

DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES OPERATIVAS EN LA GENERACIÓN DE VAPOR DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR EN LA INDUSTRIA TEXTIL

Fecha de recepción: 5 marzo 2025

Fecha de corrección: 22 abril 2025

Mario Santizo Calderón¹

RESUMEN

En esta investigación se analizó el comportamiento de un generador de vapor acuotubular de 5,000 Bhp marca Caldema en una industria textil.

El objetivo principal es analizar la continuidad de las variables operativas con la finalidad de resolver parámetros importantes en la operación de generación térmica. Este análisis se basó en el costo de la energía que era de 2.5\$/galón de combustible búnker y 6,720 horas de operación anual del generador. Las variables del generador se monitorearon cada 4 horas durante 5 días aproximadamente, obteniéndose los resultados que se presentan en esta investigación.

Para determinar las variables se usaron los siguientes equipos: BACARACH electrónico con extensión extendida, para temperaturas se utilizó un medidor de temperatura con termocupla tipo K y termómetro por infrarrojo y para la medición del vapor de consumo se leyó el medidor de orificio ubicado antes del manifold principal del generador de vapor. El combustible usado es búnker c (búnker pesado). Es importante cómo a través de la eficiencia de combustión se puede

obtener el consumo de combustible que es un parámetro muy importante para cálculo de variables en generadores de vapor.

Palabras claves: Generación de vapor, calderas para potencia, eficiencia térmica de combustión, eficiencia térmica de caldera, costo de 1,000 libras de vapor, consumo combustóleos.

ABSTRACT

This research analyzed the performance of a 5,000 Bhp Caldema water-tube steam generator in a textile industry.

The main objective was to analyze the continuity of operating variables in order to determine important parameters in the operation of thermal generation. This analysis was based on an energy cost of \$2.50/gallon of bunker fuel and 6,720 hours of annual generator operation.

The generator variables were monitored every 4 hours for approximately 5 days, yielding the results presented in this research.

¹ *PhD en eficiencia Energética, Master en Energía Renovable y Eficiencia Energética y en Ingeniería del Azúcar, egresado de la Universidad de San Carlos de Guatemala como Ingeniero Químico, Código 472 del Registro Nacional de Investigadores (RNI), Ha dictado seminarios sobre energía y procesos a gerentes de producción a nivel de Centroamérica y Panamá, dirigido industrias de cemento, aceites y grasas, jabones y detergentes, extractoras de minerales metálicos y director de la División de Servicios Técnicos Industriales del Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial ICAITI). Dirigió el programa regional (Centroamérica y Panamá) CURECA sobre eficiencia energética en la industria y en el sector vehicular de la Comisión Europea. Ha realizado 135 estudios de energía a nivel de Centroamérica, Panamá y Brasil, profesor en varias universidades nacionales e internacionales y ha impartido 32 cursos diferentes correspondiente al área profesional de Ingeniería Química y energía en Licenciaturas, Maestrías y Doctorados en el área de eficiencia energética y sostenibilidad ambiental. Ha sido Decano de la Facultad de Ingeniería y Director de Ingeniería Química en la Universidad Rafael Landívar durante 10 años. Es autor del libro: Balance de materia y energía para equipos de proceso y de potencia con ISBN 99922-2.335-9. Aparece en la revista Who is Who in the World of United Nations Framework Convention on Climate Change . Email: proenergia.com@gmail.com*

DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES OPERATIVAS EN LA GENERACIÓN DE VAPOR DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR EN LA INDUSTRIA TEXTIL

Fecha de recepción: 5 marzo 2025

Fecha de corrección: 22 abril 2025

The following equipment was used to determine the variables: an electronic BACARACH with extended extension; a temperature gauge with a type K thermocouple and infrared thermometer was used for temperatures; and the orifice gauge located before the main manifold of the steam generator was read to measure steam consumption. The fuel used is bunker c (heavy bunker).

