

REPÚBLICA DE CUBA.  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR.  
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS.  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



**CEEMA**

Centro de Estudios de Energía  
y Medio Ambiente



UNIVERSIDAD  
**CIENFUEGOS**  
Carlos Rafael Rodríguez

## Trabajo de Diploma.

*Establecer expresiones de pérdidas por calor sensible y rendimiento térmico en calderas pirotubulares aplicando métodos experimentales y técnicas de IA.*

*Autor: Yugeshuar Andy Bakwant.*

*Tutores: Dra. Margarita Lapidó Rodríguez.*

*Dr. C. Julio R. Gómez Sarduy.*

*Ing. David Vidal Moya.*

*Cienfuegos. Cuba 2009*

*50 Aniversario de la Revolución*

**DECLARACIÓN 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.

*Pensamiento*



# Pensamiento

*“Lo que importa es uncir la inteligencia, con bravura continua y silenciosa, a los deberes rudos: lo que importa no es hacer de la inteligencia trompetas con qué vocear, ni solio donde desdeñar, ni áspid con qué envenenar; sino poder que saque a salvo el decoro del hombre con la tarea fuerte y creadora de la vida”.*

José Martí



*Dedicatoria*

# Dedicatoria

*Se dedica este trabajo a todas las personas que me han brindado su amor, respeto, cariño y que han dado un pedacito de sí para contribuir a este trabajo especialmente:*

- *A mi madre Devika Balwant que me ha enseñado a conducirme en ella con todo el amor del mundo y a mi padre Chetram Micheal Balwant que ha sabido guiarme y se han sacrificado tanto para asegurar mi bien estar y mi futuro.*
- *A mis hermanos, abuelas, tías, tíos y primos por su entrega a mi causa.*
- *A mis profesores y compañeros del aula gracias por su apoyo especialmente Maidolis Cairo.*

*Agradecimientos*



# Agradecimientos

*Primero quiero darle las gracias a Dios por darme el esfuerzo para enfrentar cada día en la realización de mis sueños.*

*Agradezco a mi familia que ha sido la fuente de amor y dedicación en mi vida, a mis tutores la Dra. Margarita Lapidó Rodríguez, Dr. Julio Rafeal Gómez Sarduy por sus dedicaciones y sus apoyos, que sin ellos no era posible la realización de este trabajo.*

*A todos los trabajadores de la Empresa de la Caldera el Alastor de Cienfuegos especialmente el ingeniero David Vidal Moya, los operadores de la caldera gracias por su cooperación durante mis visitas a los centros.*

*A mis compañeros del aula gracias por su amistad durante toda la carrera, a todos los profesores y trabajadores de la Facultad de Ingeniería Mecánica por brindar sus servicios para mi formación de ingeniero.*

