



FUNCIONAMIENTO Y PÉRDIDAS EN CALDERAS PIROTUBULARES

ESTUDIOS DE CASOS

Margarita Josefa Lapidó Rodríguez

David Armando Vidal Moya

José Alejandro Madrigal Monzón

Diseño de carátula: Lic. Alex García Pérez
Edición: D.I. Frank Ernesto Valdés Vega
Corrección: MSc. Alicia Martínez León
Dirección editorial: Dr. C. Jorge Luis León González

Editorial "Universo Sur", 2015
ISBN: 978-959-257-429-8

Podrá reproducirse, de forma parcial o total, el contenido de esta publicación siempre
que se haga de forma literal y se mencione la fuente.

Editorial: "Universo Sur".

Universidad de Cienfuegos. Carretera a Rodas, Km 3 ½.
Cuatro Caminos. Cienfuegos. Cuba.
CP: 59430



ÍNDICE

Prólogo / 7

Introducción / 9

CAPÍTULO 1. TIPOS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CALDERAS PIROTUBULARES / 11

1.1 Calderas o generadores de vapor. Conceptos / 11

1.2 Calderas pirotubulares. Principio de funcionamiento / 12

1.2.1 Componentes y principio de funcionamiento / 13

1.3 Aplicaciones y tendencias de las calderas pirotubulares / 15

1.4 Particularidades de la eficiencia y parámetros operacionales / 17

1.4.1 Pérdidas por radiación / 18

1.4.2 Pérdidas con los gases de la combustión / 22

1.4.3 Otras consecuencias negativas en la eficiencia de las calderas / 25

1.5 Factores que influyen en el funcionamiento de la caldera: factor de carga y método para su cálculo / 26

1.5.1 Factor de carga. Definición / 26

1.5.2 Método para el cálculo del factor de carga / 28

1.6 Indicadores de eficiencia energética / 30

CAPÍTULO 2. CASOS DE ESTUDIO. LOS MÉTODOS PARA LA PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA Y EL INCREMENTO DE EFICIENCIA EN LA GENERACIÓN Y EL CONSUMO DE VAPOR DE LAS CALDERAS PIROTUBULARES / 33

2.1 Caso estudio I: Caracterización de la generación y el consumo de vapor en calderas pirotubulares en la ciudad de Cienfuegos / 33

2.2 Caso estudio II: Método para el cálculo del factor de carga. Aplicación del método / 38

2.3 Caso estudio III: Evaluación económica de nueve calderas con turbulizadores insertados / 42

2.4 Caso estudio IV: Planificación energética en un sistema de sistema de generación / 51

CONCLUSIONES GENERALES / 58

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS / 59

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración para la compilación de los resultados de investigación en un grupo de calderas del territorio de Cienfuegos a:

- Universidad de Cienfuegos, por el aporte científico técnico del trabajo.
- Empresa ALASTOR, por la ayuda a la ejecución de las investigaciones.
- A los estudiantes que participaron, como parte en su formación académica y científica.
- Al Dr. C. Aníbal Borroto, por los aportes de su obra científica a esta monografía.

PRÓLOGO

En el presente trabajo se muestran los problemas que, desde el punto de vista energético, mecánico, económico y medio ambiental se encuentran en instalaciones donde existen generadores de vapor pirotubulares subutilizados o explotados en condiciones de cargas inferiores a las nominales, en cuanto a su eficiencia, así como a la eficiencia de la instalación energética de la cual forman parte en general.

Trabajos de investigación, realizados y/o tutorados por los autores, en un amplio universo de calderas de la provincia de Cienfuegos, como parte de proyectos de curso, tesis de pregrado de la carrera de Ingeniería Mecánica y de la Maestría de Eficiencia Energética, han consolidado resultados de la evaluación de las calderas de diferentes capacidades de producción de vapor en sus condiciones reales de operación, instaladas en la ciudad de Cienfuegos.

En esos resultados se determinó el factor de carga de cada una de ellas, las principales pérdidas energéticas y su efecto al verse afectadas por el factor de carga cuando trabajan en condiciones reducidas de capacidad. Se incluye un grupo de casos de estudio donde se evidencia la mejora de la eficiencia por el incremento de la transferencia de calor con la inclusión de los turbulizadores y el acomodo de carga.

INTRODUCCIÓN

El ahorro de los recursos energéticos es un concepto muy importante en cualquier industria o unidad de servicios. El grado de eficiencia del trabajo de las instalaciones constituye una parte fundamental en el ahorro o despilfarro de los mismos, especialmente, el combustible. Esto es aplicable al caso de las unidades generadoras de vapor, como sucede con la caldera pirotubular, donde la eficiencia del sistema termo energético depende en gran medida de las pérdidas asociadas a ellas, entre las que se encuentran las que ocurren por radiación al medio y las que ocurren con los gases de la combustión.

Los generadores de vapor pirotubulares instalados en las industrias y empresas de servicios, con el fin de brindar vapor a los procesos térmicos, trabajan en la mayoría de los casos, bajo regímenes de carga fluctuantes o variables, acrecentados cuando por deterioro dejan de trabajar algunos de los equipos o instalaciones consumidoras, esto hace que disminuya de forma considerable, la demanda de vapor y el factor de carga, lo cual hace que el trabajo del quemador sea con constantes arranques y paradas.

Lo anteriormente planteado resulta perjudicial para la eficiencia energética del generador, así como para su estructura mecánica, para la eficiencia general de la instalación y para el medio ambiente, y por último, para la economía de la entidad. Es posible atenuar dichos efectos negativos haciendo una buena selección del equipo, realizando cambios en algunos de sus agregados o incorporando controles modulantes. Para esto se debe hacer un balance de la relación carga-capacidad, entre la necesidad de vapor de los equipos consumidores o carga instalada y la capacidad de producción de vapor de la caldera.

El trabajo de una caldera pirotubular con cargas inferiores a las del diseño ocasiona un apreciable incremento de las pérdidas que normalmente ocurren en las mismas. Se producen repetidos arranques y paradas del quemador, con las pérdidas por incombustión presentes en los momentos iniciales. Se produce aumento de las pérdidas con los gases de escape y de ventilación debido al barrido de los ventiladores al inicio y final de cada parada, lo que provoca enfriamiento del horno. Igualmente ocurre aumento de las pérdidas

por radiación, presentes en todo momento del funcionamiento de la caldera, y presentes también cuando se encuentra apagado el quemador. Todo esto trae aparejado un sobreconsumo de combustible y energía eléctrica, y por tanto, pérdidas económicas.

Los sistemas energéticos de las instalaciones que funcionan a base de vapor producido en calderas pirotubulares en la ciudad de Cienfuegos, han sufrido con el paso del tiempo, un considerable deterioro que ha llevado a la salida de servicio de varios consumidores, de los originalmente instalados. Debido a esta causa hoy las calderas o generadores de vapor se encuentran sobredimensionadas para el nivel de consumo real. Esto conlleva a un bajo factor de carga, y a que se afecte la eficiencia energética general de la instalación y la salud económica de las entidades, por cuanto se refleja esta situación en el costo final de producción del vapor.

Se integran en el trabajo los resultados realizados por investigadores de este tema, de la Empresa de Calderas ALASTOR, la Universidad de Cienfuegos y estudiantes incluidos a la investigación, a partir de proyectos de cursos, tesis de grado, trabajos finales de maestría y doctorado, que aportaron resultados y propuestas de mejoras en la eficiencia y las condiciones de explotación de los generadores de vapor pirotubulares.

CAPÍTULO 1.

TIPOS Y PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS CALDERAS PIROTUBULARES

1.1 Calderas o generadores de vapor. Conceptos

Las calderas o generadores de vapor son un elemento fundamental en el funcionamiento de instalaciones industriales y de servicios son el corazón de los sistemas termoenergéticos en los cuales están presentes. Ellas producen el vapor que entrega la energía que demandan los procesos de calentamiento y la producción de potencia mecánica.

El término “caldera” se aplica a un dispositivo para generar vapor para fuerza, procesos industriales o calefacción (Armas Valdés & CEEMA, n.d.); o agua caliente para calefacción o para uso general (Armas Valdés & CEEMA, n.d.). Por razones de sencillez de comprensión, a la caldera se le considera como un productor de vapor en términos generales. Inicialmente se les denomina calderas hasta que en una etapa más reciente se les comienza a llamar generadores de vapor (Lapido Rodríguez, Álvarez Guerra Plasencia, Castellanos Álvarez, Roque Díaz, & Armas Valdés, 2006).

Diferentes autores mencionan este concepto, Rubio (2000) lo define como: *“un equipo de gran complejidad. Es un intercambiador de calor altamente sofisticado, en el cual se transfiere al agua el calor desprendido por el combustible para formar el vapor”* y por su parte Pérez Garay (1989) dice que: *“es la instalación donde se libera mediante la combustión la energía de un combustible y se transfiere al agua convirtiéndola en vapor de la calidad y con los parámetros requeridos para su uso, todo ello con la mayor eficiencia y seguridad posibles”*.

Aníbal Borroto (2000), define este concepto de calderas como el “conjunto de equipos y agregados auxiliares, integrados en un esquema tecnológico con el objetivo de producir vapor a partir de agua de alimentación, para lo cual utilizan energía proveniente de una fuente”.

1.2 Calderas pirotubulares. Principio de funcionamiento

Las calderas pirotubulares aparecen en la industria hace ya más de un siglo, y su evolución ha ido en paralelo al desarrollo técnico. Las primeras consistían en simples recipientes cilíndricos remachados y hermetizados, a los cuales se insertaban las tuberías de suministro de agua y extracción de vapor, el calentamiento se efectuaba externamente mediante la quema de carbón o leña situados debajo de estos.

Los requerimientos industriales de mayores parámetros de presión y temperatura condicionados por el desarrollo técnico traen como consecuencia la necesidad de incrementar el área de transferencia de calor y utilizar materiales de construcción más resistentes. El aumento de las superficies de transferencia se logra introduciendo tubos de pequeños diámetros inmersos en la masa de agua, a través de los cuales circulan los gases calientes provenientes de la combustión, transfieren a su paso el calor, lo que aumenta la eficiencia del equipo.

Los generadores de vapor pirotubulares se diferencian unos de otros, entre otros aspectos, por el número de pases de los gases en el sentido longitudinal, en este caso se clasifican como de dos pases (el hogar y un pase por los tubos de humos), de tres pases (el hogar y dos pases por los tubos de humos), y de cuatro pases (el hogar y tres pases por los tubos de humos). A medida que aumenta el número de tubos de humos, así como la cantidad de pases, aumenta el intercambio de calor, lo cual disminuye la temperatura de los gases a la salida del generador de vapor, y por consiguiente, se incrementa el rendimiento. No obstante, tiene la desventaja de que aumenta la caída de presión por el lado de los gases, y se encarece por esta razón la instalación (Mingot, 1988).

Las calderas pirotubulares se adaptan al consumo de cualquier tipo de combustible, tanto sólido, líquido, como gaseoso, funcionan con bajas pérdidas por incombustión mecánica y química. No obstante, el trabajo con combustible sólido dificulta su automatización.

En las calderas de vapor pirotubulares los gases, producto de la combustión, circulan por el interior de los tubos, y en la mayoría de los casos la propia combustión se produce dentro de un tubo de mayor diámetro, de ahí su nombre (tubos de fuego), los cuales se encuentran sumergidos en la masa de agua. Todo el conjunto se encuentra rodeado por una envoltura o casco exterior rígido. El volumen que ocupa el vapor oscila entre 12 y 14 % del volumen total, criterio que siguen las empresas constructoras para el diseño y fabricación.

Hoy se fabrican calderas que alcanzan capacidades de hasta 30 t/h de producción de vapor, con presiones de hasta 3 MPa, y poseen una amplia difusión en este intervalo de trabajo dada una serie de ventajas que presentan.

