

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

<http://dx.doi.org/10.14482/inde.38.1.621.41>

Evaluación del sistema de generación, distribución y consumo de vapor de una empresa cárnica

Evaluation of the steam generation, distribution and consumption system of a meat Company

NORLEM LIAÑO ABASCAL *

YAIRELIS FERNÁNDEZ LABRADA **

RAÚL GONZÁLEZ DE LA CRUZ ***

AMAURY PÉREZ SÁNCHEZ ****

* Estudiante de doctorado en Ingeniería, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Camagüey (Cuba). Ingeniero químico.
norlem.liano@reduc.edu.cu

** Departamento de Producción, Empresa Cervecera Tínima de Camagüey (Cuba).
Ingeniera química. yairelis@tinima.cu

*** Magíster en Análisis de Procesos Químicos, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Camagüey (Cuba). Ingeniero químico.
raul.gonzalez@reduc.edu.cu

**** Estudiante de la Maestría en Biotecnología, Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Camagüey (Cuba). Ingeniero químico.
amaury.psanchez@reduc.edu.cu

Correspondencia: Amaury Pérez Sánchez, Universidad de Camagüey, Camagüey (Cuba), Carretera Circunvalación Norte, km 5¼, Camino Viejo de Nuevitas y Av. Ignacio Agramonte. CP 74650. Teléfono: +53 32 286385.



Resumen

El presente trabajo se realizó en la UEB Empacadora "Raúl Cepero Bonilla" de la provincia de Camagüey, Cuba, con el objetivo de evaluar el sistema de generación, distribución y consumo de vapor. Se obtuvo un valor de pérdidas de calor de las tuberías de 207 094,99 W a causa de falta de aislamiento térmico. Con la propuesta del empleo del aislante Lana Mineral en las tuberías que lo requieran, se reducen dichas pérdidas en un 92,303 %. La eficiencia energética del generador de vapor fue de 90,7 % y la exergética de 7,03 %. Con la propuesta del diseño de la recuperación de condensado se ahorran 475 015,5 litros de agua tratada al año, lo que conlleva una reducción en el consumo de combustible de 64 186,51 litros anualmente. Con las mejoras que se introducen en el sistema se obtiene un ahorro económico total de PC 94 172,78 (pesos cubanos) al año, de manera que el costo total de la inversión es PC 10 759,37, el cual puede recuperarse en un periodo de 1,4 meses. Se obtuvo un valor actual neto de PC 36 238 y una tasa interna de retorno del 71 %, lo cual califica de rentables las mejoras propuestas.

Palabras clave: agua, caldera, evaluación, medioambiente, pérdidas de calor.

Abstract

The present work was carried out at "Raúl Cepero Bonilla" Meat Company in the province of Camagüey, Cuba, with the objective of evaluating the steam generation, distribution and consumption system. A value of heat losses of the pipes of 207 094.99 W was obtained due to lack of thermal insulation. With the proposal of the use of Mineral Wool insulation in the pipes that require it, these losses are reduced by 92.303%. The energy efficiency of the steam generator was 90.7% while the exergy was of 7.03%. With the proposal of the condensate recovery design, 475 015.5 liters of water treated per year would be saved, bringing a reduction in fuel consumption of 64 186.51 liters annually. With the improvements that are introduced in the system, a total economic saving of \$ 94 172.78 Cuban pesos (CUP) per year is obtained, being of CUP \$ 10 759.37 the total cost of the investment, which can be recovered in a period of 1.4 months. A Net Present Value of CUP \$ 36 238 and an Internal Rate of Return of 71% was obtained, which qualifies the proposed improvements as profitable.

Keywords: water, boiler, evaluation, environment, heat losses.

1. INTRODUCCIÓN

El vapor de agua es uno de los medios de transmisión de calor de mayor efectividad de los que se dispone hoy en día, y su fácil generación y manejo lo han situado como uno de los servicios auxiliares más difundidos en la industria actual [1]. En los diagnósticos energéticos se han encontrado grandes potenciales de ahorro en la generación y distribución de vapor, que van desde el 5 % hasta el 40 % del consumo de combustible [2], [3]. La caldera o generador de vapor no es más que un equipo térmico conformado por un recipiente metálico, cerrado, hermético, presurizado y destinado a producir vapor o calentar agua u otro fluido mediante un proceso isobárico, a partir del suministro de una fuente de energía primaria (por lo general, un combustible), el cual libera ciertas cantidades de calor que luego se aprovecha de manera indirecta por un fluido (por lo general, agua) [4].

La recuperación del condensado es un proceso que reutiliza el agua y el calor sensible contenidos en el condensado descargado. Recuperar el condensado, en lugar de desecharlo, conlleva ahorros significativos de energía, tratamiento químico y agua fresca. El condensado puede reusarse de varias formas, por ejemplo [5]: 1) como agua caliente de alimentación, cuando el condensado caliente se regresa al desareador de la caldera; 2) como precalentamiento, en algún sistema de calentamiento compatible; 3) como vapor, si se reutiliza el vapor *flash*; y 4) como agua caliente, para limpieza de equipos u otras aplicaciones.

