

Auditoría Energética al Circuito de Vapor y Condensado de una Planta de Elaboración de Café Liofilizado

Roberto Daniel Bohórquez Guzmán ⁽¹⁾ Jorge Duque Rivera ⁽²⁾
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción ⁽¹⁾⁽²⁾
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral
Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador
rodaboho@espol.edu.ec ⁽¹⁾
Ing. Mecánico, Profesor FIMCP-ESPOL, jduque@espol.edu.ec ⁽²⁾

Resumen

Esta tesis es una auditoría energética al circuito de vapor y condensado de una planta industrial que se dedica a la elaboración de café liofilizado.

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis de la situación energética actual de la planta para identificar y evaluar oportunidades de conservación de energía que permitan reducir el consumo anual de combustible de la empresa.

En una etapa de pre-diagnóstico se midió los consumos de vapor de los usuarios con el único medidor de flujo existente en la planta, para las condiciones de demanda máxima y promedio, con esta información posteriormente se verificó el correcto dimensionamiento de las tuberías y distribuidores de vapor.

En la etapa de auditoría detallada se calculó el costo de generación de vapor y de energía, se cuantificó las pérdidas económicas debido a las fugas de vapor encontradas en las tuberías de distribución de vapor, a la pérdida de energía a través del aislamiento y por no retornar el condensado de algunos procesos directamente al tanque de alimentación de agua de la caldera. Se realizó la inspección a las trampas de vapor existentes con una cámara termográfica y un equipo de ultrasonido para verificar su buen funcionamiento.

Palabras Claves: Vapor, Condensado, Auditoría energética, Pérdidas de energía.

Abstract

This thesis is an energy audit to a steam and condensate loop of a plant dedicated to the production of freeze-dried coffee.

The objective of this study is to analyze the current energy situation of the plant to identify and evaluate opportunities for energy conservation that allows the company reduces the annual fuel consumption.

In a previous stage the consumption of the steam users was measured with the only existing flow meter at the facility for the conditions of maximum and average demand, with this information the correct sizing of steam pipes and distributors was verified.

The cost of generating steam and energy was calculated in the stage of detailed audit, the economic losses due to steam leakage encountered in the steam distribution pipes, to the loss of energy through the insulation and not return condensate of some processes directly to the feed water tank of the boiler were quantified. The inspection to all steam traps was carried out with a termographic camera and an ultrasound equipment to verify proper operation.

Keywords: Steam, Condensate, Energy audit, Energy loss.

1. Introducción

En los circuitos industriales de vapor y condensado existen pérdidas de energía que por lo general no son tomadas en cuenta por el personal a cargo del mantenimiento de las plantas pero a la larga estas pérdidas representan cantidades considerables de dinero.

Condensados no recuperados, fugas de vapor, trampas de vapor fallando abiertas, tuberías de distribución mal dimensionadas son algunos de los problemas más comunes que se encuentran en las plantas industriales que utilizan vapor como fluido de trabajo en sus procesos de producción.

Esta tesis de grado puede ser tomada como una referencia para quién desee realizar un estudio energético en su planta, si bien es cierto los procesos de producción son diferentes, sin embargo los equipos y accesorios para la generación, distribución, consumo y recuperación de condensado en un circuito de vapor son exactamente los mismos.

Este trabajo se concentra en utilizar de manera más eficiente los recursos energéticos, actualmente en la planta no se aprovecha de forma adecuada los condensados de los equipos de proceso, en algunos casos se los bota y en otros se los mezcla con condensados con contenido orgánico que no permiten ser retornados directamente al tanque de agua de alimentación de la sala de calderas.

2. Demanda de vapor para el proceso de elaboración de café liofilizado

Para el proceso de elaboración de café liofilizado se necesita vapor en las siguientes secciones de la planta.

- Sistema jet
- Chaquetas del sistema jet
- Sistema hogger
- Bandejas de secado de producto
- Condensadores

Para la medición de los consumos de vapor de cada usuario se puede adoptar el siguiente procedimiento.

- Cerrar todas las válvulas del distribuidor #2, excepto la que alimenta con vapor al usuario que se va a medir el consumo.
- Desde la sala de calderas enviar vapor a planta.
- Simular condiciones de proceso en el usuario que se desea medir su consumo de vapor.

- En la pantalla del medidor de flujo tomar el dato de consumo instantáneo en Lb/h.
- Repetir el procedimiento para los demás usuarios.
- Contrastar la información obtenida con los datos de diseño de los equipos y también las estadísticas internas de la empresa.

