S/. 3,127.15	S/. 438.00	S/. 1,380.00	S/. 4,945.15
Total anual 2016	S/. 69,200.14	S/. 7,145.80	S/. 25,428.40	S/. 101,774.34

Fuente: Piel Trujillo SAC, 2017.

Anexo 13: Propiedades de aislantes para el uso industrial.

MATERIAL	MÁXIMA TEMPERATURA (°C)	DENSIDAD kg/m³	CONDUCTIVIDAD kcal/h.m.°C
Fibra cerámica de sílice – aluminio	1,250	50 - 200	0.040 @ 150 °C 0.100 @ 540
Fibra mineral	1,000	270 – 400	0.075 @ 200 °C 0.095 @ 540
Sílice expandida (perlita)	870	65 – 215	0.042 @ -18 °C 0.144 @ 540
Silicato de calcio	650	85 – 215	0.054 @ 150 °C 0.076 @ 370
Fibra de vidrio	540	70	0.044 @ 150 °C 0.080 @ 425
Vidrio celular	425	125 – 150	0.070 @ 150 °C 0.132 @ 425
Lana de vidrio	200	8 – 50	0.044 @ 150 °C 0.090 @ 425
Fibra de cemento	1,000	400 – 500	0.070 @ 90 °C 0.100 @ 315
Asbesto	538	136 – 192	0.042 @ 38 °C 0.067 @ 260

Fuente: Uceda, 2014

Anexo 13: Constancia de validación de datos

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN DE DATOS

La Secretaría de operaciones de la empresa Piel Trujillo S.A.C, suscribe:

Por la presente dejamos constancia que el señor RAUL RISCO ALVAREZ, identificado con DNI: 46755597, estudiante de la escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad César Vallejo Filial Trujillo, se le está brindando toda la información y facilidades referentes a los parámetros de consumo de la caldera pirotubular, de la empresa Piel Trujillo S.A.C.

Dicha recolección de datos tiene como finalidad, el desarrollo de tesis titulada "ANÁLISIS ENERGÉTICO A LA CALDERA PIROTUBULAR A CARBÓN PARA REDUCIR COSTOS DE PRODUCCIÓN DE VAPOR E IMPACTOS MEDIOAMBIENTALES EN LA EMPRESA PIEL TRUJILLO SAC".

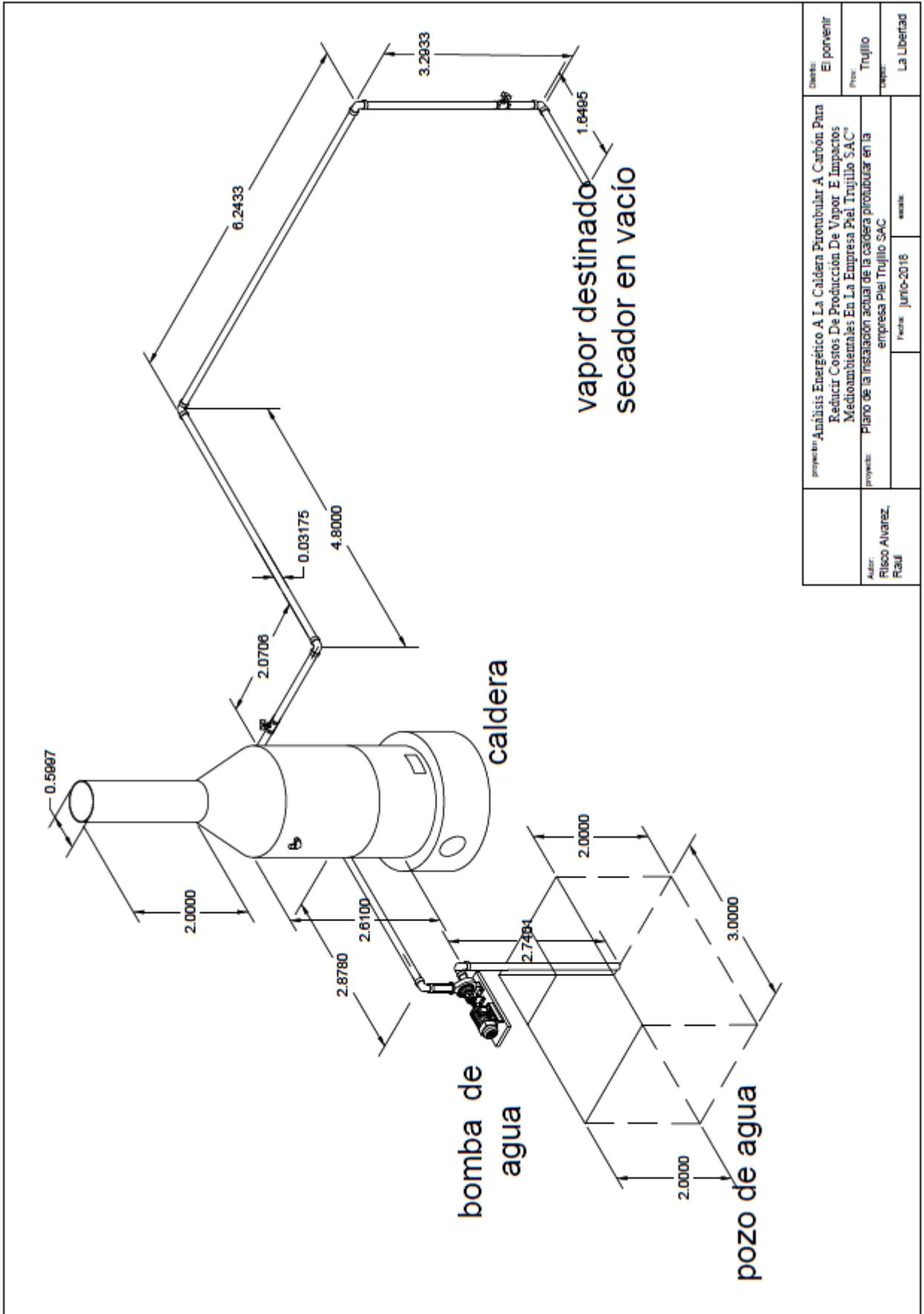
Conferimos la presente constancia, para fines prescritos.