1.2.1 Componentes y principio de funcionamiento

La estructura de las calderas pirotubulares están compuestas por:

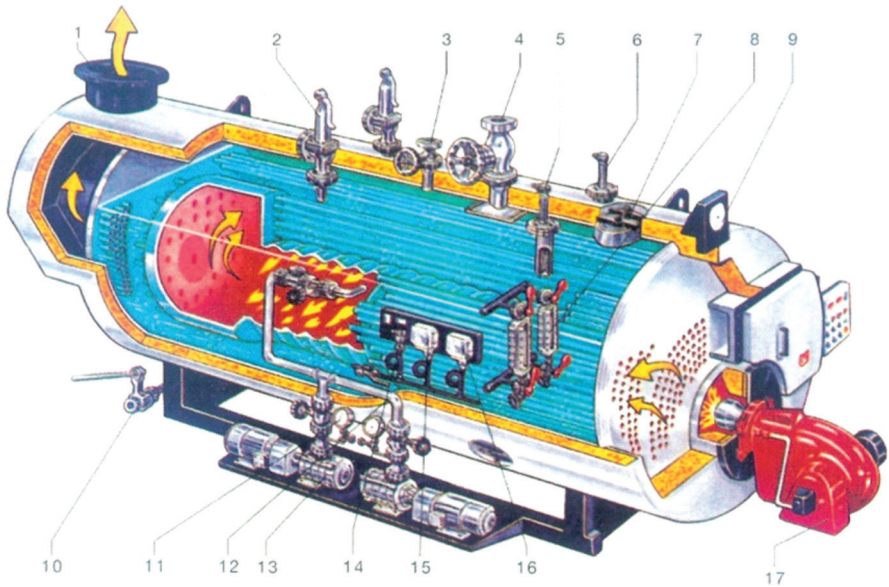
- Hogar o tubo central: cámara o lugar donde ocurre la quema del combustible con la consiguiente liberación de calor.
- Tubos de humos o fluses: conjunto de tubos de mucho menor tamaño, por los que circulan los gases de la combustión luego de abandonar el hogar.
- Placas: limitan en ambos extremos el volumen de la cámara de la caldera.
- Casco o carcasa: constituye la envoltura exterior o cuerpo de acero.
- Cámara de agua: parte del volumen que ocupa el agua en su interior.
- Cámara de vapor: parte del volumen que ocupa el vapor producido.

Además de estas partes que conforman su estructura, necesita de otros agregados como son: quemador, bombas de combustible, bombas de agua y ventilador.

En la figura siguiente se muestra la estructura y los componentes de una caldera pirotubular, con sus componentes y los fluidos de trabajo que la componen para su funcionamiento. Esta imagen corresponde a las que fabrica la Empresa Productora de Calderas ALASTOR, bajo licencia de UMISA, de España.

Figura 1.1. Generador de vapor pirotubular.

- | | |
|----------------------------------|-----------------------------|
| 1 EVALUACIÓN DE HUMOS | 10 PURGA Y VACIADO |
| 2 VÁLVULAS DE SEGURIDAD | 11 MANÓMETRO |
| 3 SALIDA AUXILIAR DE VAPOR | 12 ALIMENTACIÓN DE AGUA |
| 4 SALIDA PRINCIPAL DE VAPOR | 13 BOMBAS ALIMENTACIÓN AGUA |
| 5 SEGURIDAD DE NIVEL | 14 TRANSMISOR DE PRESIÓN |
| 6 REGULADOR Y SEGURIDAD DE NIVEL | 15 PRESÓSTATO DE SEGURIDAD |
| 7 ENTRADA HOMBRE | 16 PRESÓSTATO DE REGULACIÓN |
| 8 INDICADORES DE NIVEL | 17 EQUIPO DE COMBUSTIÓN |
| 9 MANÓMETRO | |



Funcionamiento

En el hogar de la caldera se produce la combustión del combustible, se forman una gran cantidad de gases calientes, estos gases comienzan a circular a través de las superficies de transferencia, compuestas por una considerable

cantidad de tubos de pequeño diámetro llamados fluses. Desde el hogar y en su paso a través de estos tubos, los gases van cediendo el calor al agua que se encuentra en el exterior, pero contenida dentro de la carcasa, hasta salir con relativa baja temperatura y bajo contenido energético. Por su parte el calor absorbido por el agua es empleado en producir vapor en la cantidad y con los parámetros de temperatura y presión que demanda el proceso.

1.3 Aplicaciones y tendencias de las calderas pirotubulares

Las calderas pirotubulares tienen un amplio uso, se destacan en los sistemas de calefacción y producción de vapor requerido en los procesos industriales, donde la demanda de vapor es relativamente reducida, debido a las diversas características propias de estas calderas, como son:

- Su diseño simple y compacto.
- Las facilidades de montaje, instalación y operación.
- El bajo costo inicial.
- Su aceptable eficiencia en su rango de operación.
- El corto período de tiempo para el suministro y puesta en marcha.
- Su gran volumen de almacenamiento de agua.
- Permite compensar los efectos de las grandes y repentinas fluctuaciones de la demanda de vapor.

Tendencias actuales para la generalidad de constructores de calderas

El incremento creciente de las calderas pirotubulares, en diversos sectores industriales y de servicio ha incentivado a los diseñadores e investigadores de calderas a incluirlo un grupo de mejores que se han ido aplicando en los nuevos modelos que se construyen en la actualidad a nivel mundial, dentro de las que se destacan.

- Aumento del área de transferencia de calor, teniendo en cuenta que la inmensa mayoría de las calderas se construyen de tres pases.
- Incorporación de superficies recuperativas en el conducto de salida de los gases de escape para el calentamiento del agua de alimentación o del aire que se introduce para la combustión y que permite aumentar la eficiencia.

- Aumento en los parámetros de trabajo, léase altas producciones de vapor y presiones.
- Construcción de calderas con sobrecalentadores de vapor, existen diferentes variantes de acuerdo con el uso que se le pretende dar al vapor.
- Diseño y utilización de quemadores de bajas emisiones de NO_x .
- Calderas con cámara de inversión totalmente sumergida con cargas térmicas mínimas, las firmas LOOS y VIESMAN han constituido una revolución en la calefacción europea.
- Calderas con inversión de llama, con las que se obtiene una mejor combustión al aumentar el tiempo de permanencia en el horno, se logra disminuir el exceso de aire de 10-15 %, y reporta incrementos de eficiencia entre 3-4%.
- El uso de turbulizadores con el objetivo de incrementar la turbulencia de los gases y por tanto, aumentar la transferencia de calor, es una tendencia del pasado siglo, pero firmas internacionales mantienen esta tendencia, la firma SEVESSO italiana y la firma THOMPSON usan estos dispositivos (Lapido Rodríguez, 1998).
- La recuperación de calor de los gases, puede ser en serie o en derivación, logra incrementos de eficiencia de 6%, otra variante utilizada en estas calderas es el recuperador de calor de tubos cortos en el que se reportan ahorros de combustibles entre 2 y 8 %.
- Calderas de baja temperatura. Esta tendencia a partir de 1982 aparece como una modificación de la directiva comunitaria 92/42/CEE. Su principal diferencia con las convencionales está en la posibilidad de modular la temperatura en función de necesidades caloríficas, alcanzan una eficiencia estacional de hasta 95%.
- Flexibilidad de combustibles.
- Eficiencia mantenida a cargas parciales.
- Uso del fluido térmico. El fluido térmico alcanza los niveles de temperaturas requeridos para los mismos procesos, pueden alcanzar valores superiores a los 300°C, pero sin necesidad de presión, y la regulación de la temperatura se logra de forma eficaz en las calderas de fluido térmico, lo que no ocurre con el vapor.

1.4 Particularidades de la eficiencia y parámetros operacionales

La eficiencia térmica es el indicador más importante del trabajo de un generador de vapor, ya que caracteriza el grado de aprovechamiento de la energía suministrada, o sea, la parte de esa energía que ha sido transferida al agente de trabajo (Borroto Nordelo, 2000). Se expresa la eficiencia de la caldera en porcentaje o por término de evaporación, que indica la proporción de vapor generado por unidad de combustible quemado en el horno.

Existen varios factores de los cuales depende en mayor o menor medida la eficiencia de una caldera, se señalan los más importantes:

1. Combustión completa del combustible, lograda con una mínima cantidad de aire en exceso (Borroto Nordelo, 2000) (Mingot, 1988). Esto permite obtener la mayor cantidad de energía que pueda brindar el combustible utilizado.
2. El enfriamiento profundo de los productos de la combustión (Borroto Nordelo, 2000) (Mingot, 1988). La obtención de temperaturas razonablemente bajas de los gases de la combustión a la salida de la caldera significa buen aprovechamiento del contenido energético de los mismos, indica que se transfirió la mayor cantidad de calor posible a través de las superficies de calentamiento al agua.
3. La reducción de las pérdidas de calor por radiación y convección al medio circundante (Borroto Nordelo, 2000).

Las mayores pérdidas que se producen en una caldera pirotubular, y que por tanto, afectan en mayor medida la eficiencia de las mismas, están determinadas por el calor sensible que se escapa con los gases de la combustión, determinado esto por la alta temperatura que llevan los mismos, y las pérdidas por radiación, presentes en todo momento, ya sea durante el funcionamiento o en los períodos de paradas por bajo consumo de vapor en los equipos instalados en la industria.

La eficiencia energética debe tener en cuenta varias aristas que comprendan el aprovechamiento del combustible, que lleva intrínseco el ahorro del portador energético utilizado, la seguridad de la operación del equipo, lo que redunde en beneficio del medio ambiente y la competitividad.

1.4.1 Pérdidas por radiación

Las pérdidas por radiación tienen una gran importancia en las calderas piro-tubulares por el hecho de ser una pérdida continua, que está presente también en el tiempo que la caldera está en disposición de dar servicio y no trabaja el quemador y por tener estas calderas una alta relación área-volumen, que unido al trabajo a cargas parciales, como generalmente ocurren, hace que se incrementen estas pérdidas alcanzando valores considerables (Lapido Rodríguez, 1998). Esto se demuestra a través de la fórmula:

$$q_s = \sqrt{\frac{D_{max}}{100}} * A$$

Donde: D_{max} - corresponde a la producción máxima de la caldera (ton/h).

A - factor de capacidad incompleta cuyo valor es:

1,00 - en caso de capacidad máxima constante.

1,22 - en caso de capacidad regulada.

1,28 - en caso de $\frac{3}{4}$ de la capacidad.

1,82 - en caso de $\frac{1}{2}$ de la capacidad.

El efecto del trabajo a carga parcial determinado por el tiempo total de trabajo y el tiempo real de trabajo sobre las pérdidas q_s , se observa en la ecuación (Lapido Rodríguez, 1998):

$$q_s = \frac{400 * F * 30000}{B * Q_{ip} * 4,18} * \frac{T_t}{T_r}$$

Donde: q_s - Pérdidas de calor por radiación.

F - Área de transferencia de calor de la caldera.

B - Consumo de combustible.

Q_{ip} - Valor calórico del combustible.

T_t - Tiempo total de trabajo de la caldera.

T_r - Tiempo real de trabajo de la caldera.

Por otra parte teniendo en cuenta los flujos de vapor nominal y real se puede hallar a través de la ecuación (Lapido Rodríguez, 1998):

$$q_s = \frac{400 * F * 30000}{B * Q_{ip} * 4,18} * \frac{D_n}{D_r}$$

Siendo entonces:

D_n - Flujo de vapor nominal.

D_r - Flujo de vapor real.

El proceso de transferencia o pérdida de calor a través de la radiación está determinado por la ecuación de Stefan-Boltzmann, la cual enuncia que la cantidad de calor radiado es proporcional a la temperatura del cuerpo elevada a la cuarta potencia:

$$P = \alpha * \sigma * A * T^4; (W) \quad (8) (12)$$

Donde:

P - Es la potencia radiada; (W).

α - Coeficiente de emisividad que depende de la naturaleza del cuerpo; $\alpha=1$ para los cuerpos negros.

A - área de la superficie que radia calor; (m²).

σ - Constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 * 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$.

T - Temperatura de la superficie que radia; (K).

Las pérdidas por radiación en las calderas denominadas q_s , están directa o indirectamente relacionadas con los niveles de temperaturas, como puede comprobar en las ecuaciones que para su cálculo aparecen en la literatura.

$$q_s = \frac{\frac{A(\alpha_{conv} + \alpha_{rad})(T_p - T_a)}{1000 * B}}{Q_d} * 100; (\%)$$

Donde:

A - Área superficial; (m²).

B - Flujo de combustible; (kg/s).

Q_d - Calor disponible; (kJ/kg).

T_p - Temperatura exterior de las paredes; (K)

T_a - Temperatura del medio ambiente; (K).

α_{conv} - Coeficiente de transferencia de calor por convección; (W/m²K).

α_{rad} - Coeficiente de transferencia de calor por radiación; (W/m²K).

El coeficiente de transferencia de calor por convección se calcula entonces a través del mecanismo de convección.

Por su parte el coeficiente de transferencia de calor por radiación se calcula de la siguiente manera.

$$\alpha_{rad} = \frac{q_{rad}}{T_p - T_a}; (\text{kW/m}^2\text{K})$$

Aquí se ve la dependencia del coeficiente de transferencia de calor con respecto a las temperaturas de la pared y del medio ambiente.

$$q_{rad} = \zeta_{red} + CO * \left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4; (\text{kW/h}^* \text{m})$$

El calor transmitido por radiación es dependiente de las temperaturas de la pared y del medio ambiente, elevadas a la cuarta potencia.

Otra ecuación para determinar las pérdidas asociadas a la radiación en las calderas pirotubulares se presenta como:

$$q_s = \frac{A}{B} * \left[\alpha_{conv}(T_p - T_a) + CO * \left(\frac{T_p}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{100} \right)^4 \right]; (\%)$$

Donde:

A - Área superficial; (m²).