# *Resumen*



## **RESUMEN.**

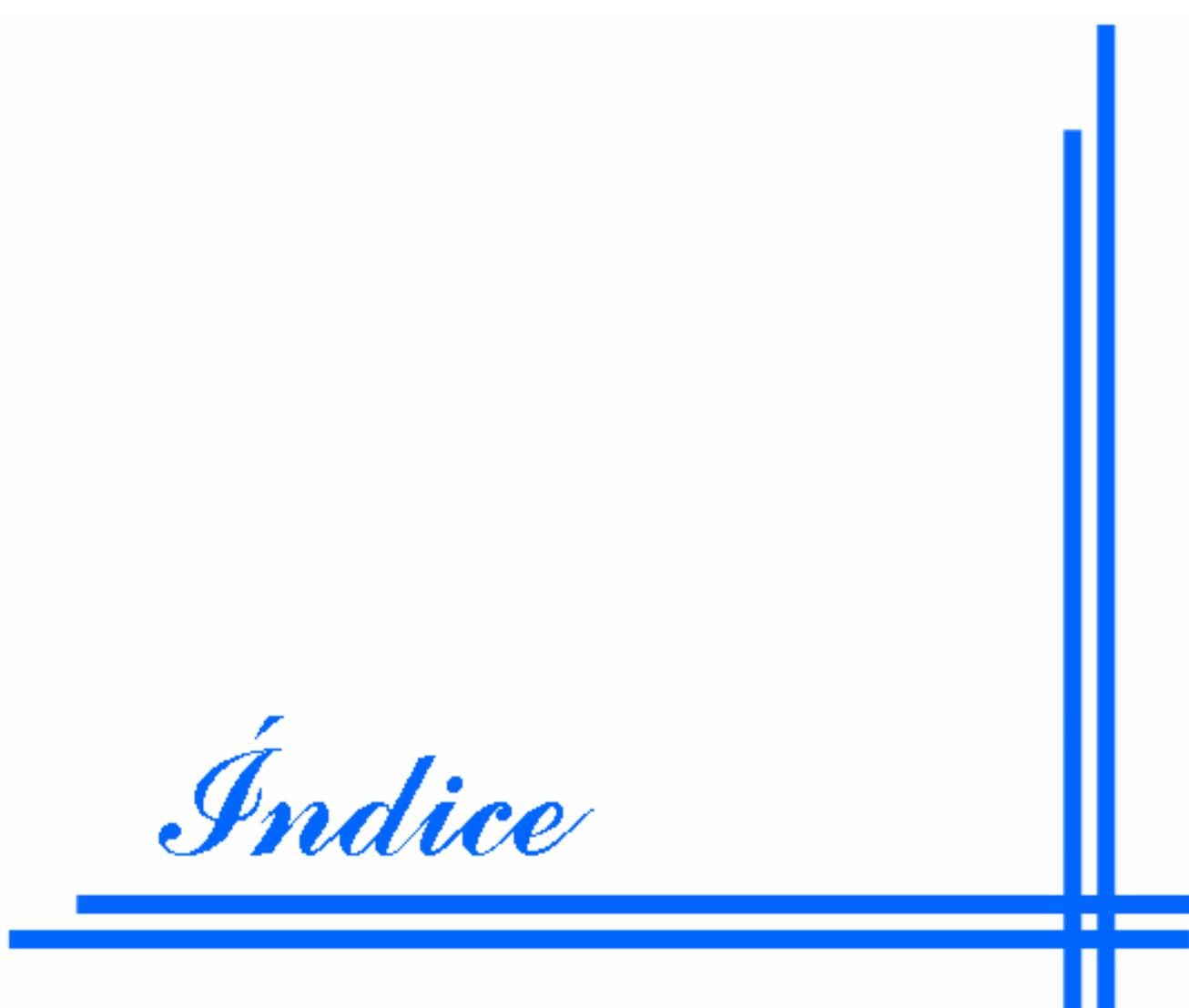
El presente trabajo está relacionado con un análisis del régimen operacional de las calderas pirotubulares de la empresa ALASTOR en la provincia de Cienfuegos. El objetivo es determinar expresiones de pérdidas por calor sensible y rendimiento térmico en calderas pirotubulares aplicando métodos experimentales y técnicas de Inteligencia Artificial (IA).

En este trabajo se muestran los problemas que se presentan en las instalaciones del Tecnológico 5 de Septiembre, la Escuela Formadora de Maestros y el Comedor Escolar, desde el punto vista energético, económico y medio ambiental, en las cuales existe un generador de vapor pirotubular sobredimensionado o explotado en condiciones de carga inferiores a la nominal. Se efectuó un estudio experimental de estos centros obteniendo con ecuaciones convencionales los valores de pérdidas por calor sensible y rendimiento térmico en estas instalaciones.

Basado en los resultados experimentales realizados en estas calderas y los resultados históricos obtenidos de trabajos precedentes se construye un modelo híbrido que combina redes neuronales artificiales para aproximar el comportamiento de la pérdida por calor sensible y la eficiencia en condiciones reales de campo con modelos estadísticos de sus parámetros de funcionamiento. Con estos modelos se soluciona la búsqueda de la pérdida por calor sensible y la eficiencia térmica en las calderas pirotubulares.

La tesis se presenta en forma de Introducción, cuatro Capítulos, Conclusiones y Recomendaciones, el primer capítulo expone la revisión bibliografía, el segundo caracterización de los centros y simulación experimental, en el tercero los resultados de los cálculos y obtención de los modelos aplicando la RNA y el último una valoración Técnico-Económico de la pérdida en dinero por la pérdida de calor sensible en las calderas.

