



INSTITUCIÓN AUTORIZADA: Empresa de Calderas ALASTOR Cienfuegos.

**DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CARGA EN LAS
CALDERAS PIROTUBULARES EN LA CIUDAD DE
CIENFUEGOS.**

TESIS EN OPCIÓN AL GRADO DE MASTER EN CIENCIAS TÉCNICAS

Autor: Ing. David Armando Vidal Moya.

**Tutor: Dra. Margarita J. Lapido Rodríguez.
Universidad "Carlos Rafael Rodríguez"
Cienfuegos.**

Cienfuegos. Cuba. 2010.



Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos: “Carlos Rafael Rodríguez” como parte de la culminación de los estudios de la Maestría en Eficiencia Energética, autorizando a que el mismo sea utilizado por la institución para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos ni publicado sin la aprobación del autor.

Firma del Autor

Los abajo firmantes, certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdos de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura, referido a la temática señalada.

Firma Información Científico Técnica

Firma Vice Decano

Firma Tutor

Firma Sistema de Documentación de Proyecto

SÍNTESIS

SÍNTESIS

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

Se hace un estudio con los datos obtenidos, del trabajo de las calderas de diferentes capacidades de producción de vapor instaladas en la ciudad de Cienfuegos en sus condiciones reales de operación, para determinar el factor de carga de cada una de ellas, y el promedio del factor de carga en la ciudad. Se analizan las principales pérdidas energéticas que ocurren y su aumento al verse afectadas por el factor de carga cuando trabajan en condiciones reducidas de capacidad.

Aplicando métodos termoeconómicos se determina el costo de producción del vapor saturado en cada una de las calderas y el promedio en la ciudad de Cienfuegos.

ÍNDICE

Tabla de contenido

Tabla de contenido6

INTRODUCCIÓN	11
Antecedentes del Problema	11
Justificación	12
Título Descriptivo del Problema	12
Formulación del Problema	13
Objetivo General	13
Objetivos Específicos	13
Hipótesis	14
Método de Investigación	14
El método empleado en la investigación es el método experimental.	14
Planteamiento Metodológico de la Investigación	14
Resultados Esperados	15
Población y Muestra	16
Viabilidad	16
CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	18
1.1 Calderas o generadores de vapor	18
1.2 Reseña histórica de las calderas pirotubulares	19
1.3 Clasificación de las calderas pirotubulares	21
1.4 Estructura y componentes	21
1.5 Funcionamiento	23
1.6 Aplicaciones	24
1.7 Tendencias del desarrollo según los criterios de algunos fabricantes	24
1.7.1 UMISA	24
1.7.2 PIROBLOC	25
1.7.3 LOOS INTERNATIONAL	27
1.7.4 GARIONNINAVAL	28
1.7.5 Resumen de las tendencias	28
1.8 Eficiencia	29
1.8.1 Radiación y pérdidas por radiación	30
1.8.2 Pérdidas con los gases de la combustión	36

1.9	Indicadores de eficiencia energética	40
1.9.1	Indicadores Termodinámicos	40
1.9.2	Indicadores Económicos-Termodinámicos	42
1.10	Otras consecuencias negativas	45
1.11	Conclusiones Parciales del Capítulo I	47

CAPÍTULO II Caracterización de la generación de vapor en calderas pirotubulares en la ciudad de Cienfuegos 49

2.1	Generalidades de la generación de vapor en calderas pirotubulares en la Ciudad de Cienfuegos	49
2.2	Caracterización particularizada de las salas de calderas	52
2.2.1	Facultad de Ciencias Médicas	53
2.2.2	Hospital Provincial "Gustavo Aldereguía Lima"	53
2.2.3	Hospital Pediátrico Provincial	55
2.2.4	Hogar de Ancianos	55
2.2.5	Hospital "Mártires de Girón"	56
2.2.6	Comedor Escolar	57
2.2.7	Tecnológico "5 de Septiembre"	57
2.2.8	Instituto Superior Pedagógico "Conrado Benítez"	58
2.2.9	Universidad "Carlos Rafael Rodríguez"	58
2.2.10	Fábrica de Conservas "El Faro"	58
2.2.11	Estadio "5 de Septiembre"	59
2.2.12	Lavandería "Unicornio"	59
2.2.13	Combinado Pesquero Industrial	60
2.3	Evaluación del sobredimensionamiento	61
2.4	Conclusiones parciales del capítulo II	64

Capítulo III Cálculo del factor de carga en las calderas pirotubulares de la ciudad de Cienfuegos 66

3.1	Análisis del factor de carga	66
3.1.1	Factor de carga	66
3.2	Método para el cálculo del factor de carga	68
3.3	Aplicación del método	71
3.3.1	Facultad de Ciencias Médicas	71
3.3.2	Hospital Provincial Gustavo Aldereguía Lima	72

3.3.3	Hospital Pediátrico "Paquito González"	73
3.3.4	Hospital Mártires de Girón	73
3.3.5	Comedor Escolar	74
3.3.6	Tecnológico 5 de Septiembre	74
3.3.7	Instituto Superior Pedagógico	74
3.3.8	Universidad Carlos Rafael Rodríguez	75
3.3.9	Fábrica de Conservas El Faro	75
3.3.10	Estadio 5 de Septiembre	76
3.3.11	SERVISA	76
3.3.12	Combinado Pesquero	76
3.3.13	Resumen	77
3.4	Análisis de los resultados	78
3.5	Conclusiones parciales del capítulo III	81
CAPÍTULO IV ANÁLISIS ECONÓMICO		83
Procedimiento para el cálculo del costo de producción de vapor en cada una de las salas de calderas estudiadas y el correspondiente al municipio Cienfuegos		83
4.1	Cálculo de la eficiencia exergética de la instalación	83
4.1.1	Cálculo de la exergía del vapor saturado	84
4.1.2	Cálculo de la exergía del agua de alimentar	85
4.1.3	Cálculo del calor disponible del combustible (fuel-oil)	86
4.1.4	Cálculo de la eficiencia exergética	87
4.2	Cálculo del costo de producción del vapor saturado	88
4.2.1	Cálculo del factor de recuperación	88
4.2.2	Cálculo del costo zonal	88
4.2.3	Cálculo del costo exergético del combustible	89
4.2.4	Cálculo del costo exergético del agua	89
4.2.5	Cálculo del costo exergético unitario del vapor	90
4.2.6	Cálculo del costo del costo de producción del vapor saturado	90
4.3	Impacto medioambiental	94
4.4	Conclusiones parciales del capítulo IV	95
CONCLUSIONES GENERALES		97
RECOMENDACIONES		99

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Antecedentes del Problema

En el marco de la Revolución Energética es necesario investigar con qué eficiencia se realizan las actividades industriales y de servicios, especialmente en un país que no tiene abundantes recursos energéticos. 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 termoenergético 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 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 numerosos 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 que tengan un bajo factor de carga, afectando considerablemente la eficiencia energética general de la instalación y por consiguiente la salud económica de las entidades, por cuanto se refleja esta situación en el costo final de producción del vapor.

Todo lo anterior ha sido corroborado en trabajos anteriores realizados por la Empresa de Calderas ALASTOR Cienfuegos, la cual presta los servicios de instalación, puesta en

marcha y mantenimiento a estos equipos en el territorio de la ciudad y la provincia, referidos a conocer la eficiencia con que trabajan los generadores de vapor pirotubulares, así como en Proyectos de Cursos y Tesis de Grado, efectuados por estudiantes de grados terminales de la carrera de Mecánica de la Universidad de Cienfuegos, llegándose a conocer que los mismos trabajan con bajos factores de carga.

Justificación

El trabajo de una caldera pirotubular con cargas inferiores a las de diseño ocasiona un apreciable incremento de las pérdidas que normalmente ocurren en las mismas. Se producen continuamente arranques y paradas del quemador, con las consiguientes 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, con el consiguiente enfriamiento del horno. Igualmente ocurre aumento de las pérdidas por radiación, presentes en todo momento del funcionamiento de la caldera, y por tanto presentes también en los momentos en que se encuentra apagado el quemador. Todo esto trae aparejado un sobreconsumo de combustible y energía eléctrica, y por tanto pérdidas económicas.

Título Descriptivo del Problema

El trabajo se titula Determinación del factor de carga en las calderas pirotubulares de la ciudad de Cienfuegos y será realizado mediante la toma de datos de producción de vapor nominal, producción de vapor real, tiempo real de trabajo de la caldera y el quemador, y capacidad instalada en las calderas objeto de estudio.

Formulación del Problema

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 inmensa 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, siendo posible atenuar dichos efectos negativos haciendo una buena selección del equipo, 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.

Objetivo General

Determinar el factor de carga y su influencia en los costos de producción de vapor de los generadores de vapor pirotubulares instalados en la ciudad de Cienfuegos.

Objetivos Específicos

1. Caracterizar el grado de sobredimensionamiento de las calderas pirotubulares en explotación.

2. Determinar el factor de carga de las calderas pirotubulares en la ciudad de Cienfuegos.
3. Obtener los costos evitables de producción de vapor en las calderas pirotubulares evaluadas.
4. Determinar el costo de producción de vapor de cada caldera y el promedio de las instaladas en la ciudad.

Hipótesis

Medir y registrar los tiempos de trabajo y paradas del quemador así como los parámetros termodinámicos de las calderas pirotubulares, permiten determinar el factor de carga y el costo de producción de vapor en las instalaciones en explotación.

Método de Investigación

El método empleado en la investigación es el método experimental.

Planteamiento Metodológico de la Investigación

Para conseguir los objetivos propuestos el trabajo será estructurado de la siguiente manera:

1. Diseño de la metodología de la toma de datos necesarios.
2. Toma de los datos nominales de las calderas.
3. Registro de los tiempos reales de trabajo y paradas de los quemadores de las calderas.
4. Registro de los parámetros termodinámicos durante la explotación.
5. Toma de los datos de los consumidores para cada caldera.

El trabajo se desarrollará siguiendo los siguientes pasos o tareas:

1. Realizar una búsqueda bibliográfica respecto al tema de las calderas pirotubulares.
2. Caracterizar el uso del vapor generado en las calderas pirotubulares.
3. Caracterizar el potencial de producción de vapor saturado en la ciudad.
4. Caracterizar cada sala de calderas en cuanto a equipamiento y consumo de vapor saturado.
5. Determinar el por ciento de aprovechamiento de la capacidad de generación de vapor saturado.
6. Determinar el grado de sobredimensionamiento de cada caldera y el valor promedio.
7. Caracterizar el factor de carga y su influencia en la eficiencia de las calderas.
8. Calcular el factor de carga de cada caldera y el valor promedio.
9. Evaluar a través de un método termoeconómico el costo exergetico unitario del vapor en cada caldera.
10. Calcular el costo de producción de vapor en cada caldera y el promedio en la ciudad.
11. Evaluar las variaciones de la eficiencia exergetica y del costo de producción de vapor con la variación del flujo de vapor saturado producido.

Resultados Esperados

1. Comprobar que las calderas se encuentran sobredimensionadas, o sea, que el consumo nominal instalado está por debajo de su potencial de generación de vapor.

2. Comprobar que estas calderas se encuentran trabajando con un factor de carga muy bajo.
3. Demostrar que debido al sobredimensionamiento y el bajo factor de carga, se producen pérdidas energéticas y económicas muy superiores a las establecidas por el fabricante y aceptadas en la literatura.

Población y Muestra

Para la consecución de los objetivos propuestos se tomarán datos de los parámetros de funcionamiento de las calderas que forman el universo de estos equipos instalados en la ciudad de Cienfuegos.

Viabilidad

El trabajo se realizará mediante la toma de datos reales de trabajo en las calderas pirotubulares instaladas en la ciudad de Cienfuegos, que se encuentran registradas y tienen relaciones contractuales con la Empresa de Calderas ALASTOR.

CAPÍTULO I

CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 Calderas o generadores de vapor

Las calderas o generadores de vapor son un elemento esencial en el funcionamiento de gran cantidad de instalaciones industriales y de servicios, pudiendo afirmarse que 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.

En los lugares donde se encuentran instaladas constituyen uno de los mayores, cuando no el mayor, de los equipos consumidores de portadores energéticos, determinando su estado o funcionamiento, por tanto, en la mayoría de los casos, la eficiencia energética y económica del proceso e incluso de la entidad, lo que obliga a diseñar estrategias compatibles con las posibilidades económicas del país, debido a que la crisis energética actual ha disparado aceleradamente los precios hasta niveles nunca antes vistos, además el mal funcionamiento de las calderas, es el responsable de la emisión al medio ambiente de una gran cantidad de contaminación producida durante la combustión del combustible como fuente primaria de energía.

El término “caldera” se aplica a un dispositivo para generar (1) vapor para fuerza, procesos industriales o calefacción; o (2) agua caliente para calefacción o para uso general. Por razones de sencillez de comprensión, a la caldera se le considera como un productor de vapor en términos generales. (15)

Inicialmente se les denominó calderas hasta que en una etapa más reciente se les comenzó a llamar generadores de vapor.

Lo define Ángel Rubio 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. (17)

Por su parte Pérez Garay nos 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. (16)

Similar definición nos brinda Aníbal Borroto...es un 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. (5)

Muy parecidas definiciones encontramos en los libros de Nelson Tanquero (21) y en el clásico Shields.(19)

1.2 Reseña histórica de las calderas pirotubulares

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 trajeron 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 logró introduciendo tubos

de pequeños diámetros inmersos en la masa de agua, a través de los cuales circulan los gases calientes provenientes de la combustión, transfiriendo a su paso el calor, lo que aumentó 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 pueden ser clasificados 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, encareciéndose por esta razón la instalación.

Las calderas pirotubulares se adaptan al consumo de cualquier tipo de combustible, tanto sólido, líquido como gaseoso, funcionando 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.

1.3 Clasificación de las calderas pirotubulares

Las calderas de tubos de humos, además de lo ya expresado, se clasifican de la manera siguiente:

1. De hogar exterior o de hogar interior. En el primer caso la combustión ocurre fuera de la estructura de la caldera. En el segundo caso la combustión ocurre en una cámara cerrada (horno u hogar), dispuesto en el interior de la caldera.
2. Horizontales o verticales. Según la forma de recorrido de los gases de la combustión.

1.4 Estructura y componentes

Las calderas pirotubulares están compuestas:

- Hogar o tubo central. Es la cámara o lugar donde ocurre la quema del combustible con la consiguiente liberación de calor. Se trata de un tubo de mucho mayor tamaño que los demás que la componen.
- Tubos de humos o fluses: Es el conjunto de tubos de mucho menor tamaño, por los que circulan los gases de la combustión luego de abandonar el hogar. A través de sus paredes los gases calientes van transfiriendo calor al agua.
- Placas: Son las planchas metálicas que limitan en ambos extremos el tamaño o volumen de la cámara de la caldera, a estas placas van sujetos mediante soldadura, mandrilado o ambos, el hogar y los tubos de humos.

- Casco o carcasa: Constituye la envoltura exterior o cuerpo de acero que contiene o soporta los demás componentes.
- Cámara de agua: Corresponde a la parte del volumen de la caldera que ocupa el agua en su interior.
- Cámara de vapor: Corresponde a la parte del volumen de la caldera que ocupa el vapor producido en su interior.

Además de estas partes que conforman su estructura, la caldera como equipo para su funcionamiento necesita de otros agregados como son:

- Quemador: Este es el encargado de lograr una buena mezcla del aire y el combustible e inyectarlos al horno a la temperatura y presión adecuadas para su combustión.
- Bombas de combustible: Son las encargadas de suministrar el combustible con los parámetros adecuados desde un tanque de almacenamiento hasta el quemador.
- Bombas de agua de alimentación: Como su nombre lo indica son las encargadas de suministrar el agua a la caldera a la presión requerida, y reponer la que se va convirtiendo en vapor.
- Ventilador: Es el encargado de suministrar el aire necesario para la combustión.

En la figura siguiente se muestra la estructura y los componentes de una caldera pirotubular, con las partes y elementos que la componen para su funcionamiento. Se observan igualmente los fluidos de trabajo, los volúmenes que ocupan en el interior del equipo y la circulación de los gases de la combustión hasta su salida por la chimenea.

Esta imagen corresponde a las que fabrica la Empresa Productora de Calderas ALASTOR, bajo licencia de UMISA de España.

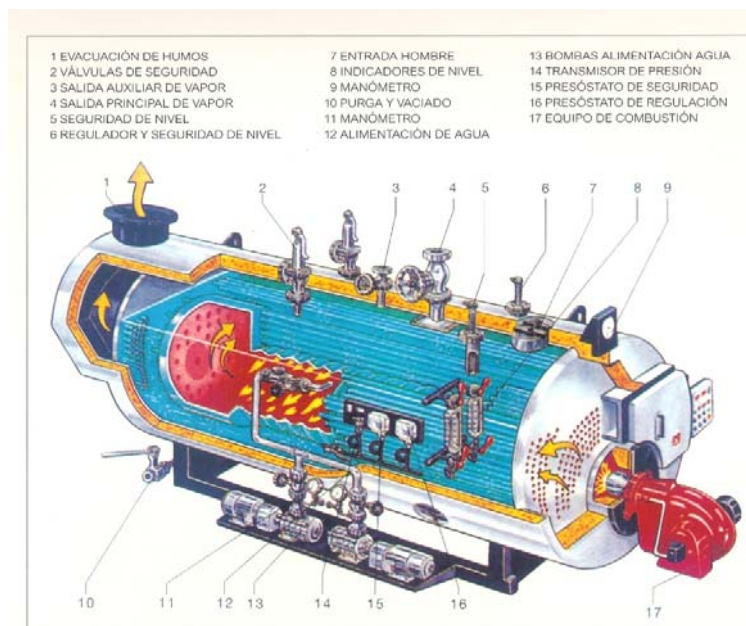


Figura 1.1 Generador de vapor pirotubular.

1.5 Funcionamiento

En el hogar de la caldera se produce la combustión del combustible, formándose 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.

