
Evaluación del aislamiento térmico en la red de vapor y la eficiencia del caldero pirotubular de 30 BHP del Hospital la Caleta.**Evaluation of the thermal insulation in the steam network and the efficiency of the 30 BHP fire tube boiler at Hospital La Caleta.****Avaliação do isolamento térmico da rede de vapor e da eficiência da caldeira de tubo de incêndio 30 BHP do Hospital La Caleta.**

Pacherres Uchalín, Manuel Anthony¹; Chucuya Huallpachoque Roberto Carlos²

Resumen

El objetivo general del trabajo de investigación fue evaluar el aislamiento térmico aplicado en la red de vapor, evaluar la eficiencia antes de la aplicación de dicho aislamiento y ver el impacto que genera luego de la aplicación del mismo en el caldero pirotubular de 30 BHP del hospital la Caleta, 2021. Así mismo para su desarrollo se procedió a tomar medidas de dicha red de vapor la cual alimenta al área de cocina, lavandería y autoclaves así como también se procedió a realizar una toma de muestra de los gases producto de la combustión, para ello se utilizó instrumento tal como; analizador de gases y cinta métrica para las dimensiones de la red de vapor; asimismo luego de poder cuantificar las pérdidas de calor para determinar la eficiencia del caldero pirotubular de 30 BHP mediante método indirecto según la Norma Técnica Peruana, determinar la producción de vapor, indicadores de producción de vapor, costo de vapor se pasó a calcular el espesor óptimo de aislamiento térmico por aplicar a la red de vapor y como último paso a realizar el mismo procedimiento de cálculos para el caldero luego de la aplicación de dicho aislamiento. Por otro lado, se calculó el ahorro de dinero anual y payback por aplicación de aislamiento térmico.

Palabras clave: *Aislamiento térmico, eficiencia de caldero, red de vapor, gases de la combustión, payback.*

Abstract

The general objective of the research work was to evaluate the thermal insulation applied in the steam network and as a consequence evaluate the efficiency before the application of said insulation and see the impact that it generates after its application in the 30 BHP firetube boiler. from hospital la Caleta, 2021. Likewise, for its development, measurements were taken of said steam network which feeds the kitchen, laundry and autoclaves area, as well as a sampling of the gases produced by combustion was carried out, for this an instrument was used. such as; gas analyzer and tape measure for steam network dimensions; Likewise, after being able to quantify the heat losses to determine the efficiency of the 30 BHP fire tube boiler by indirect method according to the Peruvian Technical Standard, determining the production, production indicators and steam cost, the optimal thickness of thermal insulation was calculated by apply to the steam network and finally to carry out the same calculation procedure for the boiler after the application of said insulation. On the other hand, the annual money savings and payback for the application of thermal insulation were calculated.

Keywords: *Thermal insulation, boiler efficiency, steam network, combustion gases, payback.*

Resumo

O objetivo geral do trabalho de pesquisa foi avaliar o isolamento térmico aplicado na rede de vapor, avaliar a eficiência antes da aplicação do referido isolamento e ver o impacto gerado por sua aplicação na caldeira flamotubular de 30 BHP do hospital La Caleta, 2021. Da mesma forma, para o seu desenvolvimento, foram feitas medições do tubo de vapor vermelho que alimenta as áreas da cozinha, lavanderia e autoclave, bem como uma amostra dos gases produzidos pela combustão, para isso foi utilizado um instrumento como; analisador de gases e fita métrica para as dimensões da rede de vapor; Desta forma, para poder quantificar as perdas de calor para determinar a eficiência da caldeira 30 BHP a

¹ Escuela Profesional de Ingeniería en Energía. Bachiller. Universidad Nacional del Santa. Chimbote, Ancash, Perú. manuel.1411002@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-8771-1061>.

² Escuela Profesional de Ingeniería en Energía. Maestro. Universidad Nacional del Santa. Chimbote, Ancash, Perú. rchucuya@uns.edu.pe. <https://orcid.org/0000-0001-9175-5545>.

Recibido: 20/08/2021

Aceptado: 26/10/2021

fogo tubular através de um método indireto de acordo com a Norma Técnica Peruana, determinar a produção de vapor, indicadores de produção de vapor, custo do vapor, procedeu-se ao cálculo da espessura ideal do isolamento térmico para aplicar a rede de vapor e como último passo realizar o mesmo procedimento de cálculo para a caldeira após a aplicação do referido isolamento. Por outro lado, foram calculados o rendimento anual e o retorno financeiro por aplicação de isolamento térmico.