El conocimiento de las pérdidas de calor en las tuberías de la red asociadas a la condición del aislamiento representa un aspecto importante en la evaluación de algunas áreas de oportunidad de mejora, puesto que permite determinar la magnitud relativa de estas pérdidas de energía, comparadas con otros mecanismos de pérdida, y con ello evaluar la conveniencia de mantener en buen estado el aislamiento de las tuberías en términos de costo-beneficio, en razón a su impacto en la disminución de las pérdidas y en el incremento de la eficiencia del proceso de transporte [6].

El aislamiento térmico se emplea con el fin de reducir las pérdidas térmicas en sistemas termoenergéticos a través del cerramiento de los equipos, depósitos, tuberías, etc., los cuales, debido a las demandas térmico-mecánicas y/o a las elevadas temperaturas a las que normalmente se someten, se construyen con materiales metálicos con elevadas conductividades térmicas [7].

Con el fin de mejorar la eficiencia y reducir el desperdicio de energía en un generador de vapor se han planteado diferentes metodologías de análisis, y una de estas es el análisis exergético. Esta técnica se plantea con base en la segunda ley de la termodinámica y se considera una herramienta poderosa en el análisis de sistemas térmicos, en el propósito de identificar los lugares y las magnitudes de las irreversibilidades.

des. Cabe resaltar que algunas de las irreversibilidades que se encuentran después de realizar un análisis exergético no pueden eliminarse, pero sí mejorar, bien sea al rediseñar el equipo o bien el proceso en el que se presenten [8].

La evaluación energética de calderas piro-tubulares ha sido efectuada con anterioridad por varios autores [2], [3], [4], [9], [10], mediante el empleo de diversas metodologías de cálculo disponibles en la actualidad.

La Unidad Empresarial de Base (UEB) Empacadora “Raúl Cepero Bonilla”, la cual pertenece a la Empresa Cárnica de Camagüey y al Ministerio de la Industria Alimentaria (Minal), tiene como objeto social producir y comercializar las carnes de cerdo, sus derivados y subproductos comestibles y no comestibles, así como la sustitución de importaciones. Su tecnología de producción es obsoleta y proviene de diversos países, tales como Francia, Argentina, la Unión Soviética y Estados Unidos, mientras que algunos son de producción nacional. La industria tiene como limitante la atrasada tecnología de sus equipos debido a los años de funcionamiento y explotación, y a la falta de mantenimiento apropiado a causa de la carencia de equipos y piezas de repuesto adecuadas.

De esta manera, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar, desde el punto de vista energético, el sistema de generación, distribución y consumo de vapor de la UEB Empacadora “Raúl Cepero Bonilla”, por ser esta área una de las de mayor influencia en los costos de producción. Se busca que esto permita la posterior propuesta de alternativas de mejoras que ayuden a incrementar la eficiencia y el rendimiento de este sistema, con su consiguiente análisis económico y medioambiental. Para la realización de los cálculos se tomó en cuenta la nomenclatura que se muestra en la Tabla 1.

TABLA 1. NOMENCLATURA UTILIZADA PARA EFECTUAR LOS CÁLCULOS

Símbolo	Descripción	Unidades
A_A	Área	m ²
A_{agua}	Ahorro por agua que no se consume	\$
A_{CC}	Ahorro de combustible por recuperación de condensados	\$
A_{CAT}	Ahorro de combustible por aislamiento térmico	\$
A_{energ}	Ahorro energético	\$
A_{MT}	Ahorro monetario total	\$

Continúa...

Símbolo	Descripción	Unidades
C_{acc}	Costo de los accesorios	\$
C_{adq}	Costo total de adquisición del aislante	\$
C_{aisl}	Costo del aislante	\$
C_{ATND}	Costo aislamiento tuberías de nuevo diseño	\$
C_{inst}	Costo de instalación	\$
C_{inv}	Costo de inversión	\$
C_{Tinv}	Costo total de inversión	\$
C_{TND}	Costo tuberías de nuevo diseño	\$
C_p	Calor específico	kJ/kg°C
L_{tub}	Longitud de la tubería	m
m	Masa	kg
$P_{sin\ aisl}$	Pérdidas totales sin aislamiento	kJ/h
P_{aisl}	Pérdidas de la tubería aislada	kJ/h
Q_{abs}	Calor absorbido	kJ
Q_{ced}	Calor cedido	kJ
Q_m	Caudal másico del vapor	kg/h
Q_v	Caudal volumétrico del vapor	m ³ /h
v	Velocidad	m/s
ΔT	Diferencia de temperatura	°C
λ	Calor latente de vaporización	kJ/kg
ρ	Densidad	kg/m ³

Fuente: elaboración propia.

