



REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR



“Influencias de las Pérdidas por Radiación en las Calderas Pirotubulares”

[Trabajo de Diploma]

Autor:

Ram Kumar Gopal

Tutores:

Dra. Margarita Josefa Lapido Rodríguez

Dr. Julio Rafael Gómez Sarduy

Ing. David Armando Vidal Moya



Cienfuegos, 2009

**DECLARACION DE AUTORIDAD
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS**



“Carlos Rafael Rodríguez”

Sistema de Documentación y Proyecto.

Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez como parte de la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Universidad de Cienfuegos para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de la Universidad de Cienfuegos.

Firma del autor.

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

Información Científico Técnico
Nombre y Apellidos. Firma.

Vice Decano.

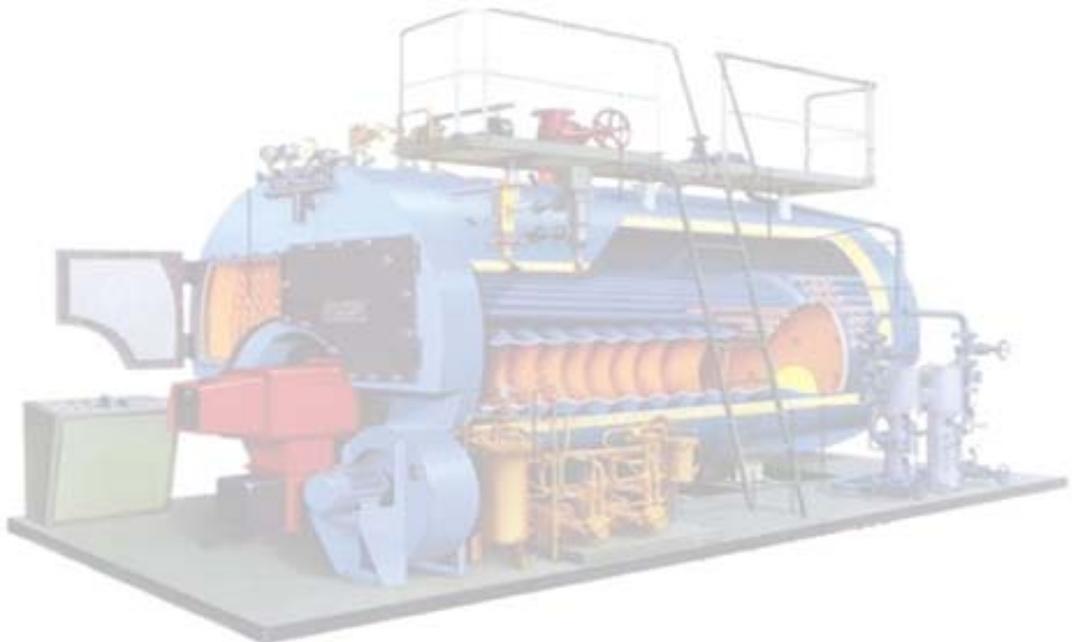
Nombre y Apellidos. Firma.

Firma del Tutor

Sistema de Documentación y Proyecto.
Nombre y Apellido. Firma.



Pensamientos

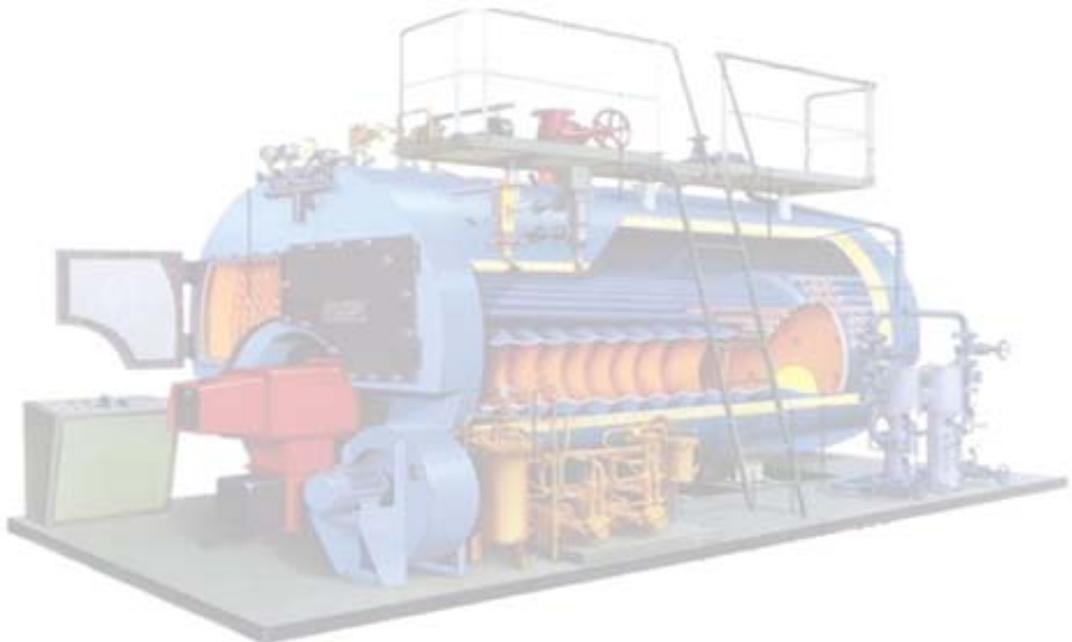


*“No hay tareas difíciles sino hombres
incapaces”*

Jefe Fidel Castro Ruz



Agradecimientos



Mis Sinceros Agradecimientos.

A Dios.

A mi familia por traerme al mundo y depositar su confianza en mí.

A mis tutores la Dra. Margarita Josefa Lapido Rodríguez y el Dr. Julio Rafael Gómez Sarduy por sus apoyos, dedicaciones y sus tiempos valerosos conmigo durante todo el transcurso del trabajo, que sin ellos no hubiera sido posible la realización del mismo.

A todos los trabajadores de la Empresa ALASTOR de Cienfuegos, especialmente el Ing. David Armando Vidal Moya y los trabajadores de los centros de estudio; gracias por su apoyo durante mis visitas.

A mi novia Mae Thyra ST. Clair por estar en las buenas y malas apoyándome siempre.

Agradezco a todos los profesores, especialmente al Dr. José Monteagudo Yanes, MSc. Yarelis Valdivia Nodal y los trabajadores de la Facultad de Ingeniería Mecánica por brindar sus servicios a mi formación profesional.

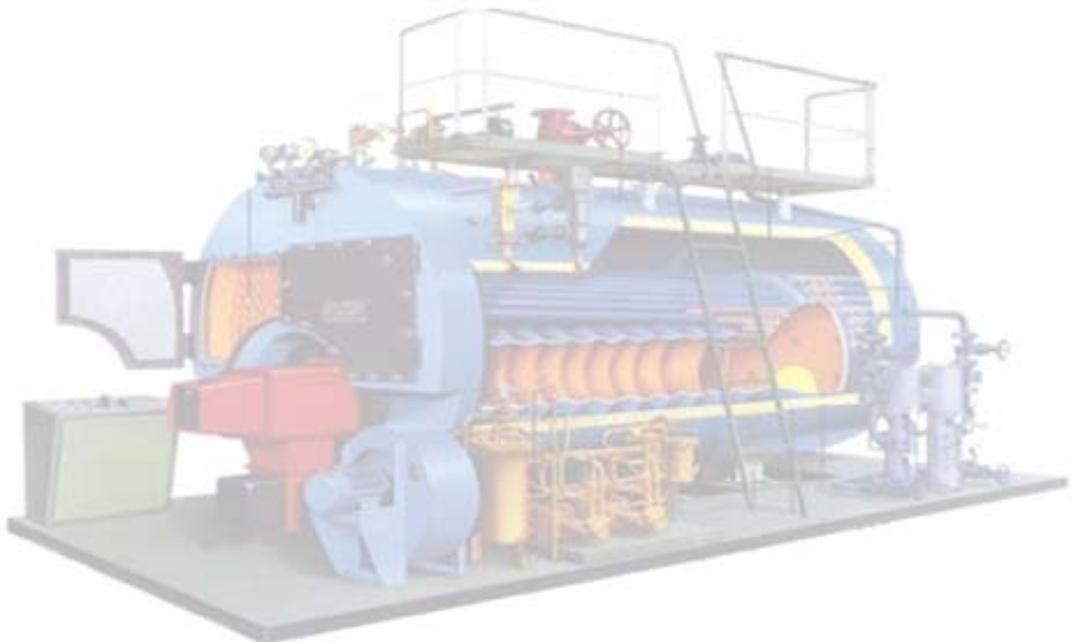
A todos los amigos que transcurrieron estos cinco años de estudio conmigo.

A la Revolución Cubana y su Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz, por brindar esta oportunidad a los estudiantes de otras tierras.

Muchas Gracias.



Dedicataria



DEDICATORIA

A Lord Shiva y Lord Rama por bendecir, proteger y fortalecer mi camino.

A la memoria de mi madre Doodmattie, quien alumbra mi camino.

A mi padre y hermana, Prem y Radhika por siempre estar a mi lado.

A Mae Thyra ST.Clair por enseñarme como querer y amar sin barreras.

A todos mis amigos especialmente Shameer S. Samad, Deodat Indar y Prakash Deonarine, que me han tratado como familia durante los momentos difíciles.

SINTESIS

Este trabajo aborda la evaluación de las pérdidas por radiación, en un grupo de calderas del sector de educación y del turismo en el municipio de Cienfuegos, a partir de métodos tradicionales de cálculo de pérdidas por radiación y aplicando métodos de inteligencia artificial para calcular la misma.

Se exponen las generalidades de las calderas y pérdidas por radiación según diferentes fuentes bibliográficas con las expresiones e indicadores para calcular las pérdidas por radiación en las calderas y se calculó el factor de carga para determinar el grado de sobre dimensionado de las mismas.

Se elabora un modelo matemático utilizando datos experimentales y técnicas de inteligencia artificial, a partir de este se diseña una aplicación para calcular las pérdidas por radiación en las calderas utilizando el software Matlab. La aplicación utiliza los valores de temperaturas de las paredes y la capacidad de la caldera como datos de entrada y se calcula la pérdida por radiación como resultado. Se realiza un análisis de errores entre los cálculos tradicionales y los resultados de la aplicación.

Se culmina en el trabajo con un análisis económico preliminar para determinar los costos de pérdidas por radiación en las cinco instalaciones de estudio.



AVAL DEL TUTORA

Por este medio, certificamos que:

El Trabajo de Diploma:

Titulo: Influencia de las Pérdidas por Radiación en las Calderas Piro-tubulares.

Autor: Ram Kumar Gopal.

Tutora: Dra. Margarita Josefa Lapidó Rodríguez.

El trabajo en cuestión tiene los requisitos necesarios para ser defendido presenta una adecuada estructuración y buen nivel técnico y científico.

Dado en Cienfuegos, 18 de Mayo del 2009.

Tutora: Dra. Margarita Josefa Lapidó Rodríguez.

TABLA DE CONTENIDOS

	ÍNDICE	Pág.
	INTRODUCCIÓN	
1.1	ANTECEDENTES.....	1
1.2	JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO	2
1.3	PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.4	OBJETIVO GENERAL.....	3
1.4.1	Objetivos Específicos.....	3
1.5	HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.6	DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.7	BENEFICIOS ESPERADOS.....	4
1.8	LIMITES DEL ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
	CAPÍTULO I: GENERALIDADES DE LA CALDERA Y PÉRDIDAS POR RADIACIÓN	
2.1	CALDERAS.....	5
2.2	RESEÑA HISTORICA DE CALDERAS PIROTUBULARES.....	6
2.3	GENERALIDADES DE LAS CALDERAS PIROTUBULARES.....	7
2.3.1	Elementos, Términos y Componentes de una Caldera.....	10
2.3.2	Funcionamiento de las Calderas Piro tubulares.....	11
2.3.3	Aplicaciones de las Calderas Piro tubulares.....	12
2.3.4	Tendencias en el Desarrollo de las Calderas.....	13
2.4	EL FENÓMENO DE LA RADIACIÓN.....	14
2.4.1	Radiación Térmica.....	15
2.4.2	Perdida de Calor por Radiación en la Caldera Piro tubular.....	15
2.4.3	Evitar Perdidas por Radiación.....	16

2.5	INFLUENCIA DEL SOBREDIMENSIONAMIENTO EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	17
2.5.1	Factor de Carga.....	18
2.6	LAS INSTALACIONES DE ESTUDIO.....	20
2.6.1	Tecnológico 5 de Septiembre.....	21
2.6.2	Instituto Superior Pedagógico.....	21
2.6.3	Comedor Escolar.....	21
2.6.4	Universidad de Cienfuegos.....	21
2.6.5	Lavandería Unicornio.....	22
2.6.6	Características Técnicas de las Calderas de Estudio.....	22
2.7	CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO I.....	23

CAPÍTULO II: CÁLCULOS DE PÉRDIDAS POR RADIACIÓN Y EL MODELO MATEMÁTICO

3.1	MÉTODOS PARA CALCULAR LAS PÉRDIDAS DE CALOR POR RADIACIÓN.....	24
3.1.1	Indicadores para Calcular Pérdida de Calor por Radiación.....	25
3.2	EXPRESIONES DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	25
3.2.1	Calculo de Coeficiente de Traspaso de Calor por Convección.....	27
	Calculo de Coeficiente de Traspaso de Calor por Radiación.....	29
3.3	EXPRESIONES PARA DIFERENTES CAPACIDADES DE CALDERAS...	30
3.4	PÉRDIDAS POR CARGA.....	32
3.5	CÁLCULOS RÁPIDOS.....	32
3.6	MEDICIONES DURANTE EL FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA....	33
3.6.1	Instrumentos de Mediciones.....	34
3.6.2	Resultados de Mediciones.....	34
3.7	EL MODELO MATEMÁTICO.....	35
3.8	FUNDAMENTOS DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES.....	36

3.8.1	Diseño y Entrenamiento de las RNA.....	38
3.8.2	Selección de la Arquitectura de la RNA.....	40
3.8.3	Arquitectura de la RNA.....	41
3.8.4	Sintaxis del Modelo Neuronal.....	42
3.8.5	Análisis Post-Entrenamiento.....	44
3.8.6	Aplicación Desarrollada.....	46
3.8.7	Calculo de Error Absoluto entre Resulto de Expresión (3.2) y la Aplicación Desarrollada.....	49
3.9	CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO II.....	50

CAPÍTULO III: CÁLCULO Y EVALUACION DE PÉRDIDAS POR RADIACIÓN

4.1	SOBREDIMENSION Y FACTOR DE CARGA.....	51
4.2	CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR POR RADIACIÓN EN FUNCIÓN DE LAS EXPRESIONES.....	53
4.2.1	Calculo de Error Absoluto entre Resulto de Expresión (3.2) y la Aplicación Desarrollada.....	55
4.3	EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS PÉRDIDAS POR RADIACIÓN EN LAS CALDERAS.....	55
4.4	METODOLOGÍA PARA CALCULAR EL COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN DE VAPOR`.....	57
4.4.1	Cálculos de los Costos Fijos.....	57
4.4.2	Costo Variable.....	58
4.4.3	Resultados de Costos Económicos.....	59
4.5	COSTO DE PÉRDIDAS DE CALOR POR RADIACIÓN.....	59
4.6	CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO III.....	61
	CONCLUSIONES GENERALES	62

RECOMENDACIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	64

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

En el marco de la Revolución Energética es necesario investigar con que eficiencia se realizan las actividades industriales especialmente un país que no tiene grandes recursos energéticos. El ahorro de estos recursos energéticos es un concepto muy importante en cualquier industria y aquí esto no es diferente. El grado de eficiencia de trabajo de las instalaciones constituye una parte fundamental en el uso de recursos energéticos, especialmente el combustible. Este es el mismo concepto para el caso de las unidades generadoras de vapor, como es el caso de la unidad pirotubular donde la eficiencia de dichas instalaciones depende en gran medida de las pérdidas por radiación.

Este trabajo se realizó como parte del Trabajo de Diploma de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Cienfuegos y tiene como objetivo estudiar la influencia de las pérdidas por radiación en las calderas pirotubulares en un grupo de calderas del sector de la educación y del turismo en el municipio de Cienfuegos.

Las calderas pirotubulares son equipos de pequeño potencial que no representan una gran cantidad de producción de vapor, no obstante son numerosas las empresas que las utilizan en diferentes procesos por lo que en su conjunto sí representan un porcentaje significativo en el consumo de combustible del país. Por eso la influencia de las pérdidas por radiación sí tiene un gran impacto en el uso de combustible en las calderas pirotubulares.

La empresa ALASTOR que dirige el grupo de calderas pirotubulares en el país, ha desarrollado nuevos modelos buscando valores de eficiencia más elevados.

Más de 3000 calderas están instaladas en diferentes sectores y empresas con diferentes rangos de explotación caracterizadas con valores de eficiencia bajas, en el

orden de 65 - 85% y altos valores de temperatura hasta más de 300°C en algunos casos.

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Las calderas pirotubulares son equipos que generan vapor para diferentes usos, en procesos industriales y de servicios, por lo que son numerosas tanto en Cuba como en otros países. Conocer la eficiencia con que estas instalaciones están explotando es esencial para su funcionamiento técnico, destacándose como elemento importante los factores que influyen en su rendimiento. Uno de estos factores es la pérdida por radiación y su influencia técnica y económica en el funcionamiento de las calderas, aspecto este que puede ser útil a los gerentes de las empresas que utilizan calderas pirotubulares cada día para realizar sus procesos de producción. Con la información del impacto de pérdidas por radiación se pueden tomar decisiones lógicas para mejorar la explotación o proponer nuevos diseños en las instalaciones de calderas pirotubulares instaladas en el país.

1.3 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En el país la empresa ALASTOR atiende más de 3000 calderas pirotubulares que trabajan con valores de baja eficiencia que oscilan entre 70 y 85 % debido a las elevadas pérdidas por radiación y al grado de sobredimensionamiento en calderas de varios sectores, como es el caso del sector de Educación, limitadas con instrumentación adecuada para efectuar su evaluación sistemáticamente.

1.4 OBJETIVO GENERAL

Determinar las pérdidas por radiación en la evaluación de calderas pirotubulares aplicando métodos de inteligencia artificial.

1.4.1 Objetivos Específicos

1. Demostrar el sobredimensionamiento de las calderas estudiadas.
2. Evaluar las pérdidas energéticas que se producen por radiación al medio.
3. Establecer un modelo matemático utilizando un procedimiento experimental aplicando técnicas de inteligencia artificial para calcular las pérdidas por radiación.
4. Calcular el costo económico de las pérdidas energéticas que se producen por radiación de las calderas.

1.5 HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

La determinación de expresiones prácticas, aplicando métodos de inteligencia artificial, para determinar las pérdidas por radiación en calderas pirotubulares permitirá evaluar sistemáticamente las calderas instaladas en el país.

1.6 DISEÑO METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

Para realizar la investigación se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Mediciones reales en los 5 centros que se deciden para la evaluación de las pérdidas por radiación.
- Realizar cálculos para determinar las pérdidas por radiación basado en diferentes expresiones obtenidas en la literatura revisada.
- Elaboración del modelo matemático con la aplicación de técnicas de inteligencia artificial.

1.7 BENEFICIOS ESPERADOS

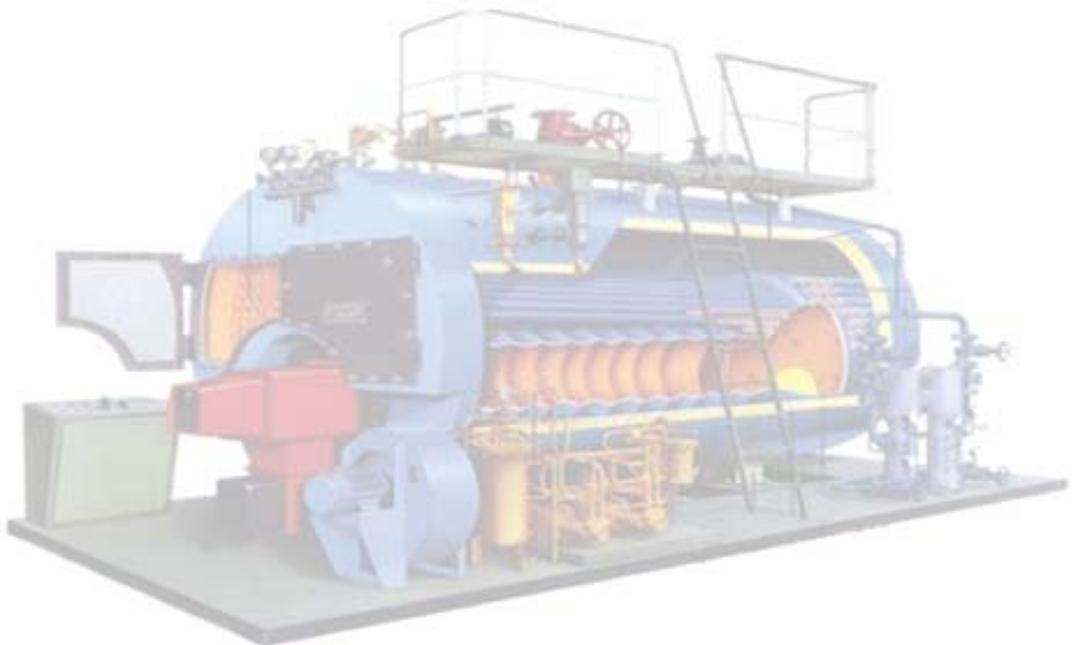
Obtener un software para la evaluación de las pérdidas por radiación de las calderas pirotubulares en el rango de trabajo estudiado.

1.8 LIMITES DEL ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

Las expresiones encontradas en este trabajo no toman en consideración simultáneamente todos los factores que influyen en las pérdidas por radiación y existe falta de instrumentos para hacer mediciones con mayor exactitud.