It is important to understand how combustion efficiency can be used to determine fuel consumption, a very important parameter for calculating variables in steam generators.

Keywords: Steam generation, power boilers, combustion thermal efficiency, boiler thermal efficiency, cost of 1,000 pounds of steam, fuel oil consumption.

INTRODUCCIÓN

En este artículo titulado determinación de las variables de operación de generación de vapor en caldera acuotubular en una industria textil, se presenta un análisis ingenieril orientado a controlar la operación y de esta manera poder optimizar el funcionamiento de generadores de vapor, aportando conocimiento útil en procesos industriales de generación de vapor en los procesos de potencia e industriales.

Es importante señalar que las variables de operación utilizadas para los cálculos presentados en este documento fueron obtenidas a partir de un monitoreo realizado durante varios días con sesiones de observación y medición entre 2 y 4 horas. Durante dicho monitoreo se verificó que los valores registrados no presentaban variaciones significativas lo que permitió prescindir del análisis mediante gráficos de control basando el

estudio en el promedio de todas las variables medidas. Para la recolección de los datos se utilizaron equipos especializados incluyendo instrumentos para la medición de temperaturas en superficies sólidas y en gases; así como analizadores de gases de combustión entre otros equipos adecuados para este tipo de estudio (David F. Dyer 1981).

Es importante destacar que los objetivos de este documento están directamente relacionados con las variables medidas durante el estudio, y tienen como propósito:

- Calcular la cantidad de combustible utilizado en la generación de vapor,
- Evaluar el porcentaje de carga de la caldera,
- Determinar el costo de la energía aprovechada, y
- Estimar el costo en combustible requerido para producir 1,000 libras de vapor por hora.

Cabe señalar que todas las mediciones de las variables seleccionadas se efectuaron bajo condiciones operativas estables y dentro de los rangos de producción normal.

METODOLOGÍA DE CÁLCULO

“Las mediciones que se presentan a continuación corresponden a las variables correspondientes a la presión de vapor, temperatura del vapor, porcentaje de oxígeno en la chimenea y su temperatura, temperatura del medio ambiente”.

Mediciones en generador de vapor marca CALDEMA

Presión de generación del vapor (PSIA)	Temperatura de generación del vapor (F)	O ₂ en chimenea	Temperatura en chimenea (F)
--	---	----------------------------	-----------------------------

DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES OPERATIVAS EN LA GENERACIÓN DE VAPOR DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR EN LA INDUSTRIA TEXTIL

Fecha de recepción: 5 marzo 2025

Fecha de corrección: 22 abril 2025

980.10	881.00	5.8	675.00
990.00	882.00	5.8	679.00
1,002.30	800.00	5.8	705.00
1,000.00	800.00	5.7	680.00
1,000.20	805.00	5.8	681.00
997.50	808.00	6.0	681.00
999.40	805.60	6.0	681.00
1,000.20	800.00	5.8	680.00
1,002.50	790.30	6.0	688.00
1,005.60	795.30	6.0	680.00
1,000.00	798.00	6.0	678.00
1,002.00	798.60	6.0	680.00
1,007.00	797.90	6.0	688.00
999.30	799.80	6.1	680.40
999.40	799.70	6.0	680.00
1,002.00	800.10	6.0	677.00
1,003.40	803.60	6.3	678.00
1,001.70	805.00	6.2	680.00
1,003.00	804.00	6.0	680.00
1,002.00	803.00	6.0	677.00
999.80	802.30	6.0	675.00
1,000.20	800.20	6.0	677.50
1,000.80	798.50	6.0	678.00
1,001.00	795.00	6.4	679.00
1,000.50	790.00	6.5	681.00
1,000.00	800.00	6.0	680.00

79.70	330.00	69,800
79.80	338.00	70,750
80.00	305.00	70,000
80.00	317.00	72,000
80.30	320.00	71,000
80.70	315.00	70,000
80.30	326.00	70,000
80.00	320.00	69,500
80.00	336.00	69,300
80.20	335.00	69,200
80.00	340.00	69,200
79.40	320.00	69,000
79.80	320.00	70,000
79.70	340.00	70,000
79.80	340.00	69,800
80.40	344.00	69,800
80.50	348.00	69,650
80.30	345.00	69,500
80.00	330.00	70,000

“Una vez presentadas las variables monitoreadas, se procede al desarrollo de los cálculos correspondientes, en función de los objetivos planteados en este artículo”.