Palavras-chave: *Isolamento térmico, eficiência de caldeira, rede de vapor, gases de combustão, payback.*

Introducción

El presente estudio fue de vital importancia para el Hospital la Caleta, porque permitió elevar la eficiencia con la que trabaja el caldero. El interés radicó en la necesidad de mejorar la generación de vapor que produce el caldero el cual conllevó a un ahorro de energía y a un ahorro monetario respectivamente. Es por ello que, mediante la aplicación de aislamiento térmico a la red de vapor se pudo obtener una mayor eficiencia del caldero para la generación de vapor y así poder abastecerse suficientemente todas las áreas finalidad de este proceso a un menor costo de materia de producción. La generación de vapor partir de la quema de combustibles es usado para diferentes propósitos claves para los procesos. El vapor generado, es en sí mismo, energía en movimiento y considerado como un recurso energético de alto valor en empresas o algunas otras instituciones del sector público que requieran su uso. Debido a esto último se ha recomendado implementar políticas de gestión energética al interior de las organizaciones para la minimización de pérdidas económicas asociadas al vapor generado (Aristizabal, Schafer, Barrera, 2014).

Para lo cual se planteó la pregunta problema: ¿Cuánto mejorará la eficiencia del caldero pirotubular de 30 BHP del Hospital la Caleta con la aplicación de aislamiento térmico a la red de vapor? Por ello se destacó el siguiente objetivo general “evaluar el aislamiento térmico en la red de vapor y la eficiencia del caldero pirotubular de 30 BHP del Hospital la Caleta - Chimbote”, así mismo, se plantearon los siguientes objetivos específicos que fueron calcular el espesor óptimo de aislamiento, cuantificar las pérdidas de calor para determinar la eficiencia del caldero pirotubular mediante el método indirecto según la norma técnica peruana, determinar la producción de vapor del caldero antes y después de la implementación del aislamiento térmico en la red de tubería de la instalación, determinar los indicadores de producción y de costo de producción de vapor antes y después de la implementación de aislamiento térmico en la red de tubería de la instalación y por último determinar el ahorro de dinero anual y payback por aplicación de aislamiento térmico.

Dado ello, se destacaron los trabajos previos como el de Aristizabal, Schafer y Barrera (2014) en su artículo elaboraron un análisis de pérdidas energéticas y económicas por transporte de vapor en tuberías sin un adecuado aislamiento térmico donde proporcionaron y probaron 3 tipos de aislantes los cuales todos ellos garantizaron temperaturas de superficies de tuberías ≤ 60 °C que implican seguridad para el personal de planta, lograron un aumento de eficiencia en la generación de vapor el cual conllevó a un ahorro energético mayor o igual al 90% que significa un ahorro inmediato de agua y gas natural. De la misma manera, Chepe y Nuñez (2018), en su tesis tuvo como objetivo realizar una evaluación para determinar el nivel de pérdida de energía térmica en la red de tuberías de vapor por falta o deficiencia de aislante, obtener una geometría óptima definida por los espesores de aislamiento térmico y la secuencia de los mismos para minimizar el costo de calor por año en la empresa Agroindustrial Pucalá S.A.C. Obteniendo que en promedio la falta de casi el 50% de aislante estaría generando una pérdida monetaria cuantiosa de 86.915 millones de soles/año y luego de la aplicación de dicho aislamiento se estaría logrando temperaturas de superficies de tuberías ≤ 60 °C que son temperaturas más seguras para los operarios y ahorro energético.

Material y métodos

La investigación es aplicada, porque se hizo uso de las teóricas relacionadas para dar solución

a un problema en un determinado tiempo mediante la aplicación de acciones concretas, se utilizó el método indirecto para hallar eficiencia de caldero. El método indirecto llamada también como el método de las pérdidas de calor. Este método consiste en hallar los calores entrantes y salientes, y compararlos con el calor entrante principal, el que suministra el combustible, el calor útil es igual a la diferencia de los calores entrantes y las pérdidas de calor. (Guevara, 2013, p.27). Y así posteriormente evaluar el mismo, pero con aplicación del aislante térmico.

Cálculo de rendimiento de una caldera (Método indirecto)

Medición del área de la superficie exterior

Área de la superficie sobre los gases (superficie exterior de la chimenea): 13 m²(Ag).

Área de la superficie sobre el fluido de trabajo (superficie exterior del caldero): 51.5 m²(Af)

Medición de los gases de la combustión

Tabla 1

Datos obtenidos del analizador de gases

Contenido de los gases de la combustión	Porcentaje (%)	Temperatura (°C)
CO ₂	9.8	198.9
H ₂ O	0.1	198.9
H	0.45	198.9
O	0.2	198.9

Fuente: *Determinación de la eficiencia del caldero de 30 BHP del Hospital la Caleta. Ever R. (2016).*

Pérdida por la entalpía de los gases de escape secos

$$P_1 = K \times \{T_g - T_a / [CO_2]\} \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

T_g = 198.9 °C, Temperatura de los gases de la combustión.

T_a = 24 °C, Temperatura del medio ambiente.