B - Flujo de combustible; (kg/s).

T_p - Temperatura de la pared; (K).

T_a - Temperatura del medio ambiente; (K).

α_{conv} - Coeficiente de transferencia de calor por convección; (kW/m²K).

CO - Coeficiente del cuerpo negro absoluto; (kW/m²K⁴).

Otras formas para determinar la pérdida de calor por radiación, pero teniendo en cuenta los consumos de combustible y las producciones de vapor reales en las condiciones de trabajo, con respecto a los parámetros nominales dados por el fabricante, se tienen en:

- Con respecto al consumo de combustible.

$$q_s = q_{snom} * \sqrt{\frac{B_{nom}}{B}} ; (\%)$$

Donde:

q_s - Pérdida de calor por radiación; (%).

q_{snom} - Pérdida de calor por radiación nominal; (%).

B_{nom} - Consumo de combustible nominal; (kg/h).

B - Consumo de combustible real; (kg/h).

- Con respecto a la producción de vapor.

$$q_s = q_{snom} * \sqrt{\frac{D_{nom}}{D}} ; (\%) \quad (17) \quad (5)$$

Donde:

D_{nom} - Producción o flujo nominal de vapor; (kg/h).

D - Producción o flujo de vapor real; (kg/h).

Esta pérdida, expresada en % de la energía de entrada (calor disponible), se reduce al aumentar la potencia nominal de la caldera, mientras más compacto es su diseño y cuando esta trabaja a cargas cercanas a la nominal.

La pérdida de calor por radiación y convección es usualmente pequeña en generadores de vapor de media y alta capacidad, pero se convierte en una de las principales pérdidas en las calderas de pequeña potencia.

De forma cuantitativa, por su valor, esta es una de las pérdidas que define la eficiencia de las calderas pirotubulares de vapor. Por tanto, es recomendable mantener un régimen de trabajo continuo y estable, para contribuir a minimizar su efecto, y esto se logra acercando la producción de vapor a las necesidades en cada momento de la instalación consumidora.

Son dos las causas principales que pueden provocar el incremento de esta pérdida durante la explotación:

- El deterioro del aislamiento térmico de la caldera.
- La operación a cargas reducidas.

En el análisis de los nomogramas de la literatura se observa cómo a medida que disminuyen la correspondencia entre la capacidad de producción de la caldera y la carga instalada aumenta el % de pérdidas que ocurren a través de las paredes, con la consiguiente afectación o disminución de la eficiencia.

$$q_s = q_{s\text{nom}} * \sqrt{\frac{D_{\text{nom}}}{D}} ; (\%)$$

Donde:

q_s - Pérdidas por radiación en las condiciones reales de trabajo. (%)

$q_{s\text{nom}}$ - Pérdidas por radiación según el fabricante o estimadas en la literatura. (%)

D_{nom} - Producción nominal de la caldera. (ton/h)

D - Producción real de la caldera. (ton/h)

1.4.2 Pérdidas con los gases de la combustión

Otro efecto negativo desde el punto de vista energético lo constituye el hecho de que durante los períodos de parada del quemador, por efecto de la convección natural los gases calientes que se encuentran en el hogar fluyen

hacia la chimenea y por medio de esta al medio exterior. El espacio dejado libre en el horno y la flusería es ocupado por aire frío a temperatura ambiente que entra por el conducto del ventilador de tiro forzado, debido a la alta diferencia de temperaturas con las paredes de transferencia provocan un “enfriamiento” de ellas.

En el momento del arranque del quemador, el primer paso o proceso que se efectúa es un “barrido” con el ventilador para minimizar la posible presencia de gases combustibles en la cámara que puedan provocar sobre explosiones no controladas. De esta forma también se contribuye al “enfriamiento” del horno. Se deduce entonces que los primeros volúmenes de combustible que se inyectan al cañón de fuego son empleados en “calentar” las superficies “enfriadas”, según los mecanismos explicados.

Los volúmenes de aire “frío” que se incorporan al horno dependen de factores como la capacidad de la caldera, el tipo de quemador, la regulación del ventilador en correspondencia con el ajuste de la combustión.

Las pérdidas q_2 , denominadas pérdidas con los gases de escape, y que es la mayor de cuantas ocurren en la caldera, se mantienen, al igual que las pérdidas por radiación, durante todo el tiempo en que se encuentra trabajando.

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_d} = \frac{(I_g - \alpha_{sal} * I_a^o) \left(1 - \frac{q_4}{100}\right)}{Q_d} * 100 ; (\%) \quad (5) \quad (16) \quad (17) \quad (21)$$

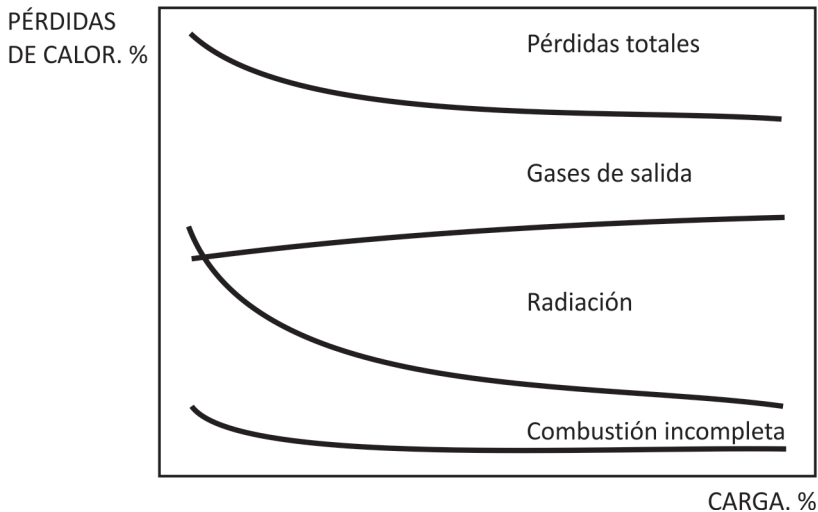
En el valor de estas pérdidas están implícitas las temperaturas de los gases producidos durante la combustión y el aire atmosférico, cuya diferencia establece la circulación de los primeros hacia el exterior, arrastran consigo una considerable parte del calor que existe en el horno.

La constructora de generadores de vapor Clayton enuncia que: *“un precalentamiento de 40 minutos al principio de un período de trabajo de 9 horas representa una pérdida del 4,7 % en el costo de combustible diario”, que : “tales pérdidas en el precalentamiento están en el rango del 2 al 20 %, del consumo diario, y dependen de la frecuencia del arranque, tamaño de la caldera y del sistema de vapor” y “en un proceso o carga en que se requiere*

operación intermitente, (por ejemplo paros diarios), entonces estas pérdidas podrían ser muy significativas” (Manual del fabricante, n.d.). Se refirieren a las pérdidas de energía por enfriamiento.

Estos problemas son comunes, pues instalar calderas sobredimensionadas también es común; generalmente, operan entre un 30 y un 70 % de su capacidad la mayor parte del tiempo. De aquí que se produzca una considerable pérdida de energía y se reduzca la eficiencia por operar a carga parcial. Este fenómeno es porque en muchas ocasiones se seleccionan las calderas tomando en consideración el máximo requerimiento de carga, sin considerar los costos que implica el funcionamiento a carga parcial.

Figura 1.2. Comportamiento de las pérdidas con respecto a la carga.



Fuente: (Borroto Nordelo, 2000).

En la gráfica anterior se evidencia que la disminución de la carga en la que trabaja la caldera se revierte en un aumento del por ciento de pérdidas por radiación, las cuales se elevan considerablemente al trabajar por debajo del 50%.

En el caso de las pérdidas por los gases de salida o de combustión, un aumento de la carga provoca un aumento de su por ciento, y viceversa, pero no de forma tan marcada como en el caso anterior, solo que aquí se justifica porque al aumentar la carga es necesario incrementar los volúmenes de combustible a quemar, junto al incremento del aire y por tanto, existe mayor producción de gases a evacuar, los cuales aumentan su velocidad de paso con lo que se afecta la transferencia y la temperatura a la salida aumenta en alguna medida.

1.4.3 Otras consecuencias negativas en la eficiencia de las calderas

Existen otros problemas que afectan la eficiencia y el buen funcionamiento del sistema energético visto de forma integral cuando la caldera trabaja con bajo factor de carga, entre los que se enumeran:

- El consumo de energía eléctrica se eleva si el motor del cual depende el funcionamiento de la bomba de combustible del quemador y del ventilador de tiro forzado, arranca y para un mayor número de veces, esto provoca picos de consumo, y además desgaste en sus elementos.
- Desde el punto de vista mecánico, el trabajo a bajas cargas trae como consecuencia que la existencia de períodos alternos de reposos con el consiguiente enfriamiento relativo de los metales del equipo, y los períodos de trabajo con su calentamiento, provoque tensiones en los metales que conforman tanto la estructura como las superficies de transferencia de calor, lo que provoca, sobre todo en las calderas más viejas, rajaduras, grietas, rotura de las soldaduras, causados por la fatiga mecánica.
- Desde el punto de vista ecológico, en los momentos de arranque del quemador, no se logra instantáneamente una buena relación aire-combustible como la que se logra instantes después, esto se manifiesta en la coloración oscura de los humos de chimenea que se observa instantes después del arranque del quemador, pues parte del combustible suministrado al horno no fue quemado, por tanto, no fue aprovechado para producir trabajo útil, pero si fue expulsado como sustancia contaminante a la atmósfera. De similar forma este efecto se vería reducido si se un trabajo continuo del quemador.

1.5 Factores que influyen en el funcionamiento de la caldera: factor de carga y método para su cálculo

Las calderas pirotubulares seleccionadas para su instalación en cualquier industria deben satisfacer los requerimientos de vapor para diferentes regímenes de explotación, como el régimen de trabajo es variable, se define para estas unidades un coeficiente o factor de carga, el cual permite conocer en qué medida el generador de vapor está siendo explotado con respecto a su capacidad, para su cálculo se apoya en el Método de Línea de Balance, empleado por la empresa ALASTOR.

1.5.1 Factor de carga. Definición

El generador de vapor que se instale en cualquier industria debe ser seleccionado de forma tal que en todo momento satisfaga los requerimientos de vapor, ya sea cuando el proceso está demandando cargas mínima, máxima o normal, siempre teniendo en cuenta que esto debe suceder con la mayor eficiencia posible en el trabajo del equipo.

Como el régimen de trabajo es variable en la mayoría de los procesos, se define un coeficiente o factor de carga, el cual permite conocer en qué medida el generador de vapor está siendo explotado con respecto a su capacidad, o lo que es igual, en cuánto se encuentra subutilizado. La información necesaria para el análisis de este factor de carga se toma a partir de los datos de chapa de la caldera y de los equipos consumidores, los que se suman algebraicamente, en el caso de que dichos consumidores trabajen a tiempo completo y consuman esta cantidad de vapor. Pero en la mayoría de los casos, los procesos no funcionan de esta manera, por ejemplo, en las cocinas, lavanderías y procesos de esterilización, el consumo es intermitente o discontinuo, cada consumidor trabaja solo una parte del tiempo, en el que consume vapor.

Otra forma de conocer o determinar el factor de carga consiste en tomar durante una jornada de trabajo de la caldera, o durante una parte de la jornada laboral, la cantidad de arranques y paradas del quemador, y los tiempos correspondientes a los mismos. Al sumar estos tiempos se conoce qué cantidad del tiempo total estuvo realmente trabajando el generador de vapor, y en qué medida se encuentra sobredimensionada la caldera.

Es decir, el factor de carga se formula de la siguiente manera:

$$\Phi = \frac{tt_q}{tt_{gv}}$$

Donde:

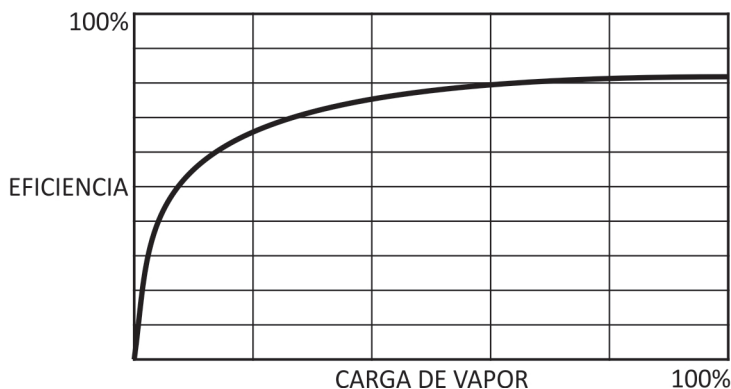
tt_q - tiempo de trabajo del quemador; (h).

tt_{gv} - tiempo de trabajo del generador de vapor; (h).