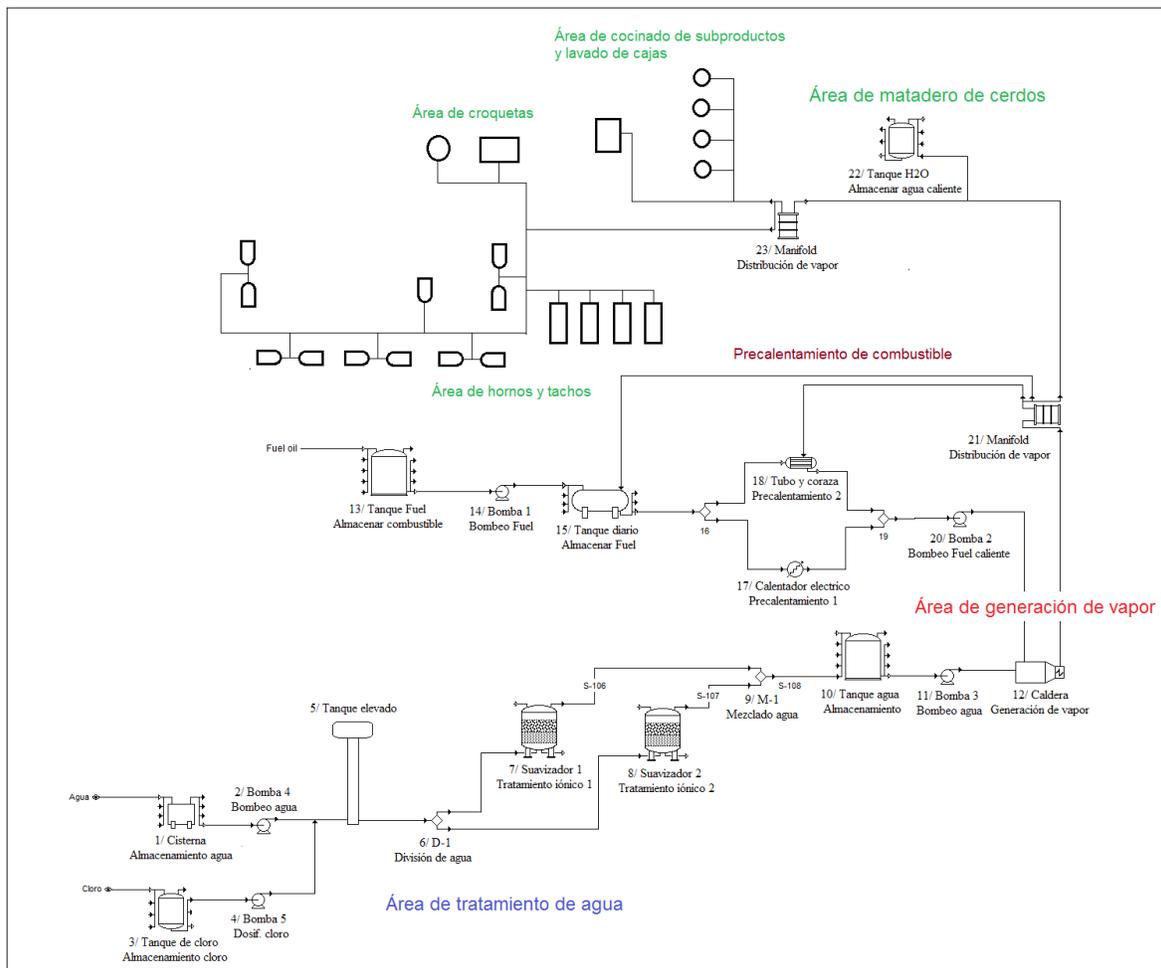
2. MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del proceso de generación, distribución y consumo de vapor

El agua cruda se envía hacia la cisterna desde los pozos de extracción. Mediante un sistema de bombeo se envía hasta el tanque elevado y se le inyecta cloro en la línea de entrada al tanque como primer tratamiento. Luego, a consecuencia de la gravedad, se distribuye el agua clorada hacia todos los puntos de la industria que la consumen. Por su parte, al agua que se va a utilizar en la caldera se le realiza un adecuado tratamiento de suavización con resinas intercambiadoras catiónicas. Una vez suavizada, esta se envía hacia el tanque de almacenamiento de la caldera, a fin de estar en capacidad de bombearla hacia el interior de este equipo. Por otra parte, el combustible se recibe en un tanque de almacenamiento de 108 641 L, y de ahí se envía hacia el tanque diario de la caldera (tanque de trabajo) mediante una bomba de combustible de primer impulso. A continuación, con una bomba de segundo impulso se hace pasar el combustible a un precalentamiento eléctrico, en el que se calienta mediante una resistencia hasta lograr una temperatura de aproximadamente 90 °C, para, finalmente, dirigirse hacia el quemador de la caldera. Después de que el generador ha producido vapor, el calentamiento eléctrico se apaga y se pone en funcionamiento otro precalentador de combustible que utiliza vapor de agua como agente calefactor, con lo que se cumple la misma función del calentador eléctrico (llevarlo a una temperatura de 90 °C). Este calentador recibe el vapor de agua directamente del primer distribuidor de vapor (Manifold), el cual recibe el vapor directo de salida de la caldera. De este primer Manifold sale una tubería que se dirige hacia el tanque de almacenamiento diario de combustible, de modo que sirve como primer precalentamiento con vapor de agua a través del empleo de un intercambiador de calor ubicado en el interior de dicho tanque. Del primer Manifold que se encuentra dentro de la sala de caldera sale una línea de vapor que se dirige hacia un segundo Manifold, que es el encargado de distribuir el vapor de agua hacia las demás áreas consumidoras de vapor de la fábrica, las cuales son (véase la figura 1):

- Área de lavado de cajas y cocinado de subproducto.
- Área de la croqueta.
- Área de cocinado en hornos y tachos.

De esta misma línea se conecta la entrada de vapor al tanque de agua caliente para el matadero de cerdos.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 1. DIAGRAMA DE FLUJO DE SISTEMA DE GENERACIÓN, DISTRIBUCIÓN Y CONSUMO DE VAPOR DE LA EMPACADORA “RAÚL CEPERO BONILLA”

Estado técnico del área

La sala de calderas cuenta con un solo generador de vapor. En estos momentos dicha área cuenta con los instrumentos de medición necesarios para el proceso, ya que en la caldera existe una electroválvula que controla el nivel del agua y seis manómetros para medir presión.