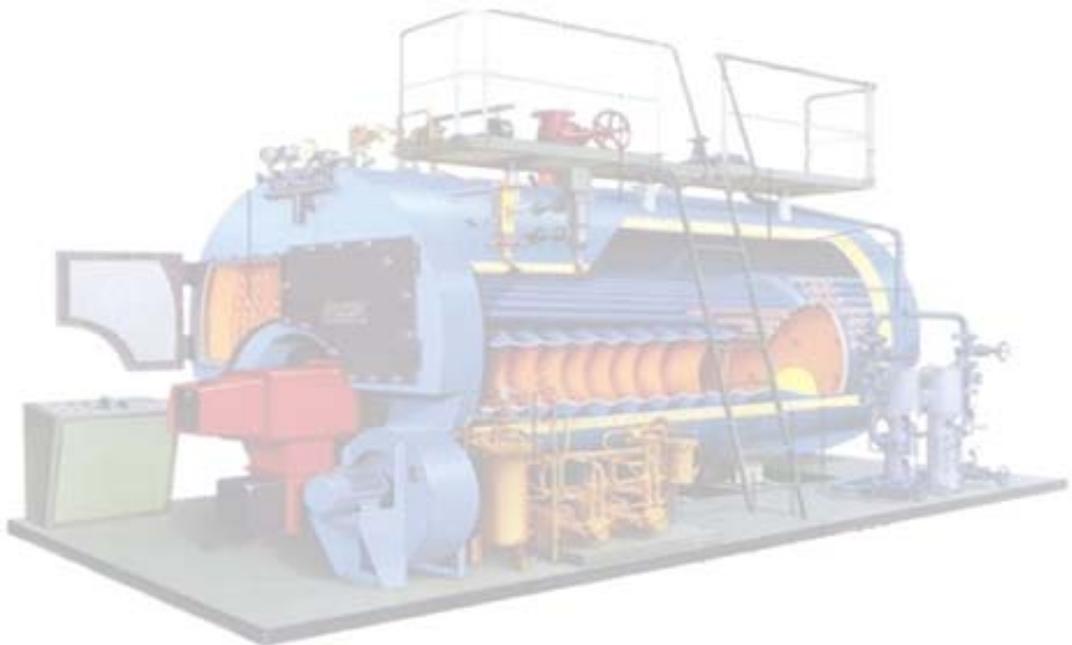


Desarrollo





Capítulo I



CAPÍTULO I

GENERALIDADES DE LAS CALDERAS Y PÉRDIDAS POR RADIACIÓN

2.1 CALDERAS.

Cuando James Watt observó que se podría utilizar el vapor como una fuerza económica que reemplazaría la fuerza animal y manual, se empezó a desarrollar la fabricación de calderas, hasta llegar a las que actualmente tienen mayor uso en las distintas industrias. Las primeras calderas tenían el inconveniente que los gases calientes estaban en contacto solamente con su base, y en consecuencia se aprovechaba mal el calor del combustible. Debido a esto, las instalaciones industriales fueron perfeccionándose, colocándose el hogar en el interior de la caldera y posteriormente se le introdujeron tubos, para aumentar la superficie de calefacción.¹

Una caldera es una máquina o dispositivo de ingeniería que está diseñado para generar vapor saturado. Éste vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia de estado.

Aunque existen numerosos diseños y patentes de fabricación de calderas, cada una de las cuales puede tener características propias, las calderas se clasifican en dos grandes grupos; calderas pirotubulares y acuotubulares, algunas de cuyas características se indican a continuación.²

¹ (2009a, p.1)

² (2009, p.1)

2.2 RESEÑA HISTORICA DE CALDERAS PIROTUBULARES.

Las calderas de vapor 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 y utilizar materiales de construcción más resistentes. El aumento de la superficie de transferencia se logró introduciendo tubos de pequeño diámetro 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.

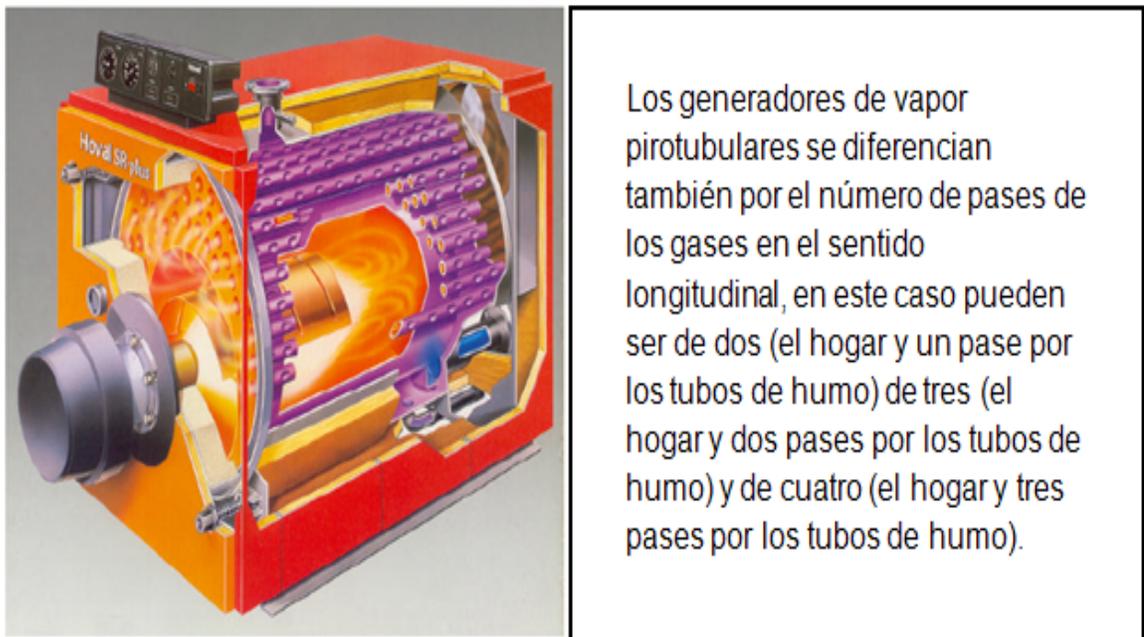


Figura 2.1 Caldera Pirotubular de tres pasos de humo.

A medida que aumenta el número de tubos de humo, aumenta el intercambio de calor, lo cual disminuye la temperatura de los humos a la salida 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 los quemadores y la instalación en general.

Las calderas pirotubulares se adaptan al consumo de cualquier tipo de combustible, desde el sólido, líquido o gas, 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, los cuales se encuentran sumergidos en la masa de agua, de ahí su nombre (de tubos de fuego). 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.

El rango superior de trabajo de estas calderas oscila hasta capacidades de 30 t/h y presiones de hasta 3 MPa, y poseen una amplia difusión en este intervalo de trabajo dada una serie de ventajas que se analizan en la literatura y en los manuales de los fabricantes de este tipo de caldera.³

2.3 GENERALIDADES DE LAS CALDERAS PIROTUBULARES.

Las calderas son un caso particular de intercambiadores de calor, en las cuales se produce un cambio de fase. Además son recipientes a presión, por lo cual son

³ (2009b, p.1-2)

construidas en parte con acero laminado a semejanza de muchos contenedores de gas.⁴



Figura 2.2 Caldera Pirotubular.

El combustible se quema en un hogar, donde tiene lugar la transmisión de calor por radiación y los gases resultantes se hacen circular a través de los tubos que constituyen el haz tubular de la caldera, y donde tiene lugar el intercambio de calor por conducción y convección. Según sea, una o varias, las veces que los gases pasan a través del haz tubular se tienen las calderas de uno o de varios pasos. En el caso de calderas de varios pasos, en cada uno de ellos, los humos solo atraviesan un determinado número de tubos, cosa que se logra mediante las denominadas cámaras de humos. Una vez realizado el intercambio térmico, los humos son expulsados al exterior a través de la chimenea.

⁴ (2009c, p.1)

Las calderas de casco cilíndrico fueron mejoradas aumentando el área de transferencia de calor mediante el paso de gases calientes por dentro de los tubos sumergidos en el volumen de agua. Esta modificación fue el origen de las "Calderas de Tubos de Humo" teniendo como resultado un aumento en la eficiencia. La evolución de las calderas de tubos de fuego en sus inicios, estuvo marcada por la tendencia hacia la disminución en el diámetro de los tubos de humo, buscando incrementar la velocidad de los gases y el área de transferencia de calor, haciendo la caldera más compacta. En sus inicios el fogón estaba colocado en la parte exterior de la caldera debajo de esta, de manera que la caldera recibía calor de la llama directa proveniente del fogón y los gases calientes, mediante el uso de cámaras de inversión se hacían pasar a través de uno ó varios pases convectivos. En la actualidad estas calderas poseen su fogón o quemador en un de las secciones de la parte cilíndrica buscando la parte baja.

La circulación en el interior de estas calderas se produce de manera natural. El agua fría desciende de la parte superior por la pared del cilindro y una vez que llega a la parte inferior del casco sube por entre los tubos de humo, absorbiendo calor para la formación del vapor, el cual se acumula en la parte superior.

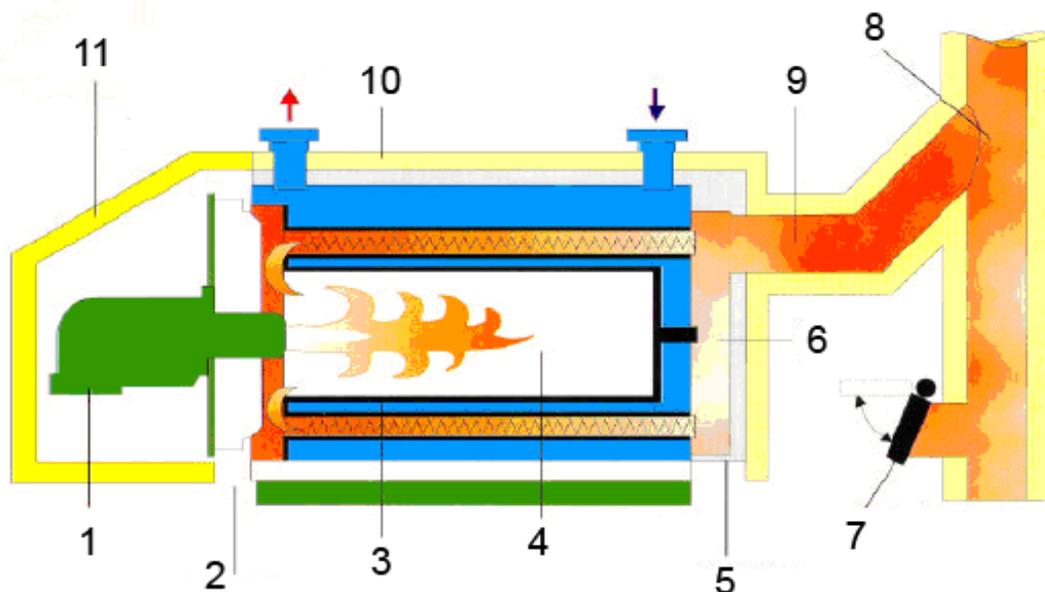


Figura 2.3 Esquema del Funcionamiento de una Caldera Piro-tubular.

Leyenda para Figura 2.3 1-Quemador; 2-Entrada de aire; 3-Carga térmica; 4-Contenido CO₂; 5-Entrada de aire de combustión; 6-Caja de humo aislada; 7-Clapeta motorizada; 8-Chimenea; 9-Gases a baja temperatura; 10-Pérdidas mínimas por radiación; 11-Insonoración y Calorifugado.⁵

2.3.1 Elementos, Términos y Componentes de una Caldera.

Agua de alimentación: Es el agua de entrada que alimenta el sistema, generalmente agua de pozo o agua de red.

Agua de condensado: Es el agua que proviene del estanque condensador y que representa la calidad del vapor.

Vapor seco: Vapor de óptimas condiciones.

Vapor húmedo: Vapor con arrastre de espuma proveniente de un agua de alcalinidad elevada.

Condensador: Sistema que permite condensar el vapor.

Estanque de acumulación: Es el estanque de acumulación y distribución de vapor.

Desaireador: Es el sistema que expulsa los gases a la atmósfera.

Purga de fondo: Evacuación de lodos y concentrado del fondo de la caldera.

Purga de superficie: Evacuación de sólidos disueltos desde el nivel de agua de la caldera.

Fogón: Alma de combustión del sistema.

⁵ (Alonso González, Adrián. 2007, p. 26-28)

Combustible: Comburente que se transforma en energía calórica y que permite la vaporización.

Agua de calderas: Agua de circuito interior de la caldera cuyas características dependen de los ciclos y del agua de entrada.

Ciclos de concentración: Número de veces que se concentra el agua de caldera respecto del agua de alimentación.

Alcalinidad: Nivel de salinidad expresada en ppm de Carbonato de Calcio que confiere una concentración de iones carbonatos e hidróxilos y determina el valor de pH de funcionamiento de una caldera, generalmente desde 10,5 a 11,5.

Desoxigenación: Tratamiento químico que elimina el oxígeno del agua de calderas.

Incrustación: Sedimentación de sólidos con formación de núcleos cristalinos o amorfos de sulfatos, carbonatos o silicatos de magnesio que merman la eficiencia de funcionamiento de la caldera.

Dispersante: Sistema químico que mantiene los sólidos descohesionados ante un evento de incrustación.

Antincrustante: Sistema químico que permite a los sólidos incrustantes permanecer en solución.

Índice de vapor/combustible: Índice de eficiencia de producción de vapor de la caldera.⁶

2.3.2 Funcionamiento de las Calderas Piro-tubulares.

La caldera piro-tubular consume combustible, provocando pérdidas por radiación y pérdidas en la chimenea. La circulación en el interior de estas calderas se produce

⁶ (Elementos, Términos y Componentes de una Caldera. 2009, p.2)

de manera natural. El agua fría desciende de la parte superior por la pared del cilindro y una vez que llega a la parte inferior del casco, sube por entre los tubos de humo, absorbiendo calor para la formación del vapor, el cual se acumula en la parte superior.

El proceso operativo de generación de vapor es de naturaleza físico-químico. El petróleo mediante la reacción química de combustión, libera una cierta cantidad de calor que absorbe el agua de alimentación de la caldera, atravesando por un proceso de cambio de fase donde se convierte en vapor saturado. El vapor, al llegar a la cocina, cede parte de calor en los equipos de cocción, fundamentalmente, calor latente.

2.3.3 Aplicaciones de las Calderas Piro-tubulares.

La amplia extensión, fundamentalmente en el ámbito industrial de las calderas, requiere de la adopción de estrictas medidas de seguridad debido al gran potencial energético que almacenan, que en caso de fallas, tienen un gran poder destructivo. De hecho, todas están concebidas y equipadas con los elementos de seguridad reglamentarios exigidos por las normativas que impidan, durante su funcionamiento, posibles fallas que impliquen daños al equipo, equipos e instalaciones aledañas.

Debido a las amplias aplicaciones que tiene el vapor, principalmente de agua, las calderas son muy utilizadas en la industria para generar vapor para utilizarlo en aplicaciones como:

Esterilización (tindarización). Es común encontrar calderas en los hospitales, las cuales generan vapor para esterilizar los instrumentos médicos, también en los comedores con capacidad industrial se genera vapor para esterilizar los cubiertos.

Calentar otros fluidos. Por ejemplo, en la industria petrolera el vapor es muy utilizado para calentar los petróleos pesados para mejorar su fluidez.

Generar electricidad a través de un ciclo Rankine. Las calderas son parte fundamental de las centrales termoeléctricas.

Es común la confusión entre caldera y generador de vapor, pero su diferencia es que el segundo genera vapor sobrecalentado.

2.3.4 Tendencias en el Desarrollo de las Calderas.

En la actualidad los generadores de vapor han ido un paso adelante con relación a sus antiguos predecesores, sus regulaciones funcionales varían dependiendo del sector en que se vayan a utilizar, en este caso en los generadores de vapor industriales se manifiestan las siguientes tendencias:

- Eficiencia (mantenida a cargas parciales).
- Confiabilidad.
- Costo.
- Impacto ambiental.
- Flexibilidad de combustibles.
- Aplicación en sistemas de cogeneración.
- Parámetros de Vapor:
- Presión: 9 a 80 kgf/cm²
- Temperatura: Saturado hasta 10 kgf/cm², sobrecalentado con temperaturas entre 180-510 °C.
- Reducción del período entre proyecto y puesta en marcha.
- Calderas compactas ensambladas en fábrica (combustible líquido o gaseoso).
- Pirotubulares: hasta 20-25 t/h
- Calderas pre-ensambladas (componentes modulares).

- Uso de calderas pirotubulares en procesos de calentamiento, baja presión y capacidad.
- Uso de calderas acuotubulares de tipo radiante para presiones entre 70 y 80 kgf/cm².
- Uso de hornos de lecho fluidizado para combustibles sólidos.
- Mayor empleo de superficies recuperativas.
- Quemadores de bajo Óxidos de Nitrógeno.⁷

2.4 EL FENÓMENO DE LA RADIACIÓN.

El fenómeno de la radiación consiste en la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material.

La radiación propagada en forma de ondas electromagnéticas (Rayos X, Rayos UV, etc.) se llama radiación electromagnética, mientras que la radiación corpuscular es la radiación transmitida en forma de partículas subatómicas (partículas α , neutrones, etc.) que se mueven a gran velocidad en un medio o el vacío, con apreciable transporte de energía.

Si la radiación transporta energía suficiente como para provocar ionización en el medio que atraviesa, se dice que es una radiación ionizante. En caso contrario se habla de radiación no ionizante. El carácter ionizante o no ionizante de la radiación es independiente de su naturaleza corpuscular u ondulatoria.⁸

⁷ (Borroto Bermudez, Anibal. 2000, p.12)

⁸ (2009, p.1)

2.4.1 Radiación Térmica.

Cuando un cuerpo está más caliente que su entorno pierde calor hasta que su temperatura se equilibra con la de su entorno, este proceso de pérdida de calor se puede producir por tres tipos de procesos: conducción, convección y radiación térmica. De hecho la emisión de radiación puede ser el proceso dominante para cuerpos relativamente aislados del entorno o para muy altas temperaturas. Así un cuerpo muy caliente, como norma general, emitirá gran cantidad de ondas electromagnéticas. La cantidad de energía radiante emitida o calor radiado viene dada por la Ley de Stefan-Boltzmann. De acuerdo con esta ley, dicho calor radiado es proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia:

$$P = \alpha * \sigma * A * T^4 \quad (1.1)$$

Donde:

P – Potencia Radiada; (W).

α – Coeficiente que depende de la naturaleza del cuerpo, $\alpha = 1$ para un cuerpo negro perfecto.

A – Área de la superficie que radia; (m^2).

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

T – Temperatura; (K).⁹

2.4.2 Pérdida de Calor por Radiación en la Caldera Piro-tubular.

Durante el funcionamiento de la caldera, las superficies exteriores alcanzan unas temperaturas superiores al ambiente, esta diferencia de temperatura genera una

⁹ (Radiación Térmica. 2009, p.2)

transferencia de calor desde las superficies de la misma al ambiente. Esta transferencia de calor es una pérdida que afecta la eficiencia de la caldera. A este tipo de pérdidas generalmente se les denomina como “pérdidas por radiación o q_5 ”.

La magnitud de las pérdidas por radiación (q_5), depende fundamentalmente de muchos factores como:

- Las dimensiones de la unidad.
- Capacidad nominal.
- Carga.
- Aislamiento.
- Temperatura de las superficies.
- Temperatura ambiente.
- Velocidad del aire exterior.
- Calor disponible.

Desde el punto de vista energético lo primero a tener en cuenta es que se favorece la pérdida de calor por radiación, la cual está presente en todo momento durante el trabajo de la caldera, o sea, se pierde calor por esta causa tanto cuando se encuentra parada pero prestando servicio, como cuando esta encendido el quemador. 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.

2.4.3 Evitar Pérdidas por Radiación.

Es evitable que una parte del calor de la combustión escapa a través de las paredes de la caldera sin que sea absorbido por el agua. Sin embargo, estas pérdidas de calor por radiación pueden ser controladas, por lo que se recomienda: aislar adecuadamente las paredes de la caldera y dar un adecuado mantenimiento a las capas del aislamiento y mantener en buen estado el refractario. Una caldera aislada adecuadamente tendrá, a plena carga, pérdidas de calor que no superan el 2% véanse Tabla 2.1. Entre mayor

sea la capacidad de la caldera, menor deberá ser el porcentaje de pérdidas por radiación.

Tabla 2.1 Pérdidas por Radiación en Calderas.

Capacidad (kg/h)	Pérdidas (%)
900000	0,5
45500	0,7
23000	0,9
9000	1,0
Menores a 9000	1,1 a 2,0

Los valores de Tabla 1.1 se usan solamente como referencia.¹⁰

2.5 INFLUENCIA DEL SOBREDIMENSIONAMIENTO EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA.

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.

Un significativo número de calderas pirotubulares instaladas en nuestro país tienen un elevado sobredimensionamiento, lo cual provoca un incremento de las pérdidas con los

¹⁰ (p.3)

gases de escape y por radiación asociada a ellas, provocado fundamentalmente por los largos períodos de parada del quemador.

2.5.1 Factor de Carga.

El régimen de trabajo es muy variable en la gran mayoría de las instalaciones de este tipo de calderas. El uso del coeficiente o factor de carga nos permite conocer en que medida la caldera está siendo explotada con respecto a su capacidad, o lo que es igual, en cuanto se encuentra subutilizada.

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 se encuentran muchos, como por ejemplo en las cocinas y lavanderías, donde el consumo además puede ser intermitente o discontinuo, lo cual quiere decir que cada consumidor trabaja solo un tiempo consumiendo vapor en una hora y se le une que el consumo debe ser afectado por un factor de simultaneidad que toma en cuenta la cantidad de equipos que en un instante se encuentran consumiendo a la misma vez y la cantidad que están demandando de acuerdo al momento del proceso en el cual se encuentran.

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:

$$\Phi = \frac{TT_{TQ}}{TT_{GV}} \quad (1.2)$$

Donde:

TT_{TQ} – Tiempo de Trabajo del Quemador; (min).

TT_{GV} – Tiempo de Trabajo del Generador de Vapor; (min).

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 relación debe ser 1. La obtención de valores inferiores a la unidad nos indica que el generador se encuentra sobredimensionado y no tiene incorporado un mecanismo o dispositivo regulador que permita ir variando la producción de vapor según los requerimientos instantáneos del proceso.

Especialistas del tema plantean que a medida que el factor de carga es por debajo del 50 % se considera que la caldera esta subutilizada o sobredimensionada.

Trabajar bajo estas condiciones resulta perjudicial desde el punto de vista energético y económico además de tener también un impacto negativo desde el punto de vista medioambiental.¹¹

2.6 LAS INSTALACIONES DE ESTUDIO.

En el trabajo, analizamos 5 calderas en los centros del sector de educación y una en la empresa Lavandería Unicornio perteneciente a SERVISA, en la provincia de Cienfuegos, cuales son:

¹¹ (Moya, Vidal. David Armando 2009, p.2-3)

1. Tecnológico 5 de Septiembre (T5).
2. Instituto Superior Pedagógico Conrado Benítez Garcí (ISP).
3. Comedor Escolar (CS).
4. Universidad de Cienfuegos (UCF).
5. Lavandería Unicornio (LU).

En el sector de educación en la provincia de Cienfuegos, las calderas se utilizan para generar vapor con el uso final para la elaboración de los alimentos en los tachos y otros usos tales como el calentamiento del agua para el fregado y el precalentamiento del combustible y agua de alimentación.

En la Lavandería Unicornio la caldera se utiliza para el lavado de la ropa de los diferentes hoteles del municipio de Cienfuegos.

La Tabla 2.2 muestra las Características Constructivas de las Calderas de Estudio. En las salas de las calderas de los centros mencionados tienen como componentes principales del sistema de generación y distribución de vapor, los siguientes:

- ✓ Generador de vapor (caldera).
- ✓ Tuberías de vapor.
- ✓ Equipos consumidores.
- ✓ Sistema de condensado.
- ✓ Sistema de agua de alimentación.
- ✓ Sistema de combustible.
- ✓ Sistema de tratamiento de agua.
- ✓ Instrumentación y sistemas de control.