# *Índice*



<b>ÍNDICE</b>	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	3
1.1.- Desarrollo de las calderas.....	3
1.2.- Tipos de caldera.....	3
1.2.1- Calderas pirotubulares.....	3
1.2.2.- Calderas acuotubulares.....	4
1.3.- Reseña histórica de las calderas pirotubulares.....	5
1.4.- Característica de una caldera pirotubular.....	6
1.5.- Parámetros e indicadores de funcionamiento de las calderas.....	8
1.5.1.- Indicador de eficiencia energética.....	8
1.5.2.- Indicadores termodinámicos.....	8
1.5.3.- Indicadores físico-termodinámicos.....	9
1.5.4.- Indicadores económico-termodinámicos.....	10
1.6.- Influencia del sobredimensionamiento en la eficiencia energética.....	10
1.6.1.- Factor de carga.....	10
1.7.- Otras consecuencias negativas.....	12
1.8.- Generalidades del proceso de combustión.....	12
1.9.- Coeficiente de exceso de aire.....	13
1.10.- Combustibles de composición elemental conocida.....	13
1.11.- Calor específico de combustión.....	15
1.12.- Generalidades de la pérdida por calor sensible.....	15
1.12.1.- Pérdidas por calor sensible ( $q_2$ ) con los gases de escape de las calderas pirotubulares.....	15
1.13.- Factores que influyen en esta pérdida.....	17
1.13.1.- Coeficiente de exceso de aire a la salida del generador.....	17
1.13.2.- Temperatura de los gases a la salida del generador.....	17
1.14.- Formas de disminuir la pérdida de calor sensible.....	19
1.15.- Conclusiones Parciales del Capítulo I.....	20

**CAPÍTULO II: CARACTERIZACIÓN DE LOS CENTROS Y SIMULACIÓN**

<b>EXPERIMENTAL.....</b>	<b>21</b>
2.1.- Sistema de generación de vapor de los distintos centros.....	21
2.2.- Características de Instalación en el Tecnológico 5 de Septiembre.....	21
2.3.- Características de Instalación en la Escuela Formadora de Maestros de Cienfuegos "Conrado Benítez García".....	22
2.4.- Características de Instalación en el Comedor Escolar.....	22
2.5.- Característica del proceso de generación.....	22
2.6.- Diseño y Simulación Experimental.....	23
2.7.- Planificación y metodología de la investigación.....	24
2.8.- Metodología del cálculo.....	25
2.9.- Eficiencia Térmica de los generadores de vapor.....	25
2.10.- Método para determinar la eficiencia térmica de un generador de vapor (Normas Europeas).....	26
2.10.1.- Metodología del Método Directo.....	26
2.10.1.1.- Cálculo del calor útil y disponible.....	27
2.10.2.- Metodología del Método Indirecto.....	29
2.10.2.1.- Determinación de los volúmenes de los gases de escape a la salida de la caldera.....	29
2.10.2.2.- Determinación del coeficiente de exceso de aire.....	31
2.10.2.3.-Determinación de la entalpía de los productos de la combustión.....	32
2.10.2.4.-Determinación de las pérdidas de calor de un generador de vapor durante su cálculo térmico.....	33
2.11.- Rendimiento Exergético.....	35
2.11.1.- Determinación de las Exergías de las sustancias en flujo (E).....	35
2.12.- Método de cálculo del factor de carga y exceso de temperatura.....	37
2.13.- Fundamentos de las RNA.....	38
2.14.- Conclusiones Parciales del Capítulo.....	40

**CAPÍTULO III: RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS Y OBTENCIÓN DE LOS**

<b>MODELOS APLICANDO RNA.....</b>	<b>41</b>
3.1.- Resultados del Balance térmico de las calderas en los distintos centros aplicando los Métodos Directo e Indirecto.....	42
3.2.- Análisis de las pérdidas y las variables adimensionales.....	44
3.3.- Resultados del Rendimiento Exergético en los distintos Centros ya analizados.....	45
3.4.- Resultados de los cálculos del factor carga y exceso de temperatura.....	45
3.5.- Diseño y entrenamiento de las RNA.....	46
3.6.- Selección de la arquitectura de la RNA.....	53
3.7.- Código del programa en MATLAB 2008.....	55
3.8.- Aplicación desarrollada.....	56
3.9.- Conclusiones Parciales del Capítulo III.....	59