Se observa el mal estado técnico del aislamiento en todos los tramos de tuberías, y es crítica la mayor parte, ya que solo existe un buen aislamiento en el área de generación de vapor, pues en la distribución y consumo las tuberías están totalmente sin aislamiento. Esto conlleva a importantes pérdidas de calor al ambiente, lo que implica mayores gastos energéticos, además de que el vapor no llegue con los parámetros

de temperatura y presión establecidos a las áreas que lo consumen, afectando de esta manera el proceso de producción.

Metodología para la determinación de las pérdidas de calor en las redes de tuberías de vapor y cálculo del espesor óptimo del aislante

Para determinar las pérdidas de calor en las tuberías se utiliza un *software*, montado en una hoja Excel y desarrollado por [11], el cual se basa en las metodologías publicadas en [12], [13].

Metodología para la determinación de la eficiencia energética y exergética del generador de vapor

La eficiencia energética del generador de vapor de la UEB Empacadora “Raúl Cepero Bonilla” se determinó por el método indirecto a través de una hoja de cálculo Excel elaborada por [14], la cual se basa en la metodología de cálculo planteada por [15]. Por su parte, la eficiencia exergética se halló mediante una hoja de cálculo Excel elaborada por [16].

Propuestas de alternativas de mejoras para elevar la eficiencia energética. Unificación de diámetros

Se debe tener en cuenta que las tuberías de vapor que se encuentran en esta fábrica poseen diversos diámetros, oscilando entre ¼ pulgada y 6 pulgadas. De esta manera, existen algunas redes que verdaderamente requieren de esta variedad de diámetro, bien sea por el flujo que por ella circula, o bien por otras características que lo demanden, aunque existen tramos como el que transita desde el cocinado de subproductos hasta el lavado de cajas, donde prevalecen tres diámetros de tubería diferentes que se instalan por la falta de los accesorios correctos, lo cual provoca mayores pérdidas de calor.

Sistema de aislamiento para las tuberías

Se propone aislar todas las redes de tuberías por donde circula vapor de agua con el aislante Lana Mineral y recubrimiento exterior de aluminio. Esto tendrá un gran impacto económico en el proceso de generación de vapor de la fábrica a causa de la reducción de pérdidas de calor. Asimismo, supone el ahorro en el consumo de combustible y, por consiguiente, la disminución de emisión de gases contaminantes a la atmósfera.

Diseño de un sistema para la recuperación del condensado

La fábrica cuenta con varias áreas consumidoras de vapor, aunque solo se le realizará el proceso de recuperación de condensado en el área de cocción, específicamente en

el horno argentino con aire caliente. En esta fábrica existen también tachos y hornos a vapor, pero según el criterio de los especialistas, se hace muy engorrosa la recuperación en estas últimas áreas consumidoras porque el condensado se contamina mucho, ya que entra en contacto directo con los productos y termina arrastrando consigo grasas y otros desperdicios. Cabe destacar que actualmente en la fábrica existen dos hornos argentinos con aire caliente, es decir, se puede recuperar condensado de los dos, pero el diseño solo se le realizará a uno.

Descripción del proceso de distribución de vapor en el área de cocción

El vapor de agua llega al intercambiador de calor (radiador) que se encuentra encima de los hornos, por donde transita en forma de serpentín. Dentro del intercambiador de calor se encuentra un extractor (ventilador) que es el encargado de aspirar el aire. Ahora bien, el intercambiador es de tubos y coraza: por fuera de los tubos (coraza) circula el aire, mientras que por dentro transita el vapor. El aire caliente pasa por los orificios laterales que tienen los hornos en la parte superior, y baja para intercambiar calor con las piezas cárnicas. Una vez que intercambia calor con las piezas cárnicas, retorna hacia arriba haciendo un recorrido en forma de U, y sale por los orificios del centro localizados en la parte superior del horno. Este vuelve a pasar a través del intercambiador de calor y se lleva de nuevo al interior del horno por los orificios laterales superiores, convirtiéndose en un proceso de circuito cerrado. Cuando el condensado sale de los hornos pasa por los accesorios necesarios para ser recuperado. Todo el condensado que se recupera va directo hacia el tanque de alimentación de agua a la caldera.

Metodologías de cálculo para la nueva línea de recuperación de condensado

Se utilizarán técnicas y ecuaciones tomadas de diversos textos, tales como [12], [17], [18].

En el proyecto que se está realizando no es necesario diseñar un tanque para almacenar el condensado, pues resulta más rentable que la tubería de recuperación de condensado se dirija directo al tanque de alimentar la caldera, pues así esta trabaja con agua caliente y mejora su eficiencia. En este sentido, se plantean los siguientes pasos:

1. Se calcula el flujo de vapor:

$$Q_{abs} + Pérdidas = Q_{ced} \quad (1)$$

En este caso el que cede calor es el vapor y el que absorbe es el producto, por lo que:

$$Q_{abs} = Q_{prod} = m \cdot Cp_{m\acute{a}x} \cdot \Delta T \quad (2)$$

Donde:

$Cp_{m\acute{a}x}$: capacidad calorífica máxima.

m : masa de los productos cárnicos.