2.1. Demanda máxima de vapor

En base a las mediciones realizadas en la Tabla 1 se muestran los consumos máximos de vapor de cada usuario.

Tabla 1. Consumo máximo de vapor por usuario

Usuario	Flujo (Lb/h)	Presión (Psig)
Sistema Hogger	5.500	220
Sistema Jet	2.650	180
Bandejas de secado	2.520	52
Condensadores	3.500	15
TOTAL	14.170	

2.2. Demanda promedio de vapor

En base a las mediciones realizadas en la Tabla 2 se muestran los consumos máximos de vapor de cada usuario.

Tabla 2. Consumo promedio de vapor por usuario

Usuario	Flujo (Lb/h)	Presión (Psig)
Sistema Jet	2.650	180
Bandejas de secado	2.520	52
Condensadores	3.500	15
TOTAL	8.670	

2.3. Indicador de producción

Basado en los datos estadísticos de la planta se pudo realizar la gráfica de la Figura 1 de donde se determinó que por cada galón de bunker que se consume la planta produce 7,06 Kg de producto terminado.

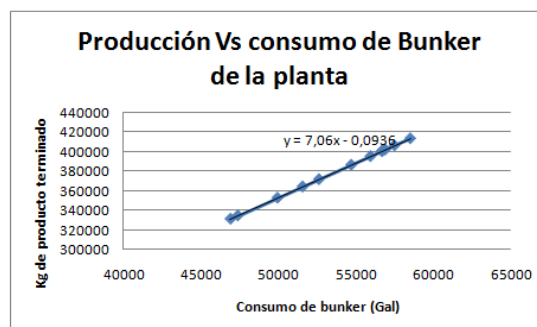


Figura 1. Gráfica de "Producción Vs. Consumo de bunker"

3. Generación de vapor

En la etapa de auditoría detallada de este trabajo se determinó que el costo de generación de vapor y de energía es de \$6,70 las 1000 Lbm de vapor y \$7,10 el millón de Btu respectivamente.

3.1. Características de la caldera

En la Tabla 3 se detallan las características de la caldera que alimenta con vapor a la planta de elaboración de café liofilizado.

Tabla 3. Características de la caldera

TIPO DE CALDERA	PIROTUBULAR
MARCA	CLEAVER BROOKS
MODELO	CB500
CAPACIDAD NOMINAL	500 BHP
PRESIÓN NOMINAL	250 PSIG
PRESIÓN DE GENERACIÓN	225 PSIG
HORAS DE OPERACIÓN	8400 HR/AÑO
TEMPERATURA DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN	82 °C
COMBUSTIBLE	BUNKER
MÁXIMO TDS ADMISIBLE	3500 PPM
EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN	75 %

3.2. Oportunidades de recuperación de energía

Las purgas de la caldera actualmente se realizan de forma manual y de forma ineficiente. Se analizó la posibilidad de cambiar el sistema de purgas manuales por un sistema de purgas continuas de superficie. En las figuras 2 y 3 se muestran las diferencias en la cantidad de agua que se desaloja para cada caso. Cuando se realiza una purga manual se desaloja mucha más agua que para el caso de una purga automática, es por esa razón que el TDS cae muy por debajo del valor promedio.

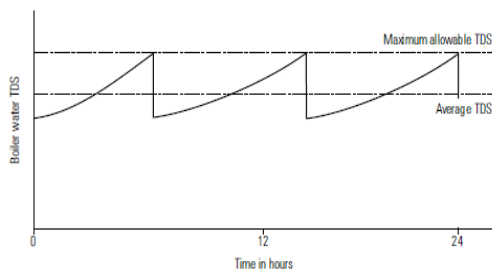


Figura 2. TDS en el agua de caldera cada vez que se realiza una purga manual [2]

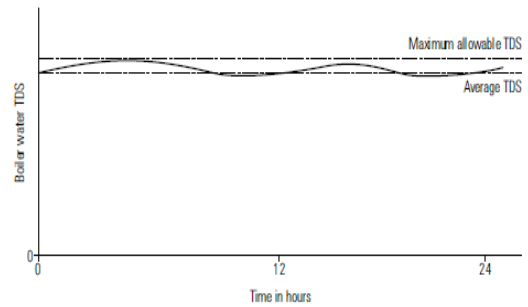


Figura 3. TDS en el agua de caldera cada vez que se realiza una purga automática

4. Distribución de vapor

Se verificará el dimensionamiento de las tuberías de vapor y de los distribuidores de la planta. Se calculará las pérdidas de energía a través del aislamiento de las tuberías, las pérdidas por fugas de vapor. Se elaborará un inventario y reporte de operación de todas las trampas existentes en la planta, adicionalmente se cuantificarán los ahorros por concepto de recuperación de condensados que actualmente no son reutilizados adecuadamente.