1.6 Aplicaciones

Las calderas pirotubulares tiene una amplia utilización fundamentalmente en los sistemas de calefacción, para la producción de vapor requerido en los procesos industriales, donde la demanda de vapor es relativamente reducida, tomando en cuenta 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.

1.7 Tendencias del desarrollo según los criterios de algunos fabricantes

1.7.1 UMISA

La firma UMISA, con la cual tiene convenios de producción cooperada y bajo licencia de quien fabrica las calderas en Cuba la Empresa Productora de Calderas ALASTOR, utilizando las normativas de la primera, diseña sus generadores de vapor y calderas de fluido térmico atendiendo a:

- Un dimensionamiento óptimo del hogar de combustión para obtener bajos índices de contaminantes (óxidos de nitrógeno) que cumple con las normativas europeas.

- Rendimientos elevados, obtenidos mediante un óptimo trazado dimensional de los circuitos de gases consiguiendo unas velocidades de circulación de humos equilibradas.
- Las cámaras de inversión de gases se encuentran totalmente refrigeradas agua y exentas de material refractario que se interponga al intercambio térmico.
- La cámara de vapor y el plano de vaporización dimensionados de forma tal que se evitan los arrastres de agua.

Los tubos de humos están soldados y mandrilados sobre las placas tubulares mediante un método especial que evita las fugas en los ensambles, lo que garantiza que no se produzcan deformaciones de las mismas.

Tanto las puertas delanteras como las traseras están exentas en su totalidad de materiales refractarios. Las delanteras están cubiertas por el exterior con paneles de lana mineral para minimizar las pérdidas de calor por radiación.

La incorporación de recuperadores de calor del tipo agua-gases o bien aire-gases antes de la evacuación de los humos a la chimenea, permite obtener un aumento del rendimiento final del conjunto cifrado entre el 93 y 94 %, dependiendo de la temperatura final de los gases elegida en su diseño.

La amplia gama de fabricación de calderas UMISA comprende producciones desde 220kg/h hasta 40 ton/h y presión de 1,3 mPa.

1.7.2 PIROBLOC

PIROBLOC centra sus esfuerzos en la fabricación de calderas de fluido térmico, lo cual justifica a través de una serie de ventajas que presenta este con respecto a la producción de vapor los cuales se analizan a continuación.

- En el caso de la producción de vapor es necesario contar con un local exterior al área de producción o servicios, con paredes gruesas y espacios alrededor en los cuales no se puede realizar actividad alguna. Las caldeas de fluido térmico se pueden instalar en los propios locales de producción, significando esto entonces un ahorro de espacio y costo de la edificación.
- Es necesario someter a diversos tratamientos el fluido de trabajo (agua), para descalcificarla y así evitar las incrustaciones en las superficies de transferencia, lo que implica gastos en equipos adicionales y en productos químicos. Pero esto a su vez trae el riesgo de ante un mal funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas, introducir sal en el generador con las consecuencias de corrosión, acortamiento del poder de transmisión de calor y de la vida útil del equipo. Además al agua se le necesita controlar el pH igualmente en evitación de posible corrosión y oxidación de las superficies con las cuales tiene contacto. El fluido térmico, una vez introducido en el sistema y llenado este, no necesita tratamiento alguno, y su duración oscila entre 8 y 10 años, con lo cual reduce el costo por concepto del fluido de trabajo. Esto incluye que no se necesita reposición del fluido de trabajo.
- Se precisa efectuar el control de las sales y otros sólidos insolubles que quedan en el fondo de la caldera, ya que no son arrastradas por el vapor y van concentrándose en el fondo de la cámara de agua, pudiendo llegar a niveles que sean perjudiciales para la integridad de la caldera cuando no se efectúan correctamente las extracciones o purgas. El fluido térmico no presenta este inconveniente, por ser de hecho un lubricante.

- El trabajo con vapor de agua conlleva a la existencia en los consumidores y redes de distribución, de trampas de vapor, las cuales tienden con el tiempo y la falta de mantenimiento a no funcionar correctamente, lo que obliga a gastos, ya sea por reparación o por sustitución. El fluido térmico no necesita estos elementos y por tanto no incurre en estos gastos.
- En los momentos pico de producción en que la demanda de vapor es elevada, tomando en cuenta que se trabaja con vapor saturado, pueden ocurrir arrastres de agua que llegue a las redes y a los consumidores, alterando la transmisión de calor por las irregularidades de la temperatura del vapor, y por consiguiente, por la menor cantidad de calor latente contenido en el mismo. En algunos casos provoca interrupción del proceso fabril. Tampoco ocurre esto con el fluido térmico.
- En la caldera de vapor pirotubular el riesgo de explosión está constantemente presente, con las consecuencias que de ello se derivan, teniendo en cuenta las temperaturas y presiones a las que están sometidas. El fluido térmico alcanza los niveles de temperaturas requeridos para los mismos procesos, pudiendo alcanzar valores superiores a los 300°C, pero sin necesidad de presión.
- La regulación de la temperatura se logra de forma muy eficaz en las calderas de fluido térmico, lo que no ocurre con el vapor.

PIROBLOC tiene instaladas en Cuba 20 calderas de fluido térmico.

1.7.3 LOOS INTERNATIONAL

Construye calderas para diferentes usos: calefacción, agua sobrecalentada y vapor. La gama de producciones de estas últimas comprende generadores de vapor rápido desde 80

kg/h a 2 000 kg/h, con presiones de hasta 31 bar, hasta llegar a vapor saturado desde 10 000 kg/h hasta 55 000 kg/h y presiones de 30 bar, e incluso generadores de vapor sobrecalentado de dos hogares para producciones de 18 000 kg/h hasta 50 000 kg/h alcanzando presiones de 30 bar. Más del 95 % de las calderas salen de fábrica con economizador incorporado, aumentando el rendimiento en 5-7 %, reduciendo las pérdidas por los gases de combustión por debajo del 5 % además son adaptables a todos los sistema de quemadores, con bajas emisiones de NO_x .

1.7.4 GARIONNINAVAL

Las calderas GARIONNINAVAL se construyen igualmente para producir vapor de agua o calor a partir de fluido térmico, siempre utilizando novedosas tecnologías. Pueden llegar a producir hasta 20 000 kg/h de vapor con alta eficiencia, teniendo en cuenta que son construidas con tres pases, tienen incorporadas superficies recuperativas, y con quemadores de bajas emisiones de NO_x .

1.7.5 Resumen de las tendencias

Resumiendo las tendencias actuales en lo común para la generalidad de los constructores de calderas encontramos:

- 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 permite aumentar la eficiencia.

- Aumento en los parámetros de trabajo, léase altas producciones de vapor y presiones.
- Construcción de calderas con sobrecalentadores de vapor.
- Diseño y utilización de quemadores de bajas emisiones de NO_x .
- Calderas con inversión de llama.
- El uso de turbulizadores con el objetivo de incrementar la turbulencia de los gases y aumentar la transferencia de calor.
- Flexibilidad d combustibles.
- Eficiencia mantenida a cargas parciales.
- Uso del fluido térmico.

1.8 Eficiencia

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. (5)

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, pero se pueden señalar tres que son considerados los más importantes y se enumeran a continuación:

1. La combustión completa del combustible lograda con una mínima cantidad de aire en exceso. (5,16). Esto permite obtener la mayor cantidad de energía que pueda brindar el combustible utilizado.

2. El enfriamiento profundo de los productos de la combustión. (5)(16) 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, pues 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.(5)

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 debemos tenerla en cuenta desde varias aristas que comprenden el aprovechamiento del combustible, que lleva intrínseco el ahorro del portador energético utilizado, la seguridad de la operación del equipo, y esto redunda en beneficio del medio ambiente y la competitividad.

1.8.1 Radiación y pérdidas por radiación

Todos los cuerpos radian energía térmica. Dos cuerpos que se encuentran a diferentes temperaturas uno frente al otro se emiten radiación mutuamente, tanto el más caliente al más frío, como el más frío al más caliente. Como resultado el cuerpo más frío se calentará debido a que el más caliente radia más calor que el que recibe. La radiación térmica es una emanación de naturaleza similar a la de la luz y las ondas

electromagnéticas y se propaga a la misma velocidad que estas en el vacío, 300 000 km/seg.

La energía cinética de una molécula es función de su temperatura, al igual que su energía radiante. De esta manera podemos atribuir que la disminución de la velocidad se corresponde con emisión de energía radiante, mientras que aumento de la velocidad se corresponde con la absorción de energía radiante.

Las pérdidas por radiación tienen una gran importancia en las calderas pirotubulares 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 (13). Esto se demuestra a través de la fórmula:

$$q_{\text{R}} = \sqrt{\frac{D_{\text{máx}}}{100}} * A; \quad (\%) \quad (20)$$

Donde: $D_{\text{máx}}$ - 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 ¾ de la capacidad.

1,82 – en caso de ½ 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_{R} , se observa en la ecuación: (13)

$$q_{\text{R}} = \frac{400 * F * 30\,000}{B * Q_{\text{tp}} * 4,18} * \frac{T_{\text{t}}}{T_{\text{r}}}$$

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 q_s a través de la ecuación: (13)

$$q_s = \frac{400 * F * 30\,000}{B * Q_{ip} * 4,18} * \frac{D_n}{D_r}$$

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:

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

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 = $5,67 * 10^{-8}$ W/m²K⁴.

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

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

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

Donde:

A – Área superficial; (m²).

B – Flujo de combustible, (kg/s).

Qd – Calor disponible; (kJ/kg).

Tp – Temperatura exterior de las paredes; (K)

Ta – 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.

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

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

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

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:

$$q_{\text{R}} = \frac{A}{B} * [\alpha_{\text{conv}}(T_{\text{p}} - T_{\text{a}}) + CO * \{(\frac{T_{\text{p}}}{100})^4 - (\frac{T_{\text{a}}}{100})^4\}]; \quad (\%)$$

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, los tenemos en:

- Con respecto al consumo de combustible.

$$q_{\text{R}} = q_{\text{Rnom}} * \sqrt{\frac{B_{\text{nom}}}{B}}; \quad (\%)$$

Donde:

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

q_{Rnom} - 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.

$$q_E = q_{E_{nom}} * \frac{D_{nom}}{D}; \quad (\%) \quad (17)(5)$$

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 del generador 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 como 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.

$$q_s = q_{snom} \frac{D_{nom}}{D}, \quad (\%)$$

Donde:

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

q_{snom} —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)

1.8.2 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. Igualmente 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 serán 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. Según nuestra experiencia el tiempo de barrido nunca es menor a 10 segundos, tiempo en el cual para un quemador quemando fuel oil pueden ser incorporados al horno un volumen de aire como el calculado a continuación a partir de la composición elemental del combustible.

Composición elemental media del fuel-oil en %:

C ----- 83,7

H ----- 9,2

S ----- 3,6

O ----- 0,0

N ----- 1,0

W ----- 2,0

Cen ----- 0,5

$$V_a^0 = 0,0889 (C^t + 0,375 S^t) + 0,265 H^t - 0,0333 O^t \quad (\text{m}^3/\text{kg}) \quad (3)(19)$$

$$V_a^0 = 0,0889 (83,7 + 0,375 * 3,6) + 0,265 * 9,2 - 0,0333 * 0 \quad (\text{m}^3/\text{kg})$$

$$V_a^0 = 9,998 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Como se observa del resultado anterior, por cada kilogramo de combustible, en este caso fuel-oil que debe ser suministrado al horno para la combustión se necesitan 9,998 m³ de aire, que va a ser suministrado a una temperatura no mayor, como promedio, de 35 °C. Si tenemos en cuenta un quemador para una caldera de producción de 1 100 kg/h de vapor, que suministra 75,7 kg/h de combustible fuel-oil, necesitaría aproximadamente 756,85 m³ de aire en una hora, o lo que es igual, 126 m³ por cada proceso de arranque

que no van a ser utilizados en la combustión propiamente dicha, teniendo en cuenta como ya se mencionó que el barrido demora como promedio 10 segundos. Se agrava o crece el fenómeno negativo a medida que aumente el número de arranques en una hora.

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.

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_d} = \frac{(T_g - T_{sal} + 1^{\circ}C) \left(1 - \frac{q_d}{100}\right)}{Q_d} * 100; \quad (5)(16)(17)(21) \quad (%)$$

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, arrastrando consigo una considerable parte del calor que existe en el horno.

La constructora de generadores de vapor Clayton nos 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”. (3)

Y después enfatiza 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”. (3)

Para después plantear: “...en un proceso o carga en que se requiere operación intermitente, (por ejemplo paros diarios), entonces estas pérdidas podrían ser muy significativas”, (3) refiriéndose a las pérdidas de energía por enfriamiento.

Estos problemas son comunes, pues instalar calderas sobredimensionadas también es muy común teniendo que, 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 muy común 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.

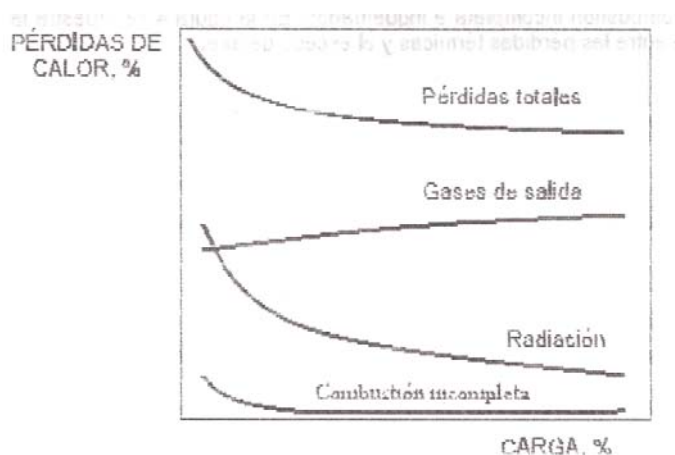


Figura 1.2 Comportamiento de las pérdidas con respecto a la carga. (5)

En la gráfica anterior se evidencia que la disminución de la carga a 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, sólo 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.

1.9 Indicadores de eficiencia energética

1.9.1 Indicadores Termodinámicos

Dentro de los indicadores termodinámicos de eficiencia energética, podemos señalar 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. (9). Y se presenta como:

$$\eta_G = 1 - q_h - q_i - q_{re}$$

Donde:

η_G – Rendimiento de generación instantáneo;

q_h - Pérdidas con los humos;

q_i - Pérdidas por inquemados;

q_{re} – Pérdidas por radiación;

-Rendimiento medio estacional

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

- Funcionamiento.
- Paradas.
- Arrancadas. (9).

Corresponde al funcionamiento el período o los 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 están produciendo tres pérdidas: las pérdidas por humos, las pérdidas por inquemados y las pérdidas por radiación al medio. En este período el rendimiento de generación estacional coincide con el rendimiento instantáneo.

Durante el periodo de las paradas el quemador se encuentra apagado, no se está produciendo el proceso de combustión, y por tanto no hay aporte de calor.

En estos períodos 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.

Por último, las pérdidas de arrancadas... 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. (9).

De lo anterior deducimos 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; viéndose afectada la primera por

las pérdidas mencionadas en los períodos de parada y de arranques, por lo que el rendimiento medio estacional será menor o igual al rendimiento instantáneo.

De las consideraciones anteriormente mencionadas veremos entonces que el rendimiento medio estacional disminuye cuando aumenta el número de horas de disposición de servicio con el quemador parado, ocurriendo 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:

$$\eta_{GE} = \frac{\eta_G}{1 + \left(\frac{1}{\Phi} - 1\right) * q_B} \quad (9)$$

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.

1.9.2 Indicadores Económicos-Termodinámicos

Estos indicadores consideran además de los aspectos termodinámicos, los económicos. En este caso tenemos al Costo de Producción de Vapor, el cual permite determinar cuánto cuesta producir una unidad de vapor a partir de los gastos en que se incurre, dentro de los cuales se encuentran el combustible y el agua, y de las condiciones termodinámicas en las que ocurre el proceso.

“... La Termoeconomía, término propuesto por Evans y Tribus en 1962, que nace como nueva disciplina en la década de los 60 tiene como objetivo estudiar la conexión entre Termodinámica y Economía, sentar las bases teóricas de una ciencia del ahorro de energía, y obtener así modelos que recojan la limitación que supone no disponer de una cantidad ilimitada de recursos naturales, buscando criterios generales que permitan evaluar la eficiencia y el coste de sus productos, en sistemas con un consumo intensivo de energía” (14)

“... 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.”(22)

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; $\left(\frac{\$}{ton}\right)$

El costo exergético unitario del vapor se calcula como:

$$CE_{vs} = \frac{CE_{comb} + CE_{agua}}{\eta_{exerg}} + \frac{C_z}{E_{vs}}$$

CE_{comb} - Costo exergético del combustible; $\left(\frac{\$}{kJ}\right)$.

CE_{agua} - Costo exergético del agua; $\left(\frac{\$}{kJ}\right)$

η_{exerg} - Eficiencia exergética.

C_z - Costo zonal; $\left(\frac{\$}{h}\right)$

E_{vs} - flujo exergético del vapor; (kW)

En esta ecuación están presentes como parámetros termodinámicos en el primer miembro la exergía del agua y el combustible y la eficiencia exergética de la instalación, y como parámetros económicos en el primer miembro los precios del agua y el combustible, y en el segundo miembro, dentro del costo zonal el costo de la inversión, el factor de recuperación de la inversión; además están presentes los flujos de cada una de las corrientes implicadas.