1. Eficiencia de combustión

De tablas de eficiencia de combustión a 6% de O₂ y temperatura de los gases de 680°F y temperatura del aire ambiente de 80°F, de tabla de eficiencia de combustión para Búnker c (David F. Dyer 1981):

$$\eta_{\text{combustión}} = 78.30\%$$

2. Eficiencia de caldera

La eficiencia de una caldera puede definirse desde distintos enfoques uno de ellos establece que la eficiencia de caldera equivale a la eficiencia de combustión menos las pérdidas térmicas asociadas, las cuales corresponden

Mediciones caldera CALDEMA

Temperatura ambiente (F)	Temperatura agua alimentación a la caldera (F)	Flujo del vapor (lb/h)
80.60	330.00	72,000
80.70	335.00	72,000
81.00	333.00	71,000
80.00	330.00	68,000
80.00	330.00	69,000
80.00	329.00	69,500
79.00	332.00	70,000

DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES OPERATIVAS EN LA GENERACIÓN DE VAPOR DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR EN LA INDUSTRIA TEXTIL

Fecha de recepción: 5 marzo 2025

Fecha de corrección: 22 abril 2025

principalmente a las pérdidas por radiación y por purga en calderas que operan en condiciones normales con un porcentaje de carga entre el 80 y 90% y que cuentan con un tratamiento químico primario y secundario adecuado, dichas pérdidas suelen ser del orden del 2% por ello, para fines de este documento se va a aplicar con confianza esta regla empírica (conocida como "regla del pulgar") la cual resulta bastante precisa en la práctica dentro de los límites que se habló al principio de este. (Palacios J.L, P. A. 2015)

$$\begin{aligned} \eta \text{ caldera} &= \eta \text{ combustión} - 2\% \\ &= 78.30\% - 2\% = \mathbf{76.30\%} \end{aligned}$$

3. Combustible utilizado

$$\begin{aligned} \frac{\text{galones búnker}}{\text{hr}} &= \\ \frac{\left(70,000 \frac{\text{lb vapor}}{\text{hr}}\right) (1,389.00 - 300.80) \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}}{\left(150,000 \frac{\text{Btu}}{\text{gal}}\right) (76.30)} &(100) \\ &= \mathbf{665.57 \frac{\text{gal}}{\text{hr}}} \end{aligned}$$

4. Porcentaje de carga de la caldera

$$\begin{aligned} \text{BHP utilizados} &= \\ \frac{\left(70,000 \frac{\text{lb vapor}}{\text{hr}}\right) (1,389.00 - 300.80) \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}}{\left(33,475 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}}\right)} & \\ &= 2,275.55 \text{ BHP} \\ \% \text{ carga caldera} &= \left(\frac{\text{BHP utilizados}}{\text{BHP placa}}\right) (100) \\ &= \left(\frac{2,275.55}{5,000}\right) (100) = \mathbf{45.50\%} \end{aligned}$$

5. Costo de la energía aprovechada

$$\begin{aligned} \text{CEC} &= \left(\frac{\frac{\$}{\text{galón}}}{\text{LHH}}\right) = \left(\frac{2.5 \frac{\$}{\text{galón}}}{0.15}\right) = 16.67 \frac{\$}{\text{MBtu}} \\ \text{CEA} &= \left(\frac{\text{CEC}}{\eta \text{ caldera}}\right) = \left(\frac{16.67}{0.763}\right) \\ &= \mathbf{21.844 \frac{\$}{\text{MBtu}}} \end{aligned}$$