4.1. Método de velocidad para dimensionamiento de tuberías de distribución de vapor

Este método no toma en cuenta la caída de presión en la línea y generalmente se utiliza para tramos cortos de tubería, hasta 35 m de longitud. En la Figura 4 se muestra la gráfica correspondiente al método de velocidad.

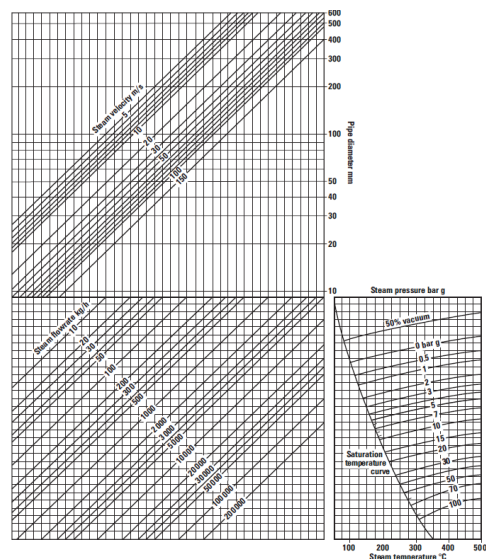


Figura 4. Gráfica del método de velocidad [2]

Para el cálculo de tuberías de distribución de vapor se recomienda utilizar una velocidad de 100 ft/s.

4.2. Inventario y reporte de trampas de vapor

Como parte de la auditoría del circuito de vapor y condensado en una planta industrial se debe incluir un inventario de todas las trampas existentes con la finalidad de tener un registro que será de gran ayuda para poder implementar un programa de revisión periódica por parte del departamento de mantenimiento. En la Figura 5 se muestra una gráfica del reporte operacional del total de trampas de vapor revisadas con la cámara termográfica y el equipo de ultrasonido.

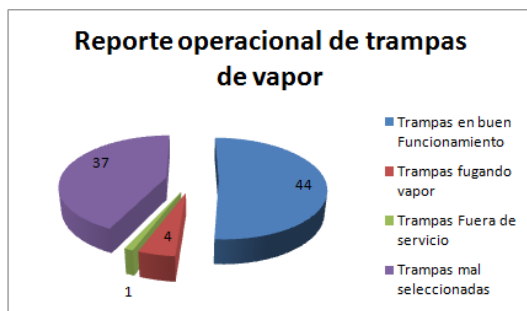


Figura 5. Reporte operacional de trampas de vapor

En las Figuras 6 y 7 se muestran las imágenes tomadas con la cámara termográfica de una trampa termodinámica y de una de balde invertido respectivamente.

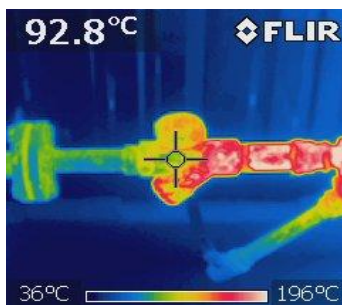


Figura 6. Trampa termodinámica con filtro en buen funcionamiento

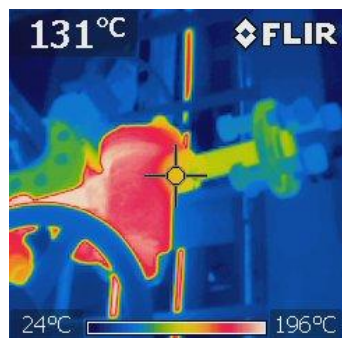


Figura 7. Trampa de balde invertido en buen funcionamiento

4.3. Oportunidades de recuperación de energía

A continuación se mencionan algunos de los potenciales puntos de recuperación de energía que se evidenciaron en los recorridos por la planta y que se deben analizar en la etapa de auditoría detallada.