CO₂ = 9.8% de en los gases de la combustión.

K = 0.45, Constante de Siegert para el Biodiesel 5.

$$P_1 = 0.45 \times \left[\frac{198.9 - 24}{9.8} \right] = 8.031 \%$$

Pérdida por la entalpía del vapor de agua en los gases

$$P_2 = \{([H_2O] + 9[H]) \times (210 - 4.2T_a + 2.1T_g)\} / PCS \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

T_g = 198.9 °C, Temperatura de los gases de la combustión.

T_a = 24 °C, Temperatura del medio ambiente.

H₂O = 0.10%, Agua en los gases de la combustión.

H = 0.45%, Hidrógeno en los gases de la combustión.

$$PCS = 10165 \frac{kcal}{kg} \times \frac{4.18 kJ}{1kcal} = 42489.7 \frac{kJ}{kg}$$

$$P_2 = \frac{((0.10) + 9(0.45)) \times (2488 - 4.2(24) + 2.1(198.9))}{42489.7} = 0.242 \%$$

Pérdida por inquemados gaseosos

$$P_3 = K_1 \times \{[CO]/([CO_2] + [CO])\} \dots \dots \dots (3)$$

Donde:

CO₂ = 9.8% de CO₂ en los gases de la combustión.

CO = 0.20% de CO en los gases de la combustión.

K = 95, Constante de inquemados del combustible.

$$P_3 = 95 \times \left\{ \frac{0.20}{9.8 + 0.20} \right\} = 1.9 \%$$

Pérdida por inquemados sólidos

$$P_4 = 0.4 \times B^2 + 0.8 \times B + 0.07 \dots \dots \dots (4)$$

Donde:

B = 4, Índice de Bacharach .

$$P_4 = 0.4 \times (4)^2 + 0.8 \times 4 + 0.07 = 9.67 \%$$

Pérdida por convección

$$P_5 = 80 \times \left(\frac{Q_{p5}}{W_C} \right) \dots \dots \dots (5)$$

Mediante uso del anemómetro se determinó la velocidad de viento: v = 0.3 m/s

Donde:

T_{sf} = Temperatura exterior de la caldera, lado del fluido (°C).

T_{sg} = Temperatura exterior de la caldera, lado de los gases (°C).

A_f = Superficie exterior que cubre al fluido (se asume la superficie exterior del caldero) (m²).

A_g = Superficie exterior que cubre los gases de la combustión (se asume la superficie exterior de la chimenea)(m²).

v = Es la velocidad del viento que fluye por la parte exterior al caldero (m/s).

$$h_{ef} = 1.973 \times 10^{-3} \times (T_{sf} - T_a)^{0.25} \times (2.857 \times v + 1)^{0.5} \dots \dots \dots (6)$$

$$h_{ef} = 1.973 \times 10^{-3} \times (30 - 24)^{0.25} \times (2.857 \times 0.3 + 1)^{0.5} = 0.0042080$$

$$h_{cg} = 1.973 \times 10^{-3} \times (T_{sg} - T_a)^{0.25} \times (2.857 \times v + 1)^{0.5} \dots \dots \dots (7)$$

$$h_{cg} = 1.973 \times 10^{-3} \times (120 - 24)^{0.25} \times (2.857 \times 0.3 + 1)^{0.5} = 0.0084161$$

$$Q_{p5} = h_{ef} \times A_f \times (T_{sf} - T_a) + h_{cg} \times A_g \times (T_{sg} - T_a) \dots \dots \dots (8)$$

$$Q_{p5} = 0.0042080 \times 51.5 \times (30 - 24) + 0.0084161 \times 13.2 \times (120 - 24) = 11.939$$

Donde:

Q_{p5} = Pérdidas por convección en la superficie.

Para determinar W_C, se requiere como dato la capacidad de la caldera que es 30 BHP, reemplazando los datos correspondientes obtenemos lo siguiente:

$$W_C = 9.81 \times \text{BHP}$$

$$W_C = 9.81 \times 30 = 294.3$$

v = Es la velocidad del viento que fluye por la parte exterior al caldero (m/s).

Finalmente reemplazamos:

$$P_5 = 80 \times \left(\frac{11.939}{294.3} \right) = 3.245 \%$$

Pérdida por radiación

$$P_6 = 80 \times \left(\frac{Q_{p6}}{W_C} \right) \dots \dots \dots (9)$$

La emisividad del acero superficie tratada térmicamente: $e = 0.5$

Donde:

$$q_{rf} = 5.763 \times 10^{-11} \times e \times [(T_{sf} + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \dots \dots \dots (10)$$

$$q_{rf} = 5.763 \times 10^{-11} \times 0.5 \times [(30 + 273)^4 - (24 + 273)^4] = 0.0186739$$

$$q_{rg} = 5.763 \times 10^{-11} \times e \times [(T_{sg} + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \dots \dots \dots (11)$$

$$q_{rg} = 5.763 \times 10^{-11} \times 0.5 \times [(120 + 273)^4 - (24 + 273)^4] = 0.4631626$$

$$Q_{p6} = (q_{rf} \times A_f) + (q_{rg} \times A_g) \dots \dots \dots (12)$$

$$Q_{p6} = (0.0186739 \times 51.5) + (0.4631626 \times 13.2) = 7.0754178$$

Donde:

$Q_{p6} = 7.0754178$, Pérdidas por radiación en la superficie.