Las pérdidas de calor representan un 20 % del calor absorbido, de acuerdo con el criterio de especialistas de la fábrica, dado el estado técnico que presenta el equipamiento que lleva el vapor de agua a los hornos. De esta manera:

$$Q_{ced} = m \cdot \lambda \quad (3)$$

Donde:

λ : calor latente de vaporización del vapor saturado a 130 °C. Esta temperatura se debe a la degradación que sufre el calor del vapor de agua al circular por tuberías con carencia de aislamiento.

Luego:

$$m = \frac{Q_{ced}}{\lambda} \quad (4)$$

Se trabajó con base de cálculo para 1 h de trabajo, por lo que el flujo másico de vapor (Q_m) es igual a la masa del vapor en kg/h.

2. Mediante la ecuación de continuidad, se determina la velocidad del condensado (v):

$$Q_m = v \cdot A \cdot \rho \quad (5)$$

Donde:

• A : área de la tubería que se utiliza para recuperar el condensado. Entonces:

$$v = \frac{Q_m}{A \cdot \rho} \quad (6)$$

3. Se determina el flujo volumétrico por la siguiente ecuación:

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho} \quad (7)$$

Para la nueva línea de condensado se requieren:

- 174,3 m de tubería con diámetro de 2 ¼ pulgadas.
- Una trampa de vapor de flotante con caudal 150 kg/h, diferencial de presión de 8 kgf/cm², rosca hembra NPT con eliminador termostático de aire similar SS tipo FT14-10DN15.
- Un filtro tipo Y, con malla acero inoxidable y mesh 80, rosca hembra NPTPN 25 de ¼ pulgada.
- Tres codos de ¼ pulgada y de 90° de hierro maleable, roscado.
- Una válvula de interrupción tipo globo roscada de ¼ pulgada tipo NPTPN 25.
- Una válvula de retención de ¼ pulgada tipo charnela, rosca hembra.
- Una te de ¼ pulgada de hierro maleable, roscada.

Comportamiento medioambiental

Para la estimación de la dispersión de los gases contaminantes producto de la combustión, se utilizó el programa de computación Contamín [19]. A través de este programa se puede estimar la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera debido al proceso de combustión y la distancia a la que los gases alcanzan su mayor concentración.

Cálculos técnico-económicos

Costo de inversión para el aislamiento de tuberías

Si se conoce el valor de las pérdidas totales de la sección de tubería sin aislamiento y el valor de las pérdidas una vez aislada la tubería, se determina el ahorro energético:

$$A_{energ} = P_{sin\ aisl} - P_{aisl} \quad (8)$$

Si se conoce el precio del aislante, se calcula el costo de adquisición:

$$C_{adq} = L_{tub} \cdot C_{aisl} \quad (9)$$

$$C_{inst} = C_{adq} \cdot 2\% \quad (10)$$

$$C_{inv} = C_{adq} + C_{inst} \quad (11)$$

Costo total de la inversión

Para conocer el costo total de inversión se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_{Tinv} = C_{inv} + C_{TND} + C_{ATND} + C_{acc} \quad (12)$$

Cálculo del ahorro producido

Para calcular el ahorro producido se utiliza la siguiente ecuación:

$$A_{MT} = A_{CC} + A_{CAT} + A_{agua} \quad (13)$$

Cálculo del PRI

A fin de conocer el periodo de recuperación de la inversión (PRI) se utiliza la siguiente ecuación:

$$PRI = \frac{C_{Tinv}}{A_M} \quad (14)$$

Cálculo del valor actual neto (VAN) y de la tasa interna de retorno (TIR)

A partir del uso de una hoja de cálculo de Excel se determinó el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) en periodos de tres, seis, nueve y doce meses, con respecto al costo total de la inversión para la compra de accesorios necesarios. Asimismo, con relación al ahorro económico que se obtendría por concepto del combustible que se deja de consumir en la caldera a causa del aislamiento de las tuberías de vapor con Lana Mineral y el recubrimiento de aluminio, se obtiene también el diseño de un sistema para la recuperación de condensados que permite, entre otras cosas, el aumento de la temperatura del agua de alimentación a la caldera.

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Del análisis realizado al sistema de generación, distribución y consumo de vapor en la UEB Empacadora “Raúl Cepero Bonilla” se tiene que los equipos fundamentales que forman el sistema son: una caldera pirotubular, dos bombas de combustible, una bomba de agua y dos distribuidores de vapor (Manifold).

De igual forma, se encontraron los resultados que se presentan a continuación.

Análisis de las pérdidas de calor y el sistema de aislamiento

Se realizó un levantamiento hidráulico al dividir las redes de tubería en quince tramos: 300,38 m horizontales y 32,09 m verticales, para un total de 332,47 m. Las pérdidas de calor en las condiciones actuales fueron de 184 938,44 W en los tramos horizontales y 22 156,55 W en los verticales, de forma que se obtuvo un total de 207 094,99 W. Se evidenció que al aislar las tuberías correctamente con aislante Lana Mineral ocurre una reducción de las pérdidas de calor de 14 130,21 W en los tramos horizontales, con un ahorro del 92,360 %, mientras que en los verticales son de 1 809,48 W, con lo que se ahorra un 91,833 %. Se obtuvo un total de pérdidas de calor de 15 939,68 W, lo que representa un 92,303 % y produce una reducción total de 191 155,31 W. Asimismo, se utilizaron los espesores de aislante adecuados para reducir las pérdidas de calor en más de un 90 % y mantener en las tuberías la mayor temperatura posible.