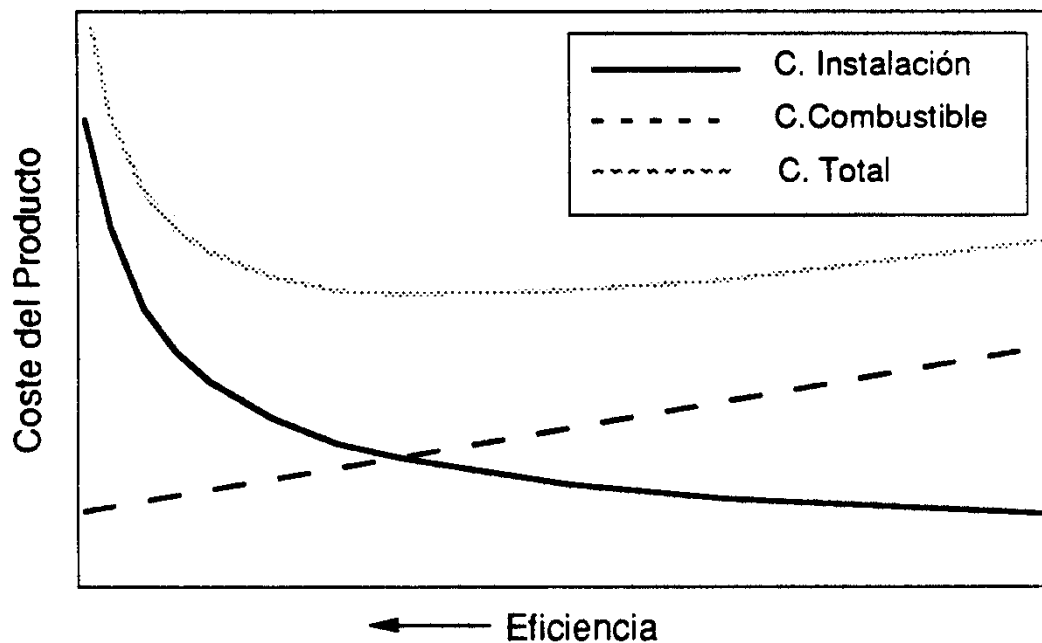


Figura 1.3 Influencia de los diferentes costos sobre el costo del producto y la eficiencia del proceso.

Cuando analizamos los tres términos vemos que:

1. A medida que aumenta el costo de la instalación, tomando en consideración como tal una nueva inversión con tecnología de punta o una mejora tecnológica

en una planta existente, aumenta la eficiencia pero igualmente se encarece el producto.

2. Con el aumento del costo del combustible también aumenta el costo del producto.
3. Cuando superponemos ambas curvas obtenemos el punto en el que con una inversión adecuada y un costo del combustible razonable obtenemos los valores adecuados de eficiencia y de costo del producto.

1.10 Otras consecuencias negativas

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 podemos enumerar:

- El consumo de energía eléctrica se eleva si tenemos en cuenta que 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, podemos señalar que 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 precisamente instantes después del arranque del quemador. Este fenómeno indica que 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 lográramos un trabajo continuo del quemador.

1.11 Conclusiones Parciales del Capítulo I

Para concluir podemos mencionar que:

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 del generador de vapor está determinada en gran medida por las pérdidas por 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. La Termoeconomía nos permite conocer el valor del costo de producción de un producto a través de los parámetros termodinámicos y económicos de las corrientes involucradas en el proceso.

CAPÍTULO II

CAPÍTULO II Caracterización de la generación de vapor en calderas pirotubulares en la ciudad de Cienfuegos

2.1 Generalidades de la generación de vapor en calderas pirotubulares en la Ciudad de Cienfuegos

En la ciudad de Cienfuegos existen en funcionamiento controladas por la Empresa de Calderas ALASTOR, 18 salas de calderas con equipos de diferentes capacidades de producción de vapor según los consumidores instalados en el momento de su puesta en funcionamiento.

En la tabla que se muestra a continuación se enumeran las salas de calderas según los organismos a que pertenecen y las funciones que realizan:

Tabla 2.1 Caracterización del consumo de vapor.

No.	ORGANISMO	CENTRO	COCINA	LAVANDERÍA	OTROS
1	MINSAP	Fac. Ciencia Médicas	x		
2	MINSAP	Hosp. Provincial GAL	x	x	Esterilización, ACS
3	MINSAP	Hosp. Pediátrico	x	x	Esterilización, ACS
4	MINSAP	Hogar de Ancianos	x	x	Esterilización, ACS
5	MINSAP	Hosp. M. de Girón	x		Esterilización, ACS
6	MINED	Comedor Escolar	x		
7	MINED	Tecn. 5 de Septiembre	x		
8	MES	Inst. Sup. Pedagógico	x		
9	MES	Universidad	x		
10	MICONS	Comedor Los 500	x		
11	MINAL	Fca. Cons. El Faro	x		
12	MINAL	Perla del Sur			Esterilización
13	MINAL	Amistad Cubano-Búlgara			Esterilización
14	INDER	Estadio 5 de Septiembre	x		
15	MINTUR	Lavandería		x	

		UNICORNIO			
16	MINAZ	Glucosa	x		
17	MINAL	Comb. Pesquero	x		
18	MINAGRI	Fca de Piensos	x		Secado

Las calderas de las fábricas de refrescos Perla del Sur y Amistad Cubano-Búlgara sólo trabajan dos días al mes como promedio por lo que su funcionamiento no es representativo a los efectos de la presente investigación.

En el caso de la Fábrica de Glucosa tampoco la tuvimos en cuenta por considerar que las producciones de vapor de sus calderas están muy por encima de lo que representa el promedio de las calderas instaladas en el territorio y pudiera ser objeto de un trabajo similar para su caso particular.

No se tomaron en cuenta las calderas de la Fábrica de Piensos por ser una entidad cuyo montaje responde a un proyecto de reciente estudio, y que no cuenta con un año de explotación. Esto presupone que las capacidades de las calderas instaladas se corresponden con las necesidades actuales del proceso productivo.

De esta forma contamos entonces con un potencial de 14 salas de calderas de las cuales se hicieron mediciones en 13 de ellas, representando esto un 92,86 % del total.

Las capacidades nominales de producción de vapor de las calderas en funcionamiento en las salas de calderas estudiadas se pueden observar en la siguiente tabla.

Tabla 2.2 Potencial de generación de vapor.

No.	ORGANISMO	CENTRO	CAPACIDAD NOMINAL (kg/h)
1	MINSAP	Fac. Ciencias Médicas	510
2	MINSAP	Hosp. Provincial GAL	4 000
3	MINSAP	Hosp. Pediátrico	2 500
4	MINSAP	Hogar de Ancianos	660

5	MINSAP	Hosp. M. de Girón	440
6	MINED	Comedor Escolar	1 000
7	MINED	Tecn. 5 de Septiembre	440
8	MES	Inst. Sup. Pedagógico	1 120
9	MES	Universidad	660
10	MINAL	Fca. Cons. El Faro	2 500
11	INDER	Estadio 5 de Septiembre	440
12	MINTUR	Lavandería UNICORNIO	4 000
13	MINAL	Comb. Pesquero	1 600
Producción nominal potencial			19 870

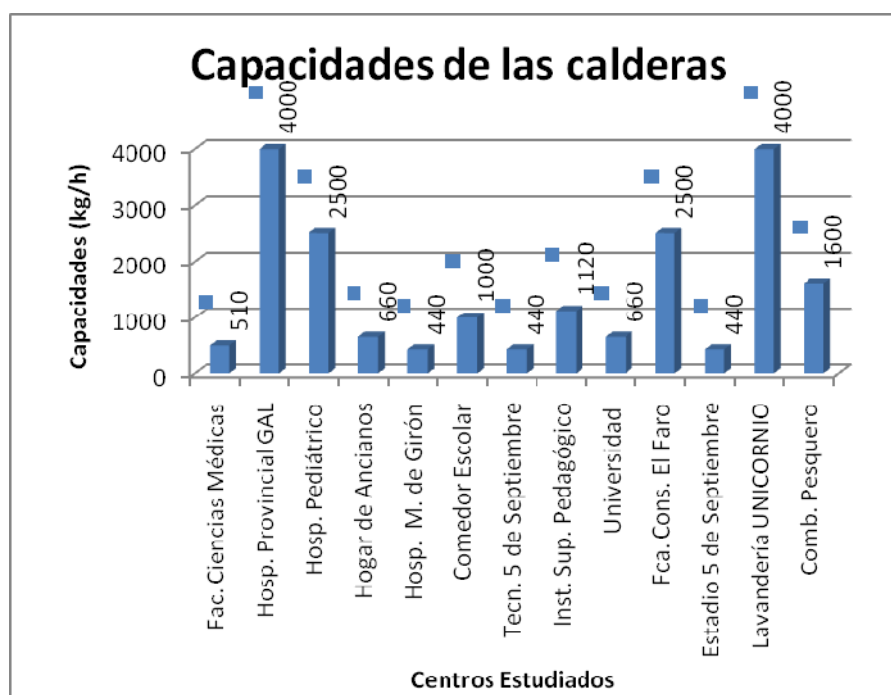


Figura 2.1 Capacidad nominal de producción de vapor por calderas.

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, representando el 92,31 %; 4 tienen incorporada una lavandería, lo que representa un 30,77 %; y 4 ofertan otro tipo de servicio como la esterilización o la obtención de agua caliente sanitaria (ACS), representando igualmente un 30,77 %.

En la inmensa mayoría de los casos las salas de calderas cuentan con dos de estos equipos de similar producción de vapor, en los lugares donde esto no ocurre se tomaron 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 si 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.

2.2 Caracterización particularizada de las salas de calderas

En los casos en que no se cuente con el consumo de vapor nominal de los tachos o marmitas, se asumirá para determinar el mismo el valor que aparece en la literatura 0,269 kg de vapor por litro de capacidad.

Teniendo la cantidad total de consumo de vapor según datos de chapa o estimados, lo afectamos por un coeficiente de simultaneidad de 0,8, factor que utilizan las entidades

que diseñan sistemas de vapor de este tipo como ALASTOR y MICONS, y que tiene en cuenta que no todos los equipos comienzan a funcionar al mismo tiempo y por tanto no se encuentran al mismo nivel de consumo.

2.2.1 Facultad de Ciencias Médicas

La Facultad de Ciencias Médicas cuenta con dos calderas ENCSAC con una producción nominal de vapor de 510 kg/h cada una, fabricadas en el año 1 982, con una superficie de evaporación de 9,8 m², diseñadas para producir vapor saturado a 10 kg/cm². Se encuentran trabajando a 6 kg/cm² de presión. Tienen cada una un quemador TK 4/45 A2 (TC), tipo pistola de suministro de combustible diesel a presión.

Su producción de vapor se destina a la cocción de alimentos en la cocina que en la actualidad cuenta con 6 tachos de 300 litros, 1 tacho de 200 litros y 1 tacho de 100 litros. Se necesitarían para un trabajo continuo al mismo tiempo de todos los consumidores 561 kg vapor/h. Pero como en la realidad esto nunca ocurre, entonces afectamos este total por un coeficiente de simultaneidad de 0,8, con lo que obtenemos una cantidad real de 448,8 kg vapor/h. Esta situación nos permite plantear que las calderas hoy tienen mayor capacidad de producción que la necesaria, por lo que se encuentran sobredimensionadas.

2.2.2 Hospital Provincial "Gustavo Aldereguía Lima"

Luego de una remodelación capital que incluyó su bloque energético de vapor casi en su totalidad, fueron instaladas dos calderas CMS-4 000, que producen 4 000 kg vapor/h. Cuentan con quemador Baltur BT-300 DSNM-D tipo pistola de suministro de fuel oil a presión.

En este caso existen tres áreas de consumo de vapor que son: cocina, lavandería y esterilización.

La cocina está equipada con marmitas marca Zanussi cuyos consumos de vapor tomados del catálogo del fabricante. El consumo total nominal de vapor equivale en la cocina a 612 kg/h; al afectarlo por el factor de simultaneidad entonces equivale a 489,6 kg/h, correspondiente a 5 marmitas de 100 litros y 4 marmitas de 200 litros.

En la lavandería fueron instaladas 6 lavadoras, 4 secadoras, 1 calandra, 1 mesa de planchado, 1 maniquí y 3 prensas universales que en total consumen 2 379 kg/h de vapor nominal; que al afectarlo por el coeficiente de simultaneidad queda entonces en 1 903,2 kg vapor /h.

Por su parte la sala de calderas tiene un consumo de 300 kg/h de vapor nominal: que al afectarlo por el coeficiente de simultaneidad queda entonces en 240 kg vapor/h como insumo para calentamiento de agua sanitaria y calentamiento del combustible.

En la esterilización se consumen 300 kg/h de vapor, que al afectarlo por el coeficiente de simultaneidad queda entonces en 240 kg vapor/h.

El consumo total de vapor nominal, por tanto, equivale a 3 591 kg vapor/h; y el real estimado al afectarlo por el coeficiente de simultaneidad equivale a 2 872,8 kg/. Como se observa está bastante por debajo con respecto a la producción nominal de la caldera teniendo como causa principal que en el proyecto original existían consumidores que luego no fueron instalados, entre los que podemos citar el servicio de agua caliente sanitaria al hotel para acompañantes que se construiría.

Estas calderas igualmente se encuentran sobredimensionadas.

2.2.3 Hospital Pediátrico Provincial

Cuenta con dos calderas CMS-2 500, que producen 2 500 kg vapor/h, con quemadores TEKENER OE-180 USOZ-3 de fuel oil a presión tipo pistola.

Aquí existen cuatro áreas de consumo de vapor: cocina, banco de leche, lavandería y esterilización.

En la cocina actualmente se cuenta con 1 marmita Fagor de 140 litros, 1 marmita PM 1 IV de 200 litros, 2 marmitas de 250 litros y 1 marmita de 175 litros, con un consumo nominal total de 320 kg de vapor por hora; que al afectarlos por el coeficiente de simultaneidad equivale a un consumo de 256 kg/h. además cuenta con 3 autoclaves y 1 secadora de ropa.

El consumo nominal total es de 712 kg de vapor por hora, que afectados por el coeficiente de simultaneidad equivalen a 596 kg/h.

En este caso se encuentra fuera de servicio prácticamente todos los equipos de lavandería, además de otros en la cocina y el sistema de agua caliente.

Lo anterior permite determinar que la caldera se encuentra sobredimensionada.

2.2.4 Hogar de Ancianos

En el hogar de ancianos se cuenta con una caldera Encsac, con una producción nominal de vapor de 660 kg/h, la que tiene un quemador marca EREBUS, de presión tipo pistola para combustible diesel. La red energética de consumo de vapor la componen cocina, lavandería y un calentador para ACS.

Los consumos en la cocina están representados por un tacho de 200 litros y uno de 100 litros. Su consumo nominal es de 164 kg de vapor por hora, siendo al real al afectarlo por el coeficiente de simultaneidad igual a 131,2 kg/h.

La lavandería mantiene funcionando una lavadora marca Romo, una secadora marca Girbau y un planchín marca Textima. El consumo nominal de vapor es de 185 kg/h, el que al ser afectado por el coeficiente de simultaneidad equivale entonces a 148 kg/h.

La suma del consumo de vapor asciende a 279,2 kg/h, de una necesidad potencial de 349 kg/h. Este consumo es bastante inferior a la capacidad de producción de la caldera, considerando entre otros factores que se encuentran fuera de servicio varios consumidores de los instalados originalmente tanto en cocina como en lavandería, así como que el servicio de esterilización, que lo reciben del Hospital Provincial por encontrarse fuera de servicio la esterilizadora.

Esta caldera se encuentra sobredimensionada.

2.2.5 Hospital "Mártires de Girón"

En este hospital fueron recientemente instaladas como parte de la remodelación total, dos calderas, así como una cocina completamente nueva y el servicio de esterilización. Las calderas son CMS-440, con una producción de vapor nominal de 440 kg/h, con quemadores Baltur BT-35 de presión tipo pistola para combustible diesel.

El consumo de vapor se distribuye entre una cocina con 5 marmitas de 100 litros y 1 de 200 litros, que tienen en total un consumo nominal de vapor de 436 kg/h; el cual al ser afectado por el coeficiente de simultaneidad equivale entonces a 348,8 kg/h.

Por su parte la esterilizadora consume 80kg/h.

En total estos equipos consumen 428,8 kg de vapor por hora.

Como se puede apreciar el consumo en este caso es prácticamente el mismo que la producción nominal de la caldera, y esto se justifica por el hecho de ser un sistema

energético a base de vapor con relativamente muy poco tiempo de explotación (alrededor de un año), en el cual todos los consumidores se mantienen trabajando.

En este caso ajusta la capacidad de producción de las calderas al consumo.

2.2.6 Comedor Escolar

Cuenta con una caldera Duro Dacovic con una producción de vapor nominal de 1 000 kg de vapor por hora. Tiene un quemador Steambloc de presión tipo pistola para combustible diesel.

Su red energética de consumo de vapor la componen 4 tachos de 300 litros y 4 tachos de 200 litros, los que en total tienen un consumo nominal de 600 kg de vapor por hora, pero que al afectarlos por el coeficiente de simultaneidad equivalen a 480 kg/h.

En este centro se encuentran fuera de servicio varios consumidores como la fregadora de bandejas y las mesas calientes.

La caldera se encuentra sobredimensionada para las condiciones actuales.

2.2.7 Tecnológico "5 de Septiembre"

Cuenta con una caldera CMS-440, con una producción nominal de 440 kg de vapor por hora, con un quemador RAY PDES-1Z de presión tipo pistola para combustible diesel.

Su red de consumo de vapor está constituida por 1 tacho de 300 litros y 3 tachos de 200 litros, con un consumo nominal de 245 kg de vapor por hora, el que al ser afectado por el coeficiente de simultaneidad equivale entonces a 196 kg/h.

El consumo real es muy inferior a la capacidad de producción de vapor, fundamentado en este caso en que están fuera de servicio otros tachos, mesas calientes y sistema de calentamiento de agua, contemplados en el proyecto original.

Por tanto esta caldera se encuentra también sobredimensionada.

2.2.8 Instituto Superior Pedagógico "Conrado Benítez"

Cuenta con dos calderas Jonh Tompsom con una producción nominal de vapor de 1 120 kg/h de vapor, con quemador BALTUR BT-50 de presión tipo pistola para combustible diesel.