$W_C = 294.3$, Capacidad de la caldera.

Finalmente reemplazamos:

$$P_6 = 80 \times \left(\frac{Q_{p6}}{W_C} \right)$$

$$P_6 = 80 \times \left(\frac{7.0754178}{294.3} \right) = 1.923 \%$$

Eficiencia del caldero

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 \dots \dots \dots (13)$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = 8.031 + 0.242 + 1.9 + 9.67 + 3.245 + 1.923 = 25.01\%$$

$$n = 100 - \sum_{i=1}^n P_i$$

$$n = 100 - 25\% = 75 \%$$

Determinación del factor de carga

Cálculo de la potencia nominal

Se sabe que por el factor de conversión: $1\text{BHP} = 8437 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$

Luego se tendrá la Potencia Nominal o Potencia Útil:

$$POT_{Nom} = 30\text{BHP} \times \frac{8437 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{1\text{BHP}} = 253110 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Cálculo de la máxima capacidad de generación del vapor

$$\text{Máxima capacidad de generación de vapor} = \frac{\text{Potencia nominal del caldero}}{(h_2 - h_1)} \dots \dots (14)$$

Donde:

h_2 = Es la entalpía final del vapor saturado a la presión de diseño (7 bar), según las tablas de vapor es $2763.5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.

h_1 = Entalpía a condiciones de ingreso del agua en el generador pirotubular, a presión de 15 Bar y a temperatura de 75°C , según tablas de vapor e interpolando es $319.675 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$.

$$\text{Máxima capacidad de generación de vapor} = \frac{253110 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{(2763.5 - 319.675) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times \frac{1\text{kcal}}{4.18\text{kJ}}}$$

$$\text{Máxima capacidad de generación de vapor} = 432.92 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Determinación del flujo de vapor real generado

Se sabe que:

$$n = \frac{\dot{m}_{\text{vapor}} \times (h_2 - h_1)}{\dot{m}_c \times \text{PCI}} \dots \dots \dots (15)$$

Despejando se tiene:

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = \frac{n \times \dot{m}_c \times \text{PCI}}{(h_2 - h_1)} \dots \dots \dots (16)$$

Donde:

n = Eficiencia del caldero

\dot{m}_c = Flujo másico de combustible (Biodiesel 5).

PCI = Poder Calorífico inferior (Biodiesel 5).

h_2 = Entalpía del vapor a la presión de 7 bar.

h_1 = Entalpía del vapor a la presión de 15 bar y 75°C .

\dot{m}_v = Flujo másico de vapor generado. En el rango según ficha técnica.

• Tomando el valor de $\text{PCI} = 138000 \frac{\text{BTU}}{\text{gal}}$.

• El flujo de combustible es: $\dot{m}_c = 36 \frac{\text{gal}}{\text{día}}$

Con una producción de 6 horas diarias, se tiene: $\dot{m}_c = 36 \frac{\text{gal}}{\text{día}} \times \frac{\text{día}}{6\text{h}} = 6 \frac{\text{gal}}{\text{h}}$

Reemplazando en la ecuación:

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = 0.75 \times \frac{6 \frac{\text{gal}}{\text{h}} \times 138000 \frac{\text{BTU}}{\text{gal}} \times 1.055 \frac{\text{kJ}}{\text{BTU}}}{(2763.5 - 319.675) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = 268.14 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 0.26814 \frac{\text{ton}}{\text{h}}$$

Cálculo del costo de combustible

$$P_{\text{Gen}} = \dot{m}_c \times d_o \times C_{\text{Comb.}} \dots \dots \dots (17)$$

Donde:

P_{Gen} = Precio de generación de vapor del caldero (mensual).

d_o = Número de días de operación al mes.

$C_{\text{Comb.}}$ = Costo de combustible del Biodiesel 5.