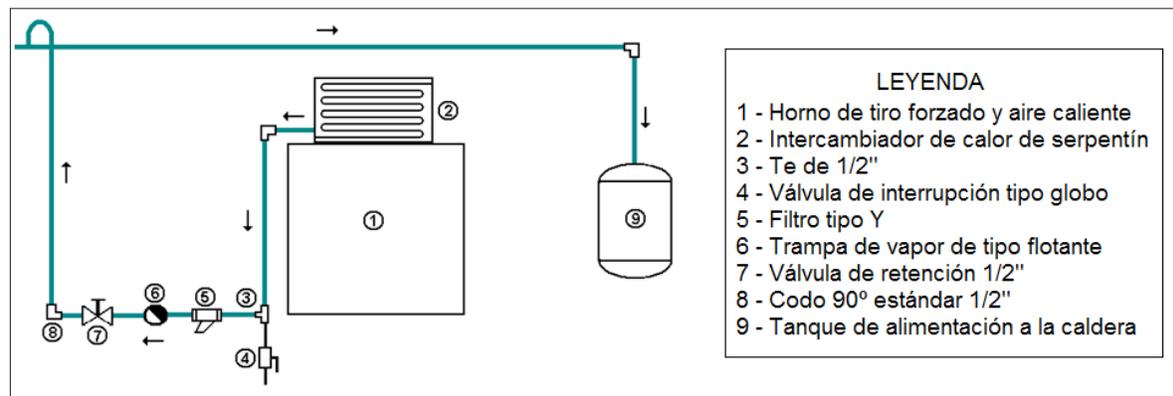
Análisis de la eficiencia energética y exergética

Con la metodología utilizada para calcular la eficiencia energética se obtiene la cantidad de combustible que se consume actualmente en la fábrica. Esto da como resultado 281,26 kg/año de *fuel oil*, con un índice de generación 14,2217 kg vapor/kg combustible, un factor de evaporación de 1,16834 y una eficiencia de 90,7 %, la cual

puede considerarse aceptable [1]. En este programa computacional se propone como medida para mejorar el funcionamiento del generador de vapor el incremento de la temperatura del agua de alimentación mediante el diseño de un sistema de recuperación de condensado. La eficiencia exergética, por su parte, tuvo un valor de 7,03 %, la cual puede considerarse tolerable, aunque también mejorable [8], [20].

Análisis del nuevo sistema de recuperación de condensado

El estudio de este diseño se realizó en el área de cocción, específicamente en el horno argentino con aire caliente. El condensado que se recupera realiza varios recorridos (especificados en el diagrama de flujo de la figura 2), de manera que se envía de forma directa al tanque de alimentación del generador de vapor, logrando el aumento de la temperatura del agua.



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 2. ESQUEMA DEL DISEÑO DEL NUEVO SISTEMA DE CONDENSADOS EN EL ÁREA DE HORNOS

Para el cumplimiento de este proyecto se utilizaron 174,3 m de tubería con diámetro de 2 ¼ pulgadas, con su adecuado aislamiento. Se requirieron varios accesorios, tales como válvulas, codos, etc. La instalación de este sistema de recuperación de condensados permitirá un ahorro de agua tratada de 139,875 L/h, lo que implica anualmente 475 015,5 L. Esto conlleva también a un ahorro de combustible de 18,9 L/h, para un ahorro anual de 64 186,51 L.

Análisis medioambiental

En el análisis medioambiental se utilizaron los valores obtenidos en los cálculos de la eficiencia del generador con el fin de estimar, mediante el programa de computación Contamín [19], la dispersión de los gases contaminantes y obtener de esta manera que a 150,098 m de distancia se alcanza la mayor concentración.

La fábrica emite anualmente importantes cantidades de gases a la atmósfera: 3 145 171,44 kg de CO₂, 14 380 067,91 kg de N₂, 1 106 876,958 kg de O₂, y 33 586,44 kg de SO₂, para un total de 18 665 716,668 kg.

Con las mejoras introducidas se aprecia una reducción de esta emisión, de manera que se llega a los siguientes valores anuales: 2 940 980,148 kg de CO₂, 13 446 445,02 kg de N₂, 1 035 168,72 kg de O₂, y 31 413 kg de SO₂, para un total anual de 17 454 030,66 kg, ahorrándose así 1 211 695,86 kg/año.

Análisis económico

Para la correcta realización de este trabajo fue fundamental realizar una serie de cálculos económicos con el objetivo de conocer los costos requeridos en la inversión, los ahorros producidos y, con ellos, el periodo en el que la fábrica recupera los gastos de esta inversión.