La red de consumo de vapor está compuesta por 2 tachos de 300 litros, 2 tachos de 200 litros, 1 fregadora y 1 mesa caliente, los cuales tienen por consumo nominal 523 kg de vapor por hora, que al afectarlos por el coeficiente de simultaneidad equivalen a 418,4 kg/h.

De esto concluimos que la caldera se encuentra sobredimensionada.

2.2.9 Universidad "Carlos Rafael Rodríguez"

Cuenta con dos calderas CMS-660, con una producción nominal de 660 kg de vapor por hora, con quemadores BT-50 DSNM, de presión tipo pistola para combustible diesel.

El vapor producido es consumido en la cocina en la que existen funcionando 2 tachos de 300 litros y 1 tacho de 100 litros, con un consumo nominal total de 245 kg de vapor por hora, que al ser afectados por el coeficiente de simultaneidad equivalen a 196 kg/h.

Como se aprecia se encuentran sobredimensionadas, lo cual se debe a que se encuentran fuera de servicio varios tachos, la fregadora de bandejas y las mesas calientes.

Esta caldera se encuentra sobredimensionada para las condiciones de trabajo actuales.

2.2.10 Fábrica de Conservas "El Faro"

Cuenta con una caldera PKM de capacidad de producción nominal de 2 500 kg de vapor por hora, con un quemador de presión tipo pistola para combustible fuel oil.

Su red de consumo actual consta de 4 tachos de 200 litros y 10 tachos de 300 litros, los que en total tienen un consumo nominal de 1 020 kg/h, que al ser afectados por el coeficiente de simultaneidad equivalen a 816 kg/h.

El consumo se aleja bastante de la producción nominal de vapor por existir varios equipos de la línea de producción fuera de servicio, por lo que la caldera se encuentra sobredimensionada para las condiciones actuales.

2.2.11 Estadio "5 de Septiembre"

Cuenta con una caldera Lambda 440, con producción nominal de 440 kg de vapor por hora, con un quemador TEKENER TK-3/30 A2 (TC), tipo pistola a presión de diesel.

La red de consumo está compuesta por 2 tachos de 200 litros y 1 tacho de 100 litros, que representan un consumo nominal de 137 kg de vapor por hora, que al ser afectado por el coeficiente de simultaneidad equivale a 109,6 kg/h.

Aquí se encuentran sin instalar por diversas causas la mesa caliente y una fregadora de vajillas, aunque desde su inicio la caldera fue instalada con una producción de vapor mayor a las necesidades del proyecto.

Concluimos que se encuentra sobredimensionada.

2.2.12 Lavandería "Unicornio"

Este centro tiene una sala de calderas con una caldera Salcor Caren con una producción de vapor de 2 000 kg/h. Esta no forma parte del presente estudio ya que se encuentra fuera de servicio y además, sólo es operada cuando la lavandería no va a trabajar a toda su capacidad o cerca de esta.

Por otra parte cuenta con una caldera PKM-4/13, con una producción de vapor de 4 000 kg/h, la cual tiene incorporado un quemador TEKENER OE-300, tipo pistola a presión de fuel-oil.

El objeto social de la entidad es el lavado de la lencería de las unidades pertenecientes al turismo en gran parte de la región central del país, y para ello cuenta con equipamiento de la firma GIRBAU, compuesto por: 1 mangle, 2 secadoras de 22 kg, 4 secadoras de 55 kg, 1 secadora de 60 kg, 1 lavadora de 12 kg, 1 lavadora de 22 kg, 2 lavadoras de 55 kg, 4 lavadoras de 110 kg. Todos estos equipos tienen un consumo nominal de 4 071 kg de vapor por hora, el que al ser afectado por el coeficiente de simultaneidad, equivale a un consumo de 3 256,8 kg/h.

En este centro originalmente existía una cocina con consumidores de vapor, que fue eliminada al ser inaugurado un centro de elaboración, que presta el servicio de comida y meriendas.

La caldera se encuentra sobredimensionada para las condiciones de trabajo actuales.

2.2.13 Combinado Pesquero Industrial

Cuenta con una caldera Jonh Tompsom con producción nominal de vapor de 1 600 kg/h, con quemador Brock House tipo pistola a presión para combustible diesel.

En este caso el consumo está centrado en 1 tacho de 300 litros, con consumo de vapor de 80 kg de vapor por hora. La característica más destacable de la red de consumo está dada porque este único consumidor está situado a más de 400 metros de distancia de la sala de calderas y la tubería que conduce el vapor se encuentra desprotegida en gran parte de la trayectoria, la cual se encuentra en algunos lugares en zanjas y en otros en la superficie a aproximadamente 30 cm del suelo.

La caldera está por tanto sobredimensionada, y esto se debe a que eliminado un consumidor importante que era la cocina, con todos sus equipos, y otros equipos fuera de servicio en la sala de producción.

2.3 Evaluación del sobredimensionamiento

A continuación mostramos una tabla en la que se identifica la relación existente entre la producción nominal de las calderas, el consumo nominal instalado en las condiciones actuales, el consumo real estimado teniendo en cuenta el coeficiente de simultaneidad en el trabajo de los consumidores, el por ciento en el que está siendo aprovechado en cada instalación el potencial de generación de la caldera, y en qué por ciento se encuentra sobredimensionada con respecto al consumo.

Tabla 2.3 Caracterización del sobredimensionamiento.

Centro	Producción de vapor nominal (kg/h)	Consumo nominal instalado (kg/h)	Consumo real estimado (kg/h)	Aprovechamiento de la capacidad de generación instalada (%)	Sobre-dimensionamiento (%)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5=(4/2)*100)	(6=100-5)
Fac. Ciencias Médicas	510	561	448	87,84	12,16
Hosp. Provincial GAL	4 000	3 591	2 872,8	71,82	28,18
Hosp. Pediátrico	2 500	712	596	23,84	76,16
Hogar de Ancianos	660	349	279,2	42,30	57,70
Hosp. M. de Girón	440	516	428,8	97,45	2,55
Comedor Escolar	1 000	600	480	48,00	52,00
Tecn. 5 de Septiembre	440	245	196	44,55	55,45
Inst. Sup. Pedagógico	1 120	523	418,4	37,36	62,64
Universidad	660	245	196	29,70	70,30
Fca. Cons. El Faro	2 500	1 020	816	32,64	67,36
Estadio 5 de Septiembre	440	137	109,6	24,91	75,09
Lavandería UNICORNIO	4 000	4 071	3 256,8	81,42	18,58
Comb. Pesquero	1 600	80	80	5,00	95,00

Valores Promedio	1 528,46	973,08	782,89	48,22	51,78
-------------------------	-----------------	---------------	---------------	--------------	--------------

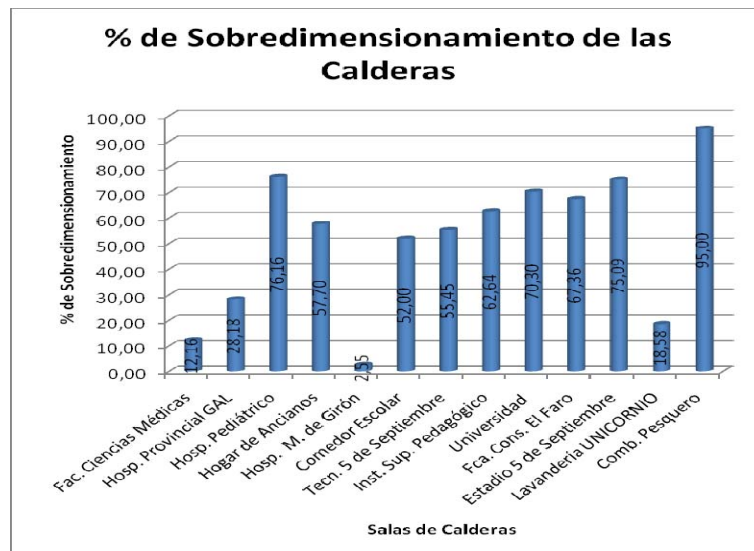


Figura 2.2 Caracterización del sobredimensionamiento.

El análisis de la tabla y la figura anterior nos deja ver claramente que de un consumo promedio de 782,89 kg/h de vapor, en la ciudad sólo 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, sólo se demanda, potencialmente, un promedio de 973,08 kg/h, de estos realmente se demandan como promedio 782,89 kg/h, por lo que se apenas se aprovecha el 48,22 % de la capacidad de generación instalada.

Se puede concluir que la capacidad de producción de vapor en la ciudad se encuentra sobredimensionada en un 51,78 %, o sea, más de la mitad se encuentra subutilizada.

Clasifican dentro de mayor sobredimensionamiento 9 centros que constituyen el 69,23 %, y dentro de estos tres que pudiéramos considerar como críticos por estar por encima del 75 % y que son presentados en la siguiente tabla:

Tabla 2.4 Casos críticos de sobredimensionamiento.

Centro	Sobre- dimensionamiento (%)
Hosp. Pediátrico	76,16
Estadio 5 de Septiembre	75,09
Comb. Pesquero	95,00

Los demás centros tienen menor % de sobredimensionamiento, siendo el que mejor índice de producción vs consumo el correspondiente al Hospital Mártires de Girón, con 2,55 %, por las razones expuestas con anterioridad.

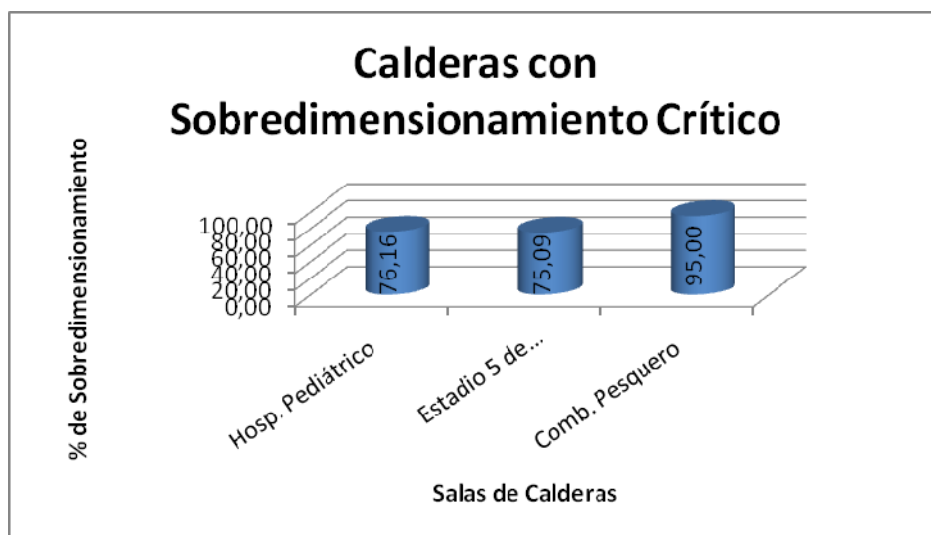


Figura 2.3 Casos críticos de sobredimensionamiento.

2.4 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 se observa que la gran mayoría de las calderas se encuentran sobredimensionadas en más de un 50 % y se demuestra que sólo se aprovecha el 48,22 % de la capacidad de producción de vapor, siendo el sobredimensionamiento promedio de 51,78 %.

CAPÍTULO III

Capítulo III Cálculo del factor de carga en las calderas pirotubulares de la ciudad de Cienfuegos

3.1 Análisis del factor de carga

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.

3.1.1 Factor de carga

Como el régimen de trabajo es variable en la gran mayoría de los procesos, entonces se define un coeficiente o factor de carga, el cual nos permite conocer en qué medida el generador de vapor está siendo explotado con respecto a su capacidad, o lo que es igual, en cuanto se encuentra subutilizado. La información necesaria para el análisis de este factor de carga puede ser tomada 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 consumiendo esta cantidad de vapor. Pero en la mayoría de los casos, los procesos no funcionan de esta manera, sino que nos encontramos muchos como por ejemplo en las cocinas, lavanderías y procesos de esterilización, donde el consumo es intermitente o discontinuo, lo cual quiere decir que cada consumidor trabaja sólo una parte del tiempo consumiendo vapor en una hora.

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. Sumando estos tiempos podemos conocer qué cantidad del tiempo total estuvo realmente trabajando el generador de vapor, y con ello podemos decir en qué medida se encuentra sobredimensionada la caldera.

Es decir, el factor de carga lo podemos formular 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 nos señala 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 nos 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 lo que es similar, 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 %.

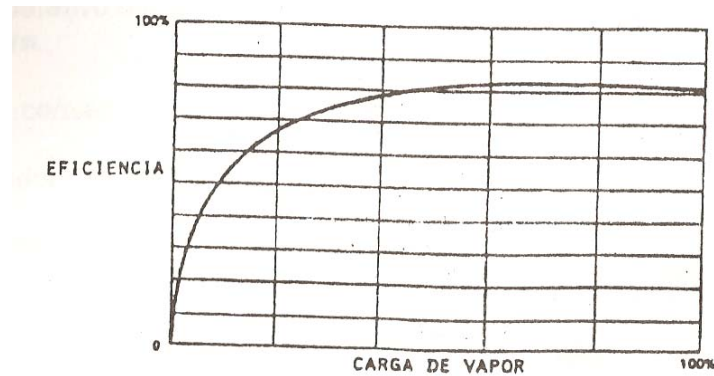


Figura 1.4 Comportamiento de la eficiencia con respecto a la carga. (7)

La figura anterior nos 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. De ella podemos entonces establecer que el trabajo a cargas parciales aumenta las pérdidas energéticas, y sobretodo q_2 y q_3 .

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

3.2 Método para el cálculo del factor de carga

Para la determinación del factor de carga de las calderas nos apoyaremos 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.

Consiste este método en calcular 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. De aquí que conocer este dato permite acometer acciones encaminadas a su corrección.

Para conocer la relación $\frac{Q_{abs}}{Q_d}$, sólo 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 serán:

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

Esta ecuación establece la relación entre los calores absorbido y 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 tenemos la ecuación:

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

En este caso, la ecuación establece la relación entre los calores absorbido y 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 podemos plantear que:

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

3.3 Aplicación del método

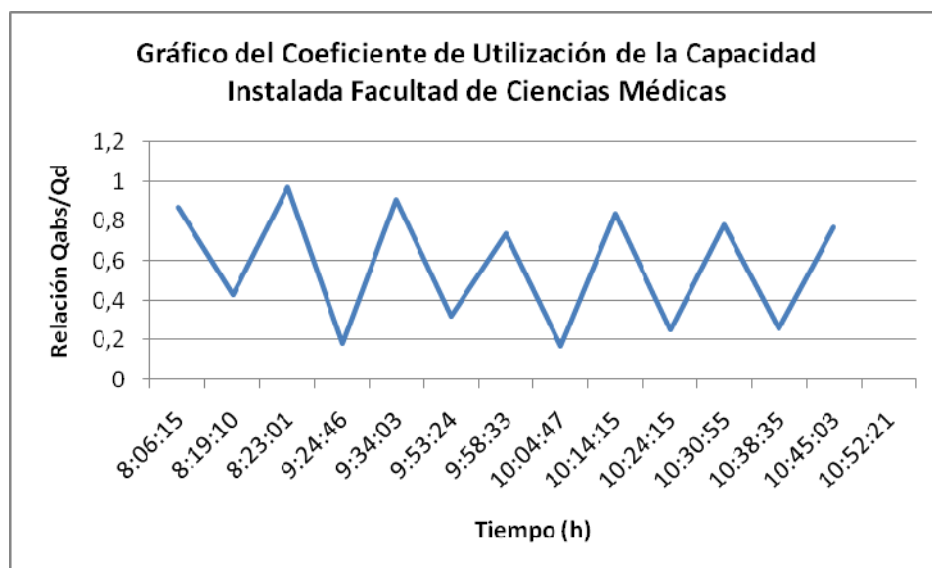
Para realización de las mediciones, el análisis de los datos obtenidos y su publicación se utilizaron los instrumentos que se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 3.1 Instrumentación utilizada para medir los parámetros

Parámetro	Instrumento	Grado de Precisión
Tiempo	Reloj	
Presión	Manómetro	$\pm 0.1 \text{ kgf/cm}^2$
Temperatura	Termómetro	1.5

Los datos para la determinación del factor de carga para cada sala de calderas y la construcción de los gráficos, según el método descrito, se encuentran en el anexo 2 y corresponden a mediciones hechas una parte por el autor y otra en las tesis de grado de Andy Balwant (4) y Adrián González (10). Estos fueron tomados siguiendo el análisis de la determinación de los tiempos t_c , t_a y t_b anteriormente mencionados.