Reemplazando se tiene:

$$P_{\text{Gen}} = 36 \frac{\text{gal}}{\text{día}} \times 30 \frac{\text{días}}{\text{mes}} \times 11.95 \frac{\text{S./}}{\text{gal}} = 12906 \frac{\text{S./}}{\text{gal. mes}}$$

Cálculo de la potencia real

$$POT_{\text{Real}} = \dot{m}_{\text{vapor}} \times (h_2 - h_1) \dots \dots \dots (18)$$

$$POT_{\text{Real}} = 268.14 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \times (2763.5 - 319.675) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 655153.16 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$POT_{\text{Real}} = 655153.16 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \times \frac{\text{kcal}}{4.18 \text{ kJ}} = 156735.20 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Cálculo de los BHP de operación

$$BHP_{\text{Real}} = \frac{\text{Potencia real del caldero}}{8437 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}} \dots \dots \dots (19)$$

$$BHP_{\text{Real}} = \frac{156735.20 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}{8437 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}} = 18.57 \text{ BHP}$$

Finalmente:

$$F_{\text{carga}} = \frac{BHP_{\text{Real}}}{BHP_{\text{Nominal}}} \times 100\% = \frac{18.57 \text{ BHP}}{30 \text{ BHP}} \times 100\% = 61.92\%$$

Indicador de producción de vapor

$$I_p = \frac{\text{Consumo de combustible}}{\text{Flujo de vapor producido}} \dots \dots \dots (20)$$

$$I_p = \frac{6 \frac{\text{gal}}{\text{h}}}{268.14 \frac{\text{kg vapor}}{\text{h}}} = 0.022376 \frac{\text{gal}}{\text{kg vapor}} = 22.37 \frac{\text{gal}}{\text{ton. vapor}}$$

Indicador de costo de producción del vapor

$$\text{Costo del Biodiesel 5} = 11.95 \frac{\text{S./}}{\text{gal}}$$

$$I_G = 0.022376 \frac{\text{gal}}{\text{kg vapor}} \times 11.95 \frac{\text{S./}}{\text{gal}} = 0.26739 \frac{\text{S./}}{\text{kg vapor}} = 267.39 \frac{\text{S./}}{\text{ton.vapor}}$$

Pérdida de dinero anual por fugas de vapor

Presión_{vapor} = 100 $\frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}$ o 7 bar (vapor saturado).

Se percibió las siguientes cantidades de agujeros medidos con la ayuda de un Vernier:

- 2 agujeros en el área de lavandería
- 5 agujeros en el área de sala de máquina
- 1 agujero en el área de cocina

$$4 \text{ agujeros de } (2.5 \text{ mm}) \longrightarrow \frac{16 \text{ mm}}{44 \text{ mm}} (380 - 0) = 138.18 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \times 4 = 552.72 \frac{\text{ton}}{\text{año}}$$

$$3 \text{ agujeros de } (2.0 \text{ mm}) \longrightarrow \frac{8 \text{ mm}}{44 \text{ mm}} (380 - 0) = 69.09 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \times 3 = 207.27 \frac{\text{ton}}{\text{año}}$$

$$1 \text{ agujero de } (1.75 \text{ mm}) \longrightarrow \frac{5 \text{ mm}}{44 \text{ mm}} (380 - 0) = 43.18 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \times 1 = 43.18 \frac{\text{ton}}{\text{año}}$$

Resultando así un total de:

$$\sum_{i=1}^n \text{Fugas de vapor} = 803.17 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \times \frac{6 \text{ h}}{\text{día}} \times \frac{365 \text{ días}}{\text{año}} \times \frac{\text{año}}{8760 \text{ h}} = 200.792 \frac{\text{ton}}{\text{año}}$$

Resultando así una pérdida de dinero anual:

Donde por eficiencia de caldero y tipo de combustible con un costo de 100 $\frac{\text{Ctv.}\$US}{\text{Kg}}$ me da un costo de vapor de 90.00 $\frac{\$US}{\text{ton}}$:

$$200.792 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \times 90.00 \frac{\$US}{\text{ton}} \times = 18071.28 \frac{\$US}{\text{año}}$$

Rendimiento de la caldera luego de la aplicación de aislamiento térmico

Cálculo de espesor de aislamiento

Aplicamos la relación:

$$\frac{K}{h} = \frac{A(T_2 - T_1)}{L(T_3 - T_2)} \dots \dots \dots (21)$$

Donde:

T₁ = Temperatura del vapor.

T₂ = Temperatura de la pared exterior de la tubería.

T₃ = Temperatura de la pared exterior del aislamiento.

Seleccionamos el espesor del aislamiento óptimo usando catálogos como es el caso, seleccionamos Cañuela (aislamiento acústico y térmico de lana mineral de vidrio biosoluble rígida, preformada, presentada en secciones de área transversal semicircular, en dimensiones ajustadas a los diámetros externos reales de tubos de acero comercial). También FiberGlass Isover – Colombia de 1" para un diámetro nominal de tubería de 8" a 120°C, es la temperatura en la pared exterior de la tubería y 40°C es la temperatura que se logra con el aislamiento de fibra de vidrio, vista en catálogos.

Resultados

Evaluando nuevamente las pérdidas por radiación: Q_{P6} = A x U (T₂ - T₃)

Donde:

A = Área por unidad de longitud de la tubería.