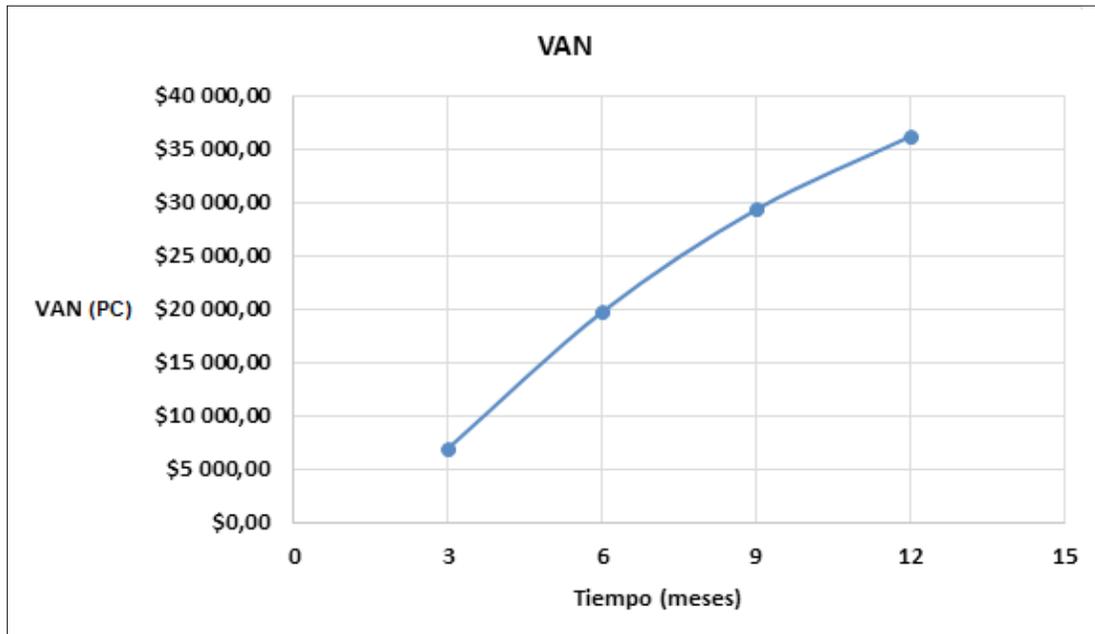
Se estima que el costo de la inversión para el aislamiento de tuberías existentes es de PC 4193,95, mientras que para el nuevo diseño del sistema de recuperación de condensado con las tuberías que necesita, su adecuado aislamiento y los accesorios que requiere, el costo es de PC 6565,42, para un costo total de PC 10 759,37.

Con la reducción de agua tratada por la recuperación del condensado se ahorran PC 13,9875/h, lo que equivale a PC 47 501,55/año.

Al introducir las mejoras en el sistema de generación, distribución y consumo de vapor, se ahorran PC 13,743/h de combustible, obteniéndose un ahorro anual de PC 46 671,228. En total se obtiene un ahorro monetario de PC 94 172,78/año.

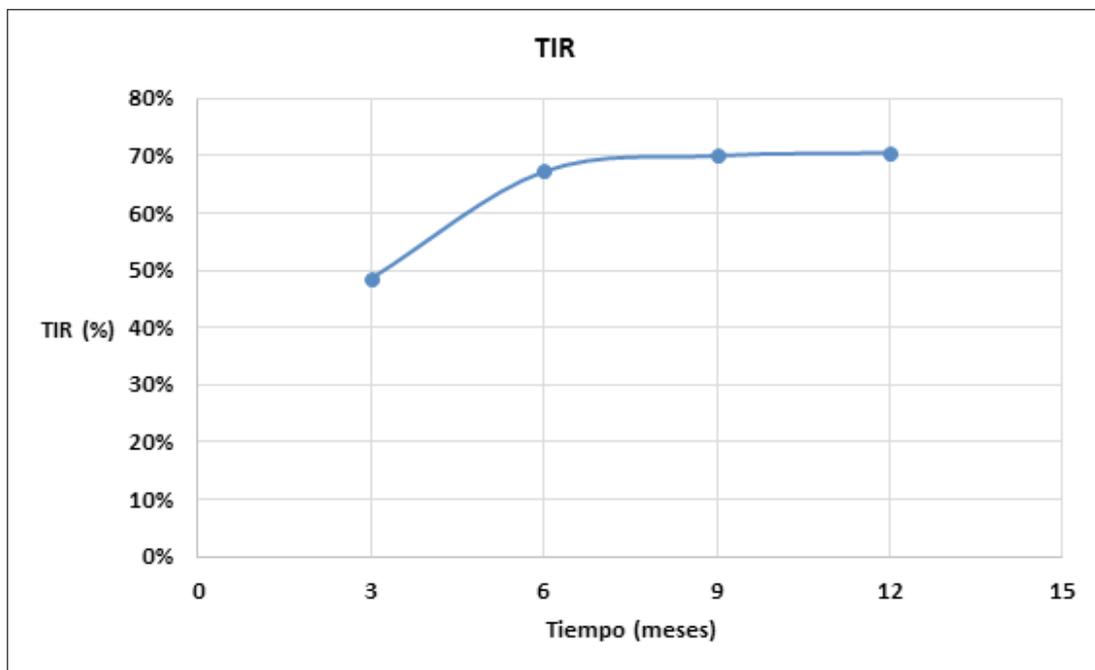
Si se tiene en cuenta el costo total de la inversión y el ahorro monetario producido, se obtiene un periodo de recuperación de la inversión de 1,4 meses. También se determinó el valor actual neto (figura 3) y la tasa de interna de retorno (figura 4), en un periodo de tres meses hasta llegar a un tiempo final de un año.

El resultado final del VAN es de PC 36 238 al cabo de los doce meses, lo cual indica que debe aceptarse la ejecución de la inversión, pues su valor es mayor que cero.