2.6.1 Tecnológico 5 de Septiembre.

La sala de caldera del Tecnológico 5 de Septiembre cuenta con una caldera de producción cubana marca Alastor CMS/C440 del año 2002, la cual trabaja con combustible diesel, de tres pasos, con un ritmo de trabajo diario de 8 horas. Véase la Figura 1. del ANEXO I.

2.6.2 Instituto Superior Pedagógico (ISP).

La sala de caldera del Instituto Superior Pedagógico de Cienfuegos tiene una caldera con la marca John Thompson Cohran de tres pasos, que trabaja menos de 6 horas diarias con combustible tipo fuel oíl. Véase la Figura 2. del ANEXO I.

2.6.3 Comedor Escolar.

La sala de caldera del Comedor Escolar tiene una caldera pirotubular con la marca Alastor de modelo CMS/C - 440 que trabaja con tipo de combustible diesel.

2.6.4 Universidad de Cienfuegos.

La sala de caldera de la Universidad de Cienfuegos tiene una caldera pirotubular con la marca Alastor de modelo CMS/C - 660 que trabaja con tipo de combustible diesel.

2.6.5 Lavandería Unicornio.

La sala de caldera de Lavandería Unicornio tiene una caldera pirotubular con la marca Alastor de modelo PKM – 4T – 13 que trabaja con un ritmo de trabajo diario de más de 10 horas, el tipo de combustible utilizado es fuel oíl.

2.6.6 Características Técnicas de las Calderas de Estudio.

Las instalaciones estudiadas tienen diferente marca y modelo de las calderas pirotubulares, diferentes capacidades y también diferentes condiciones de trabajo como tales:

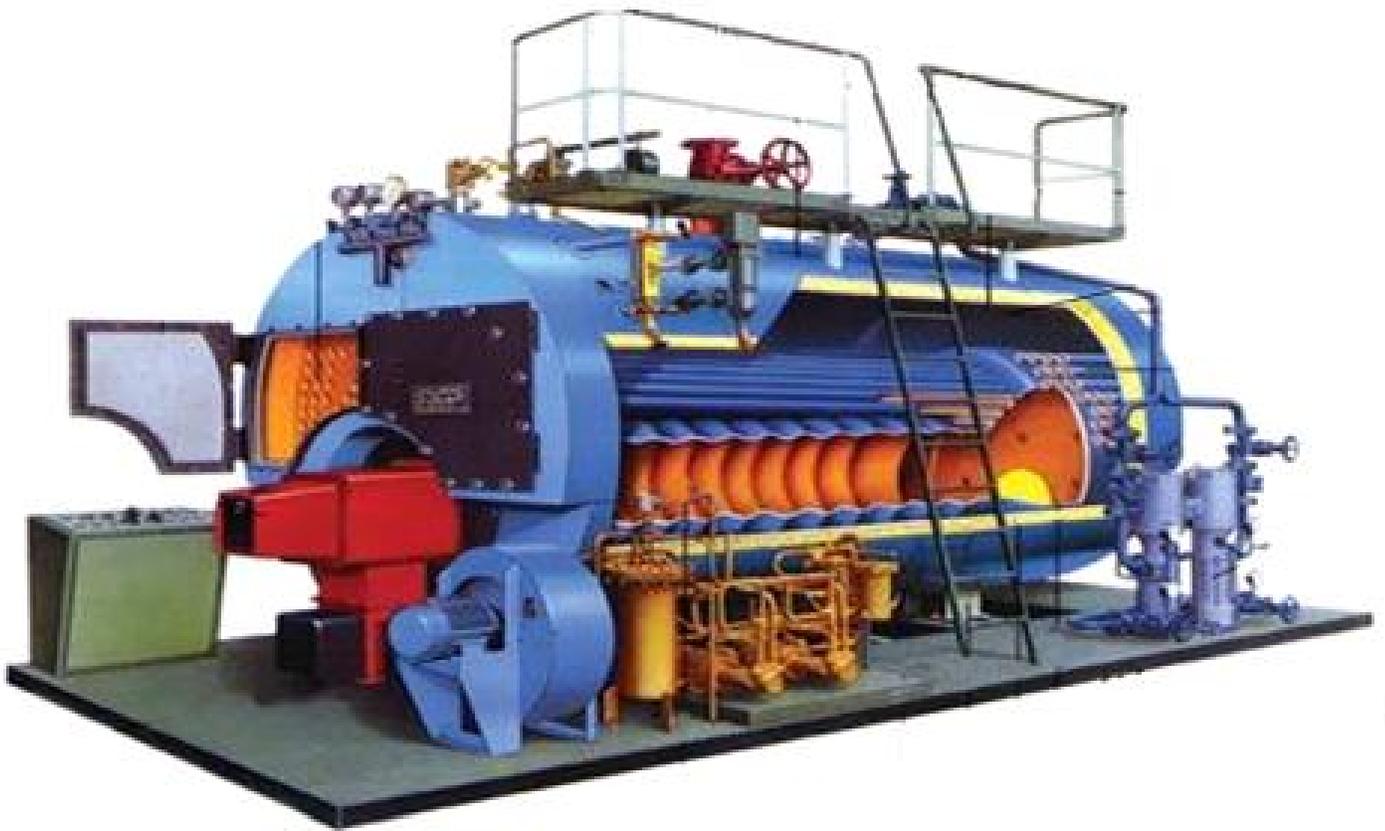
- ✓ Aislamiento.
- ✓ Velocidad de aire exterior de la caldera.
- ✓ Tipo de combustible.

Tabla 2.2 Características Técnicas de las Calderas de Estudio.

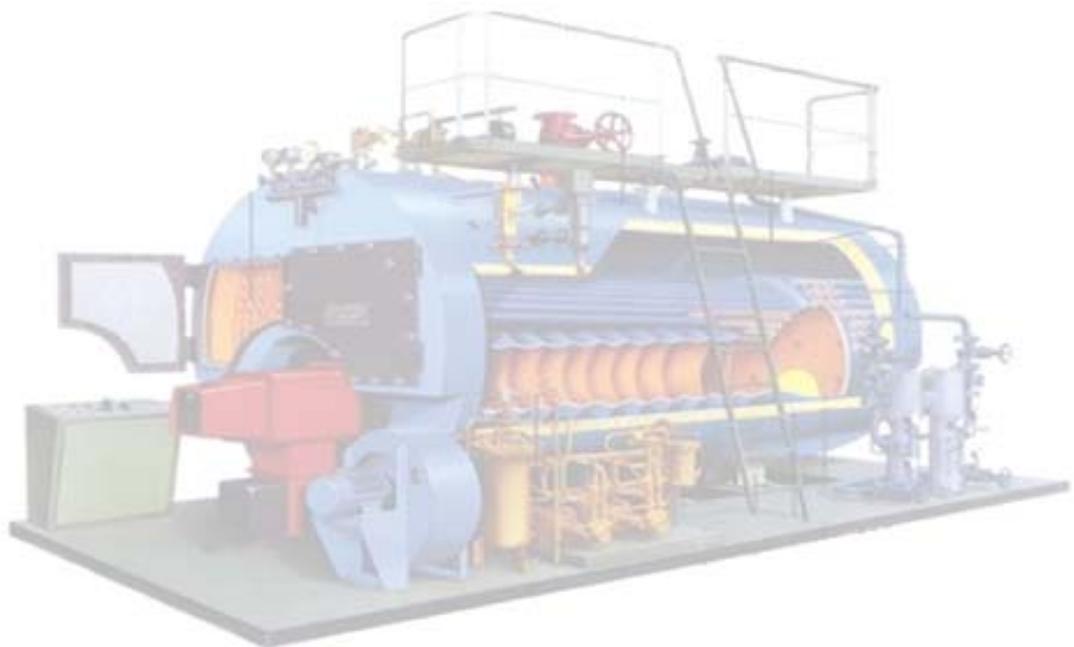
Características	Instalaciones					Unidad
	T5	ISP	CS	UCF	LU	
Producción de Vapor Nominal	440	1120	600	660	4000	kg/h
Presión de diseño.	10,5	10,5	12	13	13	kg/cm ²
Presión máxima de trabajo.	6	7	7	4	10	kg/cm ²
Presión mínima de trabajo.	4	4	4	2,5	8	kg/cm ²
Área Superficial	8	13,3	15	15	44,5	m ²

2.7 CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO I.

- ❖ En estudios precedentes realizados en calderas del sector de educación se ha estudiado el grado de sobredimensionamiento de las mismas y se refiere que a medida que el factor de carga es menor de 0,5 la caldera está subutilizada o sobredimensionada.
- ❖ La magnitud de pérdidas por radiación depende de muchos factores, entre los que se destacan el área superficial, temperaturas de las paredes, la producción de vapor real y la nominal.



Capítulo II



CAPÍTULO II

CÁLCULOS DE PÉRDIDAS POR RADIACIÓN Y MODELO MATEMÁTICO

3.1 MÉTODOS PARA CALCULAR PÉRDIDA DE CALOR POR RADIACIÓN.

En la actualidad existen algunos métodos prácticos para la determinación de pérdidas de calor por radiación. Cada método toma en cuenta uno o más factores, pero en la bibliografía revisada ninguno toma en cuenta todos los factores que influyen en la magnitud de las pérdidas por radiación (q_5). A continuación son mencionados los métodos para calcular la pérdida de calor por radiación y cada cual tiene sus expresiones para calcular la misma.

La Asociación Americana de Generadores de Vapor (ABMA) propone un nomograma (véase Figura 1 del ANEXO II) en el cual se determinan las pérdidas por radiación en porcentaje del calor disponible, en función del tipo de enfriamiento de las paredes y de las potenciales nominal y real del equipo, para determinadas condiciones de temperatura y velocidad del aire. Además ofrece un nomograma para realizar correcciones para otras condiciones (véase Figura 2 del ANEXO II). Estos resultados han sido adoptados por la industria y el código de prueba de generadores de vapor de la ASME.

La norma rusa de evaluación de generadores de vapor propone el nomograma donde se obtienen valores de estas pérdidas en función de la producción de vapor y de las características de los conductos convectivos, específicamente si poseen o no superficies recuperativas (véase Figura 3 del ANEXO II).¹²

En la literatura general hay otras ecuaciones, expresiones y tablas para determinar las pérdidas por radiación con una exactitud limitada. En función de los siguientes

¹² (Borroto Bermudez, Anibal. 1995, p.5)

indicadores, mencionados a continuación, se puede calcular la pérdida por radiación en la caldera.

3.1.1 Indicadores para Calcular la Pérdida de Calor por Radiación.

Los indicadores para calcular la pérdida por radiación en las calderas son:

- ✓ Transferencia de calor.
- ✓ Capacidad de la caldera.
- ✓ Carga.
- ✓ Cálculo rápido.

3.2 EXPRESIONES DE TRANSFERENCIA DE CALOR.

Las expresiones de Transferencia de Calor toman principalmente en cuenta la diferencia de temperatura entre las paredes exteriores y el medio ambiente, el área superficial de la caldera y el coeficiente de transferencia de calor. El coeficiente de transferencia de calor puede ser la combinación del coeficiente de traspaso de calor por convección y coeficiente de traspaso de calor por radiación como expresión (3.1) o un coeficiente general se llama coeficiente pelicular de transferencia de calor convectivo como expresión (3.2).

CÁLCULOS DE PÉRDIDAS POR RADIACIÓN Y EL MODELO MATEMÁTICO

Tabla 3.1 Expresiones de Transferencia de Calor.

EXPRESIONES	DONDE	
$q_5 = \frac{A(\alpha_{CONV} + \alpha_{RAD})[(T_P - T_A)]}{1000 * B} \frac{Q_D}{Q_D} * 100 ; (\%).$	<p>A – Área Superficial; (m²).</p> <p>B – Flujo de Combustible; (kg/s).</p> <p>Q_D – Calor Disponible; (kJ/kg).</p> <p>T_P – Temperatura de las paredes exteriores; (K).</p> <p>T_A – Temperatura del medio ambiente; (K).</p> <p>α_{CONV} – Coeficiente de traspaso de calor por convección; (W/m²K).</p> <p>α_{RAD} – Coeficiente de traspaso de calor por radiación; (W/m²K).</p>	(3.1)
$q_5 = \frac{A}{B} \left[\alpha_C (T_P - T_A) + C_O \left\{ \left(\frac{T_P}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_A}{100} \right)^4 \right\} \right]^{13}$	<p>A – Superficie exterior total, (m²).</p> <p>B – Flujo de Combustible; (kg/s).</p>	(3.2)

¹³ (Diaz Tanquero, Nelson Tanquero. 2002, p.65)

CÁLCULOS DE PÉRDIDAS POR RADIACIÓN Y EL MODELO MATEMÁTICO

	<p>T_P – Temperatura de las paredes exteriores; (K).</p> <p>T_A – Temperatura del medio ambiente; (K).</p> <p>α_C – Coeficiente pelicular de transferencia de calor convectivo; (kW/m²*K).</p> <p>C_O – Coeficiente del cuerpo negro absoluto; (kW/m²*k⁴).</p>
--	--

El coeficiente de traspaso de calor por convección se calcula considerando que la transferencia de calor ocurre por los mecanismos de la convección natural. Como las calderas que se toman en cuenta para este estudio son pequeñas y se encuentran en locales cerrados, el coeficiente de traspaso de calor por convección no depende de la posición de la superficie de la pared.

3.2.1 Cálculo de Coeficiente de Traspaso de Calor por Convección (α_{CONV}).

Superficie Vertical.

$$\alpha_{CONV.} = \frac{\overline{Nu} * \lambda}{h} ; (\text{kW/m}^2 * \text{K}). \tag{3.3}$$

Donde:

λ – Conductividad térmica del aire; (W/m*K).

h – Altura de la superficie; (m).

$$\bar{Nu} = B(Gr * Pr)^n \quad (3.4)$$

Donde:

Gr – Número de Grashof.

Pr – Número de Prandtl.

Los coeficientes de B y n se buscan en la Tabla 1. ANEXO II.

$$Gr = \frac{\beta * g * h^3 * \Delta t}{\nu^2} \quad (3.5)$$

Donde:

ν – Viscosidad cinemática; (m²/s).

$$\beta = \frac{1}{t_{MED} + 273} \quad (3.6)$$

$$t_{MED} = \frac{t_{SUP} + t_{AMB}}{2} \quad (3.7)$$

$$\Delta t = t_{MED} - t_{AMB} \quad (3.8)$$

Superficie Horizontal.

$$\alpha_{CONV.} = \frac{\overline{Nu} * \lambda}{A} \quad (3.9)$$

Donde:

A – Dimensión mínima de la superficie; (m).

$$\overline{Nu} = B(Gr * Pr)^n \quad (3.10)$$

Los coeficientes de B y n se buscan en la Tabla 1 ANEXO II.

El coeficiente B aumenta en un 30% en relación al de la tabla.

2.2.2 Cálculo del Coeficiente de Traspaso de Calor por Radiación (α_{RAD}).

$$\alpha_{RAD.} = \frac{q_{RAD}}{t_{SUP} - t_{AMB}} \quad (3.11)$$

Donde:

$$q_{RAD} = \xi_{RED} * CO \left\{ \left(\frac{T_P}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_A}{100} \right)^4 \right\} \quad (3.12)$$

Donde:

T_P – Temperatura media de las paredes exteriores; ($^{\circ}\text{C}$).

T_A – Temperatura del medio ambiente; ($^{\circ}\text{C}$).

$CO = 5,67 \text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$\xi_{RED} = \frac{1}{\frac{1}{\xi_P} + \frac{1}{\xi_A} - 1} \quad (3.13)$$

Donde:

ξ_P – Emisividad de la pared.

ξ_A – Emisividad del ambiente.

Se toma $\xi_P = 0,5$ y $\xi_A = 0,5$

3.3 EXPRESIONES PARA DIFERENTES CAPACIDADES DE CALDERAS.

Las expresiones para diferentes capacidades de calderas necesitan datos relacionados como producción de vapor, área superficial y flujo de combustible.

CÁLCULOS DE PÉRDIDAS POR RADIACIÓN Y EL MODELO MATEMÁTICO

Tabla 3.2 Expresión para Calderas de Capacidades menores de 600 kg/h.

EXPRESION	DONDE	
$q_5 = -8,1595 + 4,4395 \frac{1}{\sqrt{D_v}}$	D_v – Producción de Vapor; (t/h).	(3.14)

Tabla 3.3 Expresión para Calderas de Capacidades menores de 2 t/h.

EXPRESIONES	DONDE	
$q_{5NOM} = \frac{400 * A + 30000}{B * Q_{BC} * 4,18} * 100\%$	A – Área Superficial; (m ²). B – Flujo de Combustible;(kg/h). Q _{BC} – Valor Calórico bajo del Combustible; (Kcal/kg).	(3.15)

Tabla 3.4 Expresión para Calderas de Capacidades menores de 10 t/h

EXPRESIONES	DONDE	
$q_{5NOM} = \frac{100 + 8 * H}{Q_{BC}} * 100\%$	H – Variación de los parámetros del Vapor. Ver (1.18) Q _{BC} – Valor Calórico bajo del Combustible (Kcal/kg).	(3.16)

$H = D_{NOM} \frac{(i_v - i_{AA})}{640}$	(3.17)
--	--------

Donde:

D_{NOM} – Producción nominal.

I_V – Entalpia del vapor; (Kcal/kg).

I_{AA} – Entalpia del agua de alimentar;(Kcal/kg).

3.4 PÉRDIDAS POR CARGA.

Tabla 3.5 Expresiones para Pérdidas por Carga.

EXPRESIONES	DONDE	
$q_5 = q_{5\ EXTN} \sqrt{\frac{B_{NOM}}{B}}$	B_{NOM} – Gasto de Combustible Nominal; (kg/h). B – Gasto de Combustible Real; (kg/h). $q_{5\ EXTN}$ – Pérdida por Radiación Nominal. Ver Tabla 2. ANEXO II.	(3.18)
$q_5 = q_{5\ EXTN} * \frac{D_{NOM}}{D}$	D_{NOM} – Producción Nominal; (kg/h). D – Producción Real; (kg/h). $q_{5\ EXTN}$ – Pérdida por Radiación Nominal. Ver Tabla 2. ANEXO II.	(3.19)

3.5 CÁLCULOS RÁPIDOS.

El método de cálculo rápido consiste de tomar datos sencillos como la producción nominal y el factor de carga para llegar a un valor de pérdidas por radiación en un tiempo corto.

Tabla 3.6 Expresión para Cálculos Rápidos.

EXPRESION	DONDE	
$q_5 = \sqrt{\frac{100}{D_{NOM}}} * A$	A – Factor de capacidad. Ver Tabla 3. ANEXO II. D _{NOM} – Producción Nominal.	(3.20)

Las expresiones 3.1– 3.20.¹⁴

3.6 MEDICIONES DURANTE EL FUNCIONAMIENTO DE LA CALDERA.

Las expresiones mencionadas para calcular la pérdida por radiación utilizan datos de funcionamiento real de las calderas de estudios por esto fue necesario tomar mediciones de los siguientes parámetros:

- ✓ Temperatura Superficial de las Paredes.
- ✓ Flujo de Vapor Real.
- ✓ Flujo de Combustible.
- ✓ Flujo de vapor.
- ✓ Presión.
- ✓ Tiempo de arranque y parada del quemador.

El flujo de agua y el combustible se miden manualmente con la variación de volumen en el tanque en el tiempo (tanque aforado) que es el método que se utiliza en este tipo de

¹⁴ (Borroto Bermudez, Anibal. 1995, p.4-13)

calderas porque no cuentan en la mayoría de los casos flujo metros para medir el flujo de agua o combustible.

La producción de vapor real o flujo de vapor se mide a partir del flujo de agua considerando que el flujo de agua es igual al flujo de vapor.

3.6.1 Instrumentos de Mediciones.

En la tabla 3.7 se muestran los instrumentos utilizados para hacer las mediciones de los diferentes parámetros de trabajo.

Tabla 3.7 Instrumentos Utilizados.

Parámetro	Instrumento	Grado de Precisión
Temperatura Superficial	Mini Láser Termómetro	$\pm 1^{\circ}\text{C}$
Presión	Manómetro de Aguja	$\pm 0,1 \text{ kgf/cm}^2$
Tiempo	Cronómetro	$\pm 0,01\text{s}$

3.6.2 Resultados de Mediciones.

Ver tablas 4 – 8 del Anexo II para los valores de temperaturas superficiales de las calderas.

En tabla 3.8 se encuentran otros valores de mediciones tomadas.

Tabla 3.8 Mediciones tomadas durante el funcionamiento de las calderas

Características	Instalaciones					Unidad
	T5	ISP	CS	UCF	LU	
Flujo de Vapor Real	280	250	500	300	750	kg/h
Flujo de Combustible	20	24,7	48	21	38	kg/h
Calor Disponible	42370	40301	42384	42370	40301	kJ/kg
Valor Calórico bajo del Combustible	42325	39984	42330	42325	39984	kJ/kg

La temperatura ambiente se toma como 25°C.

El calor disponible y el valor calórico bajo del combustible se utilizan a partir de las evaluaciones realizadas en estas instalaciones por el autor en su trabajo de Proyecto III.¹⁵

3.7 EL MODELO MATEMÁTICO.

Hay muchas expresiones actuales de determinación de pérdidas por radiación en este estudio mencionamos ocho expresiones, se establecieron en el capítulo II. Las expresiones están en función de las siguientes variables fundamentales:

- Temperatura de las paredes.
- Área superficial.

¹⁵ (Gopal, Ram Kumar. 2009, p.5)

- Flujo de combustible y vapor.
- Factor de carga.
- Función básica del modelo matemático:

$$q_5 = f(T_p, Q_C, Q_V, Fc, A) \quad (3.21)$$

Donde:

T_p – Temperatura de las paredes; (K).

Q_C – Flujo de combustible; (kg/h).

Q_V – Flujo de vapor; (kg/h).

Fc – Factor de carga. Ver expresión (1.22)

A – Área superficial; (m²).

El modelo matemático consiste de utilización de temperaturas exteriores de las paredes y la capacidad nominal como entrada para determinar el comportamiento de pérdida por radiación utilizando el software Matlab, a partir de la expresión (3.2), en particular las redes neuronales artificiales (RNA).

La utilidad de emplear RNA radica principalmente en que no se necesita conocer el proceso físico del sistema en sí mismo, siendo suficiente realizar un mapeo de las variables de entrada y salida de dicho sistema. A continuación se exponen los fundamentos necesarios para la comprensión del modelo obtenido.

3.8 FUNDAMENTOS DE LAS REDES NEURONALES ARTIFICIALES (RNA).

Las redes neuronales artificiales están inspiradas en el modo en el que las redes de neuronas biológicas del cerebro procesan información y son sistemas compuestos de elementos de cálculo básicos conectados en paralelo. Estos elementos básicos, llamados neuronas, ver la Figura 3.1a, aceptan una entrada y producen un valor de salida basado generalmente en una función no lineal llamada función transferencia.

Las cantidades de entrada x_i se combinan con los pesos w_i y constituyen el argumento de la función transferencia para obtener las salidas. Se emplean diferentes tipos de funciones como la sigmoïdal, lineal, hiperbólica, tangente, etc.