6. Costo del vapor

$$\begin{aligned} \text{Costo vapor} &= \\ \frac{(\text{CEA})(\Delta h_{\text{vapor}} - \Delta h_{\text{agua alimentación}})}{1,000} & \\ &= \frac{\left(21.844 \frac{\$}{\text{MBtu}}\right) (1,389.00 - 300.80) \frac{\text{Btu}}{\text{lb}}}{1,000} \\ &= \mathbf{23.77 \frac{\$}{1,000 \text{ lb vapor}}} \end{aligned}$$

CONCLUSIONES

1. Se observa que el porcentaje de carga de la caldera es del 45%, lo cual no es lo más adecuado desde el punto de vista operativo. Lo recomendable es que la caldera funcione con un porcentaje de carga entre el 75% y el 85%, ya que operar a cargas significativamente bajas incrementa proporcionalmente las pérdidas por radiación y convección con relación al combustible suministrado.
2. De acuerdo con las mediciones realizadas y en base al ecuación de diseño utilizada, se determina que el porcentaje de carga de la caldera es 45%. Este valor indica que el generador de vapor está sobredimensionado con respecto

DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES OPERATIVAS EN LA GENERACIÓN DE VAPOR DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR EN LA INDUSTRIA TEXTIL

Fecha de recepción: 5 marzo 2025

Fecha de corrección: 22 abril 2025

a la demanda actual. No obstante, este sobredimensionamiento puede considerarse una condición favorable, ya que ofrece margen suficiente para una posible expansión de la producción de vapor ante un incremento en la capacidad productiva

3. El costo de generación de 1000 lb de vapor es un rango que está dentro de los límites de 20 a 30 USD el cual se considera aceptable siempre que dicho valor corresponda únicamente al consumo de combustible sin embargo si se desea determinar el costo total real de la producción de vapor es necesario incorporar otros factores como el salario del operador y de su asistente el costo de los productos químicos utilizados en el tratamiento primario y secundario del agua los costos de mantenimiento así como las pérdidas asociadas a las horas de no producción

Scientists. Estados Unidos de América: Editorial Word Scientific.

Hoffman, E. (1996). *Power Cycles and Energy Efficiency*. New York: Editorial Academic Press.

Horlock, J. (2010). *Combined Power Plants*. EEUU, Florida: Editorial Krieger Publishing Company. Kreose, D., Taimre, T., & Botev, Z. (2011). *Handbook of Monte Carlo Methods*. Canadá: Wiley.

Santizo, M. (2008). *Planta ciclo combinado centroamérica de 15 MW*. Guatemala: Informe.

Santizo, M. (2008). *Planta ciclo combinado Cristal 10 MW*. Guatemala: Informe.

Shonkwiler, R., & Mendivil, F. (2009). *Explorations in Monte Carlo Methods*. London: Springer.

Ganapathy. (1988). *Applied Heat Transfer*. EEUU: PennWell. Retrieved from 0 87814 182 0

Geankoplis, C. (2003). *Transport Processes and Separation Process Principles* (Fourth ed.). Delhi: PHI Learning. Obtenido de 978 81 203 2614 9

David F. Dyer (1981) Boiler Efficiency Improvement, Boiler Efficiency Institute, Alabama

IPS ingenieros. (2021). *Importancia y Dimensionamiento de Manifold de Vapor*. Retrieved Agosto 24, 2021, from IPS ingenieros: <https://ipsingenieros.com/2020/12/11/importancia-y->

Bibliografía

Belotserkouski, O., & Khlokov, I. (2010). *Monte Carlo Methods in Mechanics of Fluids and Gas*. EEUU: Editorial Word Scientific.

Brooks, S., Gelman, A., Jones, G., & Li-Meng, X. (2011). *Handbook of Markov Chain Monte Carlo*. Boston: Chapman and Hall/CRC.