X = Longitud de tubería descubierta.

U = Coeficiente de pérdidas Kcal/m² °C

T₂ = Temperatura de la tubería desnuda.

T₃ = Temperatura que se logra con el aislamiento.

$$Q_{P_6} = 0.000503 \frac{\text{m}^2}{\text{m}} \times 80\text{m} \times 14.5 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{C}} \times (120 - 40) = 46.6784 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 0.0542 \text{ kW}$$

Ahora la nueva pérdida con el aislamiento térmico seleccionado será:

$$P_6 = 80 \times \left(\frac{Q_{P_6}}{W_C} \right) = 80 \times \left(\frac{0.0542}{294.3} \right) = 0.014\%$$

Finalmente, la adhesión de la nueva pérdida a la sumatoria nos dará una eficiencia de:

$$\sum_{i=1}^n P_i = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6$$

$$\sum_{i=1}^n P_i = 8.031 + 0.242 + 1.9 + 9.67 + 3.245 + 0.014 = 23.1\%$$

$$n = 100 - \sum_{i=1}^n P_i = 100 - 23.1\% = 76.9 \%$$

Producción de vapor luego de aplicar de aislamiento térmico: $\dot{m}_{\text{vapor}} = \frac{n \times \dot{m}_c \times \text{PCI}}{(h_2 - h_1)}$

Donde:

n = Eficiencia del caldero

\dot{m}_c = Flujo másico de combustible (Biodiesel 5).

PCI = Poder Calorífico inferior (Biodiesel 5).

h₂ = Entalpia del vapor a la presión de 7 bar.

h₁ = Entalpia del vapor a la presión de 15 bar y 90 °C.

\dot{m}_v = Flujo másico de vapor generado.

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = 0.77 \times \frac{6 \frac{\text{gal}}{\text{h}} \times 138000 \frac{\text{BTU}}{\text{gal}} \times 1.055 \frac{\text{kJ}}{\text{BTU}}}{(2763.5 - 319.675) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = 275.23 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 0.27523 \frac{\text{ton}}{\text{h}}$$

Indicador de producción de vapor luego de la aplicación de aislamiento térmico

$$I_p = \frac{6 \frac{\text{gal}}{\text{h}}}{275.23 \frac{\text{kg vapor}}{\text{h}}} = 0.02179 \frac{\text{gal}}{\text{kg vapor}} = 21.79 \frac{\text{gal}}{\text{ton. vapor}}$$

Indicador de costo de producción del vapor luego de aplicar aislamiento térmico

$$\text{Costo del Diesel N}^\circ 2 = 11.95 \frac{\text{S./}}{\text{galón}}$$

$$I_G = 0.02179 \frac{\text{gal}}{\text{kg vapor}} \times 11.95 \frac{\text{S./}}{\text{gal}} = 0.26039 \frac{\text{S./}}{\text{kg vapor}} = 260.4 \frac{\text{S./}}{\text{ton. vapor}}$$

Ahorro anual de dinero al aplicar aislamiento térmico

Para una tubería de diámetro nominal de 8" para 80 m de tuberías si aislamiento a una presión de producción de vapor de 100 psi:

$$\text{Para } 8'' = \frac{30}{35.5} (500 \times 10^6 - 250 \times 10^6) + 250 \times 10^6 = 461.26 \times 10^6$$

Ahora:

$$461.26 \times 10^6 \times \left(\frac{80}{30}\right) \times \left(\frac{6\text{h}}{\text{dia}} \times \frac{365 \text{ dias}}{\text{año}} \times \frac{\text{año}}{8760 \text{ horas}}\right) = 307.5 \times 10^6 \frac{\text{kcal}}{\text{año}}$$

$$P = 100 \frac{\text{lb}}{\text{pulg.}^2} \times \frac{6894.8 \text{ kPa}}{14.7 \text{ lb/pulg.}^2} = 6.89 \text{ bar o } 7 \text{ bar (Manométrico según la tabla)} + 1 = 8 \text{ bar}$$

$$h_{\text{vapor}} = 2769.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times \frac{1 \text{ kcal}}{4.18 \text{ kJ}} = 662.46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$m_{\text{vapor}} = \frac{307.5 \frac{\text{kcal}}{\text{año}}}{662.46 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}} = 0.45 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{año}} = 450 \frac{\text{ton}}{\text{año}}$$

Entonces el ahorro de dinero anual por aplicación de aislamiento es:

$$450 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \times 84 \frac{\text{\$US}}{\text{ton.}} = 37800 \frac{\text{\$US}}{\text{año}}$$