- Purga del distribuidor # 2: Actualmente no se recupera el condensado, se lo bota y no se lo aprovecha de forma adecuada.
- Condensado de las bandejas de secado: El condensado limpio proveniente de este usuario es mezclado con condensados con contenido orgánico proveniente de otros usuarios de vapor. Se puede independizar la descarga del condensado de las bandejas y enviarlo directamente al tanque de agua de alimentación de la caldera. Lo anteriormente mencionado es la causa de la pérdida de vapor al ambiente que se observa en la Figura 8.



Figura 8. Pérdida de vapor al ambiente

- Cuantificar las pérdidas de energía a través del aislamiento térmico de las tuberías y las pérdidas por fugas de vapor.

5. Resultados

Luego de realizar los cálculos en la fase de auditoría de tallada se determinó que actualmente la planta de elaboración de café tiene las pérdidas económicas y de combustible bunker utilizado en exceso que se describen en la Tabla 4 por no aprovechar adecuadamente los recursos energéticos de la planta.

Tabla 4. Reporte de pérdidas económicas y de combustible utilizado en exceso

No	Usuario	Descripción	Bunker utilizado en exceso (Gal/año)	Pérdidas económicas anuales
1	Caldero #2	La purga del caldero se realiza de forma manual e ineficiente.	39.143	\$ 32.879,75
2	Bandejas de secado	No se aprovecha la energía que contiene el condensado de las bandejas de secado.	20.934	\$ 17.584,29
3	Distribuidor #2	No se recupera la purga de condensado del distribuidor #2.	7.202	\$ 6.049,84
4	Tuberías de distribución	Fugas de vapor.	-	\$ 5.424
		PERDIDA TOTAL	67.279	\$ 61.937,88

Actualmente la planta de café liofilizado está utilizando de forma innecesaria 67.279 Galones de bunker los cuales representan el 10,43% del consumo actual. En la Figura 9 se muestra una gráfica de "Producción Vs Consumo de bunker" considerando la implementación de todos los cambios propuestos en este capítulo. Con la implementación de las mejoras propuestas se puede llegar a producir 7,88 Kg de producto terminado por cada galón de bunker consumido.

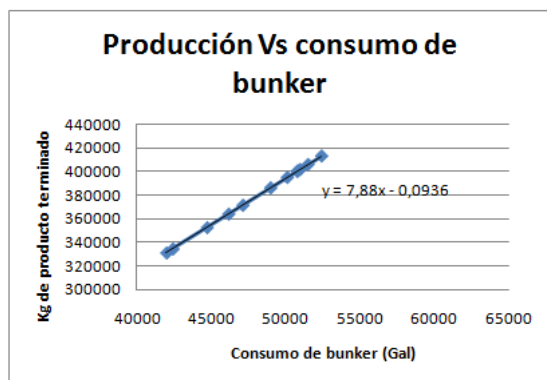


Figura 9. Gráfica de "Producción Vs. Consumo de bunker" después de implementar las mejoras

6. Tiempo de retorno de inversión

El costo de implementar todas las mejoras sugeridas en la etapa de auditoría detallada es de \$42102 + Iva, este valor incluye el costo de los equipos, accesorios y de instalación.

Basado en los tiempos de retorno de inversión de cada proyecto analizado de manera individual se recomienda implementar las mejoras siguiendo el orden de prioridad que se muestra a continuación.

- Cambio de trampas de vapor en el sistema de recuperación de condensados de las bandejas de secado. TRI: 1,3 meses.
- Corrección de fugas de vapor en tuberías de distribución. TRI: 1,7 meses.

- Cambio del sistema de purga de la caldera. TRI: 2,94 meses.
- Recuperación del condensado de la purga del distribuidor #2. TRI: 6,86 meses.
- Recuperación del condensado de las bandejas de secado. TRI: 11,6 meses.
- Nueva línea de suministro de vapor para las chaquetas del sistema jet.

7. Conclusiones

En esta tesis de grado se hizo una auditoría energética al circuito de vapor y condensado de una planta de café liofilizado, este estudio incluyó las purgas de la caldera, tuberías, distribuidores, condensados que no son aprovechados adecuadamente, aislamiento de las tuberías de distribución, fugas de vapor, trampas de vapor, problemas en usuarios de vapor.

Se calculó el costo de generación de vapor y de la energía. Generar 1.000 Lb de vapor tiene un costo de \$6,70 y 1 MMBtu tiene un costo de \$7,10.

El cambio del sistema de purga de la caldera #2, la adecuada recuperación de los condensados de las bandejas de secado y del distribuidor #2, permitirán ahorrar 67.279 galones de bunker los cuales representan el 10,43% del consumo anual de combustible de la planta.