Del análisis de la fórmula anterior se concluye que para que el generador de vapor cumpla con los requisitos de selección y eficiencia antes mencionados, la igualdad debe ser 1. La obtención de valores inferiores a la unidad indica que el generador se encuentra sobredimensionado y no tiene incorporado un mecanismo o dispositivo regulador que permita ir variando la producción de vapor, según los requerimientos instantáneos del proceso.

Un análisis de la curva presentada en el manual de la CONAE muestra la tendencia marcada hacia la disminución de la eficiencia de los generadores de vapor a medida que se va reduciendo el porcentaje de carga, o sea, a medida que se reduce el factor de carga debido a la subutilización. Esto se hace más evidente o marcado cuando se trabaja por debajo del 50 %.

Figura 1.3. Comportamiento de la eficiencia con respecto a la carga.



Fuente: (CONAE, 1997).

La figura anterior muestra la eficiencia a que trabaja una caldera en virtud de la carga instalada. En ella se confirma la necesidad de operar a carga nominal o lo más cercano posible a esta, y de instalar calderas que se correspondan con el potencial real de consumo de vapor del sistema energético. El trabajo a cargas parciales aumenta las pérdidas energéticas, y sobretodo q_2 y q_5 .

Trabajar en estas condiciones resulta perjudicial desde el punto de vista energético y económico, y tiene también un impacto negativo desde el punto de vista medioambiental.

1.5.2 Método para el cálculo del factor de carga

La determinación del factor de carga de las calderas se apoya en el Método de Línea de Balance, empleado por ALASTOR, para, prescindiendo de instrumentación sofisticada, hacer el ajuste de la capacidad instalada de las calderas pirotubulares, mediante la realización de un balance de carga-capacidad de producción de vapor, y lograr mantener constante el funcionamiento de estas. Con este método se calcula la relación matemática entre el calor absorbido, el calor disponible y los tiempos de arranques y paradas de la caldera.

La tendencia de esta relación hacia la unidad demuestra que el calor absorbido en el sistema energético es igual al disponible luego de la quema del combustible, por tanto existe correspondencia entre producción de vapor y consumo. De no ser de este modo, el alejamiento del valor obtenido con respecto a la unidad, permite establecer en qué medida es superior la capacidad de producción con respecto a la demanda instalada. Este dato permite acometer acciones encaminadas a su corrección.

Para conocer la relación $A = \frac{Q_{abs}}{Q_d}$, solo es preciso realizar mediciones de tiempos, sin necesidad de recurrir a las ecuaciones tradicionales en función de las variables del proceso, que hacen engorroso, y por tanto, largo y costoso el cálculo.

Las ecuaciones a utilizar son:

$$\frac{Q_{abs}}{Q_d} = \left(1 - \frac{t_c}{t_a}\right)$$

Esta ecuación establece la relación entre el calor absorbido y el disponible con el tiempo en que el quemador se encuentra funcionando, o sea, desde su arranque hasta su parada, la cual está determinada por los valores de presión a los que se encuentran ajustados los presostatos o controles de presión de la caldera.

Además existe la ecuación:

$$\frac{Q_{abs}}{Q_d} = \frac{t_c}{t_a}$$

En este caso, la ecuación establece la relación entre el calor absorbido y el disponible con el tiempo en que el quemador se encuentra apagado, o sea, desde su parada al llegar a la presión máxima de trabajo, hasta su nuevo arranque al llegar a la presión mínima; igualmente determinada por los valores de presión a los que se encuentran ajustados los presostatos o controles de presión de la caldera.

Los términos de estas ecuaciones se definen como:

Q_{abs} - Calor absorbido por los consumidores, las redes y las pérdidas energéticas en el sistema.

Q_d - Calor disponible al quemarse el combustible.

t_c - Tiempo de subida de la presión con la válvula de salida de vapor de la caldera cerrada, o sea, sin carga, desde la presión mínima de trabajo hasta la presión máxima de trabajo, coincidentes con el ajuste de los presostatos; este es el tiempo que transcurre desde que se enciende el quemador hasta que se apaga.

t_a - Tiempo de subida de la presión con la válvula de salida de vapor de la caldera abierta, o sea, con carga, y con todos los consumidores conectados a la red, desde la presión mínima de trabajo hasta la presión máxima de trabajo; este es el tiempo que transcurre desde que el quemador se enciende hasta que se apaga.

t_b - Tiempo de disminución de la presión, desde la presión máxima hasta la presión mínima de trabajo, desde que el quemador se apaga hasta que vuelve a encenderse.

De estas ecuaciones se plantea que:

- la medida en que el tiempo t_a se acerque al valor de t_c , indica que disminuye el calor absorbido y por tanto, es mayor el sobredimensionamiento.
- En la medida en que t_b aumenta, indica que es mayor el sobredimensionamiento.

1.6 Indicadores de eficiencia energética

Indicadores termodinámicos

Entre los indicadores termodinámicos de eficiencia energética, se señalan dos que intervienen en el objeto del presente trabajo.

Rendimiento de generación instantáneo

Este se considera como... el rendimiento puntual considerando las pérdidas en humos, inquemados y por la envolvente de la caldera (García San José, 2001). Y se presenta como:

$$n_c = 1 - q_h - q_i - q_{rc}$$

Donde:

n_c - Rendimiento de generación instantáneo.

q_h - Pérdidas con los humos.

q_i - Pérdidas por inquemados.

q_{rc} - Pérdidas por radiación.

Rendimiento medio estacional

En las horas de disposición de funcionamiento de una caldera se pueden distinguir tres situaciones diferenciadas:

- Funcionamiento. Período o períodos durante los cuales el quemador se encuentra trabajando y por tanto, se está produciendo la quema del combustible con el aporte de calor al fluido de trabajo. Durante este período se producen tres pérdidas: por humos, por inquemados y por

radiación al medio. En el mismo el rendimiento de generación estacional coincide con el rendimiento instantáneo.

- Paradas. El quemador se encuentra apagado, no se está produciendo el proceso de combustión, y por tanto, no hay aporte de calor. No se puede hablar de rendimiento, ya que únicamente hay pérdidas y no existe aportación de calor útil; sin embargo, estas pérdidas deben ser repuestas en el siguiente ciclo de funcionamiento. Se mantienen en este período las pérdidas por radiación al medio y las llamadas pérdidas por ventilación interna debido al tiro de aire que se induce a través del circuito de humos.
- Arrancadas (García San José, 2001). Corresponden a los ciclos de barrido del hogar, anteriores a la entrada en funcionamiento de los quemadores, durante los cuales se mantienen las pérdidas por radiación-convección, pero se incrementan en gran medida las de ventilación interna, ya que la circulación del aire es forzada por el ventilador del quemador (García San José, 2001).

De lo anterior se deduce que el tiempo total de funcionamiento o de disposición para brindar servicio de la caldera corresponde a la suma de los períodos mencionados. El rendimiento medio estacional se obtiene del cociente entre la energía útil entregada al agua y la energía total consumida en los quemadores; se ve afectada la primera por las pérdidas mencionadas en los períodos de parada y de arranques, por lo que el rendimiento medio estacional es menor o igual al rendimiento instantáneo.

El rendimiento medio estacional disminuye cuando aumenta el número de horas de disposición de servicio con el quemador parado, ocurre lo mismo con el número de arrancadas. El rendimiento de generación estacional puede ser determinado tomando en cuenta los factores mencionados a través de la ecuación:

$$N_{GE} = \frac{n_g}{1 + \left(\frac{1}{\Phi}\right) * q_B} \quad (9)$$

Donde:

q_B - Pérdidas por disposición de funcionamiento de la caldera.

Φ - Cociente entre las horas de funcionamiento del quemador y las horas de disposición de funcionamiento de la caldera, o lo que es igual, el factor de carga a que se encuentra sometida la caldera.

El aumento del factor de carga Φ trae consigo un aumento del rendimiento de generación estacional.

Indicadores económico-termodinámicos

Estos indicadores consideran además de los aspectos termodinámicos, los económicos. En el aspecto económico el costo de producción de vapor, permite determinar cuánto cuesta producir una unidad de vapor a partir de los gastos en que se incurre, con el combustible y el agua, y de las condiciones termodinámicas en las que ocurre el proceso.

Torres (1991), menciona que *“la evaluación final de cualquier proceso debe realizarse en términos monetarios incorporando al coste de los flujos internos y productos finales, el coste económico de cada una de las materias primas utilizadas y los costes asociados a los componentes del sistema”*.

Partiendo de lo enunciado anteriormente la ecuación del costo de producción del vapor se plantea como:

$$Cp_{vs} = \frac{CE_{vs} * E_{vs}}{G_{vs}}$$

Cp_{vs} - Costo de producción del vapor saturado; $\frac{\$}{ton}$.

Conclusiones del Capítulo I

1. En general las tendencias de los fabricantes de calderas pirotubulares están encaminadas, fundamentalmente, a lograr eficiencias mantenidas a cargas parciales, lo que justifica su adaptabilidad a los más variados procesos y consumos.
2. La eficiencia de las calderas estudiadas está determinada en gran cuantía por las pérdidas de radiación y las pérdidas con los gases de escape.
3. El rendimiento medio estacional caracteriza el trabajo intermitente durante el tiempo que las calderas pirotubulares están en disposición de prestar servicio, definido en tres etapas: funcionamiento, parada y arranque.
4. En procesos con régimen de trabajo variable se define un coeficiente o factor de carga, el cual permite conocer en qué medida el generador de vapor está siendo explotado con respecto a su capacidad, o lo que es igual, en cuánto se encuentra subutilizado.

CAPÍTULO 2.

CASOS DE ESTUDIO. LOS MÉTODOS PARA LA PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA Y EL INCREMENTO DE EFICIENCIA EN LA GENERACIÓN Y EL CONSUMO DE VAPOR DE LAS CALDERAS PIROTUBULARES

2.1 Caso estudio I: Caracterización de la generación y el consumo de vapor en calderas pirotubulares en la ciudad de Cienfuegos

Generalidades

En el estudio se toma como muestra 13 calderas con equipos de diferentes capacidades de producción de vapor, según los consumidores instalados en el momento de su puesta en funcionamiento, controladas por la Empresa de Calderas ALASTOR, en la ciudad de Cienfuegos.

En la tabla 2.1 se enumeran las salas de calderas las funciones, condiciones de trabajo.

Tabla 2.1. Caracterización del consumo de vapor. Sobredimensionamiento.

CENTRO	UTILIZACIÓN DEL VAPOR			PRODUCCIÓN NOMINAL (KG/H)	CONSUMO REAL (KG/H)	SOBREDIMENSIONAMIENTO (%)
	COCINA	LAVANDERÍA	OTROS			
A	X			510	448	12,16
B	X	X	Esterilización, ACS	4000	2872,8	28,18
C	X	X	Esterilización, ACS	2500	596	76,16
D	X	X	Esterilización, ACS	660	279,2	57,70
E	X		Esterilización, ACS	440	428,8	2,55

CENTRO	UTILIZACIÓN DEL VAPOR			PRODUCCIÓN NOMINAL (kg/h)	CONSUMO REAL (kg/h)	SOBREDIMENSIONAMIENTO (%)
	COCINA	LAVANDERÍA	OTROS			
F	X			1000	480	52,00
G	X			440	196	55,45
H	X			1120	418,4	62,64
I	X			660	196	70,30
K	X			2500	816	67,36
N	X			440	109,6	75,09
Ñ		X		4000	3256,8	18,58
P	X			1600	80	95,00

Figura 2.1. Capacidad nominal de producción de vapor por calderas.