Determinación del Pay Back:

$$\text{Producción de vapor antes} = 268.14 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Producción de vapor después} = 275.23 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\text{Precio del combustible: } 11 \frac{\text{S./}}{\text{gal}} * \frac{\text{\$US}}{3.3 \text{ S./}} * \frac{\text{m}^3}{900 \text{ kg}} * \frac{264.17 \text{ gal}}{1 \text{ m}^3} = 97.84 \approx 100 \text{ centavos } \frac{\text{\$US}}{\text{kg}}$$

Extrapolando: **n=75%**

centavos (\$US/kg)	\$US/Ton
50	45
100	x

$$X = 1000 * 45 / 50 = 90 \frac{\text{\$US}}{\text{Ton}}$$

n=77%

centavos (\$US/kg)	\$US/Ton
50	42
100	x

$$X = 1000 * 45 / 50 = 84 \frac{\text{\$US}}{\text{Ton}}$$

Cálculo del ahorro del dinero al año:

$$(90-84) \frac{\$US}{ton} * 0.27523 \frac{ton}{h} * 6 \frac{h}{día} * 365 \frac{días}{año} = 3683.76 \frac{\$US}{año}$$

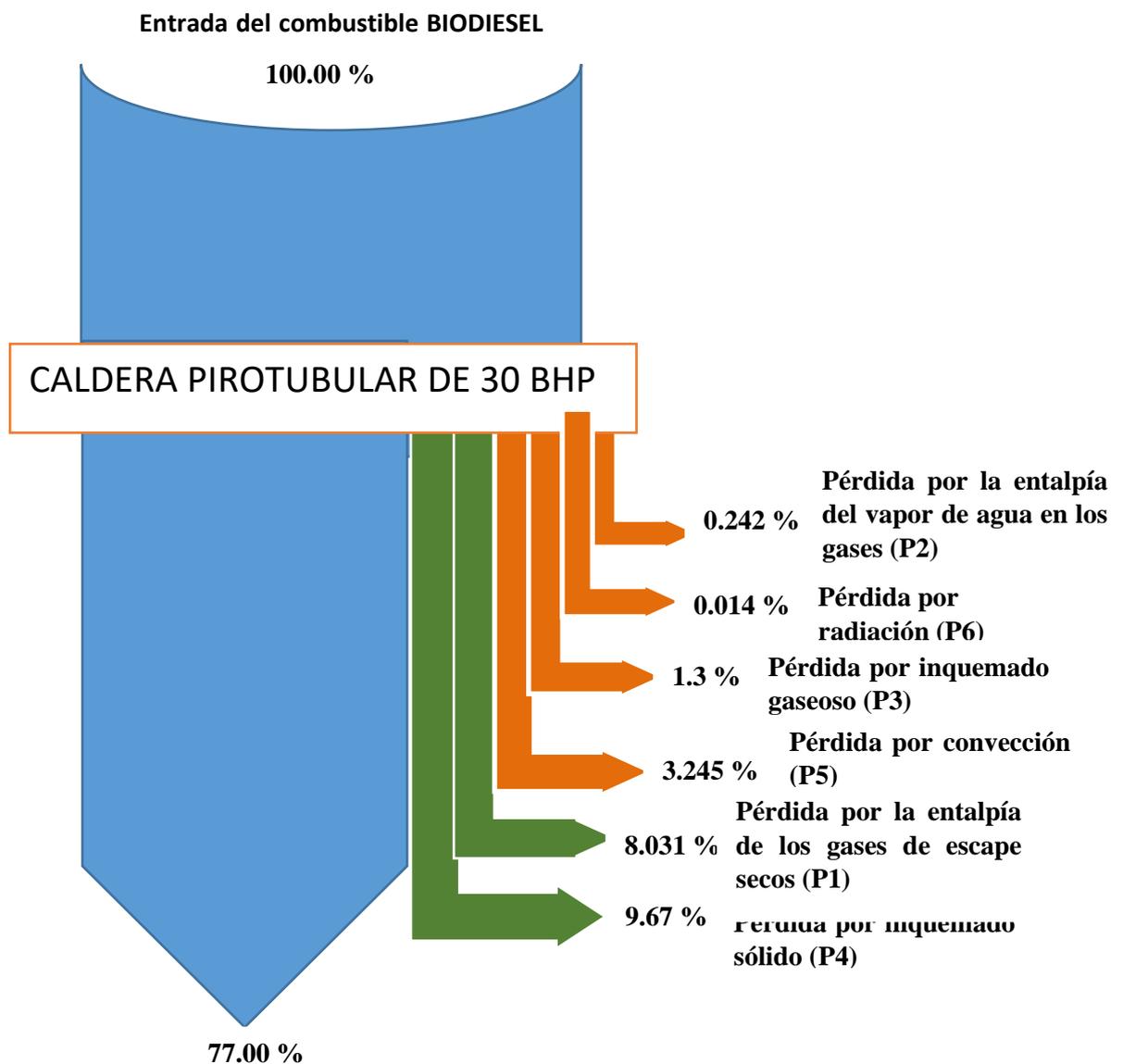
Cálculo de la inversión:

Para realizar el recubrimiento de toda la superficie necesitaremos 52 m².

$$Inversión: 6.05 \frac{€}{m^2} * 1.13 \frac{\$US}{€} * 52 m^2 = 355.45 \$US$$

$$Pay\ Back = \frac{355.45 \$US}{3683.76 \frac{\$US}{año}} = 0.097 \text{ años} \approx 1.164 \text{ meses}$$

Diagrama de Sankey del Caldero



Salida de energía útil con la aplicación de aislamiento térmico.