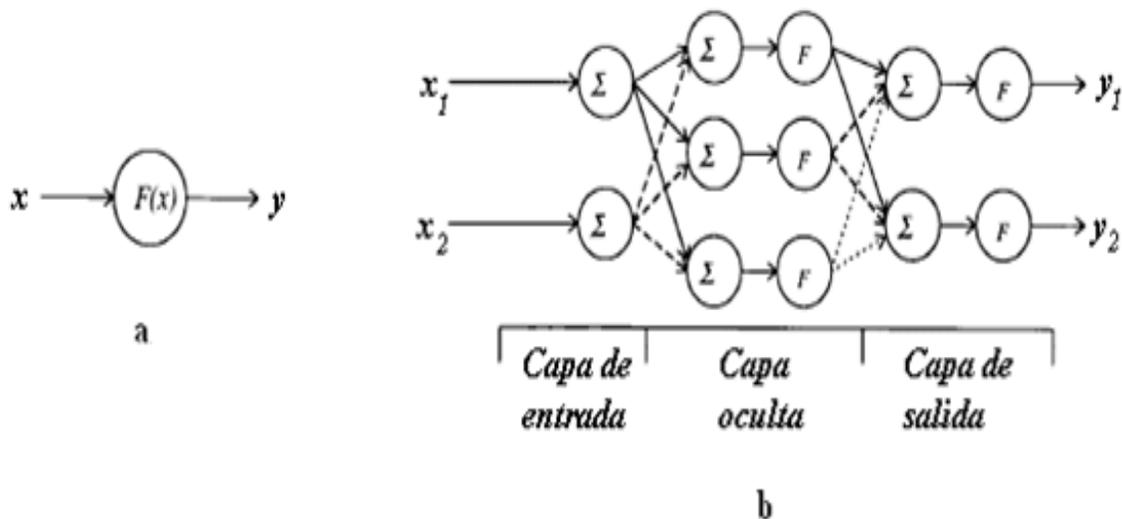


Figura 3.1 Neurona artificial con función de activación $F(x)$ y red neuronal de tres capas.

Las neuronas simples se combinan para construir una red cuya arquitectura puede ser muy variada. En la Figura 3.1b se aprecia que una red está compuesta por múltiples conexiones serie de neuronas individuales conectadas en paralelo (nodos). El conjunto de neuronas conectadas en paralelo se denomina capa.

La topología, las características de los nodos y las reglas de aprendizaje o entrenamiento, caracterizan el modelo de una RNA. La literatura técnica sugiere una red de alimentación progresiva que emplea el mecanismo matemático de retropropagación para “aprender y ajustar”, o sea, adaptar los pesos.

Los nodos empleados en la capa de entrada normalmente dependen del tipo y cantidad de los datos de entrada. El número de nodos en la capa oculta determina, en general, la capacidad de la red de aprender relaciones complejas entre las entradas y las salidas, siendo necesarias gran número de neuronas para el aprendizaje de patrones complejos. Aunque no se muestra en la Figura 3.1b, pueden ser necesarias múltiples capas ocultas para aumentar la capacidad de aprendizaje de la red. No existen reglas para tener un conocimiento previo del número de neuronas de la capa oculta o del número de capas ocultas necesarias, por lo que se requiere recurrir a una aproximación del método de prueba y error durante el diseño. El número de nodos en la capa de salida depende únicamente del número de salidas de la red. Las funciones transferencias, así como los algoritmos de entrenamiento y funciones de comportamiento así como el resto de las herramientas necesarias para el diseño, entrenamiento, simulación y manejo de redes neuronales se encuentra disponible en el Toolbox de redes neuronales del Matlab 7.0.¹⁶

3.8.1 Diseño y Entrenamiento de las RNA.

Para el diseño y entrenamiento de las RNA se emplea la herramienta de redes neuronales del Toolbox del Matlab R2008b. La red propuesta es una RNA de dos capas con propagación hacia adelante y algoritmo de aprendizaje con retropropagación. El vector de entrada está definido por los valores de las temperaturas en las paredes de la caldera y la capacidad nominal de la misma. La salida de la red es el porcentaje de

¹⁶ (Red Neuronal Artificial. 2009, p.1-5)

pérdidas por radiación estimado a partir de las mediciones de temperatura anteriormente mencionadas.

Para el diseño de la red se toma como criterio la selección de un número de neuronas de la capa oculta seleccionado a partir del comportamiento de la red durante el entrenamiento y determina la arquitectura final de la red seleccionada. La función transferencia de las neuronas de esta capa es *tansig* y la de la neurona de la última capa es *purelin*.

Las variables para el entrenamiento y validación se corresponden con valores experimentales de mediciones de temperaturas realizadas en las instalaciones. En el caso de las pérdidas que se utilizan como objetivos en el proceso de entrenamiento se calculan a partir de la expresión (3.2). Todos estos valores fueron normalizados a su valor máximo y se muestran en la Tabla 9 Anexo II. Para distinguirlo de los valores experimentales se les adiciona una N a su nomenclatura, de esta manera los datos empleados en el entrenamiento y prueba de la red son T1N, T2N, T3N, T4N y CapN, los cuales son importados al espacio de trabajo del Matlab. Con las opciones que tiene la herramienta de redes neuronales del Matlab, se selecciona el 70% de los datos para entrenamiento, un 15% para prueba y otro 15% para validación.

Los datos de prueba y validación permiten comprobar durante la etapa de entrenamiento la capacidad de generalizar que tiene la red diseñada, o sea cuán bien responde ante datos que no se encuentran dentro del conjunto de entrenamiento.

Las características del comportamiento de la red durante el entrenamiento se muestran en las Figura 3.2 En esta figura la curva en color rojo se corresponde con el comportamiento de la red para el conjunto de datos de prueba, la verde para los datos de validación y la curva en color azul para el conjunto de datos de entrenamiento. Como puede apreciarse, en ambos casos el perfil de las curvas de prueba y validación siguen al de entrenamiento con un valor de comportamiento similar por lo que la red generaliza muy bien los resultados. El error medio obtenido es $4,86 \cdot 10^{-8}$.

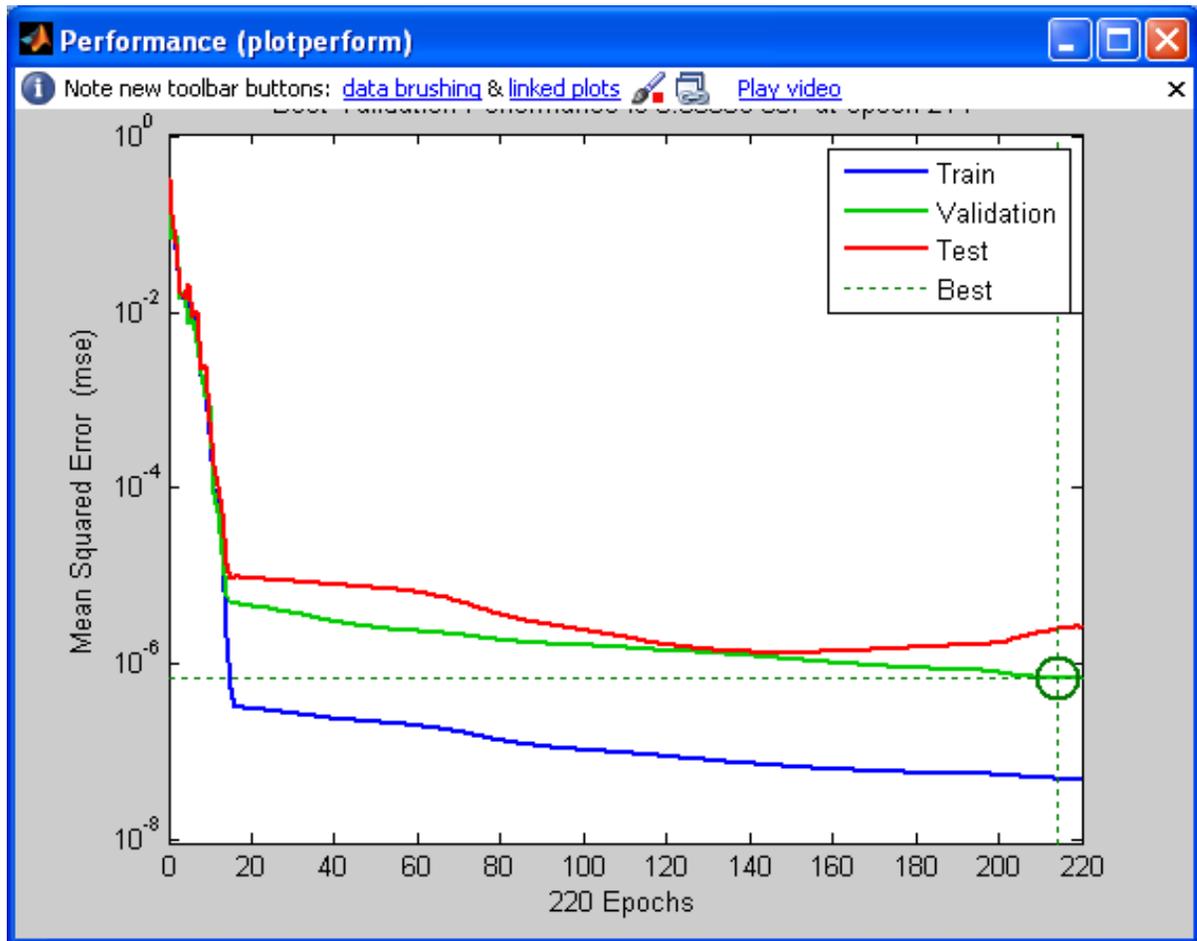


Figura 3.2 Comportamiento del entrenamiento de la RNA.

3.8.2 Selección de la Arquitectura de la RNA.

Seleccionar el número adecuado de neuronas de la capa oculta es un aspecto importante y para ello se entrenó la red variando el número de estas y manteniendo los demás parámetros de diseño constantes. El entrenamiento se realizó para 100 épocas variando el número de neuronas de la capa oculta (n). La Figura 2.3 muestra el comportamiento; MSE, como función del número de neuronas ocultas. Se puede observar que el mejor comportamiento se logra con 11 neuronas en la capa oculta.

CÁLCULOS DE PÉRDIDAS POR RADIACIÓN Y EL MODELO MATEMÁTICO

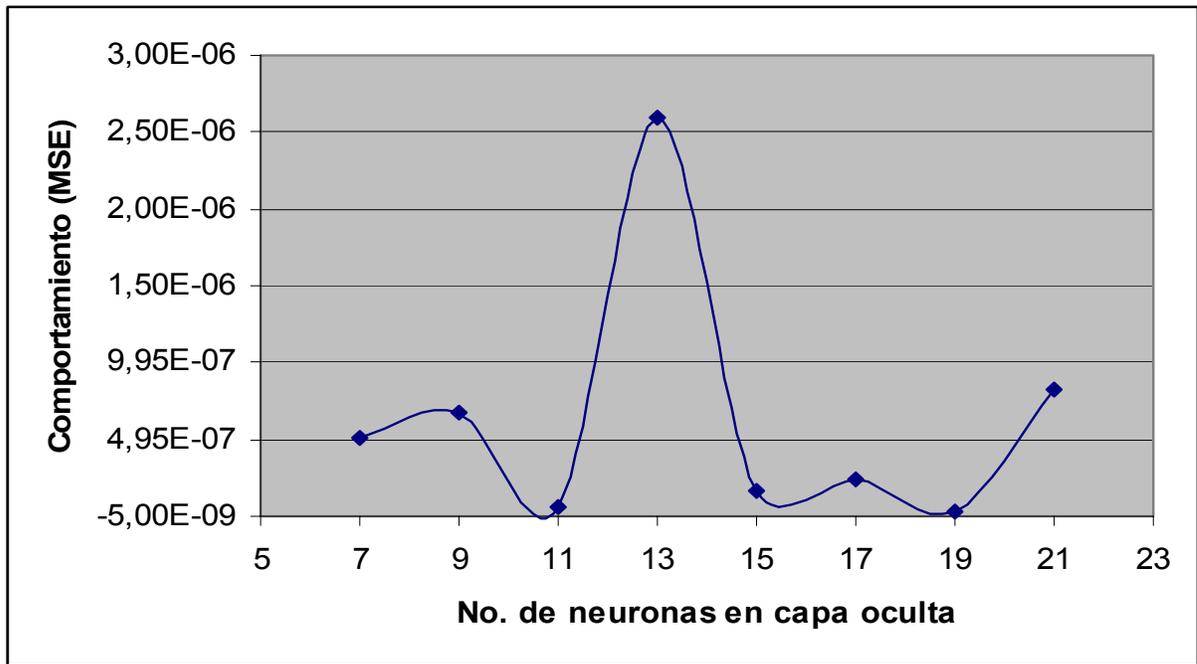


Figura 3.3 Gráfico de optimización del número de neuronas de la capa oculta.

3.8.3 Arquitectura de la RNA.

El esquema de la arquitectura de la red utilizado en nuestro caso se muestra en la Figura 3.4. La arquitectura de la red consiste de cinco entradas, once neuronas en la primera capa oculta, una neurona en la segunda capa oculta y una salida.

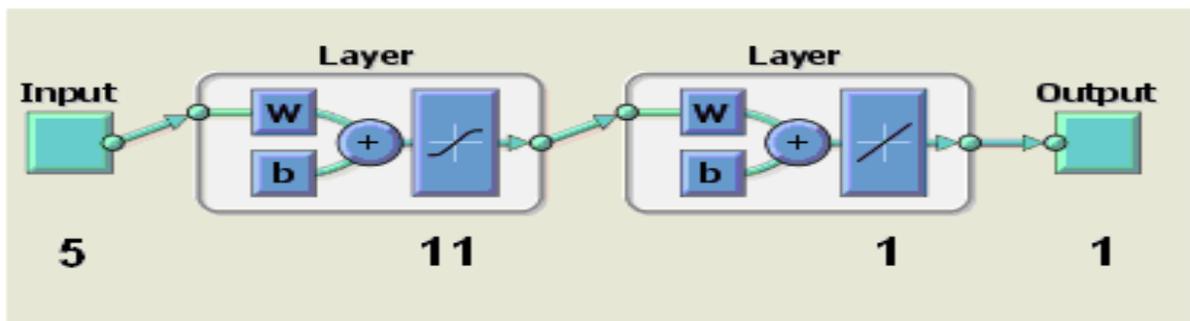


Figura 3.4 Esquema de la Arquitectura de la Red.

3.8.4 Sintaxis del Modelo Neuronal.

La red desarrollada puede ser representada matemáticamente con la siguiente expresión:

$$q_5 = \text{purelin}(LW(2,1) * (\text{tansig}(IW(1,1) * E + b_1) + b_2) \quad (3.22)$$

Donde:

E – Vector de entrada normalizado siguiente.

$$E = \begin{bmatrix} T1N \\ T2N \\ T3N \\ T4N \\ CapN \end{bmatrix}$$

W(1,1) y LW(2,1) – Las matrices de pesos.

$$IW(1,1) = \begin{bmatrix} -0,173 & 1,274 & -0,435 & 1,035 & -1,234 \\ 0,163 & -1,916 & 0,241 & 1,324 & 1,396 \\ 0,163 & 0,028 & -0,475 & 0,002 & -4,361 \\ 0,115 & -0,035 & -0,006 & 0,136 & 6,549 \\ 0,045 & -1,071 & 0,133 & 0,635 & 0,661 \\ -0,990 & 3,687 & 0,634 & 0,724 & 1,11 \\ -0,231 & 0,144 & -0,146 & -0,388 & 3,139 \\ 0,2 & 0,791 & 0,506 & -1,183 & 1,410 \\ -0,006 & -0,462 & 0,397 & 0,408 & 0,804 \\ -0,1753 & -4,120 & 1,543 & 1,757 & -2,5 \\ -0,1532 & -2,512 & 0,597 & -1,16 & 2,534 \end{bmatrix}$$

$$LW(2,1) = [-1,62 \quad -1,05 \quad 1,29 \quad 2,04 \quad -0,91 \quad -0,01 \quad -1,8 \quad 0,25 \quad 1,49 \quad -0,15 \quad 0,21]$$

Vectores de Polarización

b1 y b2 – vectores de polarización.

$$b1 = \begin{bmatrix} -2.4115 \\ 2.5419 \\ -3.7421 \\ 3.9345 \\ -0.2943 \\ -0.28793 \\ -2.2828 \\ 0.50744 \\ 0.36844 \\ -1.9516 \\ -4.1177 \end{bmatrix}$$

$$b2 = [-1,4179]$$

3.8.5 Análisis Post-Entrenamiento.

A continuación se muestra el análisis de la respuesta de la red que realiza la propia herramienta de Matlab. Éste consiste en simular la red para todo el universo de datos disponibles (entrenamiento, validación y prueba) y realizar una regresión lineal entre la salida de la red y los objetivos correspondientes (valores experimentales). Los resultados se muestran en la Figura 3.5.

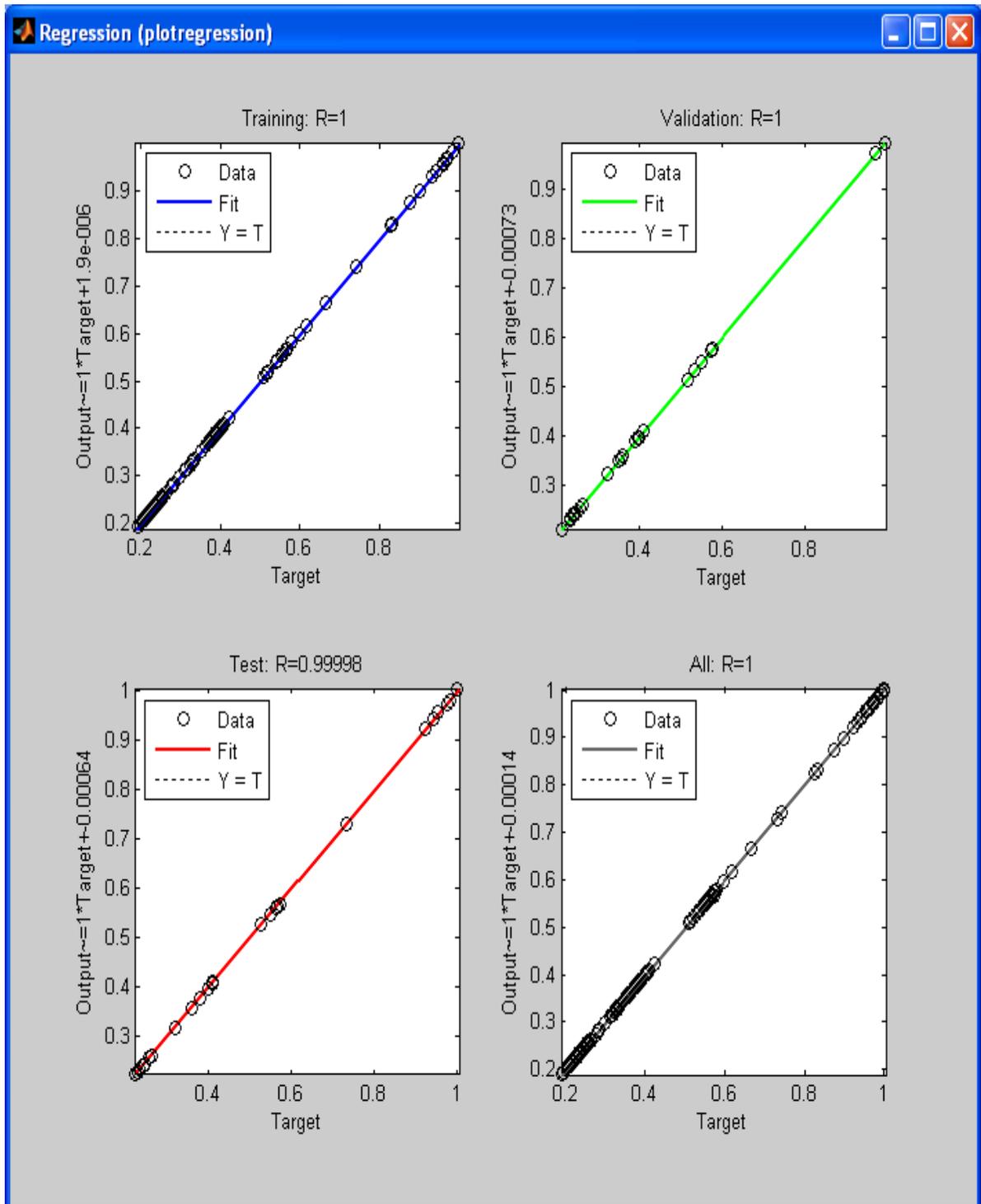


Figura 3.5 Correlación entre la salida de la red y los objetivos.

Se puede apreciar que los valores de pérdidas obtenidos por el modelo neuronal reproduce fielmente el valor de pérdidas dado como valor real a partir de la expresión (3.2) con coeficientes de correlación $R^2 = 1$ lo que sirve de validación al modelo obtenido.

3.8.6 Aplicación Desarrollada.

Para el trabajo posterior con la red se desarrolla una aplicación en ambiente Matlab que solicita del usuario como datos de entrada las temperaturas en las paredes de la caldera y la capacidad nominal de la misma y simula la red para devolver el porcentaje de pérdidas por radiación. La codificación de este programa con el nombre de **perdidasq5.m** es la siguiente:

%Programa para el cálculo de q5 a partir de modelo neuronal.

clc

fprintf('PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR RADIACIÓN\n');

fprintf(' EN CALDERAS PIROTUBULARES \n');

fprintf('*****\n');

fprintf('DATOS DE ENTRADA\n');

T1=input('Temperatura de pared lateral 1,oC, T1=');

T2=input('Temperatura de la pared frontal,oC, T2=');

T3=input('Temperatura de la pared trasera,oC, T3=');

T4=input('Temperatura de la pared lateral 2,oC, T4=');

Cap=input('Capacidad nominal de la caldera,kg/hr, Cap=');

%Normalizar datos y crear vector de entrada

```
Ent=[T1/56; T2/152; T4/240; T3/58; Cap/4000];
```

%Simular la red.

```
q5Mod=sim(net_q5,Ent);
```

%Pérdidas por radiación

```
q5=q5Mod*11.03286;
```

```
disp('*****');
```

```
disp('RESULTADOS')
```

```
disp('*****');
```

```
fprintf('El porciento de pérdidas por radiación es = %8.4f\n',q5);
```

En la Figura 2.5 se puede apreciar la ventana de Matlab con los resultados de una corrida.