3.3.1 Facultad de Ciencias Médicas

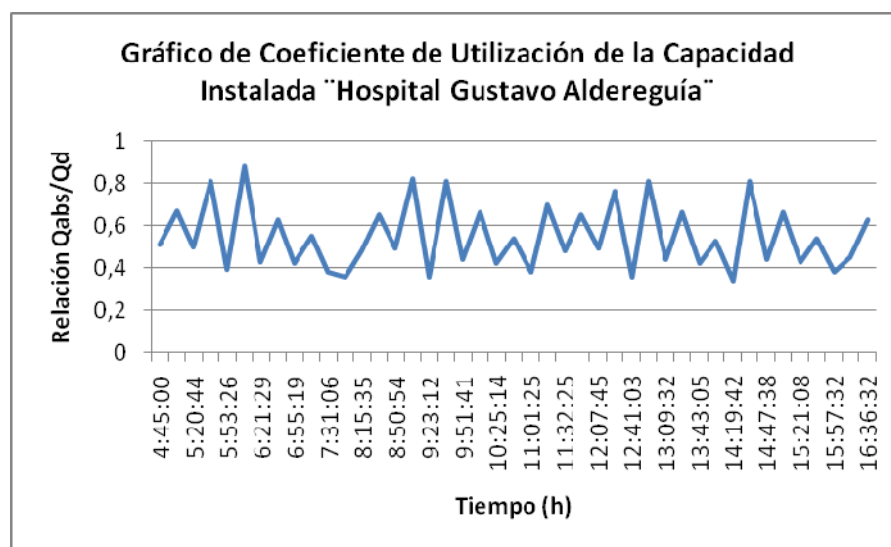


Factor de carga

$$\Phi = \frac{2:05:13}{2:46:06}$$

$$\Phi = 0,75$$

3.3.2 Hospital Provincial Gustavo Aldereguía Lima

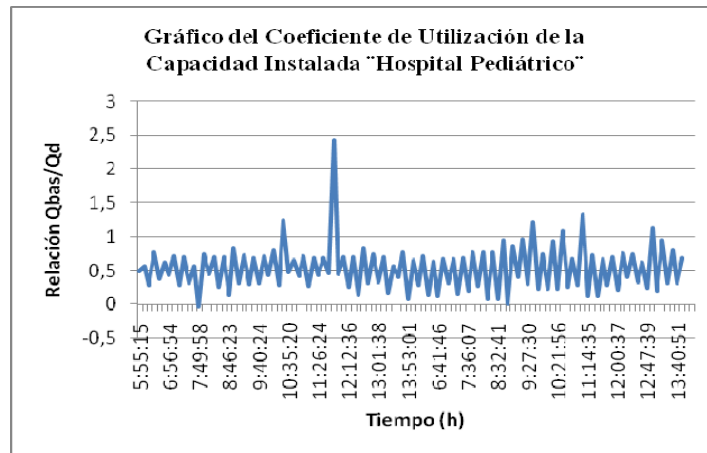


Factor de carga.

$$\Phi = \frac{6:42:40}{12:18:55}$$

$$\Phi = 0,54$$

3.3.3 Hospital Pediátrico "Paquito González"

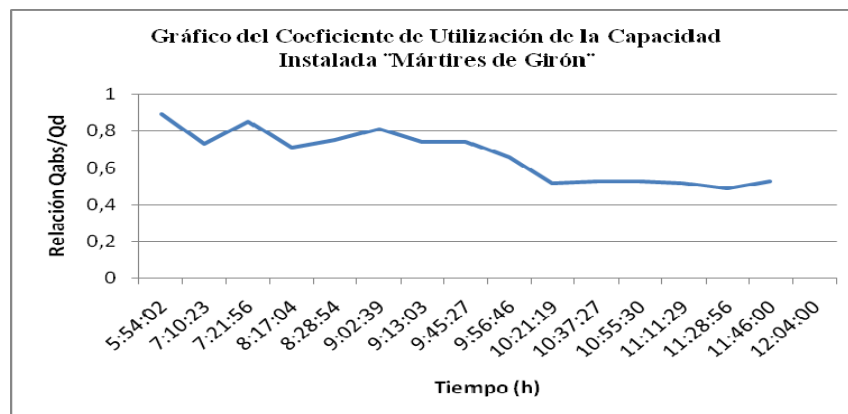


Factor de carga.

$$\Phi = \frac{4:15:45}{8:11:27}$$

$$\Phi = 0,52$$

3.3.4 Hospital Mártires de Girón



Factor de carga.

$$\Phi = \frac{4:35:41}{6:09:58}$$

$$\Phi = 0,75$$

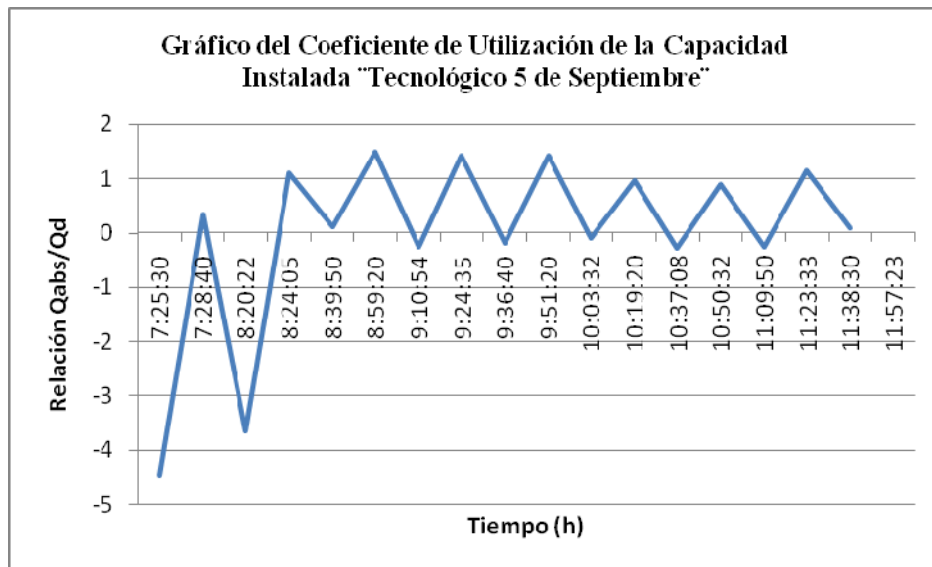
3.3.5 Comedor Escolar

Factor de carga.

$$\Phi = \frac{1:13:43}{2:50:55}$$

$$\Phi = 0,43$$

3.3.6 Tecnológico 5 de Septiembre



Factor de carga.

$$\Phi = \frac{1:56:32}{4:31:53}$$

$$\Phi = 0,43$$

3.3.7 Instituto Superior Pedagógico

Factor de carga.

$$\Phi = \frac{1:51:27}{2:31:28}$$

$$\Phi = 0,74$$

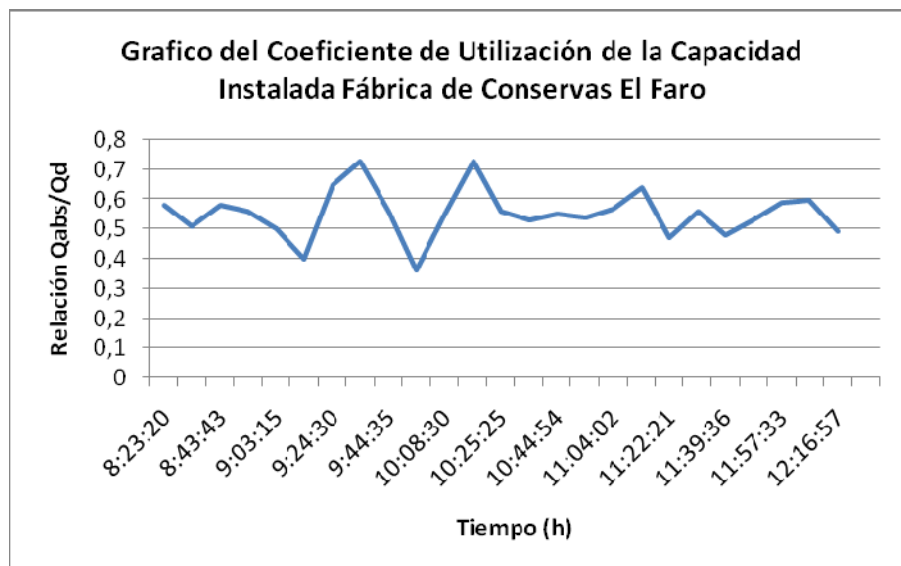
3.3.8 Universidad Carlos Rafael Rodríguez

Factor de carga.

$$\Phi = \frac{1:44:32}{2:00:29}$$

$$\Phi = 0,87$$

3.3.9 Fábrica de Conservas El Faro

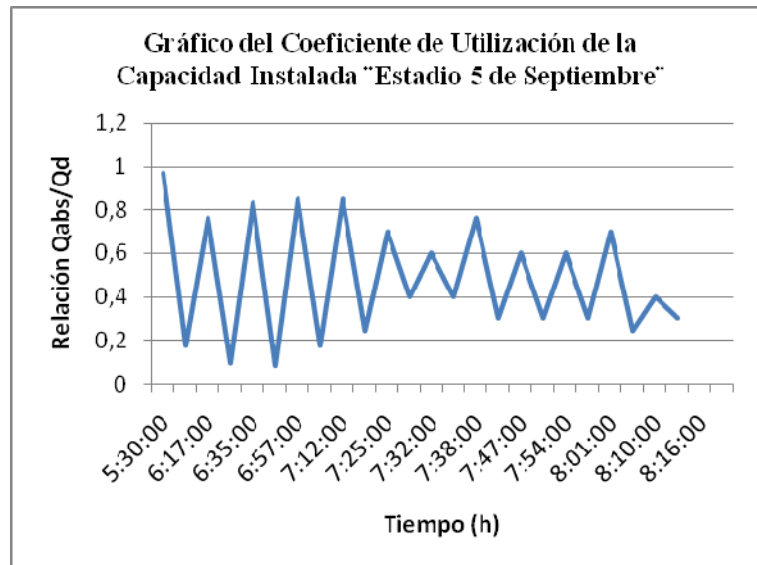


Factor de carga.

$$\Phi = \frac{2:17:02}{4:02:48}$$

$$\Phi = 0,56$$

3.3.10 Estadio 5 de Septiembre



Factor de carga.

$$\Phi = \frac{1:37:15}{2:51:26}$$

$$\Phi = 0,57$$

3.3.11 SERVISA

Factor de carga.

$$\Phi = \frac{0:30:01}{1:40:27}$$

$$\Phi = 0,30$$

3.3.12 Combinado Pesquero

Factor de carga.

$$\Phi = \frac{4:35:13}{5:40:21}$$

$$\Phi = 0,81$$

3.3.13 Resumen

Tabla 3.2 Resumen del cálculo del factor de carga en las calderas de la ciudad de Cienfuegos

No.	Centro	Capacidad Nominal (kg/h)	Tiempo de trabajo de la caldera (h)	Tiempo de trabajo del quemador (h)	Factor de carga
1	Fac. Ciencia Médicas	510	2:46:06	2:05:13	0,75
2	Hosp. Provincial GAL	4 000	12:18:55	6:42:40	0,54
3	Hosp. Pediátrico	2 500	8:11:37	4:15:45	0,52
4	Hosp. M. de Girón	440	6:09:58	4:35:41	0,75
5	Comedor Escolar	1 000	2:50:55	1:13:43	0,43
6	Tecn. 5 de Septiembre	440	4:31:53	1:56:32	0,43
7	Inst. Sup. Pedagógico	1 120	2:31:33	1:51:27	0,74
8	Universidad	660	2:00:29	1:44:32	0,87
9	Fca. Cons. El Faro	2 500	4:02:48	2:17:02	0,56
10	Estadio 5 de Septiembre	440	2:51:26	1:37:00	0,57
11	Lavandería UNICORNIO	4 000	1:40:27	0:30:01	0,30
12	Comb. Pesquero	1 600	5:40:21	4:35:13	0,81
Producción nominal potencial		19 210	55:36:28	33:24:49	
Promedio		1 600,83	4:38:02	2:47:04	0,61

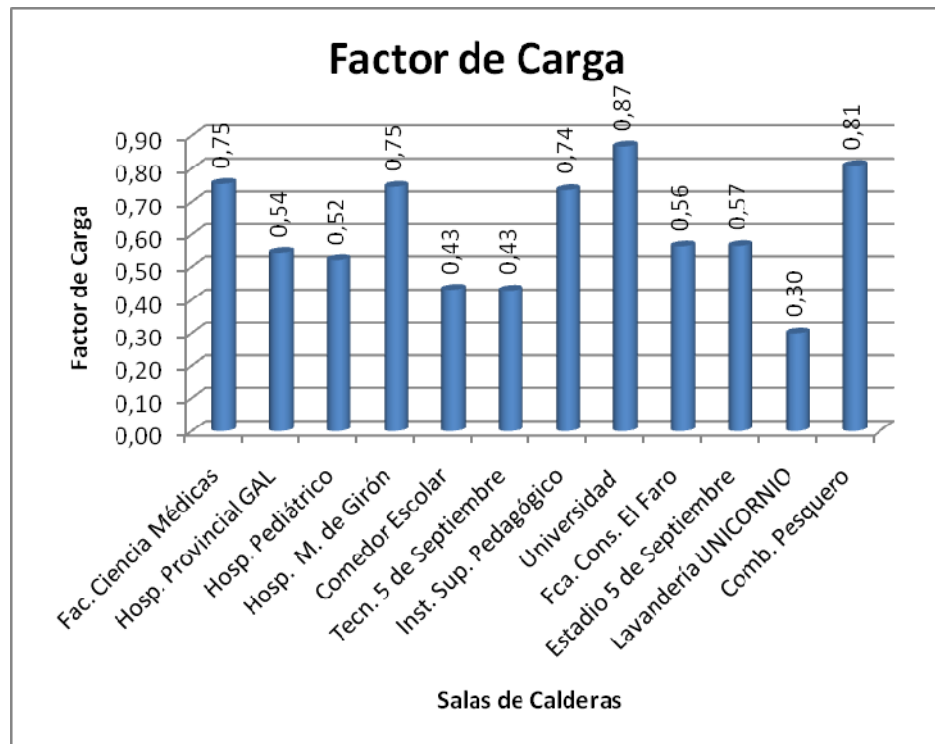


Figura 3.1 Gráfico del factor de carga en las calderas de la ciudad de Cienfuegos

3.4 Análisis de los resultados

En la tabla y gráfico anteriores observamos que sólo cuatro de doce centros tienen un factor de carga por encima de 0,75, lo que representa el 33,33 % del universo estudiado, y cuando hacemos un análisis de los mismos vemos que en realidad esto no define fielmente la situación existente. En el caso de la Universidad, 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 Combinado Pesquero, sólo 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.

La Facultad de Ciencias Médicas igualmente presenta irregularidades ocasionadas en este caso por mala operación en los consumidores. En este caso 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 de los alimentos.

El Hospital Mártires de Girón es el centro que más ajusta su consumo a la producción de la caldera, aunque es susceptible de mejorar el factor con un mejor ordenamiento del flujo de cocción.

Los demás centros, a pesar de tener por lo general situaciones en muchos casos graves de deterioros en las redes, que permiten el escape de vapor a la atmósfera, tienen, salvo el Instituto Superior Pedagógico, factores de carga bastante bajos, siendo los casos más críticos el Comedor Escolar y el Tecnológico 5 de Septiembre con 0,43 y la Lavandería SERVISA con el 0,3.

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

Este índice nos permite plantear que 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.

3.5 Conclusiones parciales del capítulo III

1. El factor de carga que permite conocer el grado de utilización de las calderas en la ciudad de Cienfuegos es muy bajo, siendo su valor promedio 0,61.
2. Sólo el 33,33 % de las calderas estudiadas se pueden considerar con un factor de carga razonable, o sea, mayor de 0,75.
3. El 25 % de los centros tiene un factor de carga que podemos llamar crítico cuyo valor es inferior a 0,5, determinado esto porque muchos de sus consumidores se encuentran fuera de servicio con respecto al diseño original de la instalación.

CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV ANÁLISIS ECONÓMICO

Procedimiento para el cálculo del costo de producción de vapor en cada una de las salas de calderas estudiadas y el correspondiente al municipio Cienfuegos

Para el cálculo del costo de producción de vapor nos auxiliamos del Método Autónomo como herramienta Termoeconómica. Para ello contamos con datos correspondientes a los parámetros físicos de las corrientes involucradas en el proceso, a saber:

Consideramos como fuel o corrientes de entrada las siguientes:

- Combustible.
- Agua.

Y como producto, al cual vamos a hallar su costo:

- Vapor de agua saturado.

4.1 Cálculo de la eficiencia exergética de la instalación

De cada una de las corrientes, tanto de las consideradas fuel como del producto conocemos sus parámetros físicos, como son: presión, temperatura y flujo. Con estos datos o parámetros hallamos con el auxilio de las tablas de propiedades del vapor, los valores correspondientes de entalpía y entropía. Estos datos nos sirven para determinar la exergía y el flujo exergético de dichas corrientes.

Con la temperatura del combustible hallamos su entalpía según corresponda, y con esta y el valor calórico, hallamos su calor disponible. A su vez con el calor disponible y el flujo correspondiente determinamos entonces el flujo exergético del combustible en cada caso.

Una vez determinados los flujos exergéticos de cada una de las corrientes podemos determinar la eficiencia exergética de cada una de las calderas analizadas.

Se tomó como estado de referencia las condiciones de:

$T^{\circ} = 298,15 \text{ K}$ (25 °C).

$P^{\circ} = 101,32 \text{ kPa}$.

A continuación se muestra el procedimiento de cálculo a través del análisis hecho en la Fábrica de Conservas El Faro:

Tabla 4.1 Propiedades de los fluidos de trabajo.