**CAPÍTULO IV: VALORACIÓN TÉCNICO – ECONÓMICO DE LA PÉRDIDA EN**

<b>DINERO POR LA PÉRDIDA DE CALOR SENSIBLE EN LAS CALDERAS.....</b>	<b>60</b>
4.1- Generalidades del costo.....	60
4.2.- Cálculo del dinero perdido con la influencia de la pérdida por calor sensible.....	60
4.3.- Conclusiones Parciales del Capítulo IV.....	62

<b>CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>64</b>
------------------------------------	-----------

<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>66</b>
-----------------------------	-----------

**REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA**

**BIBLIOGRAFÍA**

**ANEXOS**



# *Introducción*

## **INTRODUCCIÓN.**

La gran mayoría de los procesos industriales y empresas dedicadas a la prestación de servicios, emplean como fuente de energía el calor proveniente del vapor, el agua caliente o el fluido térmico, producidos o procesados en calderas piro-tubulares de vapor, agua caliente o fluido térmico, con el propósito fundamental del calentamiento.

En los lugares donde se encuentran instaladas esas calderas constituyen uno de los mayores equipos consumidores de portadores energéticos, determinando su estado o funcionamiento, por tanto, en la mayoría de los casos, la eficiencia energética y económica del proceso e incluso de la entidad, lo que obliga a diseñar estrategias compatibles con las posibilidades económicas del país, debido a que la crisis energética actual ha disparado aceleradamente los precios hasta niveles nunca antes vistos, además el mal funcionamiento de las calderas, es el responsable de la emisión al medio ambiente de una gran cantidad de contaminación producida durante la combustión del combustible como fuente primaria de energía.

Los generadores de vapor piro-tubulares instalados en las industrias con el fin de brindar vapor a los procesos térmicos trabajan, en la inmensa mayoría de los casos, bajo regímenes de carga fluctuantes o variables, lo cual hace que el trabajo del quemador sea intermitente, con constantes arranques y paradas. Lo anteriormente planteado resulta perjudicial para la eficiencia energética del generador, así como para su estructura mecánica, para la eficiencia general de la instalación y para el medio ambiente, siendo posible atenuar dichos efectos negativos haciendo una buena selección del equipo si tenemos en cuenta o hacemos un balance de la relación carga-capacidad, entre la necesidad de vapor de los equipos consumidores o carga instalada y la capacidad de producción de vapor de la caldera.

## **TÍTULO.**

Establecer expresiones de pérdidas por calor sensible y rendimiento térmico en calderas pirotubulares aplicando métodos experimentales y técnicas de IA

## **PROBLEMA CIENTÍFICO.**

Un grupo significativo de calderas de la provincia de Cienfuegos se encuentra sobredimensionadas y se requiere una evaluación sistemática de las pérdidas de mayor cuantía y el rendimiento de estas instalaciones, lo cual se ve limitado por la dificultad de las mediciones y falta de instrumentación en estas calderas.

## **HIPÓTESIS.**

La determinación de un grupo de expresiones obtenidas experimentalmente y utilizando datos históricos en un grupo de calderas aplicando técnicas de IA contribuirá a la evaluación sistemática de estas instalaciones de calderas.

## **OBJETIVO GENERAL.**

Determinar expresiones de pérdidas por calor sensible y rendimiento térmico en calderas pirotubulares aplicando métodos experimentales y técnicas de IA.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

1. Evaluar con datos experimentales las pérdidas energéticas que se producen por los gases de escape al medio durante los períodos de parada y trabajo en el quemador y el rendimiento térmico de las calderas seleccionadas.
2. Obtener influencia de diferentes parámetros de entrada en las pérdidas por calor sensible y por el rendimiento de las calderas pirotubulares en el rango establecido utilizando técnica de IA.
3. Calcular el costo económico producto del sobredimensionamiento de las calderas de los sectores.

# Capítulo I



## **CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.**

### **1.1.-Desarrollo de las calderas.**

Cuando **James Watt** observó que se podría utilizar el vapor como una fuerza económica que remplazaría 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.<sup>1</sup>

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. Según la ITC-MIE-AP01, esta caldera es todo aparato a presión en donde el calor procedente de cualquier fuente de energía se transforma en energía utilizable, a través de un medio de transporte en fase líquida o vapor.