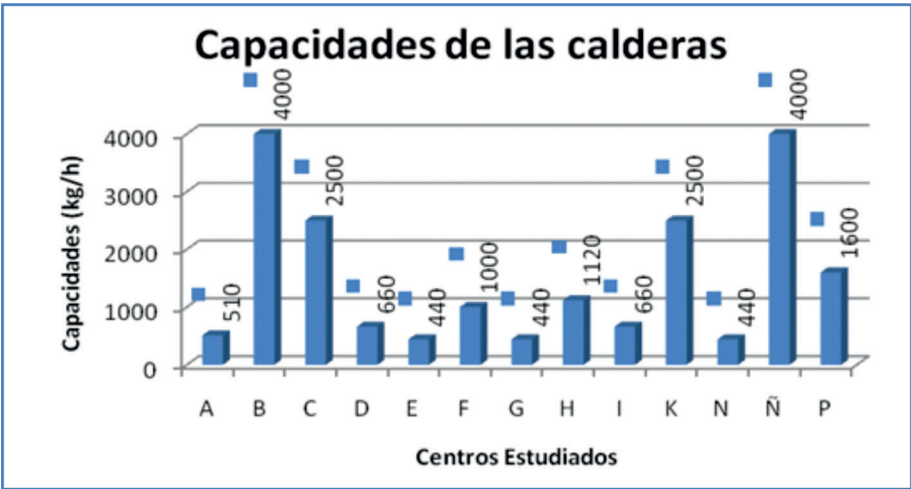
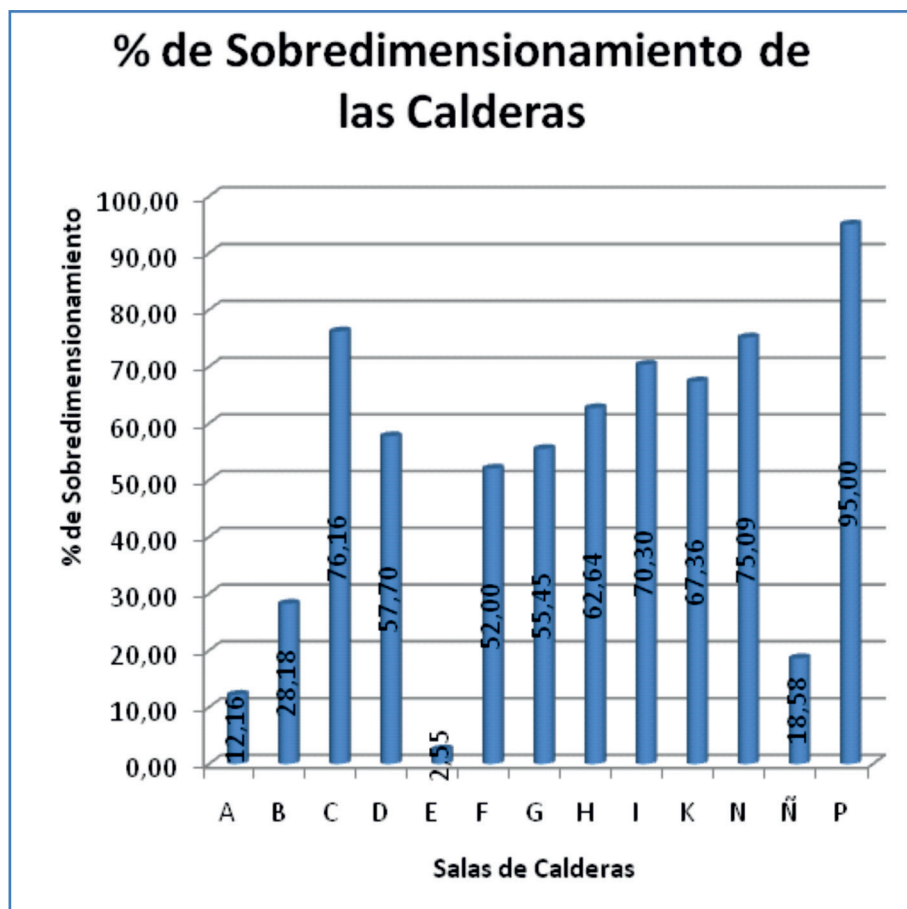


Figura 2.2. Caracterización del sobredimensionamiento.



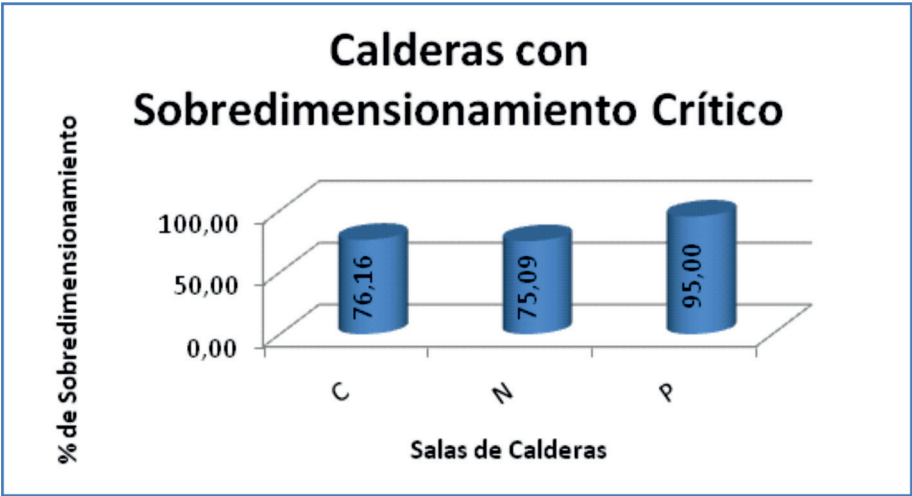
Clasifican dentro de mayor sobredimensionamiento nueve centros que constituyen el 69,23 %, y entre estos, tres se consideran como críticos por estar por encima del 75 % y son presentados en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Casos críticos de sobredimensionamiento.

CENTRO	SOBRE- DIMENSIONAMIENTO (%)
C	76,16
N	75,09
P	95,00

Los demás centros tienen menor % de sobredimensionamiento, de ellos el de mejor índice de producción vs consumo es el E, con 2,55 %, por ser un centro recién inaugurado en que la demanda se corresponde con la producción de vapor.

Figura 2.3. Casos críticos de sobredimensionamiento.



Análisis de resultados

El potencial total de producción nominal de vapor es de 19 870 kg/h, y el promedio es de 1 528,46 kg/h. Las producciones de vapor oscilan en el rango desde 440 kg/h, las más pequeñas, hasta 4 000 ton/h las de mayor capacidad, esto representa las capacidades más comúnmente presentes en la generalidad de las pequeñas y medianas industrias y entidades de prestación de servicios.

En sentido general de las 13 salas de calderas estudiadas, 12 tienen dentro de su objeto social la cocción de alimentos o preparación de los mismos, representan el 92,31 %; cuatro tienen incorporadas una lavandería, lo que representa un 30,77 %; y cuatro ofertan otro tipo de servicio como la esterilización, la obtención de agua caliente sanitaria (ACS), u otros procesos de calentamiento, representando igualmente un 30,77 %.

En la mayoría de los casos las salas de calderas cuentan con dos de estos equipos de similar producción de vapor, se toman los datos y las mediciones de las calderas que se encontraban prestando servicio en el momento del estudio. Cada una de las dos calderas instaladas en cada centro es capaz, por sí misma, de suplir las necesidades de vapor máxima que puedan demandar los consumidores.

En todos los casos, se cuenta además, con los sistemas correspondientes de almacenamiento, preparación y suministro, tanto de combustible como de agua, para el adecuado funcionamiento de las calderas, y de los instrumentos de seguridad y control correspondientes.

El análisis de la tabla 2.1 deja ver claramente que de un consumo promedio de 782,89 kg/h de vapor, en la ciudad solo se aprovecha el 48,22 %, que equivale a decir 377,51 kg de vapor por hora. De un potencial de producción de vapor de 19 870 kg/h, solo se demanda, potencialmente, un promedio de 973,08 kg/h, de estos realmente se demandan como promedio 782,89 kg/h, por lo que apenas se aprovecha el 48,22 % de la capacidad de generación instalada.

La capacidad de producción de vapor en la ciudad de Cienfuegos se encuentra sobredimensionada en un 51,78 %, o sea, más de la mitad se encuentra subutilizada.

Conclusiones parciales del caso de estudio I

1. La caracterización del consumo de vapor de las calderas pirotubulares de la ciudad de Cienfuegos indica que el 83,33 % se utiliza para la cocción de alimentos.
2. El potencial de producción de vapor saturado en capacidad instalada en las 13 salas de calderas pirotubulares estudiadas es de 19 870 kg/h.

- 3. En la muestra estudiada se observa que la mayoría de las calderas se encuentran sobredimensionadas en más de un 50 % y se demuestra que solo se aprovecha el 48,22 % de la capacidad de producción de vapor, el sobredimensionamiento promedio es de 51,78 %.

2.2 Caso estudio II: Método para el cálculo del factor de carga. Aplicación del método

Para realizar las mediciones y el análisis de los datos obtenidos se emplearon los instrumentos que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 2.3. Instrumentación utilizada para medir los parámetros.

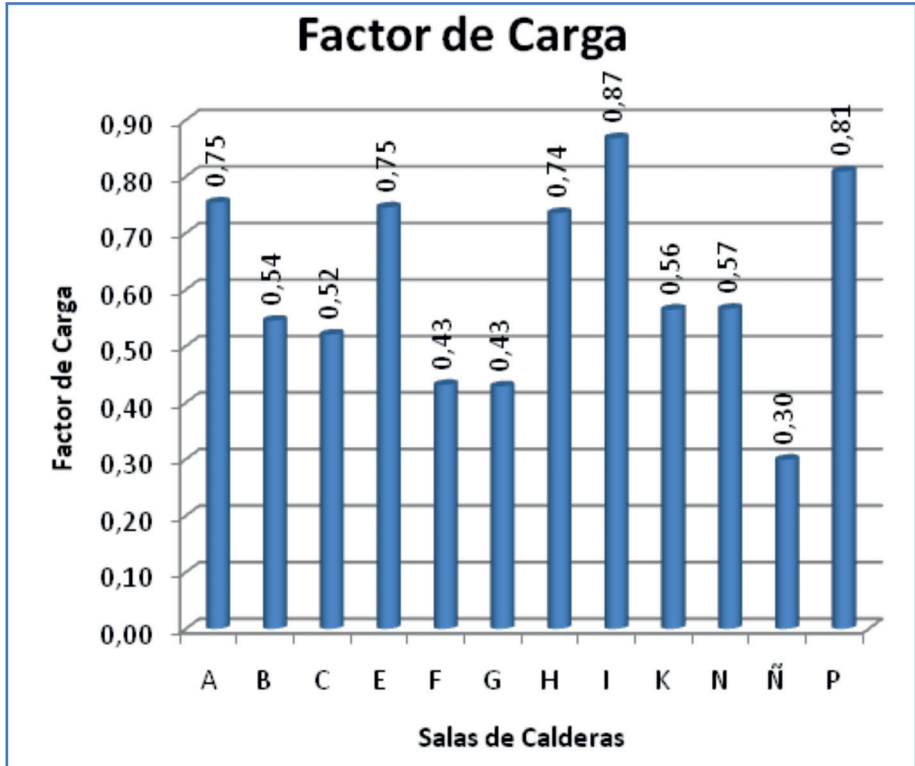
PARÁMETRO	INSTRUMENTO	GRADO DE PRECISIÓN
Tiempo	Reloj	
Presión	Manómetro	+ 0.1 kgf/cm ²
Temperatura	Termómetro	1.5

Las muestras se tomaron para el análisis de la determinación de los tiempos t_c , T_a y t_b anteriormente mencionados en la metodología que se explica en el capítulo I. Se muestra el gráfico elaborado a partir de las mediciones del caso

Tabla 2.4. Resumen del cálculo del factor de carga en las calderas de la ciudad de Cienfuegos.

CENTRO	CAPACIDAD NOMINAL (KG/H)	TIEMPO DE TRABAJO DE LA CALDERA (H)	TIEMPO DE TRABAJO DEL QUEMADOR (H)	FACTOR DE CARGA
A	510	2:46:06	2:05:13	0,75
B	4000	12:18:55	6:42:40	0,54
C	2500	8:11:37	4:15:45	0,52
E	440	6:09:58	4:35:41	0,75
F	1000	2:50:55	1:13:43	0,43
G	440	4:31:53	1:56:32	0,43
H	1120	2:31:33	1:51:27	0,74
I	660	2:00:29	1:44:32	0,87
K	2500	4:02:48	2:17:02	0,56
N	440	2:51:26	1:37:00	0,57
Ñ	4000	1:40:27	0:30:01	0,30
P	1600	5:40:21	4:35:13	0,81
Producción nominal potencial	19210	55:36:28	33:24:49	
Promedio	1600,83	4:38:02	2:47:04	0,61

Figura 2.4. Gráfico del factor de carga en las calderas de la ciudad de Cienfuegos.



Análisis de los resultados

En la tabla y gráfico anteriores se observa que solo cuatro, de doce centros, tienen un factor de carga por encima de 0,75, lo que representa el 33,33 % del universo estudiado, pero en realidad esto no define fielmente la situación existente. En el caso I, con un factor de 0,87, este se debe a gran cantidad de escapes de vapor en las redes y al mal funcionamiento de las trampas de vapor en la cocina, las cuales se convierten en una vía de escape directo al tanque de agua de alimentar, cuya temperatura se encuentra como promedio en 96 °C. Por tanto, el consumo de vapor no se encuentra justificado por un aprovechamiento real del mismo.

Le sigue en orden con un comportamiento similar el caso P, solo que en este caso además de las pérdidas por escapes de vapor en las redes, existen pérdidas por largos tramos de tubería expuestas al ambiente sin aislamiento térmico adecuado.

El caso A igualmente presenta irregularidades ocasionadas por mala operación en los consumidores, los cocineros mantienen abiertas las válvulas de drenaje de los tachos en la creencia de que el paso del vapor vivo acelera el proceso de cocción.