Trujillo, 08 de junio de 2018

PIEL TRUJILLO S.A.C.

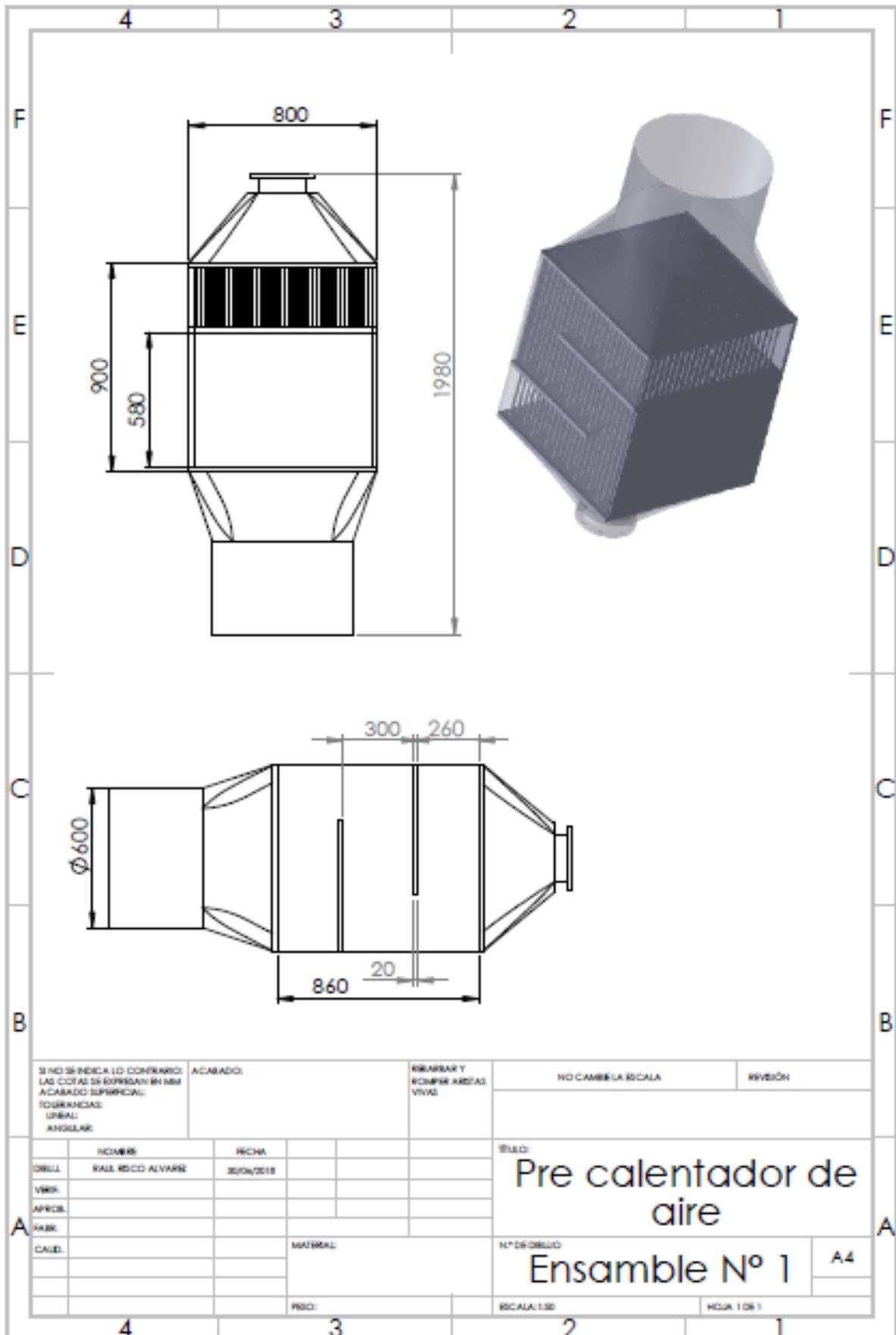
Vladimir de la Roca Morán
GERENTE GENERAL