CÁLCULOS DE PÉRDIDAS POR RADIACIÓN Y EL MODELO MATEMÁTICO

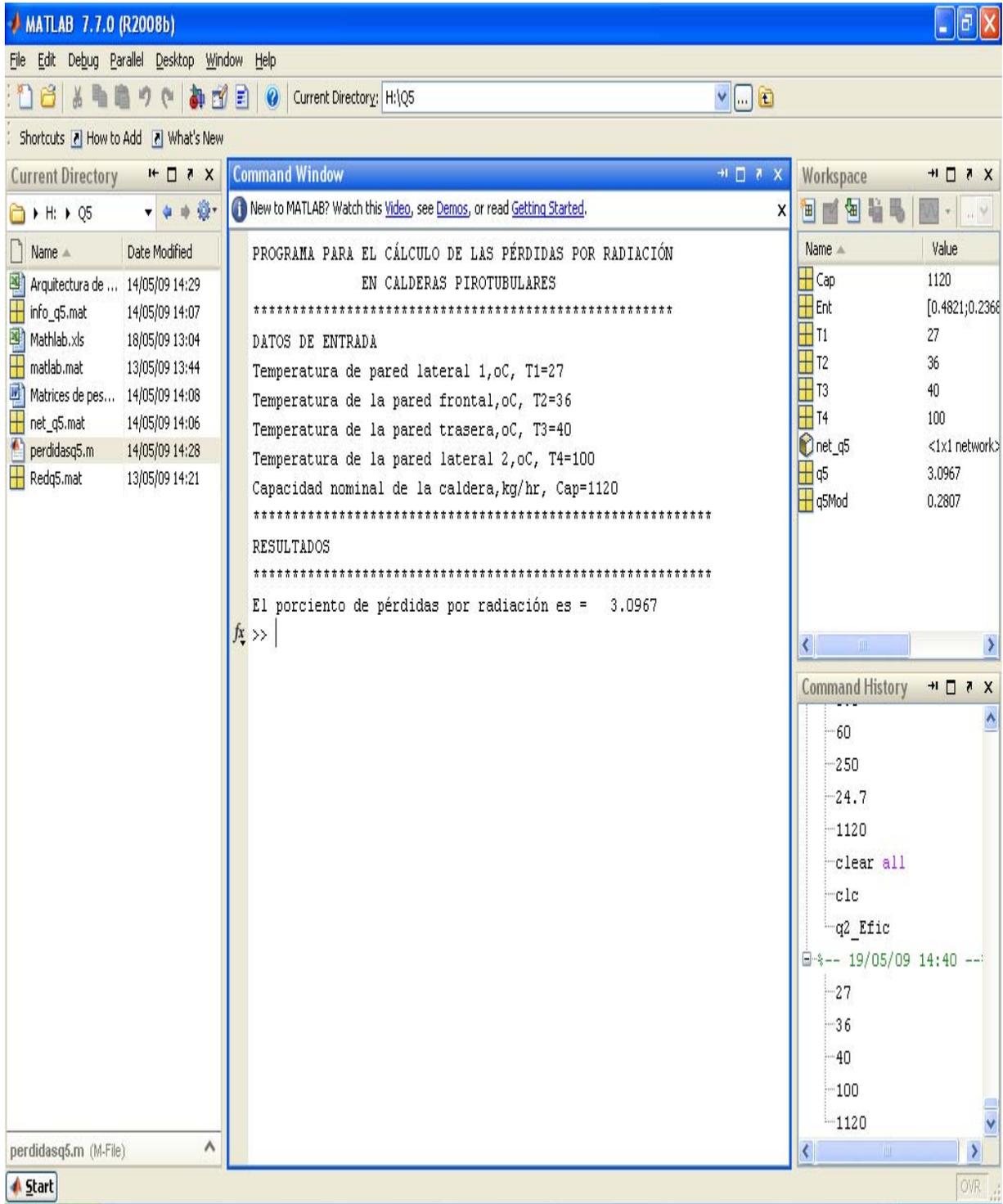


Figura 3.6 Ventana del Matlab mostrando una corrida del programa perdidasq5.m

3.8.7 Cálculo de Error Absoluto entre Resultado de Expresión (3.2) y la Aplicación Desarrollada.

El error absoluto en porcentaje, entre la expresión para calcular las pérdidas por radiación (3.2) y el resultado de la aplicación desarrollada se calcula por la siguiente expresión:

$$E = |R - A| \quad (3.23)$$

Donde:

E – Error Absoluto; (%).

R – Resultado de expresión (3.2); (%).

A – Resultado de la aplicación desarrollada; (%).

3.9 CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO II.

- ❖ Los indicadores para calcular la pérdida por radiación en las calderas son:
 - ✓ Transferencia de calor.
 - ✓ Capacidad de la caldera.
 - ✓ Carga.
 - ✓ Calculo rápido.

- ❖ Las mediciones tomadas para calcular las pérdidas por radiación son:
 - ✓ Temperatura Superficial de las Paredes.
 - ✓ Flujo de Vapor Real.
 - ✓ Flujo de Combustible.
 - ✓ Tiempo de arranque y parada del quemador.

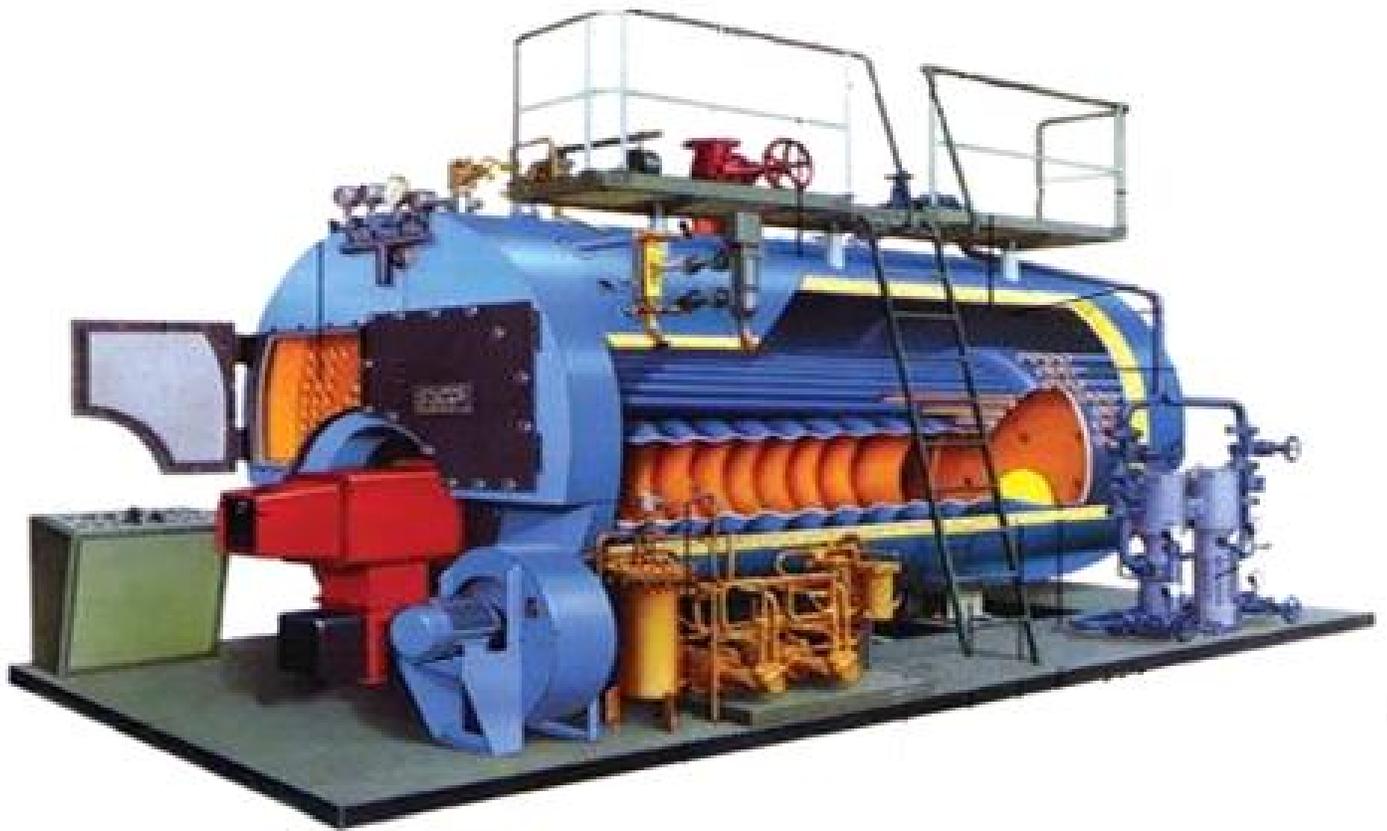
- ❖ Las medición tomada para la elaboración del modelo matemático es:
 - ✓ Temperatura Superficial de las Paredes.

3.9 CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO II.

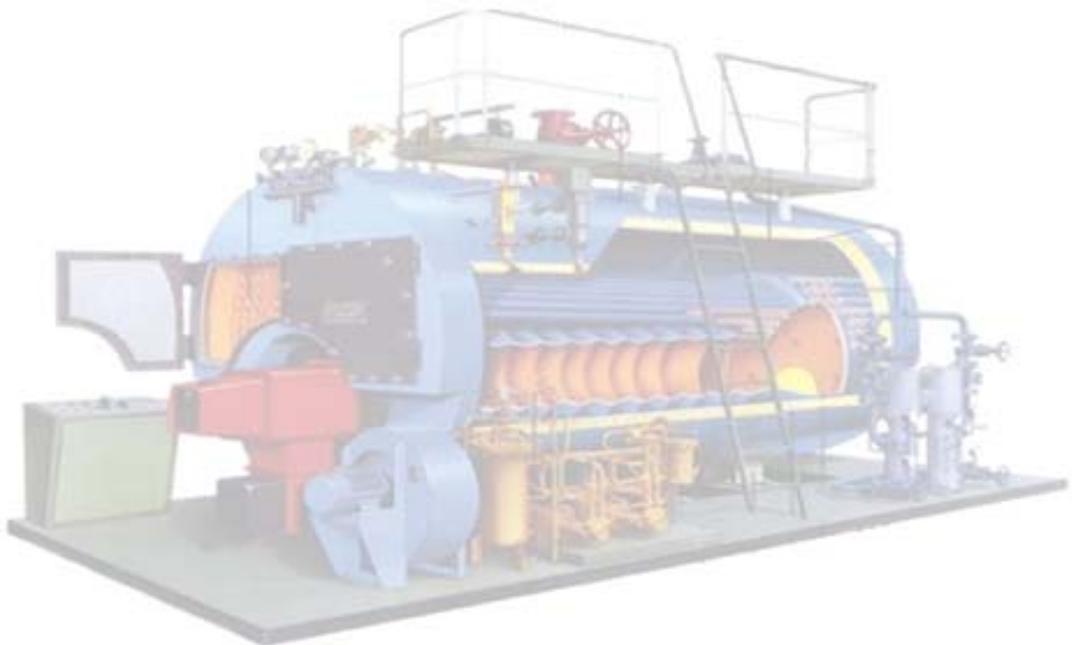
- ❖ Los indicadores para calcular la pérdida por radiación en las calderas son:
 - ✓ Transferencia de calor.
 - ✓ Capacidad de la caldera.
 - ✓ Carga.
 - ✓ Calculo rápido.

- ❖ Las mediciones tomadas para calcular las pérdidas por radiación son:
 - ✓ Temperatura Superficial de las Paredes.
 - ✓ Flujo de Vapor Real.
 - ✓ Flujo de Combustible.
 - ✓ Tiempo de arranque y parada del quemador.

- ❖ Las medición tomada para la elaboración del modelo matemático es:
 - ✓ Temperatura Superficial de las Paredes.



Capítulo III



CAPÍTULO III

CÁLCULO Y EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS POR RADIACIÓN

4.1 SOBREDIMENSIONAMIENTO Y FACTOR DE CARGA (Φ).

Utilizando expresión (3.1), calculamos el factor de carga para las instalaciones estudiadas, ver Tabla 4.1 para los resultados.

Véase ANEXO 3 Tablas 1, 2, 3, 4 y 5 para los tiempos de trabajo de los quemadores en las instalaciones estudiadas.

Tabla 4.1 Factor de Carga de las Instalaciones.

Instalaciones	TT _Q (s)	TT _{GV} (s)	Φ
Tecnológico 5 de Septiembre	6572	16313	0,4
Instituto Superior Pedagógico	6687	9093	0,74
Comedor Escolar	3910	10255	0,38
Universidad de Cienfuegos	5700	7200	0,79
Lavandería Unicornio	1800	6000	0,3

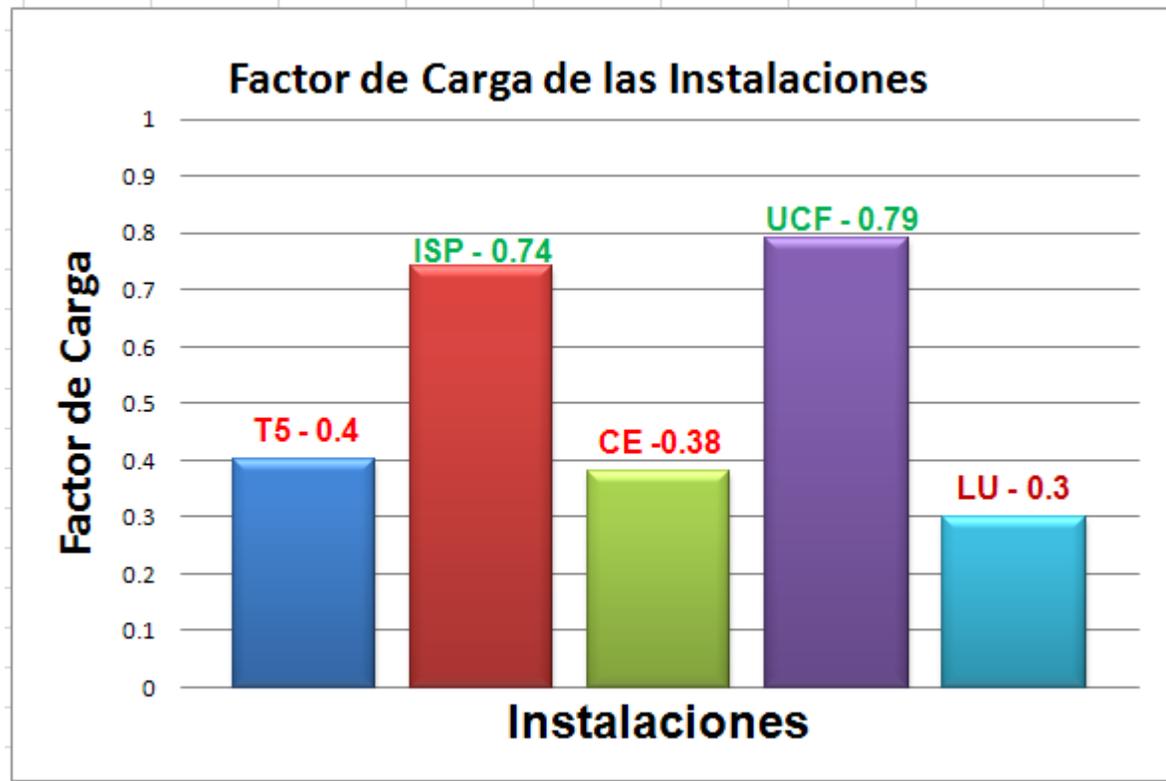


Figura 4.1 Gráfico de Factor de Carga de las Instalaciones.

Como se observa el factor de carga en el Tecnológico 5 de Septiembre, Comedor Escolar y Lavandería Unicornio; según los cálculos son menores de 0,5 lo cual significa que estas tres calderas se encuentran sobredimensionadas, esto influye en el incremento de las pérdidas por radiación, porque los quemadores de esas calderas tienen muy largos periodos de parada donde ellas tienen la oportunidad de enfriarse y ceder calor al medio ambiente, debido al efecto integral de los tres mecanismos de transferencia de calor: radiación, convección y conducción .

4.2 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR POR RADIACIÓN (q5) EN FUNCIÓN DE LAS EXPRESIONES.

Utilizando las expresiones mencionadas en el Capítulo II, calculamos las pérdidas de calor por radiación (q5) en porcentaje del calor disponible, en los centros y los resultados se pueden encontrar en Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Pérdidas por Radiación (%).

Expresiones	Instalaciones				
	T 5	ISP	CE	UCF	LU
(3.1)	1,1	3,1	0,7	0,7	2,2
(3.2)	3,98	8,97	2,4	2,7	6,1
(3.4) y (3.5)	0,23	3,58	1,77	4,1	3,2
(3.19)	5	14,3	3,8	7,04	17,1
(3.20)	0,57	0,38	1,49	0,4	0,2

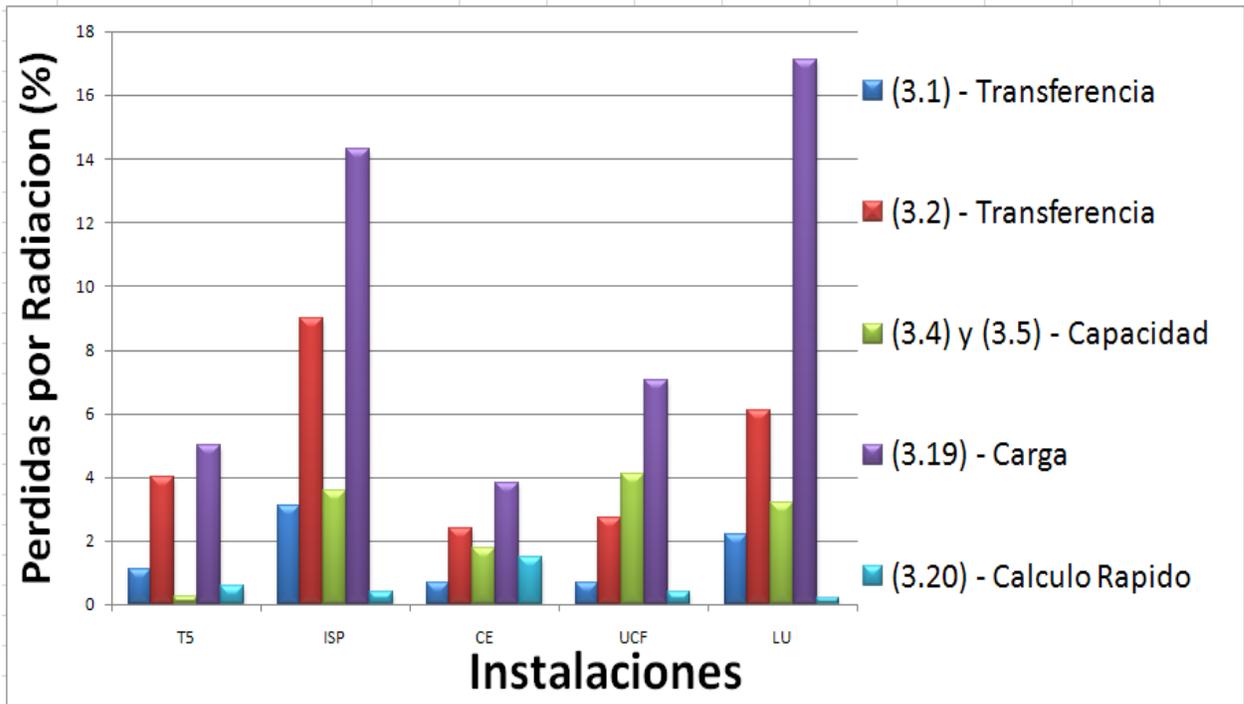


Figura 4.2 Gráficos de Comportamiento de las Pérdidas por Radiación en las Instalaciones según las Diferentes Expresiones.

Los resultados de las expresiones de cálculo analizadas en este trabajo se observa:

- ✓ Los valores de las pérdidas obtenidos en las expresiones utilizadas son diferentes en todos los casos.
- ✓ La expresión 3.2 que dependen de los métodos de transferencia de calor se acercan mas a los resultados obtenidos en la expresión 3.19 que depende de la carga lo cual es uno de los factores que más influencia tiene en esta pérdida.
- ✓ Con respecto a las expresión 3.1 y 3.2 que se basan en los métodos de transferencia no se obtiene iguales valores para las pérdidas ya que lo factores que influyen en ambas son diferentes.
- ✓ En todas las expresiones el porcentaje de perdidas oscila entre 0 y 17% lo cual es influenciada en una amplio diapasón ya que los factores que se consideran son muy diferentes en las 5 instalaciones.

4.2.1 Cálculo de Error Absoluto entre Resultado de Expresión (3.2) y la Aplicación Desarrollada.

Utilizando expresión 3.23 para hacer un ejemplo de cálculo de error absoluto, entre el resultado de expresión (3.2) y la aplicación desarrollada.

Tabla 4.3 Resultado de error absoluto (%).

Resultado de la Aplicación Desarrollada	Resultado de Expresión (3.2)	Error Absoluto (%)
3,0967	3.096416	0,000284

4.3 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LAS PÉRDIDAS POR RADIACIÓN EN LAS CALDERAS.

El costo como categoría económica expresa la eficiencia en el control de los recursos, constituye un indicador generalizador de la calidad y permite comparar la producción obtenida y la magnitud de los gastos incurridos, reflejando en los gastos de los recursos materiales, humanos y financieros.

Los valores para Tabla 4.4 son tomados y calculados según los pasos realizados por el autor en su proyecto III.¹⁷

¹⁷ (Gopal, Ram Kumar. 2009, p.5)

Tabla 4.4 Parámetros de Trabajo para Calcular el Costo Económico.

Parámetros	Instalaciones					Unidad
	T5	ISP	CS	UCF	LA	
Flujo de vapor nominal	0,44	1,12	0,6	0,66	4	Ton/h
Flujo de Agua	280	250	500	300	750	L/h
Flujo de Combustible	20	24,7	43	21	38	L/h
Salarios de Operadores	180	180	180	180	180	CUC/año
Horas de trabajo anual de la caldera	2242	1560	1080	1500	4000	Horas

Se determina el costo de todas las fuentes de energía que son utilizadas en el sistema analizado. Este es necesario para establecer el precio de cada corriente energética en el sistema, ver Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Costos de Relevantes para Calcular el Costo Económico.

Variabes	Valor	Unidad
Fuel-oíl	0,2	CUC/L
Diesel	1	CUC/L
Agua	$3 \cdot 10^{-6}$	CUC/L
Electricidad	0,036	CUC/kWh

4.4 METODOLOGÍA PARA CALCULAR EL COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN DE VAPOR (C_{TPV}).

El costo total de producción de vapor se calcule por la siguiente expresión:

$$C_{TPV} = C_f + C_v; (\text{CUC/año}). \quad (4.1)$$

Donde:

C_f – Costo fijo del área de generación; (CUC).

C_v – Costos variables del área de generación; (CUC).

Antes de calcular los costos fijos debemos conocer los costos de inversión de la caldera que se determinan por la siguiente fórmula:

$$I_C = \left(\frac{D_V}{1500} \right)^{0.6} * C_A; (\text{CUC}) \quad (4.2)$$

Donde:

D_V – Flujo de vapor de la caldera; (t/h).

C_A – Costo de Adquisición = \$35000 para una caldera de 1500 kg/h, según referencia de la empresa de caldera.

4.4.1 Cálculos de los Costos Fijos.

$$C_f = (N_g + R) \cdot I + S; (\text{\$CUC/año}) \quad (4.3)$$

Donde:

N_g – Taza de amortización (7% al año).

R - Taza de retorno de la inversión en (12% al año). Para la rama energética.

S – Gasto de salario en operación; (CUC).

4.4.2 Costo Variable.

El costo variable depende de costos de combustible y el agua.