### **1.2.-Tipos de calderas.**

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.<sup>2</sup>

#### **1.2.1.-Calderas pirotubulares.**

Se denominan pirotubulares por ser los gases calientes procedentes de la combustión de un combustible, los que circulan por el interior de los tubos cuyo exterior está bañado por el agua de la caldera. El combustible se quema en un hogar, en donde tiene lugar la transmisión de calor por radiación, y a los gases resultantes, se les hace

---

<sup>1</sup> <http://www.babcock-wanson.es>.

<sup>2</sup> <http://www.conae.gob.mx>.

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 calderas de uno o de varios pasos. En el caso de las 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.

Las calderas pirotubulares se clasifican:

- Para combustibles líquidos en (Calderas de hogar integral y Calderas compactas con tubo hogar).
- Para combustibles gaseosos.

#### **1.2.2.- Calderas acuotubulares.**

En estas calderas, al contrario de lo que ocurre en las pirotubulares, es el agua la que circula por el interior de tubos que conforman un circuito cerrado a través del calderín o de los calderínes que constituyen la superficie de intercambio de calor en las calderas. Adicionalmente, pueden estar dotadas de otros elementos de intercambio de calor como pueden ser el sobrecalentador, recalentador, economizador, etc. Estas calderas, constan de un hogar configurado por tubos de agua, tubos y refractarios, o solamente refractarios, en el cual se produce la combustión del combustible, constituyendo la zona de radiación de la caldera, desde dicho hogar, los gases calientes resultantes de la combustión son conducidos a través del circuito de la caldera, configurado este por paneles de tubos y constituyendo la zona de convección de la caldera. Finalmente, los gases son enviados a la atmósfera a través de la chimenea. Con el objetivo de obtener un mayor rendimiento en la caldera, se las suele dotar de elementos, como los ya citados, economizadores y precalentadores, que hacen que la temperatura de los gases a su salida de la caldera, sea menor, aprovechando así mejor el calor sensible de dichos gases.

Las calderas acuotubulares se clasifican en:

- Compactas (Hogar integral pequeño y Hogar integral grande).
- No Compactas (Tubo recto y Tubo curvo).
- Alta presión y temperatura.
- Lecho fluidizado (Burbujeante, Circulante, Presurizado).

### **1.3.-Reseña histórica de las calderas piro-tubulares.**

Las calderas piro-tubulares de vapor aparecen en la industria hace ya más de un siglo, y su evolución ha ido 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.

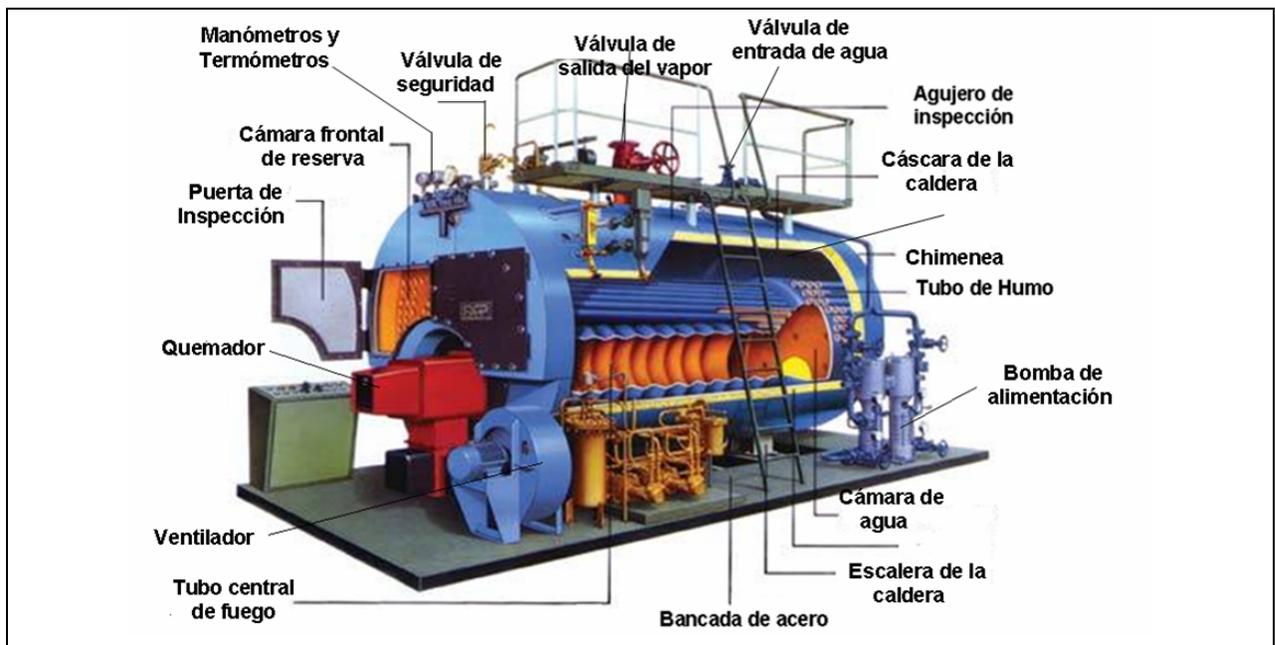
Los requerimientos industriales de mayores parámetros de presión y temperatura condicionados por el desarrollo técnico trajeron como consecuencia la necesidad de incrementar el área de transferencia y utilizar materiales de construcción más resistentes. El aumento de las superficies de transferencia 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 aumenta la eficiencia del equipo.