Anexo 12: Vista isométrica real actual de la caldera pirotubular

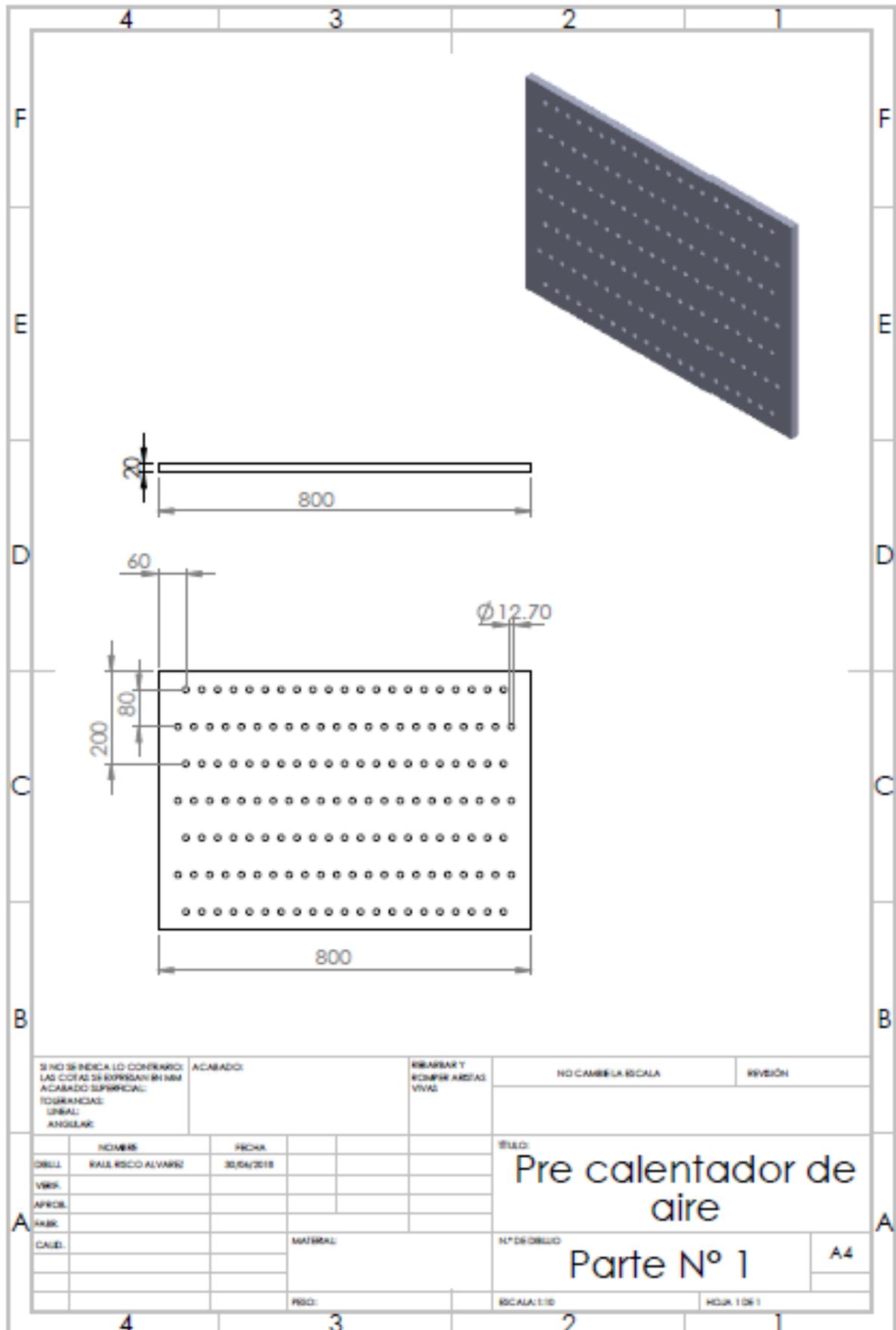


Autor: Risco Alvarez, Raúl	Proyecto: Análisis Energético A La Caldera Pirotubular A Carbón Para Reducir Costos De Producción De Vapor E Impactos Medioambientales En La Empresa Piel Trujillo S.A.C	Cliente: El porvenir
	Proyecto: Plano de la instalación actual de la caldera pirotubular en la empresa Piel Trujillo S.A.C	Fecha: junio-2018
		Lugar: La Libertad