	U.M	Fuel Oil	Agua	Vapor
Flujo (G)	kg/h	61,82	816	816
Presión (p)	kg/cm ²	24	1	8,8
Temperatura (T)	K	418,15	343,15	447.55
Entalpía (h)	kJ/kg		293,12	2772,14
Entropía (s)	kJ/kgK		0,96	6,63

4.1.1 Cálculo de la exergía del vapor saturado

$$e_{vs} = (h_{vs} - h^{\circ}) - T^{\circ}(s_{vs} - s^{\circ})$$

Donde:

e_{vs} - exergía del vapor saturado; $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$

h_{vs} - entalpía del vapor saturado; $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$

h° - entalpía a las condiciones del estado de referencia; $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$

T° - temperatura del estado de referencia; (K)

s_{vs} - entropía del vapor saturado; $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right)$

s° - entropía a las condiciones del estado de referencia; $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right)$

$$e_{vs} = \left(2772,14 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 104,92 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) - 298,15 \text{ K} \left(6,63 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} - 0,37 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}\right)$$

$$e_{vs} = 800,8 \frac{kJ}{kg}$$

- **Cálculo del flujo exergético del vapor saturado**

$$E_{vs} = e_{vs} * m_{vs}$$

Donde:

E_{vs} - flujo exergético del vapor; (kW)

m_{vs} - flujo del vapor saturado; (kg)

$$E_{vs} = \frac{800,8 \frac{kJ}{kg} * 816 \frac{kg}{h}}{3600 \frac{seg}{h}}$$

$$E_{vs} = 181,5 kW$$

4.1.2 Cálculo de la exergía del agua de alimentar

$$e_{aa} = (h_{aa} - h^o) - T^o(s_{aa} - s^o)$$

Donde:

e_{aa} - exergía del agua de alimentar; ($\frac{kJ}{kg}$)

h_{aa} - entalpía del agua de alimentar; ($\frac{kJ}{kg}$)

h^o - entalpía a las condiciones del estado de referencia; ($\frac{kJ}{kg}$)

T^o - temperatura del estado de referencia; (K)

s_{aa} - entropía del agua de alimentar; ($\frac{kJ}{kgK}$)

s^o - entropía a las condiciones del estado de referencia; ($\frac{kJ}{kgK}$)

$$e_{aa} = \left(293,15 \frac{kJ}{kg} - 104,92 \frac{kJ}{kg} \right) - 298,15 K \left(0,96 \frac{kJ}{kgK} - 0,37 \frac{kJ}{kgK} \right)$$

$$e_{aa} = 12,3 \frac{kJ}{kg}$$

- Cálculo del flujo exergético del agua de alimentar

$$E_{aa} = e_{aa} * m_{aa}$$

Donde:

E_{aa} - flujo exergético del agua de alimentar; (kW)

m_{aa} - flujo del agua de alimentar; (kg)

$$E_{aa} = \frac{12,3 \frac{kJ}{kg} * 816 \frac{kg}{h}}{3600 \frac{seg}{h}}$$

$$E_{aa} = 2,79 kW$$

4.1.3 Cálculo del calor disponible del combustible (fuel-oil)

$$C_c = 0,415 + 0,0006 * t_c$$

$$C_c = 0,415 + 0,0006 * 145^{\circ}C$$

$$C_c = 0,502$$

$$h_{comb} = C_c * t_c$$

Donde:

h_{comb} - entalpía del combustible; ($\frac{kJ}{kg}$)

$$h_{comb} = 0,502 * 145^{\circ}C$$

$$h_{comb} = 72,79 \frac{kcal}{kg} * 4,184 \frac{kJ}{kcal}$$

$$h_{comb} = 304,55 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_d = VCS + h_{comb}$$

Donde:

Q_d - calor disponible del combustible; ($\frac{kJ}{kg}$)

VCS- valor calórico superior del combustible; ($\frac{kJ}{kg}$)

$$VCS_{diesel} = 10\,300 \frac{kcal}{kg}$$

$$Q_d = (10\,300 \frac{kcal}{kg} * 4,184 \frac{kJ}{kcal}) + 304,55 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_d = 43\,399,75 \frac{kJ}{kg}$$

- Cálculo del flujo exergético del combustible (fuel-oil)

$$E_{comb} = Q_d * m_{comb}$$

Donde:

E_{comb} - flujo exergético del combustible; (kW)

m_{comb} - flujo del combustible; ($\frac{kg}{h}$)

$$E_{comb} = \frac{43\,399,75 \frac{kJ}{kg} * 61,82 \frac{kg}{h}}{3\,600 \frac{seg}{h}}$$

$$E_{comb} = 745,27 \text{ kW}$$

4.1.4 Cálculo de la eficiencia exergética

$$\eta_{exerg.} = \frac{E_{us}}{E_{aa} + E_{comb}}$$

$$\eta_{exerg.} = \frac{181,5 \text{ kW}}{2,79 \text{ kW} + 745,27 \text{ kW}} * 100$$

$$\eta_{exerg.} = 24,26 \%$$

4.2 Cálculo del costo de producción del vapor saturado

4.2.1 Cálculo del factor de recuperación

$$FR = \frac{tr(1 + tr)^{Ny}}{(1 + tr)^{Ny} - 1}$$

Donde:

FR – Factor de recuperación.

ir – Tasa de interés, (%)

Ny – Tiempo de vida útil para el equipo; (años)

$$FR = \frac{0,12(1 + 0,12)^{25}}{(1 + 0,12)^{25} - 1}$$

$$FR = 0,1275$$

4.2.2 Cálculo del costo zonal

$$C_Z = \frac{FR}{t_{op}} * C_{inv}$$

Donde:

C_Z - Costo zonal; $\left(\frac{\$}{h}\right)$

t_{op} – Tiempo de operación anual; $\left(\frac{h}{año}\right)$

C_{inv} - Costo de la inversión, Costo de la caldera; (\$)

$$C_Z = \frac{0,1275}{2650 \frac{h}{año}} * \$ 61\,839,33$$

$$C_Z = 2,98 \frac{\$}{h}$$

4.2.3 Cálculo del costo exergético del combustible

$$CE_{comb} = \frac{P_{comb}}{Q_d}$$

Donde:

CE_{comb} - Costo exergético del combustible; $(\frac{\$}{kJ})$.

P_{comb} - Precio del combustible; $(\frac{\$}{lt})$

$$CE_{comb} = \frac{\frac{0,29 \frac{\$}{kg} * 1\,000 \frac{lt}{m^3}}{965 \frac{kg}{m^3}}}{43\,399,75 \frac{kJ}{kg}}$$

$$CE_{comb} = 6,92 * 10^{-6} \frac{\$}{kJ}$$

4.2.4 Cálculo del costo exergético del agua

$$CE_{agua} = \frac{P_{agua}}{e_{aa}}$$

Donde:

CE_{agua} - Costo exergético del agua; $(\frac{\$}{kJ})$

P_{agua} - Precio del agua; $(\frac{\$}{m^3})$

$$CE_{agua} = \frac{0,65 \frac{\$}{m^3} * \frac{1m^3}{1\,000kg}}{12,29 \frac{kJ}{kg}}$$

$$CE_{agua} = 0,000053 \frac{\$}{kJ}$$

4.2.5 Cálculo del costo exergético unitario del vapor

$$CE_{vs} = \frac{CE_{comb} + CE_{agua}}{\eta_{exerg}} + \frac{C_z}{E_{vs}}$$

Donde:

CE_{vs} – Costo exergético unitario del vapor; ($\frac{\$}{kJ}$)

$$CE_{vs} = \frac{0,00000692 \frac{\$}{kJ} + 0,000053 \frac{\$}{kJ}}{0,2426} + \frac{2,98 \frac{\$}{h} * \frac{1h}{3\,600seg}}{181,5 \frac{kJ}{seg}}$$

$$CE_{vs} = 0,000229 \frac{\$}{kJ}$$

4.2.6 Cálculo del costo de producción del vapor saturado

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

Donde:

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

$$Cp_{vs} = \frac{0,000229 \frac{\$}{kJ} * 181,5 \frac{kJ}{seg} * \frac{3\,600seg}{1h}}{816 \frac{kg}{h} * \frac{1ton}{1\,000kg}}$$

$$Cp_{vs} = 183,72 \frac{\$}{ton}$$

Llevando esta caldera a trabajar al 80 % y al 100 % de su capacidad nominal se obtendrían los resultados que muestra la siguiente tabla.

Tabla 4.2 Variación de parámetros con la variación de la capacidad de producción de vapor

	U.M.	Condiciones actuales (33% de la capacidad)	Al 80 % de la capacidad	Al 100 % de la capacidad
$\eta_{\text{exergética}}$	%	24,26	26,65	26,77
Costo exergético unitario del vapor	\$/kJ	0,0002294	0,0002072	0,0002059
Costo de Producción del Vapor	\$/ton	183,72	165,96	164,92

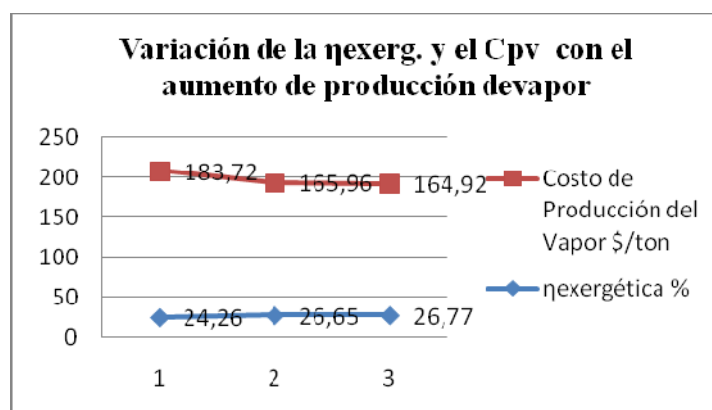


Figura 4.1 Variación de la eficiencia exergética y el Costo de Producción de Vapor con el aumento de la producción de vapor.

La variación de la capacidad de producción de vapor desde las condiciones actuales hasta las condiciones de diseño presentadas en la tabla y figura anteriores nos permiten observar cómo va aumentando la eficiencia exergética de la caldera, y con ello ocurre simultáneamente una disminución del costo del vapor producido. El análisis exergético nos muestra de la misma manera la disminución del costo exergético unitario del vapor.

Las cifras obtenidas para los parámetros de este caso ejemplificado se comportan de igual modo en el análisis de las demás calderas estudiadas.

Esta situación ha sido estudiada por algunos autores que en diferentes sistemas llegaron a las mismas conclusiones. Así el Dr. Juan Carlos Armas Valdés y otros autores plantean: El análisis exergético permite determinar el máximo ahorro de energía termodinámicamente en las condiciones reales de una instalación y en cada uno de los aparatos que lo componen... Con el análisis exergético por componentes y la determinación de los flujos de costos, pueden ser determinados los costos evitables de las pérdidas exergéticas. (2)

Más adelante se plantea: ... se pueden realizar comparaciones entre los balances exergéticos de una instalación en funcionamiento con respecto al balance en condiciones de diseño de la planta. Con lo cual se llega a obtener el ahorro técnicamente posible en dicha instalación. (2)

En otro artículo el mismo autor junto a otros colaboradores nos dice: La aplicación del método exergético al análisis de proceso permite evaluar la irreversibilidad en cada uno de los componentes del ciclo, lo cual unido a un análisis de sensibilidad en el rango de trabajo de la instalación permite obtener una información del comportamiento del sistema ante diferentes condiciones de trabajo. (1)

En el ejemplo expuesto como estudio de caso de la Fábrica de Conservas El Faro queda demostrado que variar un parámetro en el rango desde las condiciones actuales de trabajo hasta las condiciones de diseño nos brinda información sobre el comportamiento en cada situación diferente y permite la toma adecuada de decisiones.

Aumentar el número de consumidores hasta equiparar el consumo a la producción potencial de la caldera implica en primer lugar disminuir o eliminar el sobredimensionamiento, o sea, acercar el trabajo del equipo a las condiciones de diseño que como hemos visto tiene la virtud de aumentar los parámetros de eficiencia y disminuir los costos del producto final.

Similar efecto se produciría con el aumento del factor de carga, por cuanto disminuir los continuos arranques y paradas contribuyen a disminuir las irreversibilidades.

A continuación se muestra el gráfico resultante de los cálculos correspondientes al costo de producción de vapor en cada una de las salas de calderas que se estudiaron.

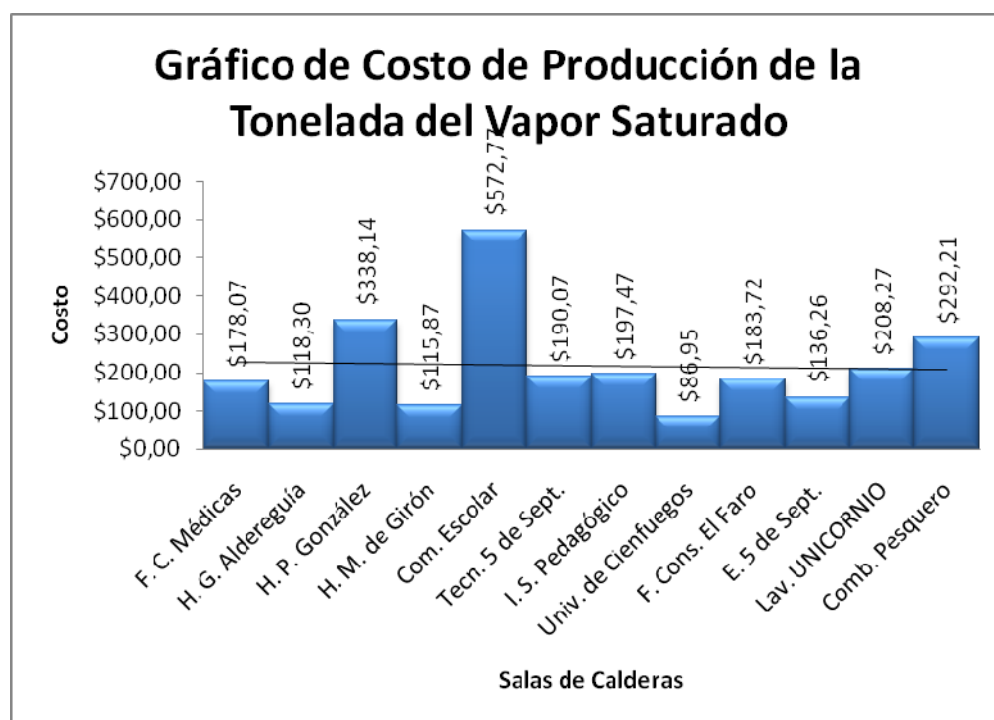


Figura 4.2 Costo de producción de la tonelada de vapor saturado.

Se puede observar una similitud en los costos de producción de vapor saturado en la gran mayoría de las salas de calderas estudiadas, valor que oscila entre los 86,95 \$/ton y los 338,14 \$/ton.

El valor medio del costo de producción de vapor saturado en la ciudad de Cienfuegos es de 218,18 \$/ton, mientras que el del Comedor Escolar es de 572,77 \$/ton, representando esto que en este centro cuesta 2.6 veces más que la media para producir una tonelada de vapor.

Tomando como referencia el caso de la Fábrica de Conservas El Faro sólo aumentando el consumo de vapor, lo cual significa una mayor producción por parte de la caldera sin variar los parámetros termodinámicos, tenemos que se incrementa la eficiencia exergética y disminuye el costo de producción del vapor.

La aplicación de la metodología del cálculo termoeconómico de todas las instalaciones y sus resultados aparecen en el anexo 3.

4.3 Impacto medioambiental

De la misma manera en que son altas consumidoras de combustibles las calderas son potencialmente contaminantes del medio ambiente. El efecto del trabajo en condiciones de sobredimensionamiento y bajo factor de carga, como ya se ha dicho trae implícitos continuos arranques y paradas del quemador. Durante los momentos del arranque y hasta que se logre la homogeneidad en la mezcla y la estabilidad en la combustión se presenta el fenómeno de partículas de combustible que atraviesan todo el tracto de gases y salen por la chimenea sin combustionar llevando al medio ambiente su carga contaminante. Este fenómeno será repetitivo tantas veces como arranques se produzcan en el quemador y se agrava en los casos en que el combustible utilizado sea el fuel oil.

4.4 Conclusiones parciales del capítulo IV

1. La eficiencia exergética de la caldera de la Fábrica de Conservas El Faro cuando se encuentra produciendo el 33 % de su producción nominal de vapor es baja, con un valor de 24,26 %.
2. Cuando simulamos que la caldera se encuentra produciendo vapor a su capacidad nominal, la eficiencia exergética aumenta a 26,77 %, incrementándose en 2.51%, y el costo exergético unitario del vapor disminuye de 0,0002294 \$/Kj a 0,0002059 \$/kJ
3. El costo de producción de vapor al incrementar la producción disminuye de 183,72 a 164,92 \$/ton, equivalente a un ahorro de 18,8 \$/ton, en la instalación del estudio de caso.
4. Los costos, exergético unitario y de producción de vapor saturado, en cada sala de calderas y como promedio en la ciudad de Cienfuegos son elevados como consecuencia del trabajo a capacidades de producción inferiores a las nominales.

CONCLUSIONES

GENERALES

CONCLUSIONES GENERALES

1. 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 %.
2. El factor de carga a que se encuentran trabajando las calderas pirotubulares es muy bajo en la mayoría de ellas, siendo su valor promedio de 0,61, este nos dice que se consume sólo 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.
3. Los índices o valores de sobredimensionamiento y factor de carga se complementan y nos demuestran que se están subutilizando en gran medida las potencialidades energéticas instaladas en la ciudad.
4. 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.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

1. Realizar el estudio en las calderas instaladas en otros municipios de la provincia.
2. Sustituir las boquillas de suministro de combustible actuales por boquillas de menor capacidad para acercar las producciones a los consumos.
3. Realizar ajuste de los controles de presión en el rango de trabajo entre el mayor y el menor valor, permitiendo un trabajo más continuo de la caldera, con menor número de arranques y paradas o prescindiendo de estos.
4. En los lugares donde no se necesitan en todo momento los consumos reales instalados y no se prevé el funcionamiento de nuevos consumos proponer como estrategia ante nuevas reposiciones, calderas con menores capacidades.