Los generadores de vapor piro-tubulares se diferencian también por el número de pases de los gases en el sentido longitudinal, en este caso pueden ser de dos (el hogar y un pase por los tubos de humo) de tres (el hogar y dos pases por los tubos de humo) y de cuatro (el hogar y tres pases por los tubos 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 piro-tubulares se adaptan al consumo de cualquier tipo de combustible, desde el sólido, líquido o gaseoso funcionando con bajas pérdidas por la combustión 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 (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 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.

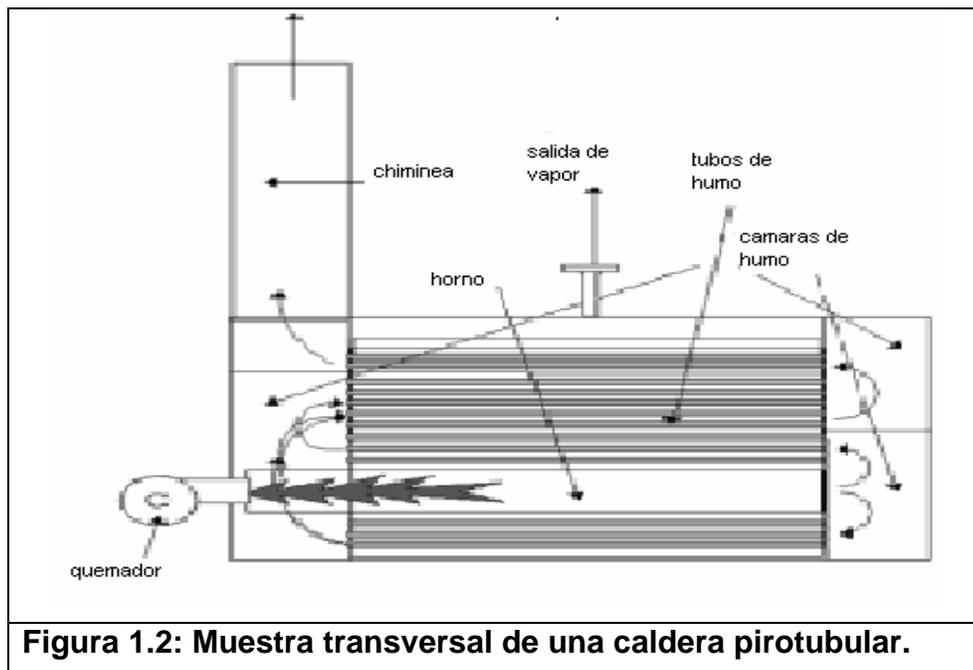


**Figura 1.1: Muestra las partes y componentes principales de una caldera pirotubular.**

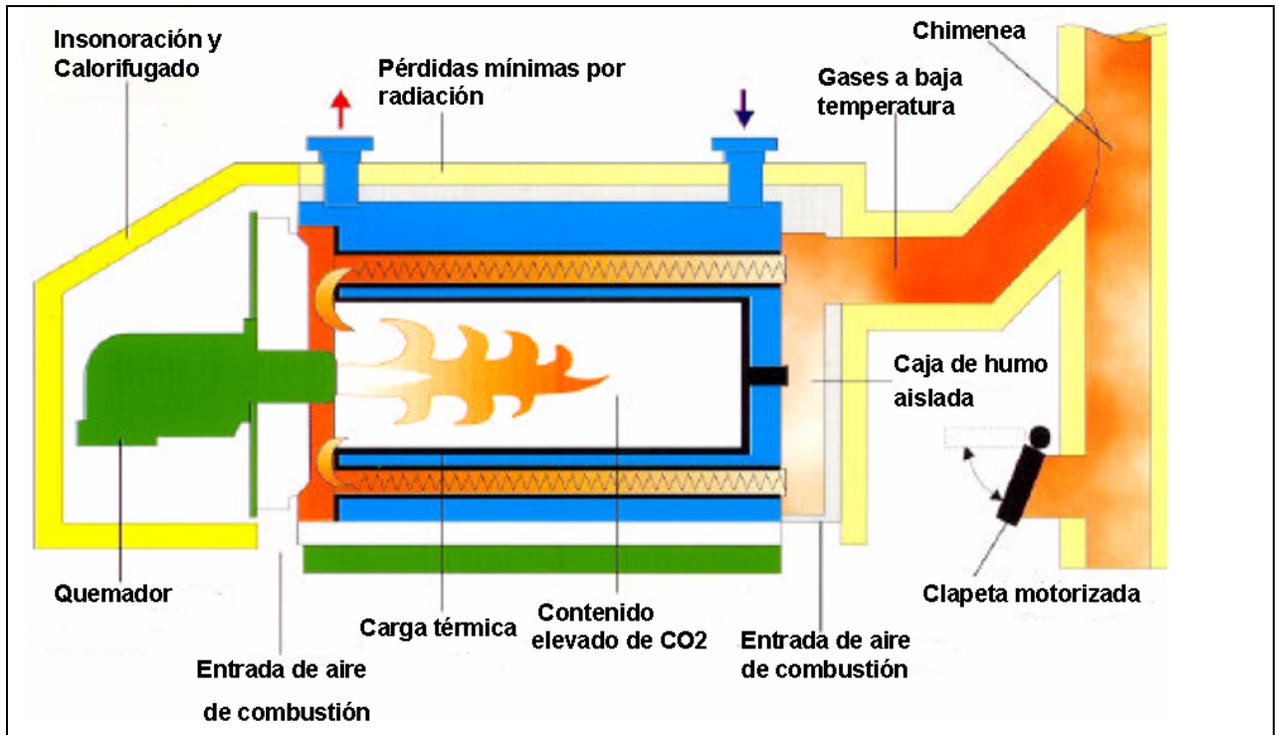
#### **1.4.-Característica de una caldera pirotubular.**

La caldera pirotubular de vapor, concebida especialmente para aprovechamiento de gases de recuperación presenta las siguientes características. El cuerpo de caldera,

está formado por un cuerpo cilíndrico de disposición horizontal, incorpora interiormente un paquete multitubular de transmisión de calor y una cámara superior de formación y acumulación de vapor. La circulación de gases se realiza desde una cámara frontal dotada de brida de adaptación, hasta la zona posterior donde termina su recorrido en otra cámara de salida de humos. El acceso al cuerpo de los gases, se realiza mediante puertas atornilladas y abisagradas