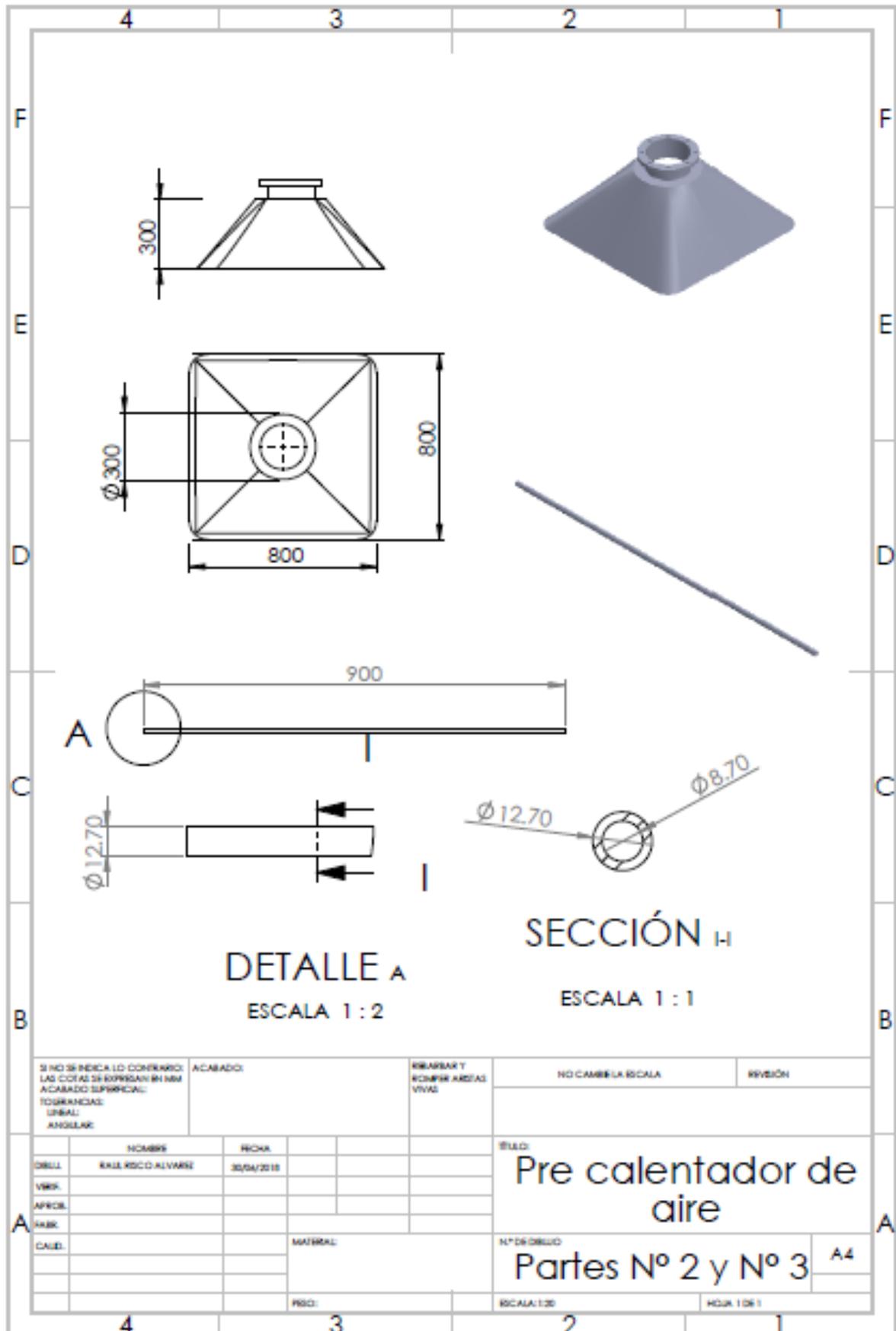
Anexo 13: planos del intercambiador de calor 01



Anexo 14: planos del intercambiador de calor 02



Anexo 15: planos del intercambiador de calor 03



Anexo 16: planos del intercambiador de calor 04