Dimov, I. (2008). *Monte Carlo Methods for Applied*

DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES OPERATIVAS EN LA GENERACIÓN DE VAPOR DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR EN LA INDUSTRIA TEXTIL

Fecha de recepción: 5 marzo 2025

Fecha de corrección: 22 abril 2025

- dimensionamiento-de-manifold-de-vapor/
- ntes/01-Distribucion%20de%20Vapor%20-%20Spirax%20Sarco.pdf
- J.B. Kitto, S. S. (2005). *Steam, its generation and use*. (Vol. 41st). Ohio, United States: The Babcock & Wilcox Company.
- SpiraxSarco. (n.d.). Retrieved Septiembre 2, 2021, from <https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/steam-engineering-principles-and-heat-transfer/steam-consumption-of-plant-items>
- López, P. (2017). *Evaluación de la eficiencia de generadores de vapor, Estudio de caso: ECOPETROL S.A.* Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.
- TLV Engineering S.A. (n.d.). TLV. Retrieved Septiembre 1, 2021, from <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/steam-equipment-energy-saving-tips.html>
- McCabe, W., C. Smith, J., & Harriott, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (Séptima ed.). China: Mc Graw Hill. Retrieved from 0-07-284823-5
- TLV Engineering SA. (2021). *Golpe de Ariete en Líneas de Distribución de Vapor*. Retrieved from <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/waterhammer-steam-distribution-lines.html#>
- Palacios J.L, P. A. (2015). Técnicas de Gestión Energética en Sistemas de Vapor. *Revista Politécnica*, 32(3).
- Toledo López, A. F. (2009, Agosto). *Estudio y experimento del fenómeno de golpe de ariete, debido a cierre de válvulas, para el laboratorio de hidráulica*. doi:08_3018_C
- Roca, S. M. (2007, Octubre). Beneficios en sistemas de vapor por medio de una correcta instalación y selección de trampas. Ciudad de Guatemala, Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Vega. (2018). *Aplicaciones de diferentes tipos de trampas de vapor*. Retrieved Agosto 2021, from TLV: <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/steam-trap-varieties-and-applications.html>
- San Juan, D. (2016, Abril 4). *Golpe de ariete*. Retrieved Agosto 20, 2021, from 0grados: <https://0grados.com.mx/golpe-de-ariete-consecuencias-y-prevenciones/>
- Spirax sarco. (n.d.). *Spirax Sarco, first for steam solutions*. Retrieved from <http://www1.frm.utn.edu.ar/electromecanica/materias%20pagina%20nuevas/INSTALACIONES%20TERMICAS%20MECANICAS%20Y%20FRIGORIFICAS/material/apu>
- Cao, E. (2009). *Heat Transfer*. United States of America: Mc Graw Hill.
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de Calor y Masa - Fundamentos y Aplicaciones*. México: Mc Graw Hill.

**DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES OPERATIVAS EN LA GENERACIÓN DE VAPOR DE
UNA CALDERA ACUOTUBULAR EN LA INDUSTRIA TEXTIL**

Fecha de recepción: 5 marzo 2025

Fecha de corrección: 22 abril 2025

Coulson, J., Richardson, J., Backhurst,
J., & Harker, J. (2004). *Chemical
Engineering* (Vol. 1). Great
Britain: Elsevier. ISBN 0 7506
4444 3

Ganapathy. (1988). *Applied Heat
Transfer*. EEUU: PennWell. ISBN
0 87814 182 0

Geankoplis, C. (2003). *Transport
Processes and Separation
Process Principles* (Fourth ed.).
Delhi: PHI Learning. ISBN 978 81
203 2614 9

Holman, J. (1998). *Transferencia de
Calor*. Madrid: Mc Graw Hill.

McCabe, W., C. Smith, J., & Harriott, P.
(2007). *Operaciones Unitarias en
Ingeniería Química* (Séptima ed.).
China: Mc Graw Hill. ISBN 0-07-
284823-5