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Armas Valdés, MSc. Juan Carlos, Aplicación del Segundo Principio de la Termodinámica a casos de estudios de un Sistema de Climatización Centralizada por Agua Helada, MSc. Juan Carlos Armas Valdés y col., CEEMA, Universidad de Cienfuegos.
2. Armas Valdés, Dr. Juan Carlos, 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, Dr. Juan Carlos Armas Valdés y col., CEEMA, Universidad de Cienfuegos.
3. Ahorros de combustible y ventajas adicionales con generadores de vapor CLAYTON, Manual del fabricante.
4. Balwant, Yugesftwar Andy, Establecer expresiones de pérdidas por calor sensible y rendimiento térmico en calderas pirotubulares aplicando métodos experimentales y técnicas de I.A., Trabajo de Diploma, Universidad de Cienfuegos, 2 009.
5. Borroto Nordelo, Ph.D Aníbal, Ahorro de Energía en la Generación y Distribución del Vapor. Aníbal Borroto Nordelo, Aníbal J. Borroto Bermúdez. Universidad de Cienfuegos, 2 000.
6. Borroto Nordelo, Aníbal, Combustión y Generación de Vapor, Aníbal Borroto Nordelo, Angel Rubio González. Editorial Universo Sur, Universidad de Cienfuegos, 2 007.
7. CONAE, Metodología para el desarrollo de diagnósticos energéticos en sistemas de generación y distribución de vapor, CONAE, Versión 1.4, Octubre, 1 997

8. Faires, Virgil Moring, Termodinámica, Edición Revolucionaria, Ciudad de La Habana, 1 987.
9. García San José, Ricardo, Rendimiento de generación estacional con calderas de agua caliente, 2 001
10. González Alonso, Adrián, Caracterización del sobredimensionamiento de las calderas en el sector de la salud en Cienfuegos, Trabajo de Diploma, Universidad de Cienfuegos, 2 007-2 008.
11. Gopal, Ram Kumar, Influencia de las pérdidas por radiación en las calderas pirotubulares, Trabajo de Diploma, Universidad de Cienfuegos, 2 009.
12. Kern, Donald Q., Procesos de transferencia de calor, Editorial Pueblo y Educación, Ciudad de La Habana, 1 979.
13. Lapido Rodríguez, MSc. Margarita J., Incremento de la eficiencia térmica en calderas pirotubulares por disminución de las pérdidas por calor sensible, Tesis presentada en opción del grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad de Cienfuegos, 1 998.
14. Lapido Rodríguez, Dra. Margarita., Métodos de Análisis Termodinámicos, Dra. Margarita Lapido Rodríguez, Dr. Juan Castellanos Álvarez, MSc. Juan Carlos Armas Valdés, CEEMA, Universidad de Cienfuegos.
15. Lapido Rodríguez, Dra. Margarita J., Termodinámica Avanzada. Dra. Margarita J. Lapido Rodríguez, Dr. Mario A. Álvarez Guerra Plasencia, Dr. Juan A. Castellanos Álvarez, Dr. Pablo Roque Díaz, M.Sc. Juan C. Armas Valdés. CEEMA, Editorial Universidad de Cienfuegos, 2 006.

16. Mingot, Tomás de Galiana, Pequeño Larouse de Ciencias y Técnicas, Editorial Científico-Técnica, Ciudad de La Habana, 1 988.
17. Pérez Garay, Luis, Generadores de vapor, ENPES, 1 989.
18. Rubio González, Dr. Ángel M., Generadores de vapor: Funcionamiento y explotación, Santa Clara, Cuba, 2 000.
19. Shields, Carl D., Calderas, Tipos, Características y Funciones, Carl D. Shields. Ciudad de la Habana: Edición Revolucionaria, 1 969.
20. Sistemas de Generación y Distribución de Vapor, Cálculos Rápidos, Ciudad de la Habana, Comisión Nacional de Energía, 1 987.
21. Tanquero, Ing. Nelson, Guía metodológica para proyectos de curso de generadores de vapor, Ing. Nelson Tanquero, Ing. Luis M. Aballe, Ing. Nelson Reyes, Ministerio de Educación Superior, 1 987.
22. Torres Cuadras, César., Exergoeconomía simbólica Metodología para el análisis termoeconómico de los sistemas energéticos, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 1 991.

ANEXOS

ANEXO 1.1 PARAMETROS TERMICOS PRINCIPALES GENERADORES DE VAPOR

Parámetros principales	Unidad de medida	Modelos					
		CMS-C/220	CMS-C/440	CMS-C/660	CMS-C/1100	CMS-C/1.5	CMS-C/2.5
Presión de cálculo	MPa	1	1	1	1	1 / 1.3	1 / 1.3
Presión máxima de trabajo	MPa	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9 / 1.2	0.9 / 1.2
Presión de prueba hidrostática	MPa	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5 / 1.95	1.5 / 1.95
Producción nominal de vapor	kg/h	220	440	660	1100	1500	2500
Producción de vapor por m ² de superficie de calefacción	kg/m ²	28.21	27.5	33.67	37.54	37.69	36.23
Temperatura del vapor	°C	184	184	184	184	184 / 194	184 / 194
Temperatura de agua de alimentar	°C	80	80	80	80	80	80
Temperatura de los gases salida del generador	°C	287	286.0	261.8	251.8	266.8 / 276.7	244 / 254.8
Superficie de transferencia o calefacción total	m ²	7.8	16	19.60	29.30	39.80	69
Eficiencia	%	86.3	86.5	88	88.5	88 / 87.8	89.5 / 89
Carga térmica	kcal/h	128576	257153	385729	642882	876657 / 879612	1461096 / 1466019
Potencia térmica útil	kW	149.534	299.069	448.603	747.672	1019.553 / 1022.988	1699.254 / 1704.980
Volumen de agua nivel medio	m ³	1.07	1.52	1.90	3.11	4.27	7.43

ANEXO 1.1 PARAMETROS TERMICOS PRINCIPALES GENERADORES DE VAPOR (CONT.)

Parámetros principales	Unidad de medida	Modelos					
		CMS-C/4	CMS-C/5	CMS-C/6	CMS-C/8	CMS-C/10	
Presión de cálculo	MPa	1 / 1.3	1 / 1.3	1 / 1.3	1 / 1.3	1 / 1.3	
Presión máxima de trabajo	MPa	0.9 / 1.2	0.9 / 1.2	0.9 / 1.2	0.9 / 1.2	0.9 / 1.2	
Presión de prueba hidrostática	MPa	1.5 / 1.95	1.5 / 1.95	1.5 / 1.95	1.5 / 1.95	1.5 / 1.95	
Producción nominal de vapor	kg/h	4000	5000	6000	8000	10000	
Producción de vapor por m ² de superficie de calefacción	kg/m ²	35.8	34.79	35.38	35.76	33.90	
Temperatura del vapor	°C	184 / 194	184 / 194	184 / 194	184 / 194	184 / 194	
Temperatura de agua de alimentar	°C	80	80	80	80	80	
Temperatura de los gases salida del generador	°C	231 / 241.8	231 / 240.7	231.7 / 241.8	226.5 / 236.8	225.5 / 236.3	
Superficie de transferencia o calefacción total	m ²	111.71	143.7	168.4	232.7	295.0	
Eficiencia	%	88.5 / 89.2	89.5 / 89.2	89.5 / 89.2	90.0 / 89.5	90.0 / 89.5	
Carga térmica Potencia térmica útil	kcal/h kW	2337753 / 2345631 2718.807 / 2727.969	2922191 / 2932039 3398.508 /3409.961	3506630 / 3518446 4078.210 / 4091.953	4675506 / 4691262 5437.614 / 5455.938	5844383 / 5864077 6797.017 / 6819.922	
Volumen de agua nivel medio	m ³	12.33	14.72	16.36	20.76	25.66	

ANEXO 1.2 PARAMETROS DE COMBUSTION PRINCIPALES GENERADORES DE VAPOR

Modelo de generadores	Tipos de combustibles		
	Gas natural Nm ³ /h	Fuel oil kg/h	Gas oil kg/h
	1 / 1.3 MPa	1 / 1.3 MPa	1 / 1.3 MPa
CMS-C/220	15.9	15.4	14.35
CMS-C/440	31.8	30.8	28.69
CMS-C/660	47.4	45.9	42.79
CMS-C/1100	78.1	75.7	70.51
CMS-C/1.5	107.1 / 107.5	103.8 / 104.1	96.7 / 97.02
CMS-C/2.5	176.5 / 177.1	171.6 / 171.6	159.36 / 159.9
CMS-C/4	280.5 / 281.8	271.7 / 273.0	253.27 / 254.40
CMS-C/5	350.6 / 353.2	339.7 / 342.1	316.58 / 318.90
CMS-C/6	420.3 / 424.1	407.1 / 410.8	379.47 / 382.89
CMS-C/8	558.5 / 563.5	541.1 / 545.9	504.28 / 508.81
CMS-C/10	698.1 / 703.6	676.3 / 681.1	630.35 / 635.30

ANEXO 1.3 PÉRDIDAS DE RADIACIÓN vs PRODUCCIÓN NOMINAL

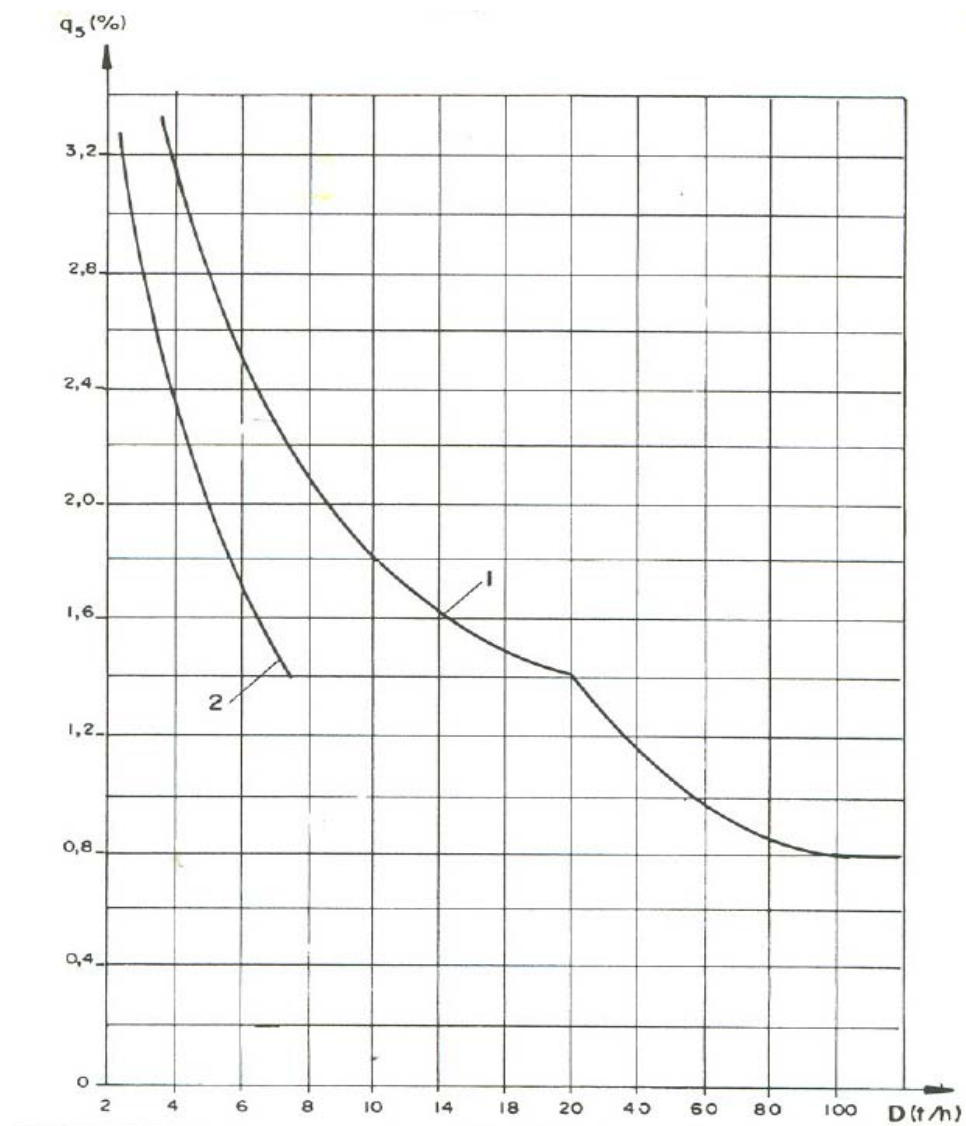


Fig. 3.2
Pérdida por radiación versus D_N .

ANEXO 1.4 RANGOS DE VARIACIÓN DE LA MAGNITUD DE q_5 CON LA PRODUCCIÓN NOMINAL

Producción (D_N)	q_5 (%)
< 10 t/h	1,8 - 3,2
10 - 100 t/h	0,8 - 1,8
100 - 300 t/h	0,6 - 0,8

Facultad de Ciencias Médicas

Hora de Inicio	Hora de Parada	ta	tb	$Q_{ab}/Q_d=(1-t_c/t_a)$	$Q_{ab}/Q_d=(t_c/t_b)$
8:06:15	8:19:10	0:12:55	0:03:51	0,87	0,43
8:23:01	9:24:46	1:01:45	0:09:17	0,97	0,18
9:34:03	9:53:24	0:19:21	0:05:09	0,91	0,32
9:58:33	10:04:47	0:06:14	0:09:28	0,74	0,17
10:14:15	10:24:15	0:10:00	0:06:40	0,84	0,25
10:30:55	10:38:35	0:07:40	0:06:28	0,78	0,26
10:45:03	10:52:21	0:07:18		0,77	
Tiempo de trabajo real del quemador		2:05:13	0:40:53		
Tiempo de trabajo total de la caldera		2:46:06			

Anexo 2.2 Parámetros de trabajo Hospital Provincial Gustavo Aldereguía.

Hospital Provincial Gustavo Aldereguía

Hora de Inicio	Hora de Parada	ta	tb	$Q_{ab}/Q_d=(1-t_c/t_a)$	$Q_{ab}/Q_d=(t_c/t_b)$
4:45:00	5:05:35	0:20:35	0:15:09	0,51	0,67
5:20:44	5:40:52	0:20:08	0:12:34	0,50	0,81
5:53:26	6:09:58	0:16:32	0:11:31	0,39	0,88
6:21:29	6:39:14	0:17:45	0:16:05	0,43	0,63
6:55:19	7:12:48	0:17:29	0:18:18	0,42	0,55
7:31:06	7:47:31	0:16:25	0:28:04	0,38	0,36
8:15:35	8:35:10	0:19:35	0:15:44	0,48	0,65
8:50:54	9:10:46	0:19:52	0:12:26	0,49	0,82
9:23:12	9:39:10	0:15:58	0:12:31	0,36	0,81
9:51:41	10:09:55	0:18:14	0:15:19	0,44	0,66
10:25:14	10:42:43	0:17:29	0:18:42	0,42	0,54
11:01:25	11:17:50	0:16:25	0:14:35	0,38	0,70
11:32:25	11:52:01	0:19:36	0:15:44	0,48	0,65
12:07:45	12:27:37	0:19:52	0:13:26	0,49	0,76
12:41:03	12:57:01	0:15:58	0:12:31	0,36	0,81
13:09:32	13:27:46	0:18:14	0:15:19	0,44	0,66
13:43:05	14:00:29	0:17:24	0:19:13	0,42	0,53
14:19:42	14:35:07	0:15:25	0:12:31	0,34	0,81
14:47:38	15:05:52	0:18:14	0:15:16	0,44	0,66
15:21:08	15:38:50	0:17:42	0:18:42	0,43	0,54
15:57:32	16:13:57	0:16:25	0:22:35	0,38	0,45
16:36:32	17:03:55	0:27:23		0,63	
Tiempo de trabajo real del quemador		6:42:40	5:36:15		
Tiempo de trabajo total de la caldera		12:18:55			

Anexo 2.3 Parámetros de trabajo Hospital Pediátrico Paquito González.

Hospital Pediátrico Paquito González

Hora de Inicio	Hora de Parada	ta	tb	Qab/Qd=(1-tc/ta)	Qab/Qd=(tc/tb)
5:55:15	6:01:35	0:06:20	0:05:46	0,49	0,56
6:07:21	6:11:52	0:04:31	0:04:09	0,28	0,78
6:16:01	6:21:12	0:05:11	0:05:48	0,38	0,62
6:27:00	6:32:41	0:05:41	0:04:30	0,43	0,72
6:37:11	6:41:46	0:04:35	0:04:37	0,29	0,70
6:46:23	6:51:10	0:04:47	0:05:44	0,32	0,56
6:56:54	7:00:01	0:03:07	0:04:20	-0,04	0,75
7:04:21	7:10:14	0:05:53	0:04:38	0,45	0,70
7:14:52	7:19:09	0:04:17	0:04:36	0,25	0,70
7:23:45	7:27:30	0:03:45	0:03:52	0,14	0,84
7:31:22	7:36:07	0:04:45	0:04:27	0,32	0,73
7:40:34	7:45:12	0:04:38	0:04:46	0,30	0,68
7:49:58	7:54:42	0:04:44	0:04:33	0,32	0,71
7:59:15	8:04:53	0:05:38	0:04:00	0,43	0,81
8:08:53	8:13:25	0:04:32	0:02:36	0,29	1,24
8:16:01	8:22:12	0:06:11	0:04:55	0,48	0,66
8:27:07	8:32:41	0:05:34	0:04:30	0,42	0,72
8:37:11	8:41:36	0:04:25	0:04:47	0,27	0,68
8:46:23	8:52:11	0:05:48	0:04:43	0,44	0,69
8:56:54	9:03:01	0:06:07	0:01:20	0,47	2,43
9:04:21	9:10:14	0:05:53	0:04:38	0,45	0,70
9:14:52	9:19:09	0:04:17	0:04:36	0,25	0,70
9:23:45	9:27:30	0:03:45	0:03:52	0,14	0,84
9:31:22	9:36:07	0:04:45	0:04:17	0,32	0,75
9:40:24	9:45:12	0:04:48	0:04:39	0,33	0,70
9:49:51	9:53:41	0:03:50	0:05:38	0,16	0,57
9:59:19	10:04:43	0:05:24	0:04:12	0,40	0,77
10:08:55	10:12:25	0:03:30	0:05:00	0,08	0,65
10:17:25	10:21:56	0:04:31	0:04:34	0,28	0,71
10:26:30	10:30:15	0:03:45	0:05:05	0,14	0,64
10:35:20	10:39:00	0:03:40	0:04:50	0,12	0,67
10:43:50	10:48:34	0:04:44	0:04:48	0,32	0,67
10:53:22	10:57:10	0:03:48	0:04:47	0,15	0,68
11:01:57	11:06:01	0:04:04	0:04:08	0,20	0,78
11:10:09	11:14:35	0:04:26	0:04:10	0,27	0,78
11:18:45	11:22:15	0:03:30	0:04:09	0,08	0,78
11:26:24	11:29:56	0:03:32	0:03:24	0,08	0,95
11:33:20	11:36:35	0:03:15	0:03:46	0,01	0,86

11:40:21	11:45:50	0:05:29	0:03:20	0,41	0,97
11:49:10	11:53:48	0:04:38	0:02:40	0,30	1,21
11:56:28	12:00:37	0:04:09	0:04:22	0,22	0,74
12:04:59	12:09:10	0:04:11	0:03:26	0,23	0,94
12:12:36	12:16:46	0:04:10	0:02:58	0,22	1,09
12:19:44	12:24:01	0:04:17	0:04:49	0,25	0,67
12:28:50	12:33:22	0:04:32	0:02:26	0,29	1,33
12:35:48	12:39:31	0:03:43	0:04:26	0,13	0,73
12:43:57	12:47:39	0:03:42	0:04:49	0,13	0,67
12:52:28	12:57:00	0:04:32	0:04:38	0,29	0,70
13:01:38	13:05:45	0:04:07	0:04:16	0,21	0,76
13:10:01	13:15:25	0:05:24	0:04:19	0,40	0,75
13:19:44	13:24:34	0:04:50	0:05:10	0,33	0,63
13:29:44	13:33:58	0:04:14	0:02:51	0,24	1,13
13:36:49	13:40:51	0:04:02	0:03:24	0,20	0,95
13:44:15	13:48:59	0:04:44	0:04:02	0,32	0,80
13:53:01	13:57:46	0:04:45	0:04:46	0,32	0,68
14:02:32	14:06:52	0:04:20			
Tiempo de trabajo real del quemador		4:15:45	3:55:52		
Tiempo de trabajo total de la caldera		8:11:37			

Anexo 2.4 Parámetros de trabajo Hospital Mártires de Girón.