Calcular los costos variables por la siguiente expresión:

$$C_V = ((D_V * C_W) + (C_F * B_C)) * H_A; \text{ (CUC/año)} \quad (4.4)$$

Donde;

C_f , C_w , – Son valores del costo de petróleo y de agua; (CUC).

B_c – Flujo de combustible; (L/h).

D_v – Flujo de agua; (L/h).

H_A – Horas de trabajo; (horas/año).

4.4.3 Resultados de Costos Económicos.

Tabla 4.6 Costos Económicos de los Centros.

Costos	Instalaciones					Unidad
	T5	ISP	CS	UCF	LA	
Fijo	2609	2450	3620	2710	4568	CUC/año
Variable	44841	7479	46443	31501	30409	CUC/año
Total de Producción de Vapor	47450	9929	50063	34210	35000	CUC/año

4.5 COSTO DE PÉRDIDAS DE CALOR POR RADIACIÓN.

Con el costo de pérdidas por radiación en función de costo total de producción de vapor podemos saber en cuanto las instalaciones de estudio están perdiendo en unidades de CUC por año.

Estudios realizados en calderas pirotubulares demuestran que las pérdidas por radiación oscilan entre 1,2% y 2%.¹⁸ Tomando como límite que hay siempre alrededor de un 2% de pérdidas que no se pueden evitar, y teniendo esto en cuenta, se restan las pérdidas calculadas por la expresión (3.2) y se obtiene la siguiente tabla con la pérdida por radiación re-calculada para determinar sus costos.

¹⁸ (p.3)

Tabla 4.7 Costo de Pérdidas por Radiación.

Centros	C _{TPV} (\$CUC/año)	Incremento de Pérdidas por Radiación (sobre el límite establecido) (%)	Costo de Pérdidas por Radiación (CUC/año)
T5	47450	1,98	940
ISP	9929	6,97	692
CS	50063	0,4	200
UCF	34210	0,7	240
LU	35000	4,1	1435

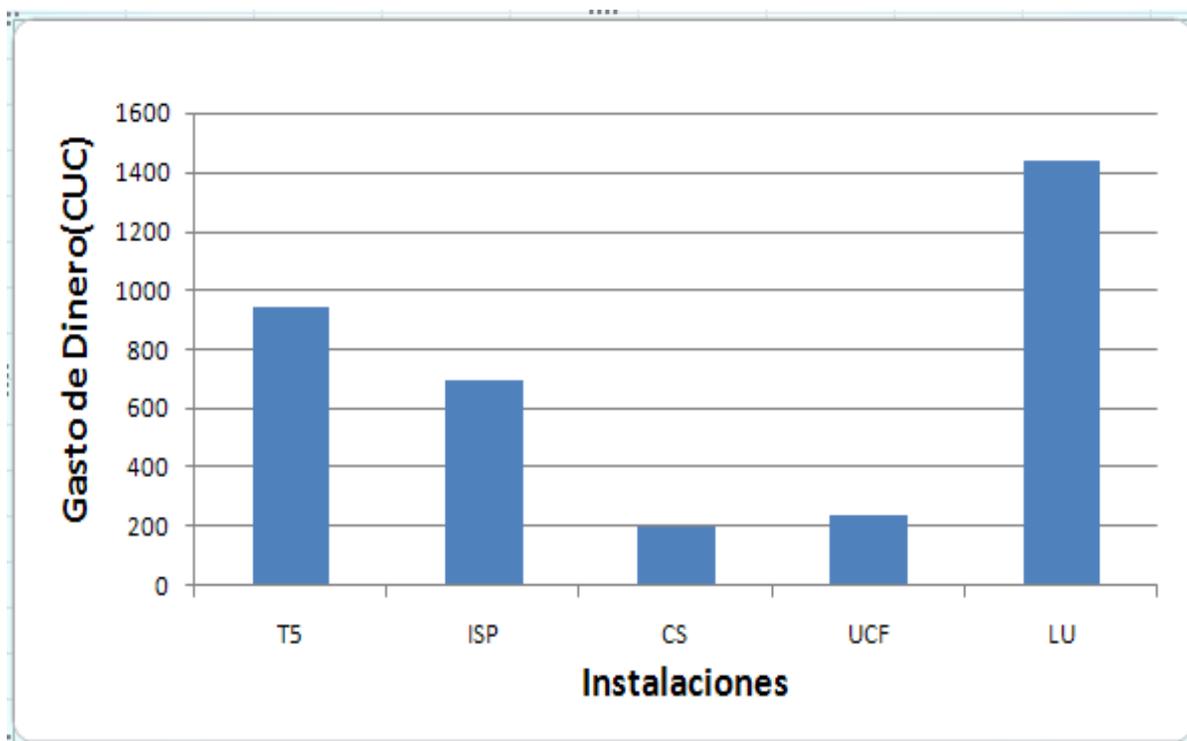


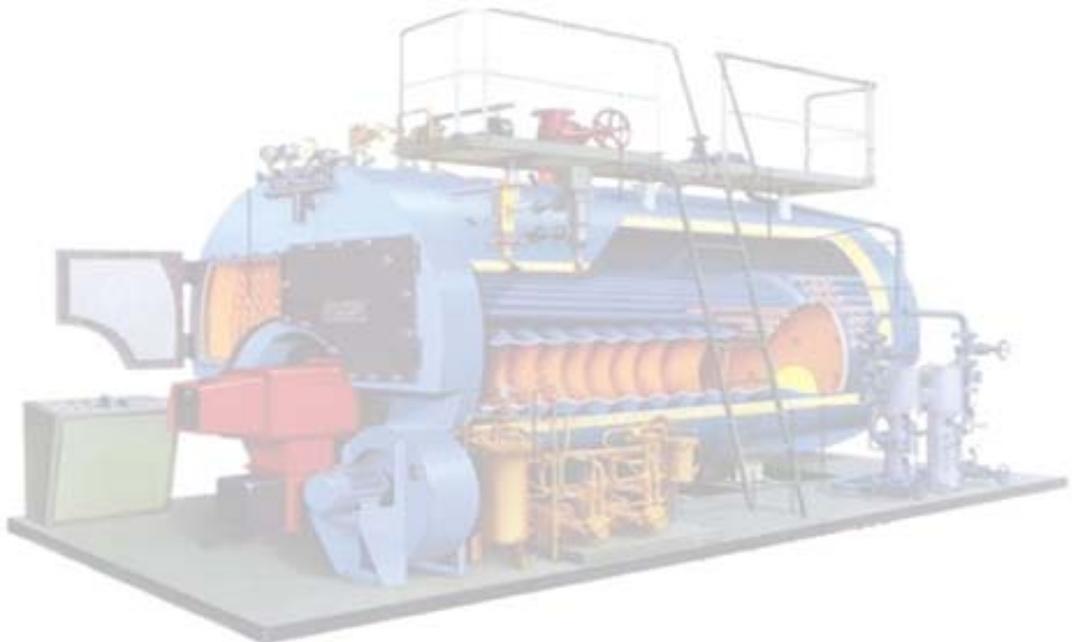
Figura 4.3 Gráfico de gasto de dinero en Pérdidas por Radiación.

4.6 CONCLUSIONES PARCIALES DEL CAPÍTULO III.

- ❖ La valoración de las expresiones utilizadas en el presente trabajo corrobora los resultados de la influencia de la pérdida por radiación en calderas de baja capacidad incluyendo las ecuaciones de cálculo basadas en los mecanismos de transferencia de calor que se corresponden con los datos encontrados en la literatura.
- ❖ Las calderas de las siguientes instalaciones se encuentran sobredimensionadas, debido a que el factor de carga, en todo los casos, se encuentra por debajo de 0,5 :
 - ✓ El Tecnológico 5 de Septiembre.
 - ✓ El Comedor Escolar.
 - ✓ La Lavandería Unicornio.
- ❖ El Tecnológico 5 de Septiembre, según los cálculos tiene 1,98% de pérdidas por radiación que significa \$940 CUC y el Instituto Superior Pedagógico tiene 6,97% de pérdidas por radiación que significa \$692 CUC.



Conclusiones

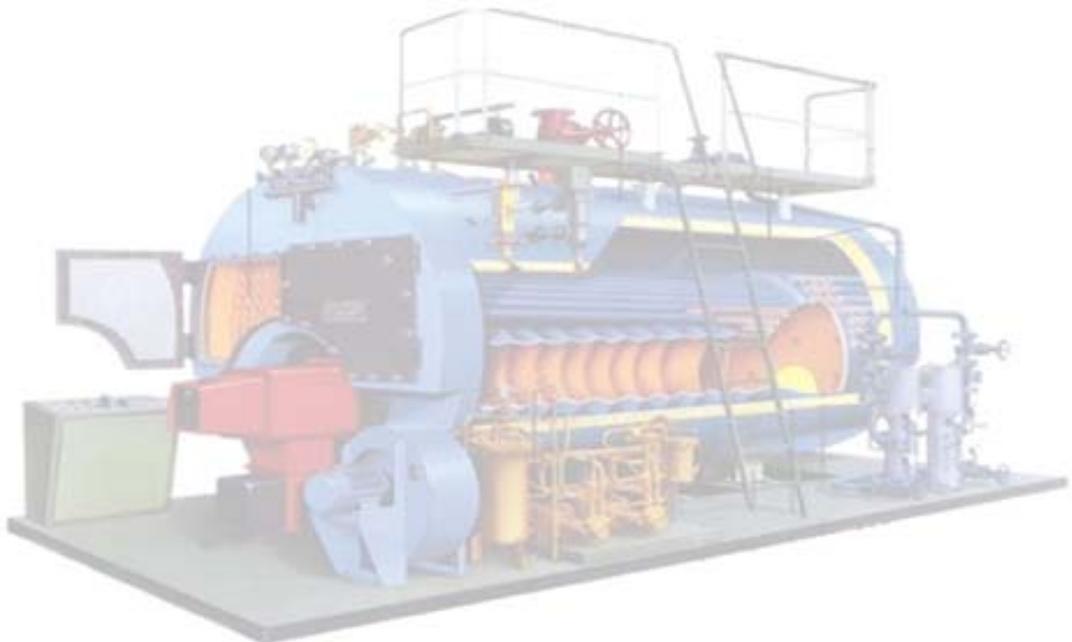


CONCLUSIONES GENERALES

- ❖ Del estudio realizado por el autor, basado en datos experimentales y utilizando los métodos de cálculos aplicados en las calderas pirotubulares de: Tecnológico 5 de Septiembre, Comedor Escolar y Lavandería Unicornio; se demuestra que estas unidades se encuentran sobredimensionadas, con valores de factor de carga entre 0,4; 0,38 y 0,3 respectivamente.
- ❖ Aplicando las expresiones tradicionales para el cálculo de las pérdidas por radiación, se demuestra que en el Instituto Superior Pedagógico y la Lavandería Unicornio, se detectan las mayores pérdidas por radiación con 8,97 y 6,1% respectivamente.
- ❖ Los resultados obtenidos para las pérdidas por radiación, basado en el modelo matemático que se obtiene aplicando RNA y utilizando los resultados evaluados según la expresión (3.2), se obtiene un error menor que 1%; lo cual es aceptable para este tipo de investigación.
- ❖ La evaluación económica realizada, considerando el límite mínimo de pérdidas por radiación posible, a partir de criterios de especialistas se demuestra que en el Comedor Escolar y la Universidad de Cienfuegos se detectan incrementos de consumo originados por las pérdidas por radiación, que representan un gasto adicional entre \$200 y \$240 CUC respectivamente.



Recomendaciones



RECOMENDACIONES

- ❖ Validar el método utilizado para las calderas pirotubulares de capacidades instaladas en el rango estudiado.
- ❖ Entregar a la empresa ALASTOR las expresiones de cálculo obtenidas en el presente trabajo una vez validadas.
- ❖ Continuar la investigación realizada en el presente trabajo en calderas pirotubulares de otras capacidades utilizando el método empleado.

BIBLIOGRAFÍA

2009a. Caldera. Available at: [http://www. Wikipedia.com/la enciclopedia libre.html](http://www.Wikipedia.com/la enciclopedia libre.html), 20 de marzo del 2009.

2009b. Calderas de Vapor. . Available at: <http://www. sistemascalefaccion.com/> .

2009c. Desarrollo de las calderas. . Available at: <http://www.babcock-wanson.es>.

Alonso González, Adrián. Caracterización del Sobredimensionamiento de las Calderas en el Sector de la Salud en Cienfuegos, Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez".

Borroto Bermúdez, Aníbal José, 2000. Ahorro de Energía en la Generación y Distribución del Vapor. , p.110.

Borroto Bermudez, Anibal. , 1995. Estudio de las perdidas de calor por radiación en generadores pirotubulares en régimen on/off.

Diaz Tanquero, Nelson Tanquero. , 2002. Curso de Generador de Vapor, Venezuela: Puerto.

Elementos, Términos y Componentes de una Caldera., 2009. Available at: <http://www. Wikipedia/la enciclopedia libre.html>.

Guía de vapor para la industria”, 2002. México: Conae.

Radiación Térmica. , 2009. Available at: <http://www. Wikipedia.com/la enciclopedia libre.html>,

Radiación. , 2009. Available at: <http://www. Wikipedia.com/la enciclopedia libre.html>,

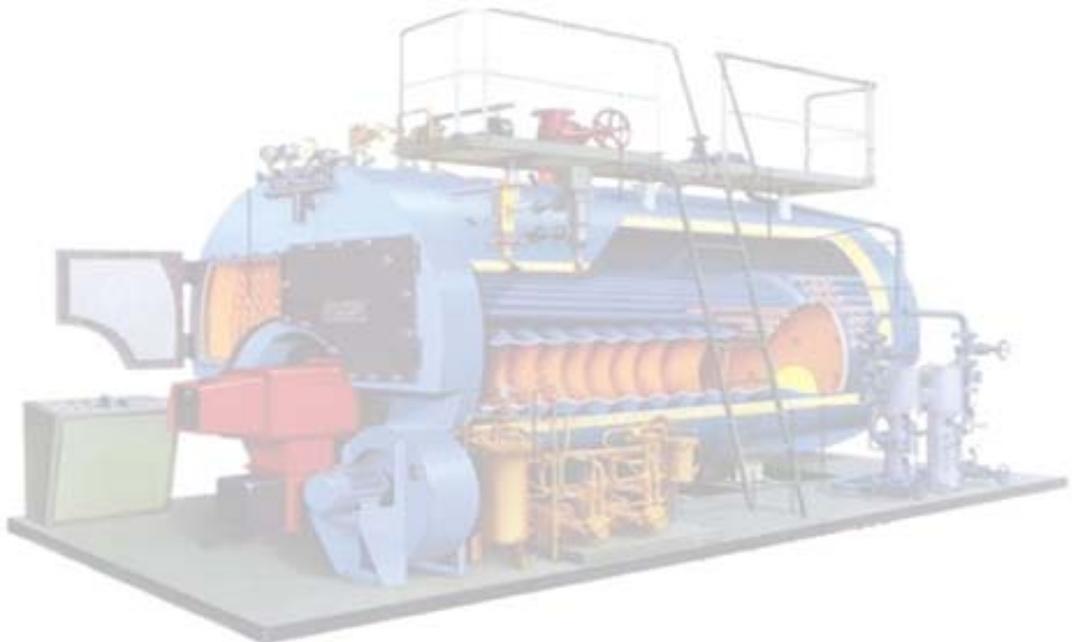
Red Neuronal Artificial. , 2009. Available at: <http://www. Wikipedia.com/la enciclopedia libre.html>.

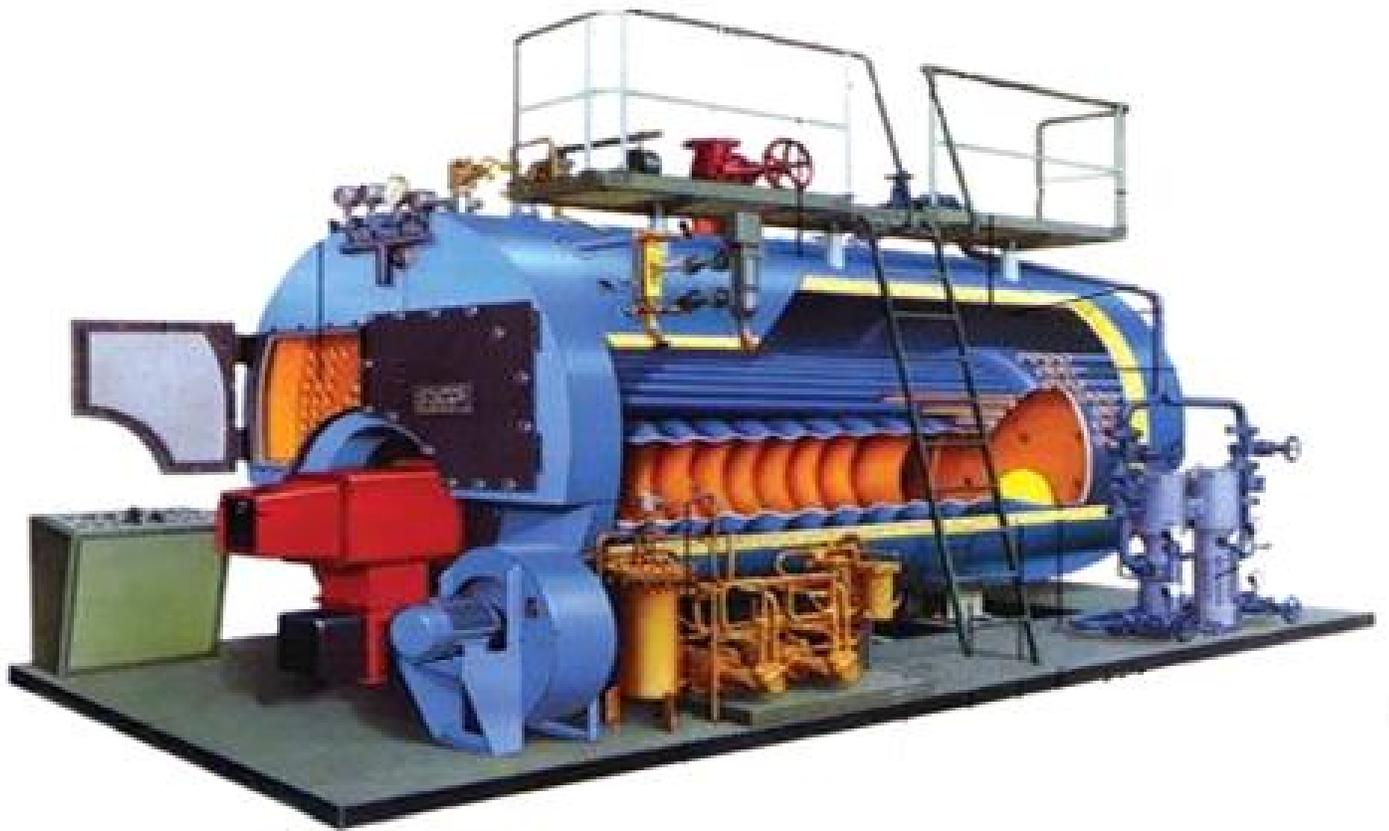
Tipos de calderas. , 2009. Available at: <http://www.conae.gob.mx>.

- Moya, Vidal. David Armando, 2009. Estudio del factor de carga en las calderas pirotubulares.
- Parris, Dwight Abo, 2009. Estudio del Sistema de Generación de Vapor de la Universidad de Cienfuegos, Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez".
2009. Evaluación de las pérdidas en la caldera del Comedor Escolar del municipio de Cienfuegos.
- Balwant, Yugeshwar Andy, 2009. Evaluación de las perdidas en la caldera del Tecnológico 5 de Septiembre de Cienfuegos, Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez".
- Isachenco, 1985. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, La Habana: MES.
- Rubio Gonzales, Ángel M., 1982. Generadores de Vapor. Funcionamiento y Explotación., Santa Clara.: Editorial UCLV.
- Rodriguez Lapido, Margarita, 1998. Incremento de la eficiencia térmica en calderas pirotubulares por disminución de las perdidas por calor sensible.
- Gopal, Ram Kumar. , 2009. La Balance Térmica de la Caldera de la Escuela Formadora de Maestros, Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez".