en la cámara frontal y posterior de entrada y salida de gases, equipadas con bridas de conexión. En cuanto al acceso, al lado del agua se efectúa a través de la boca de hombre, situada en la bisectriz superior del cuerpo y con tubuladuras de gran diámetro en la bisectriz inferior y placa posterior para facilitar la limpieza de posible acumulación de lodos. El conjunto completo, calorifugado y con sus accesorios, se asienta sobre un soporte deslizante y bancada de sólida y firme construcción suministrándose como unidad compacta y dispuesta a entrar en funcionamiento tras realizar las conexiones a instalación. La caldera, una vez realizadas las pruebas y comprobaciones reglamentarias y legales por una Entidad Colaboradora de la Administración, se entrega adjuntando un "Expediente de Control de Calidad" que contiene todos los certificados y resultados obtenidos.<sup>3</sup>



<sup>3</sup> Alonso González, Adrián, "Caracterización del Sobredimensionamiento de las Calderas en el Sector de la Salud en Cienfuegos" (pp. 26-28)



**Figura 1.3: Muestra el funcionamiento de una caldera pirotubular de tres pasos de humo.**

## 1.5.-Parámetros e indicadores de funcionamiento de las calderas.

### 1.5.1.-Indicador de eficiencia energética.

Este parámetro está íntimamente relacionado con la competitividad, seguridad y el cuidado del medio ambiente, y toma mayor relevancia en los momentos actuales en los que se habla de crisis energética y peligros para la supervivencia de la humanidad producto de la contaminación ambiental.