1. Se calculó teóricamente el tamaño de las tuberías de distribución de vapor, se realizó dos verificaciones, la primera con el método gráfico de velocidad y la segunda con un software de cálculo, para todos los casos se pudo determinar que las tuberías están bien dimensionadas.
2. El distribuidor de vapor #3 está sub-dimensionado, el tamaño óptimo para este distribuidor debe ser de 6". Un distribuidor sub-dimensionado provoca que el condensado que arrastra el vapor por la tubería no pueda ser desalojado por la purga del bolsillo del distribuidor.
3. El ahorro de \$745,30/año calculado por concepto del cambio del aislamiento de las tuberías de distribución de vapor no justifica por el momento la inversión a realizar, por lo tanto esta mejora debe someterse a una posterior evaluación.
4. La corrección inmediata de las 2 fugas de vapor encontradas en las líneas de distribución permiten ahorrar \$5.424/año.
5. En la inspección de trampas realizada con ultrasonido y termografía se determinó que 4 trampas están fugando vapor, 37 están mal seleccionadas, 1 está fuera de servicio y 44 están en buen funcionamiento.
6. Para el caso del anegamiento las bandejas de secado de producto en donde por

inconvenientes de espacio no se puede realizar una correcta instalación de las trampas, el problema se puede solucionar instalando trampas con relevador de sello de vapor. El anegamiento de los equipos de intercambio de calor se produce cuando las trampas de vapor no se instalan inmediatamente después de la descarga de condensado del equipo de intercambio de calor, esto provoca el bloqueo de la trampa debido a la formación de un sello de vapor antes de la trampa.

8. Recomendaciones

1. En el capítulo 2 se mencionó que por cada galón de bunker consumido la planta produce 7,06 Kg de producto terminado, luego de implementar las mejoras propuestas en esta tesis se debe evaluar en un periodo no mayor a un año en cuanto aumenta este indicador.
2. Contratar después de 2 años un nuevo estudio de eficiencia de combustión de la caldera y repetir los cálculos de costo de generación de vapor y pérdidas de energía por aislamiento en tuberías de distribución para evaluar si el ahorro en ese tiempo justifica el cambio del aislamiento.
3. Inspeccionar de manera periódica que las trampas de vapor estén en buen funcionamiento, se debe nombrar un responsable del departamento de mantenimiento para que ejecute esta revisión cada 4 meses.
4. Para futuros trabajos de auditorías energéticas se recomienda no analizar pérdidas de energía por el aislamiento de las tuberías de distribución de vapor, a menos que no exista aislamiento o que visiblemente se pueda notar el deterioro. Es un procedimiento de cálculo muy extenso y se obtienen ahorros de dinero muy bajos. La mayor cantidad de pérdidas de energía en un circuito de vapor se dan cuando no se recupera adecuadamente los condensados.
5. Antes de comenzar una auditoría energética se recomienda instalar medidores de flujo a la salida de la caldera y en las diferentes secciones de consumo de vapor de la planta para comparar la cantidad de vapor producido con el vapor consumido, esto facilitará el procedimiento de toma de datos.

9. Referencias

- [1] Yanus A. Cengel, Termodinámica, 5ta edición, Mc Graw Hill.
- [2] Spirax sarco, The Steam and Condensate Loop Book, 2011 edition
- [3] Watson McDaniel, Catálogo de producto, 127 va Edición.
- [4] Costera soluciones industriales, Artículo "Ahorro de energía en aislamiento térmico"
- [5] Spirax sarco, Design of fluid Systems, Eleventh Edition, April 1997
- [6] Selmeq equipos industriales S.A de CV, Manual Selmeq de Calderas, 4ta edición, 1992.
- [7] Spirax Sarco, Artículo "El costo del vapor"
- [8] US Department of energy, "Steam Tip Sheet #15"
- [9] Spirax Sarco, Programa de cálculo para dimensionamiento de tuberías, [<http://spiraxsarco.com/resources/calculators/pipes/sizing-new-pipes.asp>]
- [10] Frank P. Incropera, Fundamentos de transferencia de calor, 4ta edición, Prentice Hall, México 1999
- [11] Testo, Termografía guía de bolsillo, Septiembre 2008
- [12] Fiberglass, Aislamientos industriales, ficha técnica de productos
- [13] Valsteam Adca Engineering SA, Product Handbook, May 2011