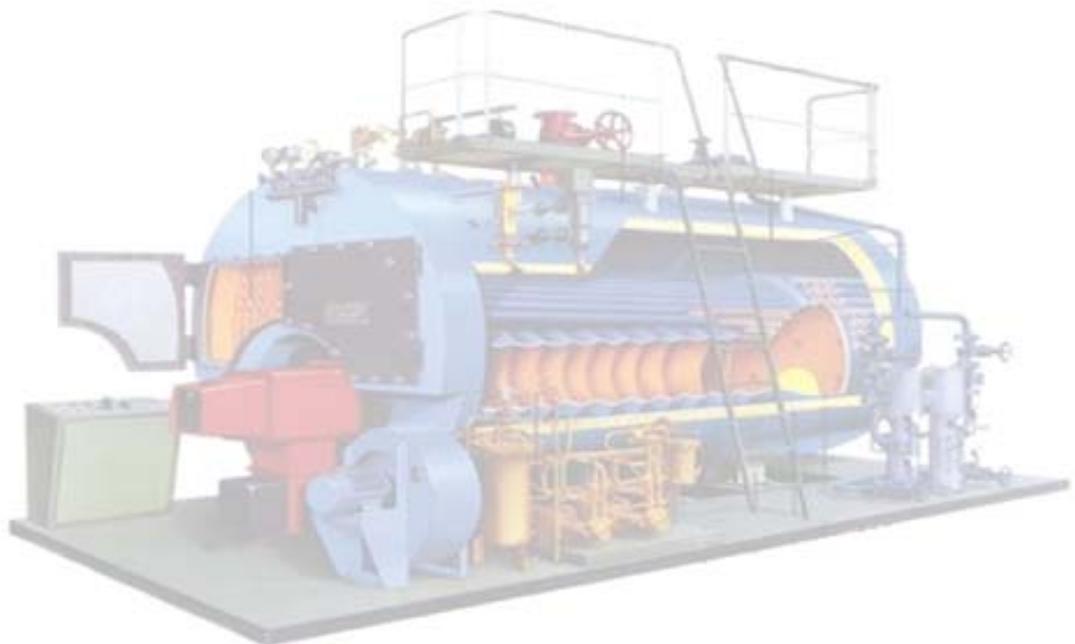


Anexos





Anexo I



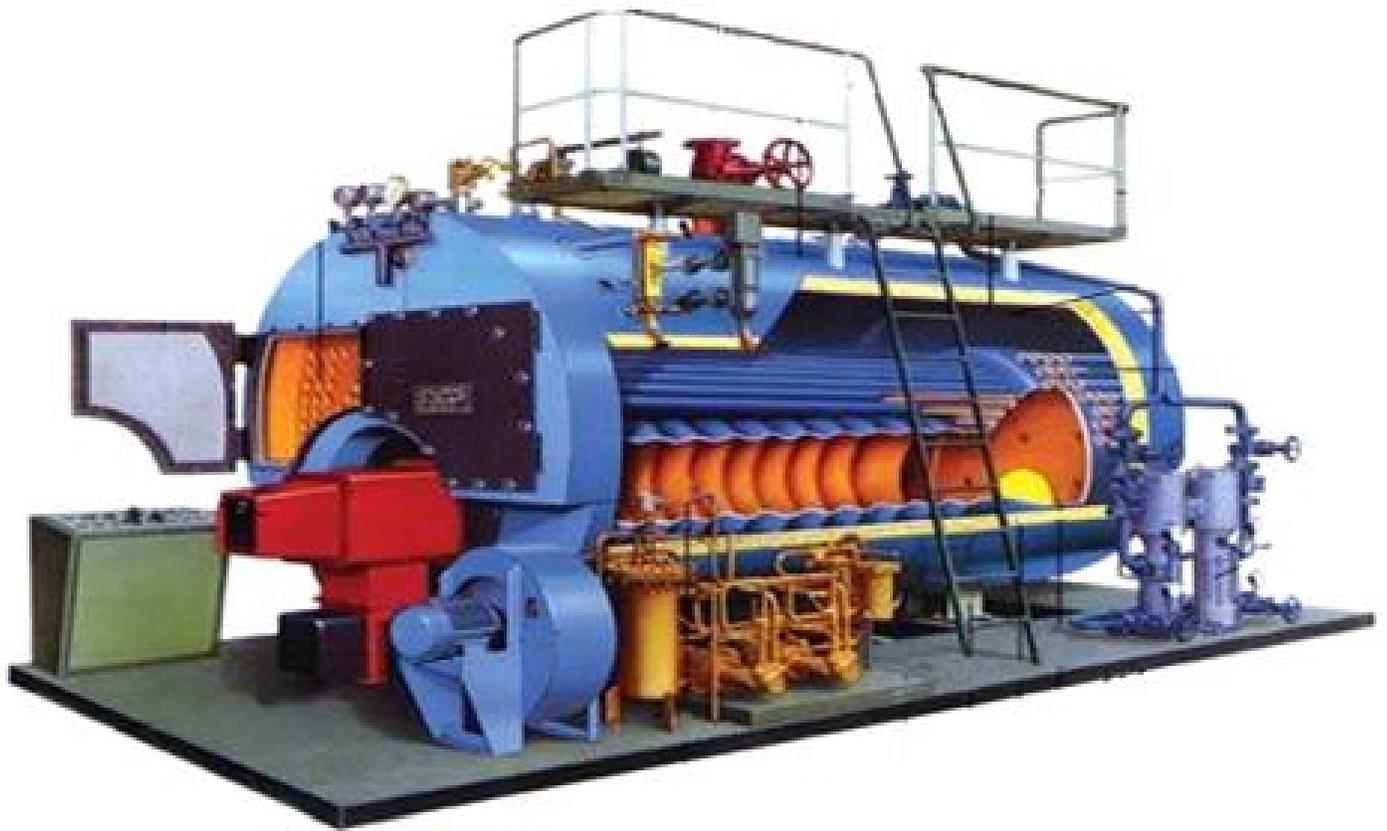
ANEXO I



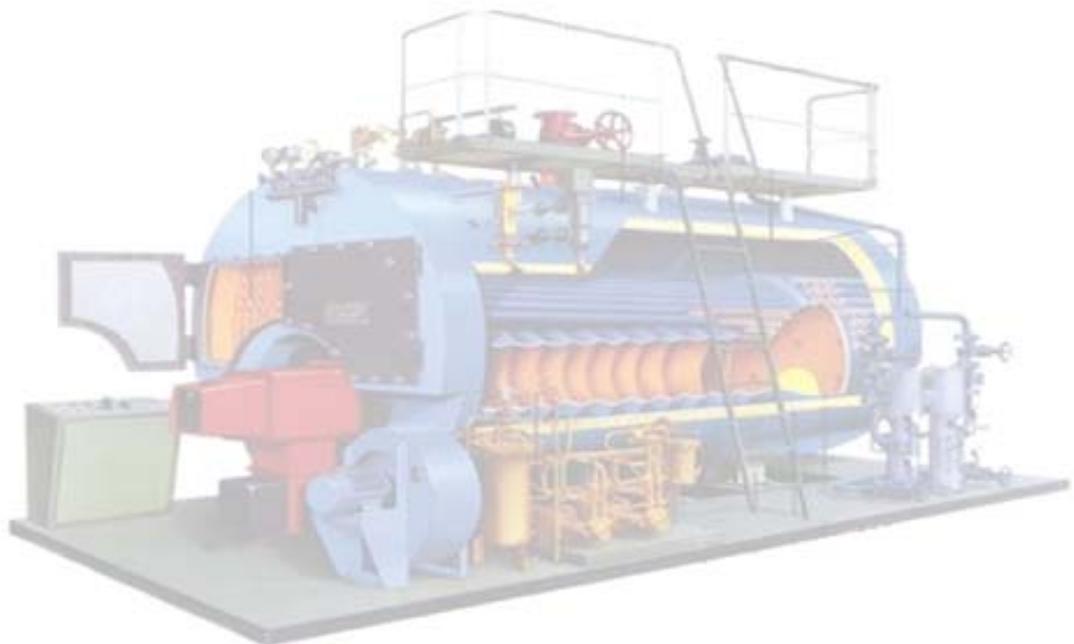
Figura 1. Foto de la caldera de Tecnológico 5 de Septiembre.



Figura 2. Foto de la caldera de sala de caldera de la Instituto Superior Pedagógico de Cienfuegos.



Anexo II



ANEXO II

Figura 1. Nomograma para la determinación de las perdidas por radiación propuesto por la ABMA.

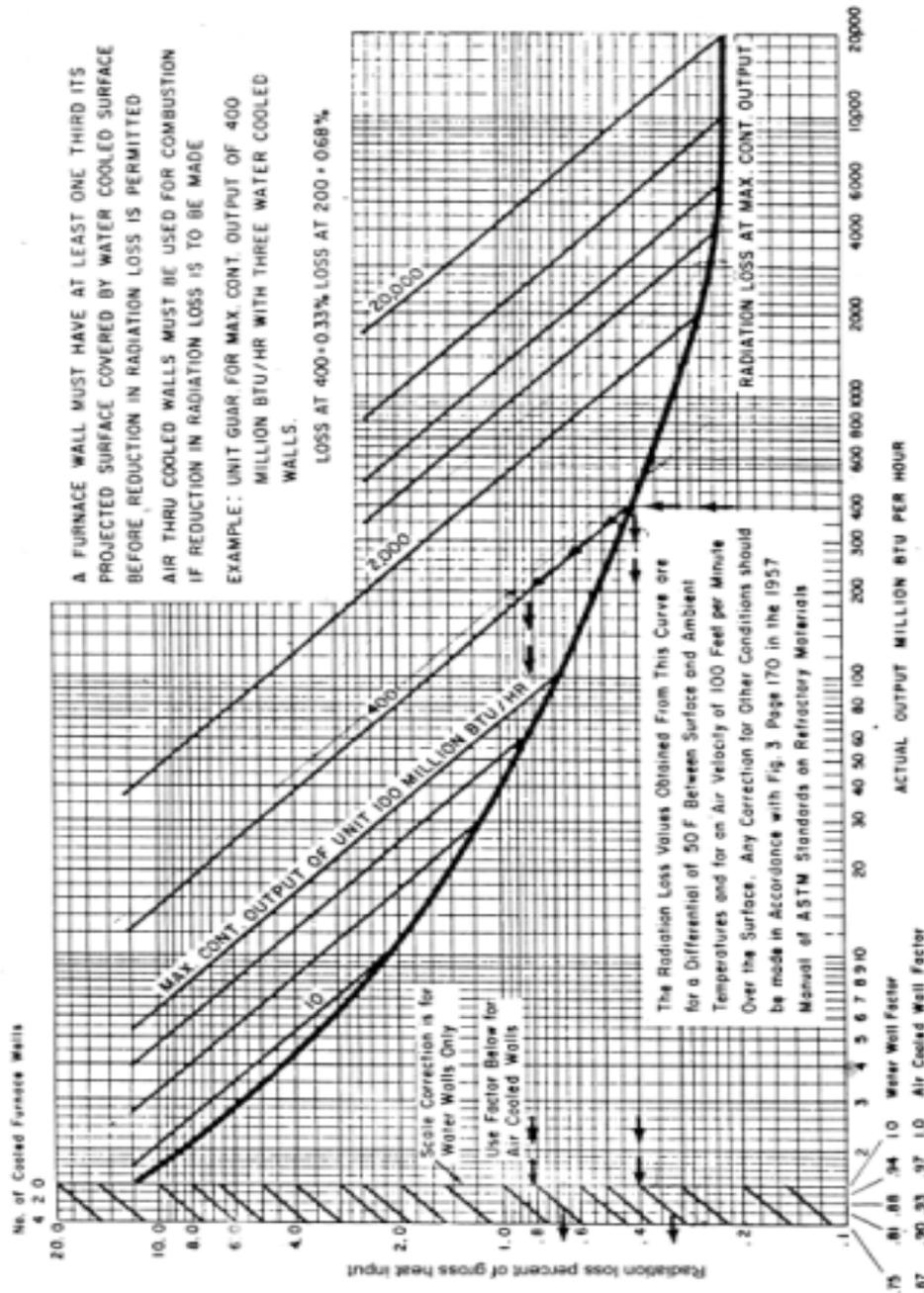


FIG. 8 ABMA STANDARD RADIATION LOSS CHART

To facilitate the use of the major correction which is for air velocity, this correction is included in the Code on Fig. 9, the lower curve of which is the basis of the ABMA curve.

(Published through the courtesy of the American Boiler Manufacturers Association)

Figura 2. Nnomograma para las correcciones a los valores de la Figura 1. para otras condiciones.

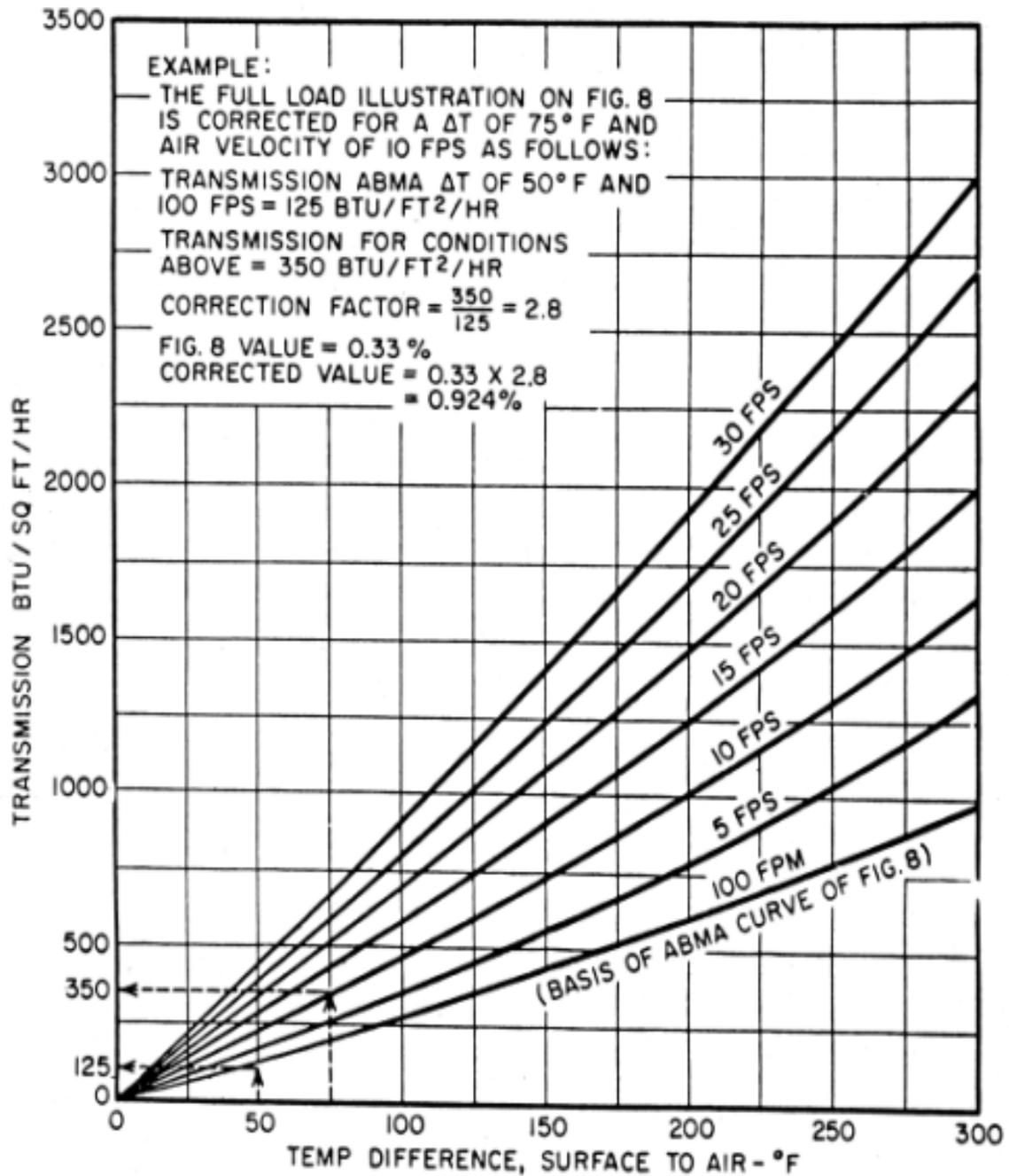


FIG. 9 SURFACE TRANSMISSION FOR VARIOUS AIR VELOCITIES BASED ON EMISSIVITY OF 0.95 AND AIR TEMPERATURE OF 70°F

(Basic data above were obtained from ASTM Standard on Refractory Materials)

Figura 3. Perdidas de calor al exterior a régimen nominal.

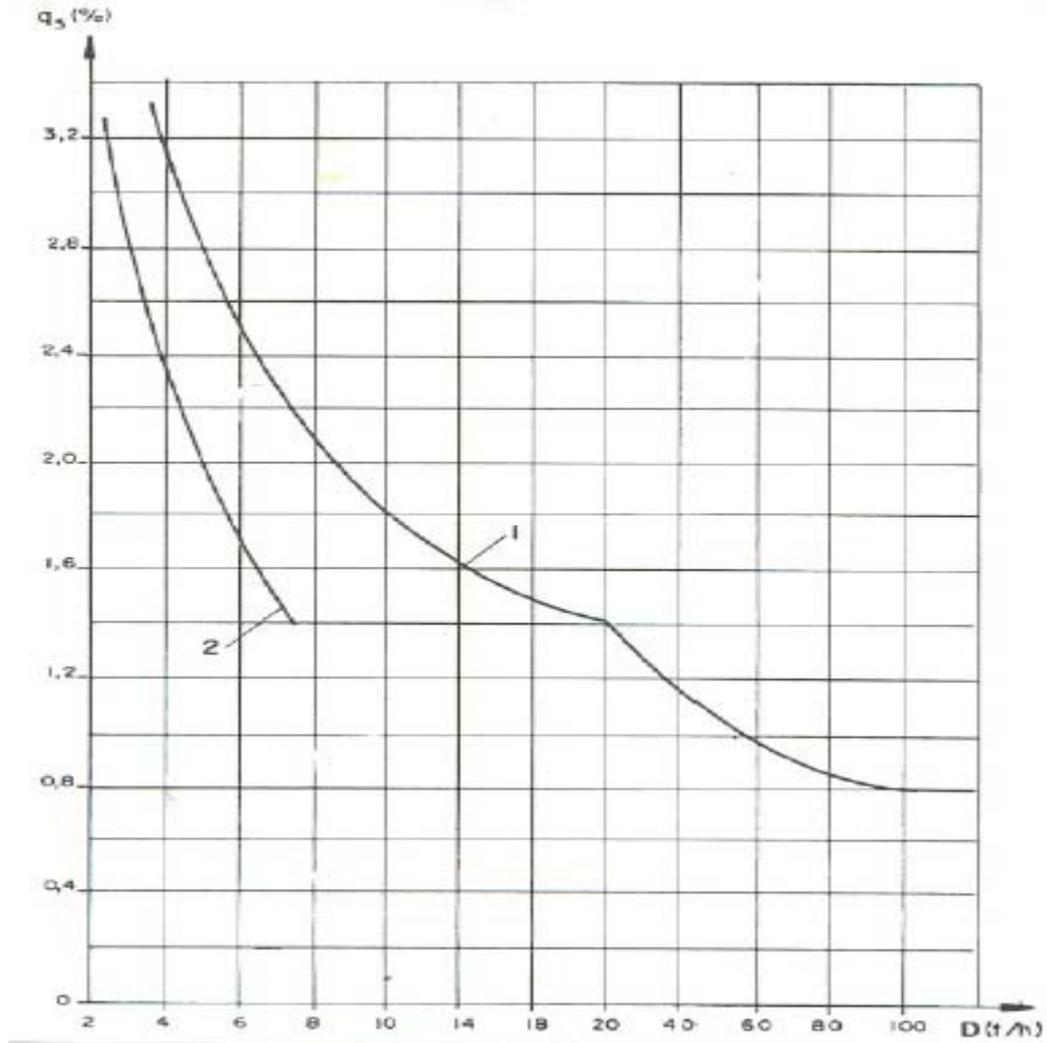


Tabla 1. Coeficientes para el cálculo del coeficiente de traspaso de calor por convección natural.

Gr * Pr	B	N
$10^{-3} - 10^3$	1,18	0,125
$10^3 - 10^8$	0,45	0,25
$> 10^8$	0,135	0,33

Tabla 2. Valores aproximados de pérdida por radiación nominal al medio ambiente.

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

Tabla 3. Factor de capacidad incompleta (A).

Régimen de trabajo de caldera.	A
capacidad máxima constante	1,0
capacidad regulada	1,2
$\frac{3}{4}$ de la capacidad	1,28
$\frac{1}{2}$ de la capacidad	1,82

Tabla 4. Mediciones de las Temperaturas de la caldera de Tecnológica 5 de Septiembre.

HORA	A	B	D	C	Arranque
7:30	37	47	37	77	Si
7:35	35	51	37	78	No
7:40	39	50	38	87	No
7:45	34	63	39	87	No
7:50	46	59	41	91	No
7:55	43	66	40	94	No
8:00	53	60	44	97	Si
8:05	48	56	44	99	Si
8:10	47	58	45	104	Si
8:15	50	58	47	113	Si
8:20	49	52	43	110	Si
8:25	49	56	44	112	No
8:30	50	58	44	111	No
8:35	49	62	46	111	No
8:40	47	62	44	112	Si
8:45	49	61	45	115	Si
8:50	51	58	46	117	Si
8:55	53	56	47	119	Si
9:00	52	58	52	122	No
9:05	49	61	49	112	No
9:10	50	66	48	119	No
9:15	52	64	49	124	Si
9:20	48	60	49	125	Si
9:25	52	60	49	126	No
9:30	45	65	50	125	No
9:35	49	66	50	124	No
9:40	48	62	50	126	Si
9:45	50	64	50	129	Si
9:50	54	60	52	130	Si
9:55	50	64	51	129	No
10:00	49	70	54	128	No
10:05	48	70	53	127	Si

10:10	49	63	52	131	Si
10:15	49	63	52	130	Si
10:20	50	67	53	133	No
10:25	50	72	53	132	No
10:30	50	74	53	131	No
10:35	49	75	53	130	No
10:40	56	74	51	131	Si
10:45	51	70	52	133	Si
10:50	50	67	53	134	No
10:55	51	68	53	132	No
11:00	54	73	56	130	No
11:05	52	77	54	127	No
11:10	49	79	54	125	Si
11:15	48	71	53	127	Si
11:20	50	72	53	128	Si
11:25	52	71	53	127	No
11:30	53	75	54	125	No
11:35	50	75	54	123	No
11:40	51	75	55	122	Si
11:45	53	77	57	124	Si
11:50	50	77	57	122	Si
11:55	54	76	57	126	Si
12:00	51	76	58	124	No
12:05	51	80	58	123	No
12:10	50	80	58	122	No

Tabla 5. Mediciones de las Temperaturas de la caldera del Instituto Superior Pedagógico de Cienfuegos.

HORA	A	B	D	C	Arranque
7:25	27	36	40	100	Si
7:30	28	44	37	110	Si
7:35	30	56	37	132	Si
7:40	32	59	38	158	Si
7:45	30	66	39	166	Si
7:50	34	66	41	164	Si
7:55	35	77	40	174	Si
8:00	34	81	44	185	Si
8:05	37	89	44	199	Si
8:10	33	94	45	200	Si
8:15	34	106	47	216	Si
8:20	34	116	43	212	Si
8:25	34	118	44	225	Si
8:30	36	120	44	230	Si
8:35	41	134	46	240	Si
8:40	41	130	44	230	Si
8:45	36	140	45	235	Si
8:50	36	135	46	222	No
8:55	36	148	47	225	No
9:00	37	148	52	217	No
9:05	38	150	49	230	Si
9:10	40	150	48	212	Si
9:15	38	148	49	210	No
9:20	40	147	49	215	No
9:25	40	150	49	225	Si
9:30	40	152	50	224	Si
9:35	40	150	50	220	No
9:40	40	148	50	220	No
9:45	38	146	50	218	No
9:50	40	142	52	212	No
9:55	38	143	51	210	No

Tabla 6. Mediciones de las Temperaturas de la caldera del Comedor Escolar.

HORA	A	B	D	C	Arranque
6:35	32	79	33	72	no
6:40	30	80	32	73	si
6:45	32	86	33	76	no
6:50	30	80	33	75	no
6:55	30	89	34	69	no
7:00	31	88	35	70	si
7:05	32	90	36	72	si
7:10	32	82	38	75	no
7:15	31	80	37	72	no
7:20	31	81	37	80	si
7:25	32	85	37	82	si
7:30	31	82	36	73	no
7:35	31	85	37	80	si
7:40	31	88	37	80	si
7:45	31	85	37	78	no
7:50	31	85	36	75	no
7:55	36	94	34	85	no
8:00	36	90	34	85	si
8:05	33	90	36	78	no
8:10	34	85	36	80	no
8:15	34	88	36	91	si
8:20	32	87	35	90	no
8:25	33	87	35	73	no
8:30	33	85	35	70	no
8:35	35	82	35	74	si
8:40	34	82	35	81	si
8:45	36	84	35	81	no
8:50	36	85	35	82	no
8:55	35	84	33	80	no
9:00	35	79	34	75	no
9:05	34	78	34	74	no
9:10	34	84	36	86	si

Tabla 7. Mediciones de las Temperaturas de la caldera de la Universidad de Cienfuegos.

HORA	A	B	D	C	Arranque
8:00	38	74	38	187	si
8:05	40	73	38	182	si
8:10	39	72	39	199	si
8:15	36	71	40	184	si
8:20	37	72	37	198	si
8:25	35	74	36	190	si
8:30	38	74	43	187	no
8:35	37	73	42	182	no
8:40	39	76	43	199	no
8:45	36	78	47	184	si
8:50	40	83	42	198	si
8:55	40	80	40	197	no
9:00	39	84	42	199	no
9:05	40	80	43	201	si
9:10	37	73	40	199	si
9:15	35	72	37	184	si
9:20	38	71	36	198	si
9:25	37	72	43	190	si
9:30	39	74	42	187	si
9:35	36	74	42	182	si
9:40	40	73	43	199	si
9:45	37	76	47	194	si
9:50	39	77	48	199	si
9:55	40	78	50	198	no
10:00	40	75	51	195	no

Tabla 8. Mediciones de las Temperaturas de la caldera de la Lavandería Unicornio.