El caso E es el centro que más ajusta su consumo a la producción de la caldera, aunque es susceptible de aumentar el factor con un mejor ordenamiento del flujo de cocción.

Los demás centros, a pesar de tener por lo general situaciones graves de deterioros en las redes, que permiten el escape de vapor a la atmósfera, tienen, salvo el H, factores de carga bastante bajos, son los casos más críticos el F y el G, con 0,43 y el Ñ con el 0,3.

Se estudió como promedio el funcionamiento de las calderas durante 4:38:02 horas, en las cuales trabajaron durante 2:47:04 horas, para indicar un factor de carga de 0,61 en las instalaciones de calderas pirotubulares de la ciudad de Cienfuegos.

A pesar de las grandes pérdidas que ocurren por diferentes causas en las redes de distribución, y de la disminución apreciable por diferentes motivos de los consumos originales en los centros estudiados, en general en la ciudad existe una mala planificación del consumo, y se desaprovechan otras oportunidades de ahorro como el cambio de elementos tan simples como pueden ser las boquillas de los quemadores.

Conclusiones parciales del caso de estudio II

1. El aprovechamiento real de la capacidad de generación instalada representa solo 48,2%, o sea, menos de la mitad.
2. El factor de carga en el que trabajan las calderas pirotubulares es muy bajo en la mayoría de ellas, su valor promedio es de 0,61, lo que indica

que se consume solo algo más de la mitad de la necesidad del consumo real instalado.

- 3. Ambos índices o valores se complementan, y demuestran que se están subutilizando en gran medida las potencialidades energéticas de las calderas pirotubulares existentes en la ciudad.

2.3 Caso estudio III: Evaluación económica de nueve calderas con turbulizadores insertados

Para efectuar la evaluación se tomaron 9 de las 17 calderas que tenían instalados turbulizadores en la provincia de Cienfuegos. Estas calderas se instrumentaron para realizar las mediciones necesarias para el balance térmico directo e indirecto, sin y con generadores de turbulencia. Se evaluó cada caldera nueve veces por un período de una hora. Los resultados aparecen en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Datos experimentales para las calderas del caso de estudio.

PARÁMETRO	U/M	A SIN TURB.	A CON TURB.	B SIN TURB.	B CON TURB.	C SIN TURB.	C CON TURB.	D SIN TURB.	D CON TURB.	E SIN TURB.	E CON TURB.
Producción de vapor	kg/seg	0,09	0,1	0,039	0,04	0,041	0,035	0,095	0,096	0,11	0,12
Gasto de combustible	Kg/seg	0,011	0,01	0,0036	0,0031	0,0036	0,0029	0,0074	0,0069	0,0087	0,0096
Presión de vapor	MPa	0,49	0,49	0,58	0,58	0,7	0,7	0,22	0,22	0,67	0,67
Contenido O2 gases	%	6,3	6,3	5,0	5,0	4,0	4,0	8,1	6,2	2,5	2,5

PARÁMETRO	U/M	A SIN TURB.	A CON TURB.	B SIN TURB.	B CON TURB.	C SIN TURB.	C CON TURB.	D SIN TURB.	D CON TURB.	E SIN TURB.	E CON TURB.
Contenido de CO2	%	11,8	11,8	12,0	12,0	13,5	13,5	11,4	11,4	14,0	14,0
Temp. gases de salida	oC	330	260	298	200	340	240	211	170	230	198
Temp. agua alimentar	oC	28	28	28	28	28	28	30	33	27,5	27,5
Coeficiente exceso de aire	-	1,34	1,34	1,32	1,32	1,17	1,17	1,39	1,13	1,13	1,13
Pérdida calor sensible	%	16,53	10,55	16,05	9,11	12,52	8,84	8,61	6,94	8,84	7,41
Pérdida por incombustión	%	1,5	1,5	1,55	0,5	0,5	0,5	0,8	0,2	0,5	0,5
Índice de Bacharach	-	5	5	1	1	7	7	4	1	7	7
Perdidas por radiación	%	13,96	14,0	14,0	14,9	11,61	10,5	5,66	5,32	11,67	10,0
Efic. Método directo	%	68,4	73,4	68,23	73,0	80,02	82,47	79,44	84,4	80,02	82,47

PARÁMETRO		U/M	A SIN TURB.	A CON TURB.	B SIN TURB.	B CON TURB.	C SIN TURB.	C CON TURB.	D SIN TURB.	D CON TURB.	E SIN TURB.	E CON TURB.
Efic. Método indirecto		%	68,01	73,01	68,4	74,4	75,37	80,16	84,93	87,57	79,05	82,09
Índice de Generación	kgv/kgc											
			8,18	10,0	10,83	12,9	11,38	12,06	12,83	13,91	12,85	13,21

PARÁMETRO		U/M	F SIN TURB.	F CON TURB.	G SIN TURB.	G CON TURB.	H SIN TURB.	H CON TURB.	I SIN TURB.	I CON TURB.
Producción de vapor	kg/seg		0,094	0,09	0,26	0,26	0,32	0,33	1,07	1,08
Gasto de combustible	kg/seg		0,0073	0,0066	0,023	0,023	0,026	0,025	0,078	0,074
Presión de vapor	MPa		0,75	0,75	0,45	0,45	0,76	0,82	0,82	0,82
Contenido O2 en gases	%		3,5	3,5	5,1	5,1	-	-	8	8
Contenido de CO2 en gases	%		13	13	12,0	12,0	11,8	11,8	12	12

PARÁMETRO	U/M	F SIN TURB.	F CON TURB.	G SIN TURB.	G CON TURB.	H SIN TURB.	H CON TURB.	I SIN TURB.	I CON TURB.
Temp. Gases de salida	oC	275	202	264	221	244	196	182	162
Temp. agua alimentar	oC	28	28	30	30	35	34	34	42
Coeficiente exceso de aire	-	1,22	1,22	1,32	1,32	1,4	1,39	1,32	1,32
Pérdida de calor sensible	%	11,65	8,63	13,73	12,19	13,47	10,5	9,82	8,72
Pérdida por incombustión	%	2,86	2,86	0,4	0,4	0,8	0,8	0,4	0,4
Índice de Bacharach	-	4	4	4	4	-	-	4	4
Perdidas por radiación	%	6,26	4,32	11,03	10,91	5,87	5,84	2,18	2,17
Efic. Método directo	%	79,94	84,24	75,54	77,79	80,64	83,61	88,22	89,4
Efic. Método indirecto	%	79,23	84,19	74,88	76,48	79,84	82,61	87,59	88,7

PARÁMETRO	U/M	F SIN TURB.	F CON TURB.	G SIN TURB.	G CON TURB.	H SIN TURB.	H CON TURB.	I SIN TURB.	I CON TURB.
	kgv/kgc	12,87	13,63	11,37	11,75	12,47	12,87	13,6	14,63
Índice de Generación									

A partir de la tabla 2.5 y utilizando el programa EVACAL, se obtienen los valores de eficiencia directa e indirecta con y sin turbulizador. Con estos resultados, y aplicando la metodología del epígrafe anterior, se determinan los parámetros de costo de producción de vapor, la energía y la exergía como indicadores importantes a valorar en las calderas pirotubulares durante su explotación.

Análisis de resultados

Tabla 2.6. Evaluación económica y ambiental de las calderas pirotubulares estudiadas.

PARÁMETROS	U/M	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Capacidad nominal	kg/h	460	660	660	660	660	1100	2000	2500	4000
Producción real	kg/h	360	144	149,4	342	459	338	969	1176	3884
Factor de capacidad	%	78,26	21,8	22,6	51,8	69,5	30,7	48,4	47,0	97,1

PARÁMETROS	U/M	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Ahorro de combustible	t/año	6,7	3,28	1,34	4,5	1,89	3,3	4,94	4,85	39,0
Ahorro de combustible	%	7,5	10	4,7	7,52	2,66	5,09	2,6	2,34	6,01
Ahorro anual	\$/año	837,5	410	167,5	562,5	236,25	412,5	617,5	606,25	487,5
Costo vapor sin turb.	\$/ton	24,81	33,57	31,66	19,26	17,82	24,27	18,1	16,1	11,8
Costo vapor con turb.	\$/ton	21,2	31,78	29,7	18,5	15,6	22,2	17,4	15,8	11,3
Reducción del costo	%	14,4	5,3	6,9	4,1	12,4	8,4	3,6	1,6	5,1
Costo energía sin turb.	\$/kWh	0,034	0,045	0,043	0,027	0,024	0,033	0,025	0,022	0,016
Costo energía con turb.	\$/kWh	0,029	0,043	0,039	0,025	0,021	0,0014	0,024	0,021	0,015
Disminución de CO2	%	9,3	13,8	5,7	7,5	2,6	5,8	2,01	2,3	6,1
Costo exergía sin turb.	\$/kWh	0,126	0,156	0,151	0,111	0,085	0,115	0,124	0,076	0,081
Costo exergía con turb.	\$/kWh	0,119	0,15	0,135	0,1	0,075	0,105	0,113	0,075	

El análisis de la tabla 2.6, permite establecer algunas variaciones importantes que se producen en los indicadores referidos con la instalación de turbulizadores.

- Se aprecia que con la inclusión de estos dispositivos un 70% de estas calderas logran una reducción de la temperatura de los gases de salida entre 40 y 100°C, lo que hace que las pérdidas por calor sensible en los gases de escape disminuya en un rango de 1.5-7%.
- El incremento que se produce en el intercambio de calor con la introducción de los generadores de turbulencia trae consigo un aumento en la razón de evaporación del orden 0.35-2 kgv/kgc.
- En todos los casos analizados se logran aumentos de eficiencia superiores al 1.1 puntos porcentuales y ahorros de combustible mayores del 2%. Un 80% de las calderas analizadas logra un incremento de la eficiencia superior a 2.5 puntos porcentuales y en un 60% se logra un ahorro de combustible mayor del 5%, lo que corrobora la factibilidad técnica y económica de estos dispositivos para las condiciones evaluadas.
- Del análisis de las calderas por número de pases, se concluye que en las de dos pases se logra un aumento de la eficiencia entre 2.5 y 6 puntos porcentuales y en las de 3 pases en todos los casos evaluados el incremento es inferior a 4 puntos porcentuales, ya que existe un menor potencial térmico disponible en los gases de escape tal y como se demostró en el primer capítulo de este trabajo.
- Evaluando la disminución de la temperatura con respecto a la eficiencia se observa que por cada 15-18°C que disminuya la temperatura con la inclusión del turbulizador de cinta, se logra un aumento de la eficiencia de 1 punto porcentual.
- La inclusión del costo de producción de vapor en las calderas pirotubulares como un criterio de evaluación permite evaluar una serie de aspectos como es el grado de utilización de la capacidad, que un solo análisis de la eficiencia no permite considerar.
- La mayor disminución del costo de producción de vapor se logra para las calderas de 460 kg/h (145), que representa 3.6 U.S.D./tv.

- En las calderas de 660 kg/h se obtienen resultados similares en cuanto a la disminución del costo, oscila la reducción entre 5.1-12.4 %. No obstante, se observa en lo que respecta al costo total un aumento sensible con la disminución del porcentaje de utilización de la capacidad de la caldera.
- Caldera B - 21.8 % Capacidad 33.57 U.S.D./tv.
- Caldera E - 69.5 % Capacidad 17.82 U.S.D./tv.
- En las calderas de tres pases la disminución del costo oscila entre 1.6-5%.
- El análisis de los índices costo/kW energía y costo/kW exergía es similar a los resultados anteriores como se aprecia en la tabla 2.6.
- Con la reducción del consumo de combustible se disminuye la emisión de CO_2 a la atmósfera y por lo tanto, se contribuye a disminuir el impacto ambiental en lo que respecta al efecto invernadero. La reducción del volumen de CO_2 oscila entre 2.5-3 % con respecto al volumen total emitido.
- En todos los casos analizados el período de recuperación de la inversión es inferior a seis meses y el % anual de ahorro por concepto de combustible está entre 2.6-10%.
- Al valorar la variación de los costos/kW de exergía se observa en la tabla 2.6 que el costo por exergía sufre una variación más sensible que el de energía.
- Del balance exergético se aprecia como en estas unidades que trabajan con presión del vapor baja (0.2-0.82 MPa), la exergía de esta corriente con respecto a la exergía del combustible oscila de 15-25 % para las calderas evaluadas. Está muy relacionado también este indicador con el factor de capacidad de la caldera, ya que los mayores valores de exergía del vapor se obtienen en las calderas E, F y H donde coinciden relativamente altos valores de presión del vapor con alto factor de carga.
- Si se analiza el valor de la exergía del calor del gas sin turbulizador se observa que existe un potencial térmico disponible considerable en esta corriente, ya que representa de un 6-12 % de la exergía del

combustible en las calderas de dos pases y entre 2-7 % en las de tres pases. Lo anterior corrobora también la necesidad de instalar estos dispositivos de forma especial en las calderas de dos pases, teniendo en consideración los resultados de la caracterización y el análisis de los mecanismos de traspaso de calor que tienen lugar con la introducción de los turbulizadores.