Hospital Mártires de Girón

Hora de Inicio	Hora de Parada	ta	tb	$Q_{ab}/Q_d=(1-t_c/t_a)$	$Q_{ab}/Q_d=(t_c/t_b)$
-----------------------	-----------------------	-----------	-----------	--	--

5:54:02	7:10:23	1:16:21	0:11:33	0,89	0,73
7:21:56	8:17:04	0:55:08	0:11:50	0,85	0,71
8:28:54	9:02:39	0:33:45	0:10:24	0,75	0,81
9:13:03	9:45:27	0:32:24	0:11:19	0,74	0,74
9:56:46	10:21:19	0:24:33	0:16:08	0,66	0,52
10:37:27	10:55:30	0:18:03	0:15:59	0,53	0,53
11:11:29	11:28:56	0:17:27	0:17:04	0,52	0,49
11:46:00	12:04:00	0:18:00		0,53	
Tiempo de trabajo real del quemador		4:35:41	1:34:17		
Tiempo de trabajo total de la caldera		6:09:58			

Anexo 2.5 Parámetros de trabajo Comedor Escolar.

Comedor Escolar

Hora de Inicio	Hora de Parada	ta	tb	Qab/Qd=(1-tc/ta)	Qab/Qd=(tc/tb)
6:25:10	6:32:26	0:07:16	0:05:01	1,00	0,00
6:37:27	6:49:11	0:11:44	0:21:24	1,00	0,00
7:10:35	7:19:20	0:08:45	0:02:13	1,00	0,00
7:21:33	7:29:50	0:08:17	0:07:45	1,00	0,00
7:37:35	7:45:03	0:07:28	0:08:41	1,00	0,00
7:53:44	8:01:20	0:07:36	0:15:11	1,00	0,00
8:16:31	8:22:31	0:06:00	0:15:39	1,00	0,00
8:38:10	8:43:08	0:04:58	0:08:32	1,00	0,00
8:51:40	8:56:01	0:04:21	0:12:46	1,00	0,00
9:08:47	9:16:05	0:07:18		1,00	
Tiempo de trabajo real del quemador		1:13:43	1:37:12		
Tiempo de trabajo total de la caldera		2:50:55			

Anexo 2.6 Parámetros de trabajo Tecnológico 5 de Septiembre.

Tecnológico 5 de Septiembre

Hora de Inicio	Hora de Parada	ta	tb	$Q_{ab}/Q_d=(1-t_c/t_a)$	$Q_{ab}/Q_d=(t_c/t_b)$
7:25:30	7:28:40	0:03:10	0:51:42	-4,45	0,33
8:20:22	8:24:05	0:03:43	0:15:45	-3,64	1,10
8:39:50	8:59:20	0:19:30	0:11:34	0,12	1,49
9:10:54	9:24:35	0:13:41	0:12:05	-0,26	1,43
9:36:40	9:51:20	0:14:40	0:12:12	-0,18	1,41
10:03:32	10:19:20	0:15:48	0:17:48	-0,09	0,97
10:37:08	10:50:32	0:13:24	0:19:18	-0,29	0,89
11:09:50	11:23:33	0:13:43	0:14:57	-0,26	1,15
11:38:30	11:57:23	0:18:53		0,09	
Tiempo de trabajo real del quemador		1:56:32	2:35:21		
Tiempo de trabajo total de la caldera		4:31:53			

Anexo 2.7 Parámetros de trabajo Universidad Carlos Rafael Rodríguez.

Universidad Carlos Rafael Rodríguez
--

Hora de Inicio	Hora de Parada	ta	tb	$Q_{ab}/Q_d=(1-t_c/t_a)$	$Q_{ab}/Q_d=(t_c/t_b)$
8:00:02	8:30:31	0:30:29	0:01:36	1,00	0,00
8:32:07	8:40:22	0:08:15	0:04:48	1,00	0,00
8:45:10	8:50:07	0:04:57	0:05:17	1,00	0,00
8:55:24	9:00:51	0:05:27	0:04:16	1,00	0,00
9:05:07	10:00:31	0:55:24		1,00	
Tiempo de trabajo real del quemador		1:44:32	0:15:57		
Tiempo de trabajo total de la caldera		2:00:29			

Anexo 2.8 Parámetros de trabajo Fábrica de Conservas El Faro.

Fábrica de Conservas El Faro

Hora de Inicio	Hora de Parada	ta	tb	$Q_{ab}/Q_d=(1-t_c/t_a)$	$Q_{ab}/Q_d=(t_c/t_b)$
8:23:20	8:34:28	0:11:08	0:09:15	0,58	0,51
8:43:43	8:54:53	0:11:10	0:08:22	0,58	0,56
9:03:15	9:12:36	0:09:21	0:11:54	0,50	0,40
9:24:30	9:38:05	0:13:35	0:06:30	0,65	0,73
9:44:35	9:55:15	0:10:40	0:13:15	0,56	0,36
10:08:30	10:18:56	0:10:26	0:06:29	0,55	0,73
10:25:25	10:36:05	0:10:40	0:08:49	0,56	0,53
10:44:54	10:55:16	0:10:22	0:08:46	0,55	0,54
11:04:02	11:15:01	0:10:59	0:07:20	0,57	0,64
11:22:21	11:31:11	0:08:50	0:08:25	0,47	0,56
11:39:36	11:48:41	0:09:05	0:08:52	0,48	0,53
11:57:33	12:09:08	0:11:35	0:07:49	0,59	0,60
12:16:57	12:26:08	0:09:11		0,49	
Tiempo de trabajo real del quemador		2:17:02	1:45:46		
Tiempo de trabajo total de la caldera		4:02:48			

Anexo 2.9 Parámetros de trabajo Estadio 5 de Septiembre.

Estadio 5 de Septiembre

Hora de Inicio	Hora de Parada	ta	tb	$Q_{ab}/Q_d=(1-tc/ta)$	$Q_{ab}/Q_d=(tc/tb)$
5:30:05	6:10:23	0:40:18	0:07:02	0,97	0,17
6:17:25	6:22:04	0:04:39	0:13:40	0,76	0,09
6:35:44	6:42:32	0:06:48	0:15:04	0,83	0,08
6:57:36	7:05:17	0:07:41	0:06:43	0,85	0,17
7:12:00	7:20:24	0:08:24	0:04:41	0,85	0,24
7:25:05	7:29:11	0:04:06	0:02:59	0,70	0,40
7:32:10	7:35:19	0:03:09	0:03:03	0,60	0,40
7:38:22	7:43:52	0:05:30	0:03:16	0,76	0,30
7:47:08	7:50:26	0:03:18	0:04:22	0,60	0,30
7:54:48	7:57:45	0:02:57	0:04:10	0,60	0,30
8:01:55	8:05:07	0:03:12	0:04:59	0,70	0,24
8:10:06	8:12:22	0:02:16	0:04:12	0,40	0,30
8:16:34	8:21:31	0:04:57			
Tiempo de trabajo real del quemador		1:37:15	1:14:11		
Tiempo de trabajo total de la caldera		2:51:26			

Anexo 2.10 Parámetros de trabajo Lavandería SERVISA.

SERVISA

Hora de Inicio	Hora de Parada	ta	tb	$Q_{ab}/Q_d=(1-tc/ta)$	$Q_{ab}/Q_d=(tc/tb)$
8:10:20	8:20:05	0:09:45	0:10:25	1,00	0,00
8:30:30	8:35:04	0:04:34	0:10:49	1,00	0,00
8:45:53	8:48:40	0:02:47	0:09:33	1,00	0,00
8:58:13	9:00:15	0:02:02	0:09:57	1,00	0,00
9:10:12	9:15:37	0:05:25	0:29:42	1,00	0,00
9:45:19	9:50:47	0:05:28		1,00	
Tiempo de trabajo real del quemador		0:30:01	1:10:26		
Tiempo de trabajo total de la caldera		1:40:27			

Anexo 2.11 Parámetros de trabajo EPICIEN.

EPICIEN

Hora de Inicio	Hora de Parada	ta	tb	$Q_{ab}/Q_d=(1-t_c/t_a)$	$Q_{ab}/Q_d=(t_c/t_b)$
9:40:23	10:40:02	0:59:39	0:05:03	1,00	0,00
10:45:05	11:15:41	0:30:36	0:09:34	1,00	0,00
11:25:15	12:00:01	0:34:46	0:10:52	1,00	0,00
12:10:53	12:45:32	0:34:39	0:09:54	1,00	0,00
12:55:26	13:35:14	0:39:48	0:10:08	1,00	0,00
13:45:22	14:20:46	0:35:24	0:09:47	1,00	0,00
14:30:33	15:00:21	0:29:48	0:09:50	1,00	0,00
15:10:11	15:20:44	0:10:33		1,00	
Tiempo de trabajo real del quemador		4:35:13	1:05:08		
Tiempo de trabajo total de la caldera		5:40:21			

Anexo 3.1 Resumen de parámetros.

Fluido	Parámetros	Denominación	Unidad de Medida	Facultad Ciencias Médicas	Hospital Gustavo Aldereguía	Hospital Paquito González	Hospital Mártires de Girón	Comedor Escolar	Tecnológico 5 de Septiembre
Combustible	Tipo			Diesel	Fuel Oil	Fuel Oil	Diesel	Diesel	Diesel
	Flujo	G	Kg/h	33,25	222,7	46,56	32,98	35,04	14,31
	Presión	p	kg/cm ²	18	22	20	16	4	16
	Temperatura	T	K	298,15	413,15	398,15	298,15	298,15	298,15
Agua	Flujo	G	Kg/h	448,8	2872,8	596	428,8	480	196
	Presión	p	kg/cm ²	1	1	1	1	1	1
	Temperatura	T	K	341,15	354,15	326,15	353,15	321,15	338,15
	Entalpía	e	kJ/kg	284,74	339,25	221,96	335,05	201,06	272,18
	Entropía	s	kJ/kgK	0,93	1,09	0,74	1,07	0,68	0,89
Vapor saturado	Flujo	G	Kg/h	448,8	2872,8	596	428,8	480	196
	Presión	p	kg/cm ²	7	11	9	7	7	7
	Temperatura	T	K	438,1	457,21	449,44	438,1	438,1	438,1
	Entalpía	e	kJ/kg	2762,75	2780,65	2773,9	2762,75	2762,75	2762,75
	Entropía	s	kJ/kgK	6,71	6,55	6,61	6,71	6,71	6,71

Anexo 3.1 Resumen de parámetros. (Continuación)

Fluido	Parámetros	Denominación	Unidad de Medida	Instituto Superior Pedagógico	Universidad de Cienfuegos	Fábrica de Conservas El Faro	Estadio 5 de Septiembre	Lavandería UNICORNIO	Combinado Pesquero
Combustible	Tipo			Fuel Oil	Diesel	Fuel Oil	Diesel	Fuel Oil	Diesel
	Flujo	G	Kg/h	33,74	14,2	61,82	7,94	246,73	5,93
	Presión	p	kg/cm ²	20	18	24	18	22	16
	Temperatura	T	K	423,15	298,15	418,15	298,15	413,15	298,15
Agua	Flujo	G	Kg/h	418,4	196	816	109,6	3256,8	80
	Presión	p	kg/cm ²	1	1	1	1	1	1
	Temperatura	T	K	343,15	369,15	343,15	353,15	354,15	333,15
	Entalpía	e	kJ/kg	293,12	402,31	293,12	335,05	339,25	251,25
	Entropía	s	kJ/kgK	0,96	1,26	0,96	1,07	1,09	0,83
Vapor saturado	Flujo	G	Kg/h	418,4	196	816	109,6	3256,8	80
	Presión	p	kg/cm ²	9	9	8,8	6	11	7
	Temperatura	T	K	448,5	448,5	447,55	431,98	457,21	438,1
	Entalpía	e	kJ/kg	2773,03	2773,03	2772,14	2756,14	2780,65	2762,75
	Entropía	s	kJ/kgK	6,62	6,62	6,63	6,76	6,55	6,71

Anexo 3.2 Resultados del cálculo exergético.

Fluido	Parámetros	Denominación	Unidad de Medida	Facultad Ciencias Médicas	Hospital Gustavo Aldereguía	Hospital Paquito González	Hospital Mártires de Girón	Comedor Escolar	Tecnológico 5 de Septiembre
Combustible	Exergía	Qd	kJ/kg	43140,18	43347,08	43351,47	43140,18	43140,18	43140,18
	Flujo Exergético	Ecomb	kW	398,45	2681,50	560,68	395,21	419,90	171,48
Agua	Exergía	eaa	kJ/kg	12,86	19,66	6,72	21,43	3,71	12,22
	Flujo Exergético	Eaa	kW	1,60	15,69	1,11	2,55	0,50	0,67
Vapor saturado	Exergía	evs	kJ/kg	767,56	833,16	808,52	767,56	767,56	767,56
	Flujo Exergético	Evs	kW	95,69	664,86	133,86	91,42	102,34	41,79
Eficiencia Exergética		η_{exerg}	%	23,92	24,65	23,83	22,98	24,34	24,28

Anexo 3.2 Resultados del cálculo exergético. (Continuación)

Fluido	Parámetros	Denominación	Unidad de Medida	Instituto Superior Pedagógico	Universidad de Cienfuegos	Fábrica de Conservas El Faro	Estadio 5 de Septiembre	Lavandería UNICORNIO	Combinado Pesquero
Combustible	Exergía	Qd	kJ/kg	43412,14	43140,18	43399,75	43107,93	43387,49	43140,18
	Flujo Exergético	Ecomb	kW	406,87	170,16	745,27	95,08	2973,61	71,06
Agua	Exergía	eaa	kJ/kg	12,29	32,04	12,29	21,43	19,66	9,18
	Flujo Exergético	Eaa	kW	1,43	1,74	2,79	0,65	17,79	0,20
Vapor saturado	Exergía	evs	kJ/kg	804,67	804,67	800,80	746,04	833,16	767,56
	Flujo Exergético	Evs	kW	93,52	43,81	181,51	22,71	753,73	17,06
Eficiencia Exergética		η_{exerg}	%	22,91	25,48	24,26	23,73	25,20	23,93

Anexo 3.3 Resultados del cálculo económico.

Parámetros	Denominación	Unidad de Medida	Facultad Ciencias Médicas	Hospital Gustavo Aldereguía	Hospital Paquito González	Hospital Mártires de Girón	Comedor Escolar	Tecnológico 5 de Septiembre
Factor de Recuperación	FR		0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275
Costo Zonal	Cz	\$/h	2,28	2,25	2,70	1,63	4,86	2,19
Costo Exergético del Combustible	Cecomb	\$/kJ	0,00001402	0,00000693	0,0000069	0,0000140	0,0000140	0,0000140
Costo Exergético del Agua	Ceagua	\$/kJ	0,00005056	0,00003306	0,0000967	0,0000303	0,0001750	0,0000532
Costo Exergético Unitario del Vapor Saturado	Cevs	\$/kJ	0,00023200	0,00014198	0,0004182	0,0001510	0,0007462	0,0002476
Costo de Producción del Vapor Saturado	Cpvs	\$/ton	178,07	118,30	338,14	115,87	572,77	190,07

Anexo 3.3 Resultados del cálculo económico. (Continuación)

Parámetros	Denominación	Unidad de Medida	Instituto Superior Pedagógico	Universidad de Cienfuegos	Fábrica de Conservas El Faro	Estadio 5 de Septiembre	Lavandería UNICORNIO	Combinado Pesquero
Factor de Recuperación	FR		0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275	0,1275
Costo Zonal	Cz	\$/h	2,56	2,28	2,98	3,33	2,25	4,35
Costo Exergético del Combustible	Cecomb	\$/kJ	0,0000069	0,0000140	0,0000069	0,0000140	0,0000069	0,0000140
Costo Exergético del Agua	Ceagua	\$/kJ	0,0000529	0,0000203	0,0000529	0,0000303	0,0000610	0,0000708
Costo Exergético Unitario del Vapor Saturado	Cevs	\$/kJ	0,0002454	0,0001081	0,0002294	0,0001826	0,0002500	0,0003807
Costo de Producción del Vapor Saturado	Cpvs	\$/ton	197,47	86,95	183,72	136,26	208,27	292,21