HORA	A	B	D	C	Arranque
8:05	44	112	41	88	no
8:10	43	101	41	88	no
8:15	46	99	42	107	si
8:20	47	99	42	87	no
8:25	46	99	43	87	no
8:30	45	103	48	89	si
8:35	46	102	48	85	no
8:40	46	101	47	85	no
8:45	47	103	44	89	si
8:50	42	106	43	86	no
8:55	56	104	48	87	si
9:00	47	109	50	87	no
9:05	53	113	44	85	no
9:10	48	108	44	87	si
9:15	48	112	44	88	no
9:20	53	108	44	83	no
9:25	54	112	46	84	no
9:30	51	112	53	87	si
9:35	50	109	48	84	no
9:40	53	109	45	85	no
9:45	48	113	46	82	si
9:50	51	110	53	83	si

Leyenda para Tablas 4 – 8.

A	Superficie Lateral
B	Superficie Delantera
D	Superficie Lateral
C	Superficie Posterior

Tabla 9. Datos de Entradas y Salida para el programa Matlab.

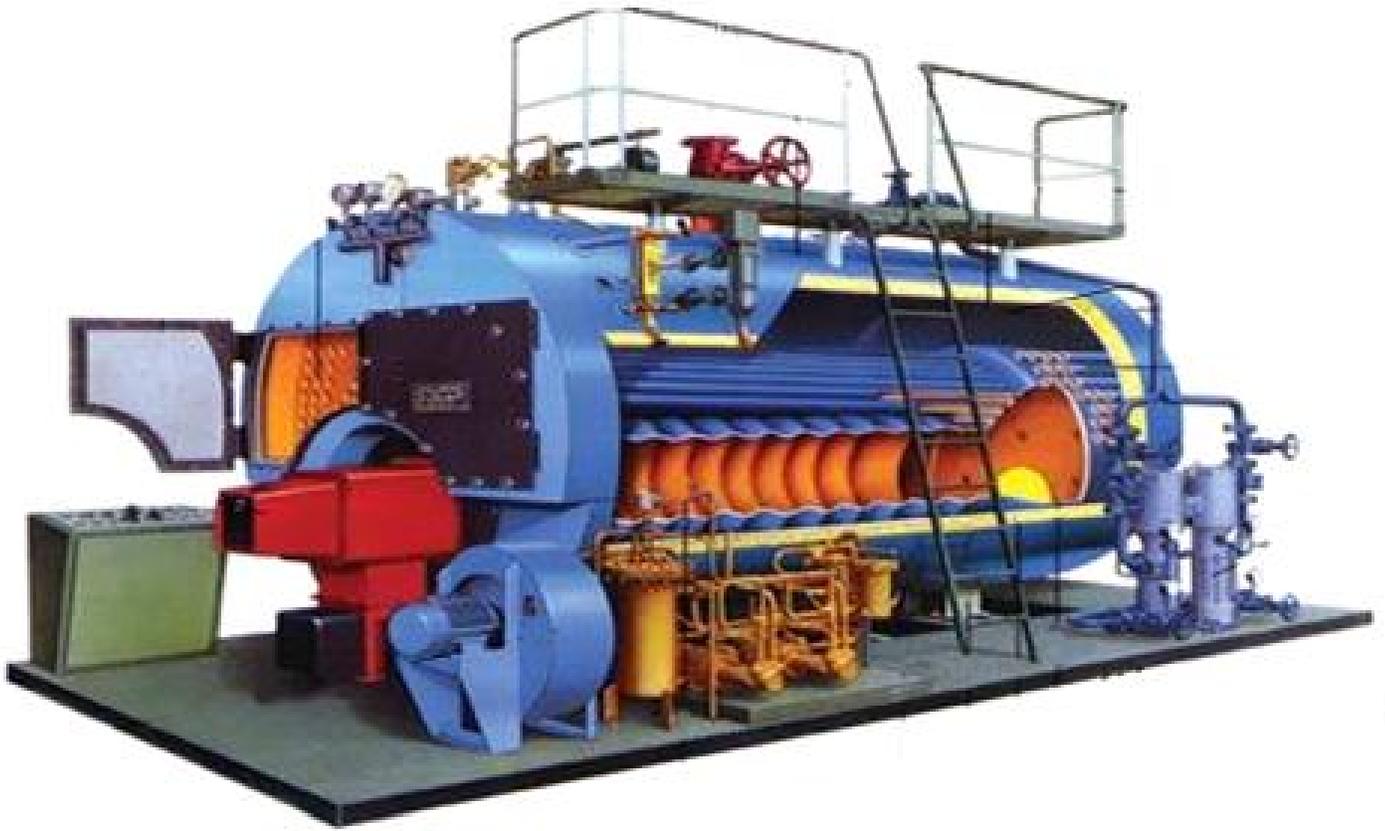
ENTRADAS					SALIDA
A Mod (TN1)	B Mod (TN2)	D Mod (TN3)	C Mod (TN4)	Capacidad Mod (CapN)	q5 Mod
0.69642857	0.47368421	0.67241379	0.82916667	0.165	0.24845447
0.57142857	0.55921053	0.63793103	0.34166667	0.15	0.24007219
0.85714286	0.46052632	0.9137931	0.52916667	0.11	0.38158877
0.91071429	0.46052632	0.89655172	0.55416667	0.11	0.3970065
0.92857143	0.42105263	0.84482759	0.51666667	0.11	0.36424382
0.875	0.41447368	0.89655172	0.54166667	0.11	0.3738799
0.82142857	0.67105263	0.82758621	0.35416667	1	0.53242102
0.53571429	0.52631579	0.56896552	0.3125	0.15	0.20829793
0.57142857	0.56578947	0.56896552	0.31666667	0.15	0.22418506
0.78571429	0.73684211	0.70689655	0.36666667	1	0.54418723
0.60714286	0.51315789	0.5862069	0.30833333	0.15	0.2118284
0.58928571	0.55921053	0.60344828	0.29166667	0.15	0.21712411
0.67857143	0.48684211	0.74137931	0.77916667	0.165	0.2414698
0.94642857	0.71710526	0.77586207	0.35416667	1	0.5647781
0.89285714	0.44078947	0.9137931	0.55416667	0.11	0.39122485
0.76785714	0.43421053	0.68965517	0.39166667	0.11	0.27559189
0.67857143	0.48684211	0.65517241	0.77916667	0.165	0.23648076
0.85714286	0.73684211	0.75862069	0.36666667	1	0.5647781
0.91071429	0.5	1	0.51666667	0.11	0.40278814
0.82142857	0.65131579	0.72413793	0.44583333	1	0.5706612
0.69642857	0.32894737	0.65517241	0.3625	0.11	0.21970262
0.57142857	0.53947368	0.65517241	0.3125	0.15	0.22418506
0.85714286	0.74342105	0.79310345	0.34166667	1	0.55595344
0.625	0.47368421	0.63793103	0.76666667	0.165	0.22750047
0.60714286	0.69736842	0.81034483	0.9	0.28	0.82561307
0.875	0.40131579	0.77586207	0.47916667	0.11	0.32762672
0.64285714	0.48684211	0.72413793	0.75833333	0.165	0.23348733
0.66071429	0.48026316	0.68965517	0.82916667	0.165	0.24845447
0.60714286	0.76315789	0.74137931	0.88333333	0.28	0.83106266
0.64285714	0.55263158	0.60344828	0.3375	0.15	0.24007219
0.875	0.34210526	0.74137931	0.45833333	0.11	0.29679126
0.55357143	0.55921053	0.63793103	0.33333333	0.15	0.23477648
0.96428571	0.5	0.98275862	0.525	0.11	0.41049701
0.64285714	0.61842105	0.5862069	0.35416667	0.15	0.26302027

0.89285714	0.42105263	0.87931034	0.5375	0.11	0.3738799
0.69642857	0.55263158	0.72413793	0.82916667	0.165	0.2634216
0.83928571	0.65131579	0.72413793	0.3625	1	0.5147717
0.875	0.51973684	0.93103448	0.52083333	0.11	0.39893371
0.66071429	0.97368421	0.89655172	0.90416667	0.28	0.96457765
0.53571429	0.36842105	0.63793103	0.55	0.28	0.42234331
0.625	0.53947368	0.60344828	0.30833333	0.15	0.22241982
0.76785714	0.66447368	0.70689655	0.36666667	1	0.5088886
0.82142857	0.65131579	0.74137931	0.3625	1	0.5147717
0.91071429	0.73684211	0.9137931	0.3625	1	0.59713517
0.64285714	0.92105263	0.77586207	0.97916667	0.28	0.97002725
0.67857143	0.98684211	0.84482759	0.95833333	0.28	1
0.73214286	0.88157895	0.79310345	1	0.28	0.98365122
0.53571429	0.43421053	0.67241379	0.69166667	0.28	0.54768391
0.60714286	0.77631579	0.75862069	0.9375	0.28	0.87465939
0.69642857	0.5	0.74137931	0.82916667	0.165	0.25643694
0.58928571	0.59210526	0.62068966	0.325	0.15	0.24183743
0.71428571	0.52631579	0.74137931	0.8375	0.165	0.2634216
0.91071429	0.49342105	0.94827586	0.50833333	0.11	0.39122485
0.875	0.41447368	0.89655172	0.54583333	0.11	0.37580712
0.94642857	0.39473684	0.75862069	0.40416667	0.11	0.29679126
0.67857143	0.96052632	0.86206897	0.90833333	0.28	0.95912806
0.55357143	0.55921053	0.63793103	0.325	0.15	0.23124601
0.875	0.49342105	0.9137931	0.54166667	0.11	0.39893371
0.55357143	0.53947368	0.62068966	0.30416667	0.15	0.21535888
0.83928571	0.71710526	0.86206897	0.3625	1	0.56771965
0.48214286	0.23684211	0.68965517	0.41666667	0.28	0.28065394
0.64285714	0.97368421	0.81034483	0.9375	0.28	0.97002725
0.69642857	0.46710526	0.81034483	0.78333333	0.165	0.24446323
0.71428571	0.96710526	0.84482759	0.89583333	0.28	0.95640327
0.85714286	0.71052632	0.75862069	0.3625	1	0.55007033
0.57142857	0.51973684	0.56896552	0.3	0.15	0.20476746
0.91071429	0.44736842	0.9137931	0.55	0.11	0.39315206
0.96428571	0.73684211	0.79310345	0.35	1	0.57654431
0.89285714	0.42105263	0.86206897	0.5375	0.11	0.37195269
0.66071429	0.48026316	0.72413793	0.75833333	0.165	0.23348733
0.625	0.49342105	0.77586207	0.8	0.165	0.24645885
0.89285714	0.71710526	0.82758621	0.35	1	0.56183654
0.80357143	0.67763158	0.82758621	0.37083333	1	0.54418723
0.91071429	0.38157895	0.79310345	0.4875	0.11	0.33148115
0.71428571	0.54605263	0.72413793	0.825	0.165	0.26242379

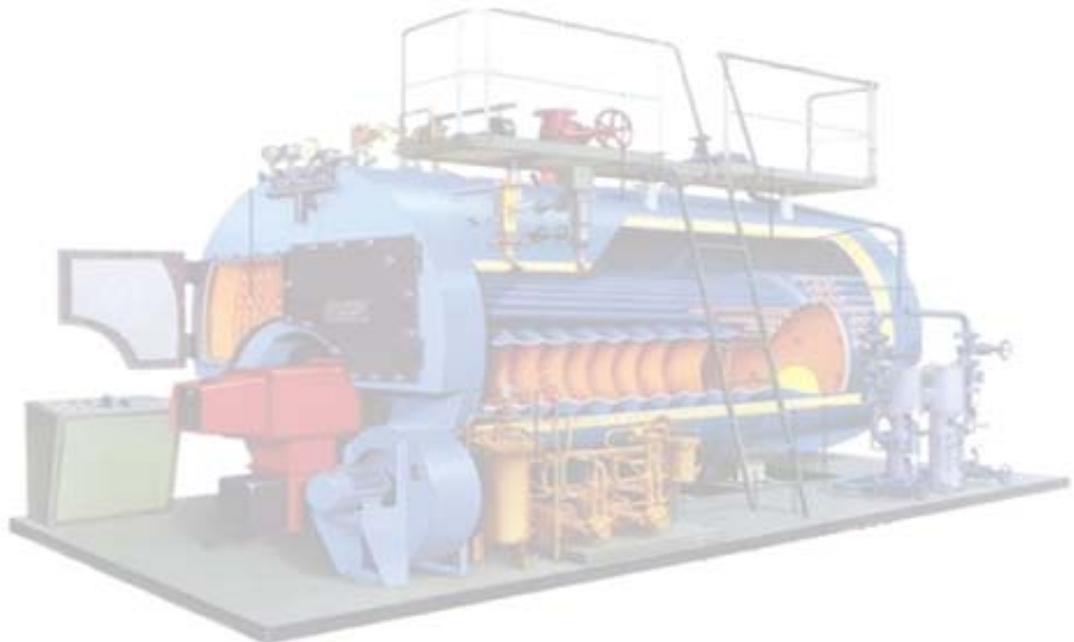
0.89285714	0.44078947	0.9137931	0.55833333	0.11	0.39315206
0.60714286	0.55263158	0.62068966	0.35833333	0.15	0.24713314
0.89285714	0.47368421	0.9137931	0.53333333	0.11	0.39122485
0.58928571	0.57236842	0.60344828	0.30416667	0.15	0.2259503
0.55357143	0.53289474	0.63793103	0.33333333	0.15	0.22771553
0.67857143	0.97368421	0.84482759	0.875	0.28	0.94005449
0.875	0.40789474	0.79310345	0.4625	0.11	0.32377229
1	0.68421053	0.82758621	0.3625	1	0.57360275
0.85714286	0.46710526	0.9137931	0.52916667	0.11	0.38351598
0.75	0.69736842	0.74137931	0.35833333	1	0.52065481
0.91071429	0.52631579	1	0.5125	0.11	0.40856979
0.60714286	0.43421053	0.70689655	0.68333333	0.28	0.55858309
0.67857143	0.48026316	0.82758621	0.79166667	0.165	0.24845447
0.55357143	0.55921053	0.62068966	0.3125	0.15	0.22418506
0.53571429	0.58552632	0.5862069	0.2875	0.15	0.21535888
0.625	0.55263158	0.56896552	0.33333333	0.15	0.23301124
0.85714286	0.36842105	0.75862069	0.4125	0.11	0.28330075
0.58928571	0.61842105	0.77586207	0.83333333	0.28	0.7411444
0.71428571	0.98684211	0.86206897	0.91666667	0.28	0.98092643
0.69642857	0.48684211	0.72413793	0.77916667	0.165	0.2414698
0.53571429	0.52631579	0.55172414	0.30416667	0.15	0.20300222
0.55357143	0.52631579	0.63793103	0.3	0.15	0.2118284
0.66071429	0.47368421	0.74137931	0.79166667	0.165	0.2414698
0.71428571	1	0.86206897	0.93333333	0.28	0.9972752
0.5	0.28947368	0.63793103	0.45833333	0.28	0.32425067
0.64285714	0.59210526	0.5862069	0.35416667	0.15	0.25595932
0.71428571	0.98684211	0.82758621	0.88333333	0.28	0.95367847
0.66071429	0.5	0.81034483	0.80833333	0.165	0.25344351
0.82142857	0.38815789	0.70689655	0.37916667	0.11	0.26402859
0.92857143	0.46710526	0.9137931	0.52916667	0.11	0.39122485
0.60714286	0.55921053	0.62068966	0.33333333	0.15	0.23830695
0.89285714	0.50657895	0.98275862	0.50833333	0.11	0.3970065
0.96428571	0.39473684	0.89655172	0.54166667	0.11	0.37773434
0.89285714	0.43421053	0.82758621	0.49583333	0.11	0.35268053
0.80357143	0.42763158	0.86206897	0.52083333	0.11	0.35653496
0.94642857	0.50657895	0.98275862	0.51666667	0.11	0.40664258
0.60714286	0.57894737	0.62068966	0.37916667	0.15	0.26302027
0.89285714	0.48684211	0.9137931	0.54583333	0.11	0.40086093
0.625	0.50657895	0.68965517	0.725	0.28	0.6158038
0.875	0.46052632	0.93103448	0.53333333	0.11	0.38737042
0.94642857	0.49342105	0.93103448	0.52083333	0.11	0.39893371

0.85714286	0.40789474	0.86206897	0.525	0.11	0.35846218
0.57142857	0.57236842	0.60344828	0.375	0.15	0.25419408
0.57142857	0.38815789	0.65517241	0.65833333	0.28	0.50953677
0.67857143	0.94078947	0.87931034	0.875	0.28	0.9318801
0.89285714	0.49342105	0.93103448	0.5125	0.11	0.38929763
0.71428571	0.93421053	0.89655172	0.88333333	0.28	0.94277929
0.875	0.43421053	0.86206897	0.51666667	0.11	0.36424382
0.96428571	0.48026316	0.96551724	0.54166667	0.11	0.41049701
0.64285714	0.46710526	0.68965517	0.76666667	0.165	0.2304939
0.55357143	0.57894737	0.60344828	0.29166667	0.15	0.21888935
0.94642857	0.71052632	0.75862069	0.34583333	1	0.55301188
0.92857143	0.38157895	0.89655172	0.50833333	0.11	0.35460774
0.55357143	0.57894737	0.63793103	0.33333333	0.15	0.24007219
0.92857143	0.50657895	0.93103448	0.52916667	0.11	0.40471536
0.64285714	0.51315789	0.81034483	0.76666667	0.165	0.24446323
0.83928571	0.40789474	0.75862069	0.46666667	0.11	0.31799064
0.73214286	0.85526316	0.75862069	0.95833333	0.28	0.94005449
0.66071429	0.30921053	0.63793103	0.32083333	0.11	0.18886717
0.66071429	0.47368421	0.63793103	0.825	0.165	0.24346542
0.89285714	0.47368421	0.9137931	0.55	0.11	0.39893371
0.64285714	0.55921053	0.60344828	0.34166667	0.15	0.24360266
0.71428571	0.98684211	0.84482759	0.9375	0.28	0.99182561
0.64285714	0.78947368	0.75862069	0.95833333	0.28	0.89918255
0.85714286	0.39473684	0.84482759	0.52083333	0.11	0.35075331
0.71428571	0.48026316	0.74137931	0.82916667	0.165	0.25444132
0.625	0.48684211	0.62068966	0.79166667	0.165	0.23448514
0.67857143	0.46710526	0.62068966	0.825	0.165	0.24246761
0.60714286	0.53289474	0.75862069	0.77083333	0.28	0.66485012
0.94642857	0.74342105	0.75862069	0.35416667	1	0.57360275
0.82142857	0.66447368	0.81034483	0.35416667	1	0.52653791
0.625	0.33552632	0.63793103	0.325	0.11	0.19464881
0.71428571	0.52631579	0.68965517	0.82083333	0.165	0.25643694
0.60714286	0.53947368	0.60344828	0.3375	0.15	0.23301124
0.60714286	0.41447368	0.67241379	0.3625	0.11	0.23704757
0.94642857	0.36842105	0.81034483	0.49583333	0.11	0.3372628
0.71428571	0.97368421	0.86206897	0.91666667	0.28	0.97547684
0.64285714	0.88815789	0.79310345	0.925	0.28	0.92370572
0.92857143	0.39473684	0.84482759	0.525	0.11	0.36038939
0.57142857	0.59210526	0.62068966	0.3	0.15	0.22948077
0.83928571	0.67763158	0.75862069	0.37083333	1	0.53830412
1	0.48684211	0.87931034	0.54583333	0.11	0.40856979

0.89285714	0.38157895	0.75862069	0.4625	0.11	0.31413621
0.83928571	0.38157895	0.77586207	0.43333333	0.11	0.29679126
0.66071429	0.58552632	0.75862069	0.82916667	0.28	0.73297001
0.875	0.40131579	0.84482759	0.46666667	0.11	0.32955393
0.89285714	0.52631579	1	0.50833333	0.11	0.40471536
0.71428571	0.48026316	0.65517241	0.75833333	0.165	0.23248952
0.89285714	0.38157895	0.81034483	0.47083333	0.11	0.32377229
0.875	0.36842105	0.75862069	0.46666667	0.11	0.31028177
0.625	0.51973684	0.5862069	0.3125	0.15	0.21712411
0.91071429	0.72368421	0.9137931	0.34583333	1	0.57948586



Anexo III



ANEXO III

Tabla 1. Tiempo de Trabajo del Quemador 5 de septiembre.

Hora de Trabajo del Quemador	Hora de Parada del Quemador	Tiempo de Trabajo del Quemador (s)
07:25:30	07:28:40	190
08:20:22	08:24:05	223
08:39:50	08:59:20	690
09:10:54	09:24:35	821
09:36:40	09:51:20	880
10:03:32	10:19:20	948
10:37:08	10:50:32	804
11:09:50	11:23:33	883
11:38:30	11:57:23	1133
TOTAL		6572

Tabla 2. Tiempo de Trabajo del Quemador de Comedor Escolar.

Hora de Trabajo del Quemador	Hora de Parada del Quemador	Tiempo de Trabajo del Quemador (s)
06:25:10	06:32:26	436
06:37:27	06:49:11	704
07:10:35	07:09:20	75
07:21:33	07:29:50	479
07:37:35	07:45:03	448
07:53:44	08:01:20	456
08:16:31	08:22:31	360
08:38:10	08:43:08	298
08:51:40	08:56:01	261
09:08:47	09:16:05	438
TOTAL		3910

**Tabla 3. Tiempo de Trabajo del Quemador de Instituto Superior Pedagógico
Conrado Benítez Garcí.**

Hora de Trabajo del Quemador	Hora de Parada del Quemador	Tiempo de Trabajo del Quemador (s)
07:28:30	08:49:05	4835
09:00:23	09:14:22	839
09:24:50	09:38:50	840
09:57:10	10:00:03	173
TOTAL		6687

Tabla 4. Tiempo de Trabajo del Quemador de la caldera de la Universidad de Cienfuegos.

Hora de Trabajo del Quemador	Hora de Parada del Quemador	Tiempo de Trabajo del Quemador (s)
08:00	08:30	1800
08:30	08:40	600
08:45	08:50	300
08:55	09:00	300
09:05	10:00	4500
TOTAL		5700

Tabla 5. Tiempo de Trabajo del Quemador de la caldera de la Lavandería Unicornio.

Hora de Trabajo del Quemador	Hora de Parada del Quemador	Tiempo de Trabajo del Quemador (s)
08:10	08:20	600
08:30	08:35	300
08:45	08:48	180
08:58	09:00	120
09:10	09:15	300
09:45	09:50	300
TOTAL		1800