Valoración del uso de turbulizadores

Para evaluar las 31 calderas estudiadas y posibilitar dar una valoración de la situación existente en la provincia de Cienfuegos en cuanto a la posibilidad de instalar turbulizadores y recuperadores de calor, se definieron factores adimensionales que permiten comparar el universo de calderas sin entrar a considerar las diferencias en sus características técnicas y condiciones de operación.

Teniendo en cuenta los resultados de la caracterización técnica y los cálculos realizados en epígrafes anteriores, se realiza una valoración de la posible utilización de turbulizadores en las calderas pirotubulares de la provincia.

Análisis de las pérdidas y la temperatura de los gases

Al evaluar la pérdida por calor sensible se observa que en un 67.73 % de los casos esta supera el 11%, valor a considerar en este tipo de caldera, unido al exceso de temperatura que en el 96% de las calderas está por encima del valor recomendado; evidencia que es posible incrementar la eficiencia actuando sobre esta pérdida.

Se valora el efecto de los turbulizadores, teniendo en cuenta evaluaciones realizadas a calderas con estos dispositivos. Existen experiencias de que por cada 15°C que disminuye la temperatura de los gases, se incrementa la eficiencia en 1 punto porcentual y considerando que en las mediciones de tiro efectuadas en siete calderas, el valor de la presión a la salida tenía valores positivos funcionando el quemador, y la experiencia de que los turbulizadores introducen una baja caída de presión perfectamente admisible para el ventilador, se plantea que del grupo de calderas estudiadas hay posibilidad técnica de instalar estos dispositivos en las unidades en 16 de las calderas

evaluadas, lo que representa el doble si se considera que en cada unidad hay dos calderas generalmente de la misma capacidad.

Estos resultados obtenidos son de aplicación práctica para la Empresa ALASTOR de la provincia de Cienfuegos y factibles de generalizar a las calderas instaladas en el país.

2.4 Caso estudio IV: Planificación energética en un sistema de sistema de generación

En enero del 2014 se realiza un estudio del proceso productivo de los meses previos y se determina que el sobreconsumo respondía a un cambio total de la lencería con un peso diferente a la que se procesaba anteriormente. Tal situación, unido a que los equipos de la lavandería se cargaban manualmente y por cantidad de unidades con un peso diferente al actual, trajo consigo la reducción de los niveles de aprovechamiento de la capacidad de los equipos y por tal, un mayor número de ciclos del proceso con un respectivo aumento del combustible requerido en calderas para generar vapor.

En la figura 2.5 se muestran los gráficos de correlación entre el consumo de fuel y la producción, en la figura 2.5 a) se puede apreciar la correlación de 0.82 con todos los datos recopilados de los últimos dos años. Aunque dicho valor es bueno, se decide eliminar la etapa que experimentó el sobreconsumo para obtener un valor de correlación entre ambos elementos para condiciones normales de operación. El valor resultante fue de 0.90, o sea, existe una buena correspondencia entre ambas variables en condiciones normales de trabajo. Como el valor de correlación obtenido es mayor que 0.75 y se considera válido se realiza el diagrama Índice de consumo vs Producción (figura 2.6), del mismo se obtuvo que para valores de producción mensuales menores 90 toneladas (producción crítica) el índice de consumo aumenta considerablemente.

Figura 2.5. Diagrama de correlación consumo fuel oil vs. Producción antes y después del filtrado de meses.

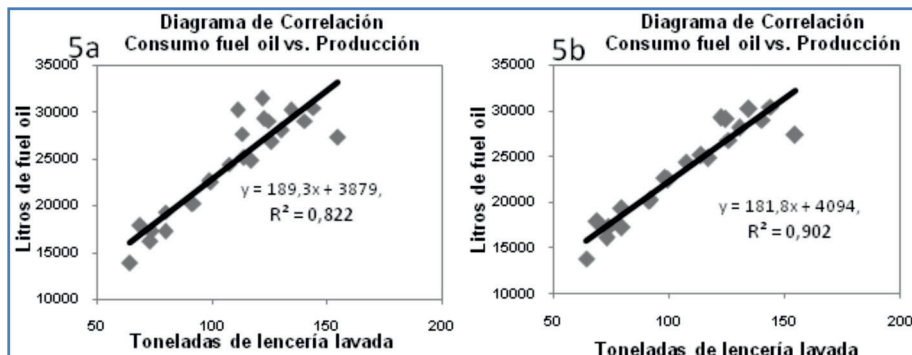
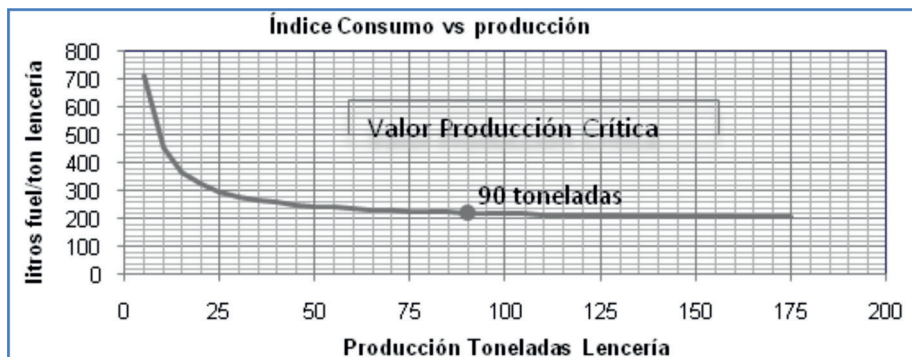


Figura 2.6. Diagrama de índice de consumo vs producción.



Análisis de las variables que afectan la producción

- **Variable 1.** Nivel de producción

El trabajo de la lavandería depende en gran medida de las dos temporadas de turismo en nuestro país. En la etapa de baja turística esta procesa entre 60 y 100 toneladas mensuales y en la de alta, entre 100 y 150 toneladas mensuales. Dichos valores están en correspondencia con el valor de producción crítica seleccionado anteriormente y el cual corrobora el alto grado de subutilización e ineficiencia de la lavandería para valores inferiores a las 90 toneladas mensuales.

- **Variable 2.** Estado técnico del sistema de generación, distribución y uso de vapor

En la lavandería después de realizar un recorrido para revisar el estado técnico de las diferentes partes y accesorios del sistema de vapor, se determina que de manera general el sistema presenta un estado técnico bastante favorable. Deficiencias encontradas:

1. En el proceso existen pérdidas de vapor debido al deterioro que presentan las trampas de vapor.
2. El tanque del retorno de condensado tiene pérdidas en la parte inferior del mismo.

- **Variable 3.** Actuación del personal clave

Se determina que las personas encargadas de las operaciones de lavado y secado eran claves en el proceso, pues dichas operaciones se realizan sin tener en cuenta el peso real de la lencería, o sea, introducen la lencería en los equipos por cantidades físicas y sin una estrategia para procesar los picos de lencería que ocurren en el proceso.

Para la producción del vapor necesaria en las diversas áreas de la lavandería, existe una sala con dos calderas, la primera es PKM-4/13, con una producción de vapor de 4000 kg/h, la cual tiene incorporado un quemador TEKENER OE-300, tipo pistola a presión de fuel-oil. La segunda Salcor Caren con una producción de vapor de 2000 kg/h.

Análisis equipos consumidores de vapor

La lavandería cuenta con diversos equipos consumidores de vapor, todos pertenecientes a la firma GIRBAU, aunque algunos tienen una tecnología más avanzada, dos máquinas planchadoras (mangles), secadores (tumbles) de 22 kg, 4 secadores de 55 kg, 3 secadores de 45 kg, 2 lavadoras de 22 kg, 1 lavadora de 55 kg, 6 lavadoras de 110 kg. Cuando todas estas trabajan simultáneamente el consumo nominal horario según los datos de chapas es 4492 kg/h. La intermitencia en el trabajo del quemador de la caldera de cuatro toneladas en los momentos de máxima demanda, evidencia que la lavandería opera por debajo del consumo nominal total de sus equipos, por

lo que se determinan los valores reales de consumo. Con tal objetivo se mide el tiempo en que las máquinas consumen vapor, en siete días y horarios distintos y a través de la ecuación 1 se determina el consumo real:

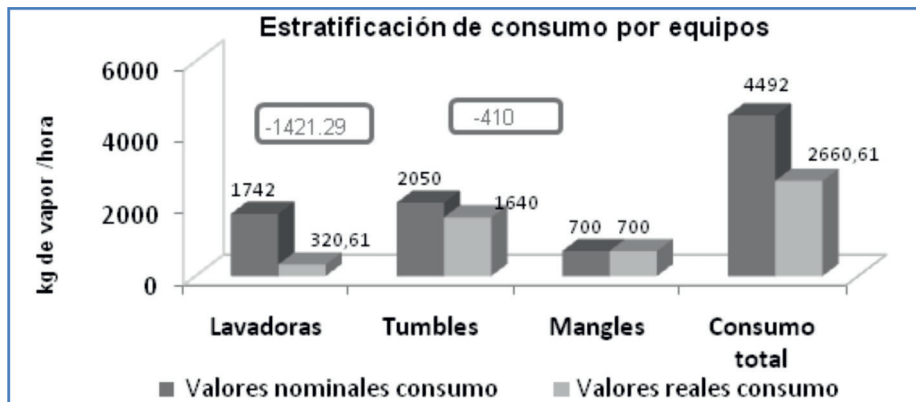
$$\frac{T_{CV}}{1 \text{ hr}} = \frac{C_{Vr}}{C_{Vn}}$$

Donde T_{cv} es el tiempo que la lavadora consume vapor, C_{vr} es el consumo de vapor real de la lavadora en una hora y C_{vn} el consumo de vapor nominal en una hora

Los resultados obtenidos del análisis muestran cómo las lavadoras de 110 kg de capacidad no consumen los 248 kg/h de vapor que refleja la chapa, sino 45.5 kg/h. El mismo comportamiento es semejante para todas las lavadoras de diferentes capacidades y para los tumblers en un menor grado, puesto que estos nominalmente reflejan 250kg/h y realmente consumen alrededor de los 200 kg/h.

En la figura 2.7 se puede apreciar la estratificación de los resultados por tipo de equipo, los tumblers continúan siendo los equipos más consumidores (66% de la demanda total), sin embargo, consumen 410 kg/h menos que el valor nominal. Las lavadoras dejaron de ser un gran peso en el balance de equipos consumidores al consumir 1421 kg/h menos que los valores totales de chapa.

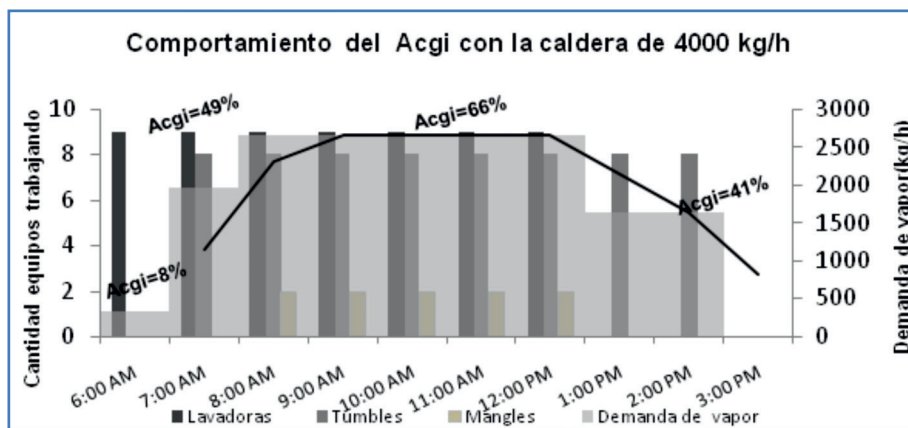
Figura 2.7. Estratificación de consumos nominales y reales por equipos.



Aprovechamiento de la capacidad de generación instalada

El aprovechamiento de la capacidad de generación instalada (Acgi) es la razón entre el consumo de vapor real y la capacidad de producción de vapor. Al estudiar el comportamiento de dicho parámetro en una jornada de trabajo promedio, en la que se procesan cinco toneladas diarias de lencería utilizando la caldera de 4000 kg/h, se obtuvo la siguiente figura.

Figura 2.8. Comportamiento del Acgi con la caldera de 4000 kg/h.