Figura 12. Diagrama de Sankey de la Caldera

Fuente: Elaboración propia

Discusión

Referente al estudio realizado, se implementó el aislamiento térmico a base de fibra de lana de vidrio en toda la red de distribución de vapor, debido a que es un material aislante térmico y acústico sumamente eficiente y de fácil manejo, posee una muy buena relación resistencia térmica / precio, para así tener un considerable ahorro de combustible, ahorro económico, mejorar la eficiencia del caldero y la producción de vapor. El caldero presenta una eficiencia global de 75% debido a todas las pérdidas existentes cuantificadas, la cual mejoró en un 2% al realizar la aplicación del aislante térmico, logrando así una eficiencia global de 77% que podría ser mayor si se realizara un mantenimiento periódico a la red tuberías, las cuales se observaron con agujeros generando pérdidas de vapor cuantiosas y de igual manera si operara en conjunto con un ablandador de agua evitando depósitos e incrustaciones como el carbonato de calcio que se adhieren a las paredes del equipo reduciendo la transferencia de calor, provocando aumento de combustible y pérdidas económicas.

Conclusiones

Se determinó un espesor óptimo de 1" de fibra de lana de vidrio de la marca Isover Glass para un diámetro nominal de tubería de 8", se cuantificó las pérdidas totales en 25.00%, presentando una eficiencia global del caldero de 75%.

Se determinó la producción de vapor sin aislamiento térmico en las tuberías que es de $268.14 \frac{\text{kg vapor}}{\text{h}}$, luego de implementar aislamiento térmico mejoró la producción de vapor, llegando a producir $275.23 \frac{\text{kg vapor}}{\text{h}}$.

Se determinó la producción de vapor en $22.37 \frac{\text{gal}}{\text{ton.vapor}}$ y el costo de producción del vapor en $267.39 \frac{\text{S/.}}{\text{ton.vapor}}$ antes del aislamiento térmico, luego de la implementación del mismo se presentaron los siguientes indicadores de producción de vapor de $21.79 \frac{\text{gal}}{\text{ton.vapor}}$ y el costo de producción de vapor en $260.4 \frac{\text{S/.}}{\text{ton.vapor}}$ (Biodiesel 5).

Se determinó que el ahorro anual de dinero es de $37800 \frac{\text{\$US}}{\text{año}}$ y el payback o recuperación de inversión es de 1 mes.

Referencias

Guevara, R. (2013). Manual de uso interno de Plantas Consumidoras de Energía. E.A.P. Ing. En Energía, Universidad Nacional del Santa. Ancash, Perú.

Limone, C. (2012). Diseño e Instalación de Aislante Térmico en Tuberías y Equipos. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela.

Shapiro, H. (2004). Fundamentos de Termodinámica Técnica. Segunda edición. Editorial Reverté, S.A. Disponible en:

https://www.academia.edu/28426234/Fundamentos_de_Termodinamica_Tecnica_Shapiro_Moran_2_Edici%C3%B3n_2_

Aristizabal, C; Schafer, G; Barrera, R. (2014). Analyses of energetic and economic losses for the steam transport by pipes without and adequate thermal insulation. Análisis de pérdidas energéticas y económicas por transporte de vapor en tuberías sin un adecuado aislamiento térmico. Disponible en: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/REDES/article/view/6358>

Chepe, C; Nuñez, S. (2018). Diseño de un sistema de aislamiento térmico para la red de tuberías de vapor en la empresa agroindustrial Pucalá S.A.C. Disponible en:

<https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/4872>

Ruiz, E. (2016). Determinación de la Eficiencia del Caldero de 30 BHP del Hospital la Caleta”. Universidad del Nacional del Santa. Ancash, Perú.

Rodríguez, O. (2014). Diseño del sistema de distribución de vapor y selección del caldero para el hospital San Juan de Dios. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, España. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7026>

Catálogo de Aislamiento Térmico FiberGlass Isover Colombia. (2018). Disponible en: <https://www.isover.com.co/>

Guía para la calificación de consultores en eficiencia energética – Agencia Chilena de Eficiencia Energética. Disponible en: old.acee.cl/577/articles-62222_recurso_3.pdf