Fuente: elaboración propia

FIGURA 3. GRÁFICO DEL VALOR ACTUAL NETO (VAN)



Fuente: elaboración propia.

FIGURA 4. GRÁFICO DE LA TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

Se obtuvo un valor de la TIR igual al 71 %, superior a la tasa de aplicación empleada en los flujos de caja actualizados. Esto indica aceptar la ejecución del proyecto, pues a mayor TIR, mayor rentabilidad.

4. CONCLUSIONES

Se concluye que todo el sistema contará con aislamiento de Lana Mineral a fin de evitar pérdidas de energía al ambiente, reduciéndose estas en un 92,303 %. La eficiencia energética del generador de vapor fue de 90,7 %, mientras que la exergética fue de 7,03 %.

Ahora bien, se requieren PC 10 759,37 para aislar térmicamente las tuberías de distribución de vapor con Lana Mineral y construir el nuevo sistema de recuperación de condensado. Sin embargo, con la recuperación de condensado es posible elevar la temperatura de alimentación del agua al generador de vapor, lo que disminuye el consumo de agua y combustible en 139,875 y 18,9 litros/h, respectivamente. De esta manera, con la introducción de las mejoras en el sistema de distribución de vapor se obtiene un ahorro económico total de PC 94 172,78/año. Asimismo, con la aplicación de las mejoras se reduce la emisión anual de CO₂ en 2 940 980,148 kg, y de SO₂ en 31 413 kg.

Por último, se obtuvo un valor positivo del indicador VAN igual a PC 36 238, un valor de la TIR igual a 71 %, y un PRI de 1,4 meses, lo cual indica la rentabilidad y la factibilidad económica de aplicar las alternativas de mejora propuestas en la empresa cárnica.

REFERENCIAS

- [1] S. Teir, & A. Kulla, *Boiler calculations*. Espoo: Helsinki University of Technology, 2002.
- [2] ColCiencias, *Eficiencia energética en la generación y distribución de vapor*. Bogotá: Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología (ColCiencias), 2009.
- [3] S. Krishnanunni, J. Paul, M. Potti, & E. M. Mathew, «Evaluation of heat losses in fire tube boiler», *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 2, n.º 12, pp. 301-305, 2012.
- [4] R. F. Guevara, «Curso plantas consumidoras de energía. Separata II-generadores de vapor pirotubulares», Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Santa, Nuevo Chimbote, Perú, 2013.
- [5] C. Merritt, *Steam systems: a practical guide for operators, maintainers, and designers*. Nueva York: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [6] R. Ovando, A. García, J. I. Martínez, I. Canchola, P. J. Galván, C. Miranda, & O. Mora, «Determinación de pérdidas de calor en la red de transporte de vapor del campo

- geotérmico de Cerro Prieto, BC, con base en el estado físico del aislamiento térmico de vaporductos», *Geotermia*, vol. 24, n.o 2, pp. 11-24, 2011.
- [7] Isover, «Manual de aislamiento en la industria», Mercaillament, Badalona, España, 2012.
- [8] H. D. Patiño, & B. D. Rosero, «Análisis exerético de una planta de cogeneración operando bajo ciclo combinado», *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, vol. 17, n.o 1, pp. 49-58, 2017.
- [9] R. Cabrera, & R. Vizcón, «Evaluación termoeconómica de un generador de vapor pirotubular», *Revista Avanzada Científica*, vol. 10, n.o 3, pp. 1-12, 2007.
- [10] J.H. Sosa-Arno, & S. A. Nebra, «First and second law to analyze the performance of bagasse boilers», *International Journal of Thermodynamics*, vol. 14, n.o 2, pp. 51-58, 2011. doi: <https://doi.org/10.5541/ijot.270>.
- [11] A. Pérez, *Cálculo de las pérdidas de calor y el espesor óptimo del aislante para tuberías tanto horizontales como verticales, Versión 1.3*. Camagüey, Cuba: Universidad de Camagüey, 2013.
- [12] D. Q. Kern, *Procesos de transferencia de calor*. México D. F.: Compañía Editorial Continental, 1999.
- [13] A. Fonte, P. M. Nemirovich, & R. González, *Cálculo de las pérdidas de calor y del espesor del aislante*. Camagüey, Cuba: Universidad de Camagüey, 1986.
- [14] P. Rodríguez, *Sistema de análisis de eficiencia para generadores de vapor, Versión 2.0*. Cienfuegos, Cuba: MEP, 2006.
- [15] N. Tanquero, *Guía metodológica para proyectos de curso de generadores de vapor*. Ciudad de la Habana, Cuba: Editorial Pueblo y Educación, 1987.
- [16] A. Pérez, *Rendimiento exerético en calderas pirotubulares, Versión 1.0*. Camagüey, Cuba: Universidad de Camagüey, 2013.
- [17] J. M. Rosabal, & L. Garcell, *Hidrodinámica y separaciones mecánicas*, 3ª ed., vol. 1. La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela, 2006.
- [18] M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, & R. E. West, *Plant design and economics for chemical engineers*, 5ª ed., Nueva York: McGraw-Hill, 2003.
- [19] Cujae, *Contamín, Versión 1.0.0*. La Habana, Cuba: Universidad Tecnológica de La Habana (Cujae), 2004.
- [20] O. M. Nuñez, «Análisis exerético de una central eléctrica de cogeneración», *Revista Centro Azúcar*, vol. 43, pp. 10-20, 2016.