En la figura anterior se aprecia que el pico de la demanda de vapor se produjo entre las 8 am y las 12 pm, momento en que se encontraban funcionando todos los equipos y donde solo se logró aprovechar hasta un 66% de la capacidad de generación instalada (4000 kg/h). De los valores anteriores se concluye que dicha caldera para las condiciones de trabajo presenta un alto grado de sobredimensionamiento ($1 - \text{Acgi}$), el mismo es de un 34% en el momento de mayor demanda. El índice de consumo de combustible con las condiciones anteriores se comporta alrededor de los 80 litros por hora, lo que equivale a 800 litros para una jornada laboral de diez horas.

Aunque la máxima demanda de vapor de la lavandería en una hora excede la posibilidades del generador de 2000 kg/h, es posible trabajar con el mismo aplicando una adecuada planificación de la utilización de los equipos, y con ello se logran mayores por cientos de aprovechamiento de la capacidad de generación.

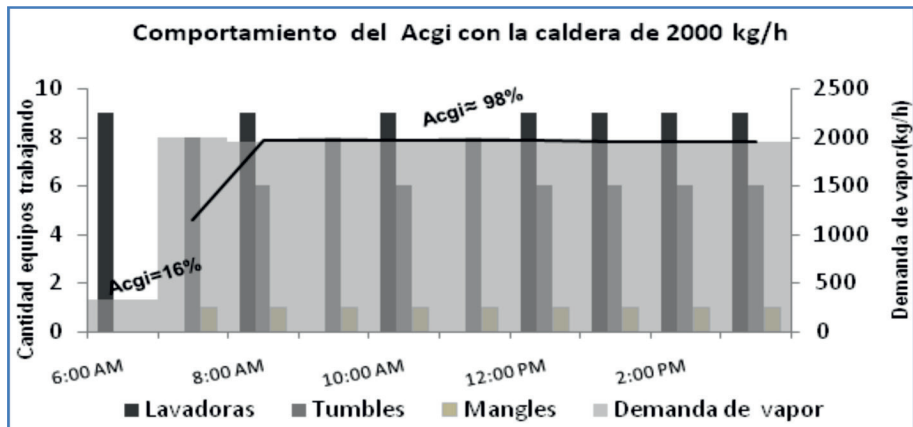
El indicador de consumo de combustible mejora también puesto que el mismo se encuentra alrededor de los 66 litros por hora, lo que presupone un gasto de 660 litros en una jornada laboral de diez horas, valor inferior al que se obtiene en las mismas condiciones trabajando con la caldera de cuatro toneladas.

Registro de Oportunidades de ahorro

Después de terminada las primeras fases del intercambio intensivo de ideas quedaron como principales medidas de ahorro:

1. Control trimestral del coeficiente de exceso de aire de las calderas.
2. Nueva estrategia operacional basada en el uso de la caldera de dos toneladas (figura 2.9).

Figura 2.9. Comportamiento del Acgi con la caldera de 2000 kg/h.



Actualmente la lavandería tiene producciones entre tres y cinco toneladas de lencería diarias, en temporada alta varía entre cinco y siete. Se propone para jornadas normales de trabajo y hasta producciones de cinco toneladas al día, usar la caldera de 2000 kg/h con los equipos que se relacionan en la figura 2.9. Para producciones mayores de las cinco toneladas se propone utilizar también dicha caldera empleando jornadas laborales más extensas. El uso de esta estrategia logra estabilizar el aprovechamiento de la capacidad de generación en un valor alrededor del 98 %, con un factor de carga de 0.89 y un respectivo menor grado de sobredimensionamiento.

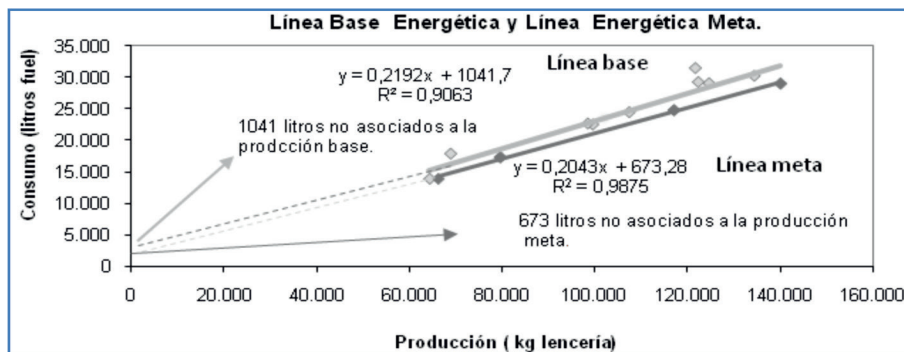
El ahorro que se produce en una jornada laboral de diez horas utilizando la caldera de dos toneladas respecto a la caldera de cuatro toneladas es de 14 litros de fuel en una hora, lo que equivale a 140 litros diarios. En un mes se lograrían ahorros de 4200 litros de combustible, lo que se transforma en ganancias económicas anuales equivalentes a cerca de 50000 litros de fuel oil para la entidad.

Resultados de la planificación

Como principales resultados de la planificación energética se obtuvieron resultados, cuya documentación y manejo son de gran importancia para el desempeño energético de la entidad. Entre los principales resultados están:

- Establecimiento de una Línea de base energética (figura 2.10). Para la confección de la misma se utilizó el comportamiento histórico después de filtrar los meses de sobreconsumo. En dicha etapa se empleó la caldera de 4000 kg/h sin una estrategia operacional, por lo que el uso de la caldera de dos toneladas presupone desempeños mejores.
- Revisión de los indicadores de desempeño establecidos y establecimiento de la energía no asociada a la producción como un nuevo indicador indispensable para procesos que usan vapor.
- Uso de la Línea energética meta como herramienta para alcanzar mejores logros. Para trazar la misma en la figura 2.10, se utilizan los valores esperados a partir de la estrategia operacional trazada en la que se emplea la caldera de 2000kg/h todo el año.

Figura 2.10. Línea base energética y Línea energética meta.



Conclusiones parciales del capítulo II

1. La caracterización del consumo de vapor de las calderas pirotubulares de la ciudad de Cienfuegos indica que el 83,33 % se utiliza para la cocción de alimentos.
2. El potencial de producción de vapor saturado en capacidad instalada en las 13 salas de calderas pirotubulares estudiadas es de 19 870 kg/h.
3. En la muestra estudiada la mayoría de las calderas se encuentran sobredimensionadas en más de un 50 % y se demuestra que solo se aprovecha el 48,22 % de la capacidad de producción de vapor, el sobredimensionamiento promedio es de 51,78 %.

CONCLUSIONES GENERALES

El deterioro de los sistemas energéticos ha provocado la salida del servicio de gran cantidad de consumidores, un 83,33 % de los cuales se emplea en la cocción de alimentos, han llevado a que en la actualidad exista un sobredimensionamiento de la capacidad de generación de vapor saturado en la ciudad de Cienfuegos de un 51,78 %.

El factor de carga en las calderas pirotubulares analizadas es muy bajo en su mayoría, el valor promedio es de 0,61; se consume solo algo más de la mitad de la necesidad de consumo real instalado, a pesar de que en algunos casos los sistemas energéticos tienen incorporados consumidores improductivos representados en los escapes de vapor a la atmósfera y en pérdidas por falta de aislamiento.

Los índices o valores de sobredimensionamiento y factor de carga se complementan y demuestran que se están subutilizando en gran medida las potencialidades energéticas instaladas en la ciudad.

Las condiciones reales de trabajo de las calderas pirotubulares con alto sobredimensionamiento y bajo factor de carga conllevan a que la eficiencia exergética promedio de las calderas estudiadas esté baja, con un valor de 24,13%, el costo exergético unitario del vapor sea de 0,0002778 \$/kJ, y el costo de producción de una tonelada de vapor sea de \$218,18.

Se demuestra que en las calderas instaladas existe posibilidad técnica de aprovechar el potencial térmico disponible utilizando turbulizadores de cinta en el 95 % de las calderas evaluadas. Su selección está en función del costo de adquisición, del tiro disponible y del exceso de temperatura.

La lavandería que se estudia, demanda solamente 2660 kg/h de vapor para utilizar todos sus equipos, valor inferior a los 4492 kg/h que se manejaba en demandas anteriores a la prueba realizada. Los tumbles representan el 66% de la demanda total de vapor de la lavandería y en las condiciones de explotación de la lavandería utilizando la caldera de 4000kg/h provoca que solo se aproveche hasta un 66% de la capacidad de generación instalada. Por lo que se propone en el caso de análisis utilizar la caldera de 2000 kg/h en temporada alta mediante estrategias operacionales, en la que se planifican los equipos a utilizar, y mediante la cual se logra aprovechar hasta el 98% de la capacidad de generación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Armas Valdés, J. C., & CEEMA. (n.d.-a). Aplicación del segundo principio de la termodinámica a casos de estudios de un sistema de climatización centralizada por agua helada.
- Armas Valdés, J. C., & CEEMA. (n.d.-b). Evaluación de potenciales de ahorros técnicos de la exergía, dirigida a la determinación del costo real de los flujos exergético y monetario de sistemas de climatización centralizados.
- Balwant Yugesftwar, A. (2009). Establecer expresiones de pérdidas por calor sensible y rendimiento térmico en calderas pirotubulares aplicando métodos experimentales y técnicas de I.A. Universidad de Cienfuegos.
- Borroto Nordelo, A. (2000). Ahorro de energía en la generación y distribución del vapor.
- Borroto Nordelo, A., & Rubio González, A. (2007). Combustión y generación de vapor.
- CONAE. (1997). Metodología para el desarrollo de diagnósticos energéticos en sistemas de generación y distribución de vapor.

- Faires, Virgil, M. (1987). Termodinámica. Ciudad de La Habana: Revolucionaria.
- García San José, R. (2001). Rendimiento de generación estacional con calderas de agua caliente.
- González Alonso, A. (2008). Caracterización del sobredimensionamiento de las calderas en el sector de la salud en Cienfuegos. Universidad de Cienfuegos.
- Gopal Ram, K. (2009). Influencia de las pérdidas por radiación en las calderas pirotubulares. Universidad de Cienfuegos.
- Kern Donald, Q. (1979). Procesos de transferencia de calor. Ciudad de la Habana: Editorial Pueblo y Educación.
- Lapido Rodríguez, M. J. (1998). Incremento de la eficiencia térmica en calderas pirotubulares por disminución de las pérdidas por calor sensible. (Doctor en Ciencias Técnicas). Universidad de Cienfuegos.
- Lapido Rodríguez, M. J., Álvarez Guerra Plasencia, M. A., Castellanos Álvarez, J. A., Roque Díaz, P., & Armas Valdés, J. C. (2006). Termodinámica avanzada.
- Lapido Rodríguez, M. J., Castellanos Álvarez, J., & Armas Valdés, J. C. (n.d.). Métodos de análisis termodinámicos.
- Manual del fabricante. (n.d.). Ahorros de combustible y ventajas adicionales con generadores de vapor CLAYTON.
- Mingot, T. de G. (1988). Pequeño Larouse de Ciencias y Técnicas. Ciudad de la Habana: Editorial Científico-Técnica.
- Pérez Garay, L. (1989). Generadores de vapor. ENPES.
- República de Cuba. Comisión Nacional de Energía. (1987). Sistemas de generación y distribución de vapor, cálculos rápidos. Ciudad de la Habana.
- Rubio González, A. M. (2000). Generadores de vapor: Funcionamiento y explotación. Santa Clara.

- Shields, C. D. (1969). Calderas, tipos, características y funciones. Ciudad de la Habana: Edición Revolucionaria.
- Tanquero, N., Aballe, L. M., & Reyes, N. (1987). Guía metodológica para proyectos de curso de generadores de vapor. Ministerio de Educación Superior.
- Torres Cuadras, C. (1991). Exergoeconomía simbólica metodología para el análisis termoeconómico de los sistemas energéticos. Universidad de Zaragoza.
- Vidal, D. (2010). Determinación del factor de carga en las calderas pirotubulares en la ciudad de Cienfuegos. (Máster en Eficiencia Energética). Universidad de Cienfuegos.
- Vidal, D., & Lapido Rodríguez, M. J. (2010). Determinación del factor de carga en las calderas pirotubulares de la provincia de Cienfuegos.

En la obra se aborda la influencia de la eficiencia de las instalaciones energéticas, desde los puntos de vista energético, mecánico, económico y medio ambiental, donde existen generadores de vapor pirotubulares en condiciones subutilizados o explotados en condiciones de cargas inferiores a las nominales. Se realiza un estudio a instalaciones de calderas en la ciudad de Cienfuegos en sus condiciones reales de trabajo, se exponen las generalidades de las pérdidas por radiación y calor sensible, según diferentes fuentes bibliográficas y resultados de investigación, empleando datos experimentales. Finalmente se analizan cuatro casos, donde se incluyen resultados de los métodos aplicados para la planificación energética y el incremento de eficiencia en la generación y el consumo de vapor de las calderas estudiadas.



ISBN: 978-959-257-429-8