Eficiencia energética =  $\text{Energía útil de salida} / \text{Energía de entrada al proceso}$ .

Para monitorear los cambios de la eficiencia energética se emplean diversos indicadores.

### 1.5.2.-Indicadores termodinámicos.

Emplean los elementos de la Termodinámica y pueden llegar a ser tan sofisticadas que relacionan la energía actual con la energía empleada en un proceso ideal. Se calculan

en términos de funciones de estado y están en un contexto particular del medio, no vinculadas a parámetros del consumidor o con el producto de salida.<sup>4</sup>

- **Rendimiento térmico.**

Valora el aprovechamiento de la energía de entrada o calor disponible en función del calor útil entregado del vapor a agua caliente, es utilizado como parámetro de comparación en calderas y no tiene en cuenta la calidad de la energía, ni la influencia de factores económicos.

- **Rendimiento exergetico.**

En función de la Segunda Ley de la Termodinámica, tiene en cuenta la variación en la calidad de la energía, tanto en la corriente de salida como en la de entrada.

- **Rendimiento instantáneo.**

Representa el aprovechamiento de la energía de entrada para un intervalo de tiempo dado para el cual se hizo la prueba de balance. Da un criterio rápido para un determinado momento, pero no refleja las variaciones de los parámetros de la caldera en el tiempo.

- **Rendimiento estacional.**

Representa la relación entre la cantidad anual de calor útil y la cantidad de calor generado, permite evaluar la caldera en un período de tiempo.

### **1.5.3.-Indicadores físico-termodinámicos**

Las mediciones de entrada son unidades termodinámicas, pero la energía de salida es medida en unidades físicas que están relacionadas con el proceso o parámetros de salida. Son los que mejor reflejan las variaciones técnicas y económicas.

---

<sup>4</sup> Lapido Rodríguez, MSc Margarita, "Incremento de la eficiencia térmica operacional en calderas pirotubulares. (pp. 16-25)

#### **1.5.4.-Indicadores económico-termodinámicos**

Es un híbrido donde la energía de entrada es medida en unidades termodinámicas o indicadores físico-termodinámicos y la energía de salida en valores monetarios.

Algunos de los indicadores que representan la eficiencia de la caldera en términos económicos son:

- Costo de producción del vapor.

$$\text{CPV} = \text{Costo de producción (\$)} / \text{Producción de vapor (ton)}$$

Permite evaluar la influencia que tiene la eficiencia de la caldera en la producción del vapor, tomando en cuenta los costos asociados a su obtención. Es sensible a las variaciones en el factor de carga.

- Costo de producción de energía.

$$\text{CPE} = \text{Costo de producción (\$)} / \text{energía del vapor (kW-h)}$$

Considera parámetros termodinámicos y no unidades físicas, además no evalúa los cambios de calidad.

- Costo de la exergía.

$$\text{CPEx} = \text{Costo de producción (\$)} / \text{exergía del vapor (kW-h)}$$

Tiene la posibilidad de evaluar las variaciones en la calidad de la energía.

#### **1.6.-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.

##### **1.6.1.-Factor de carga.**

Como el régimen de trabajo es variable en la gran mayoría de los procesos, entonces se define un coeficiente o factor de carga, el cual nos permite conocer en que medida el generador de vapor está siendo explotado con respecto a su capacidad, o lo que es igual, en cuanto se encuentra subutilizado. La información necesaria para el análisis de este factor de carga puede ser tomada a partir de los datos de chapa de la caldera y de

los equipos consumidores, los que se suman algebraicamente en el caso de que dichos consumidores trabajen a tiempo completo consumiendo esta cantidad de vapor. Pero en la mayoría de los casos, los procesos no funcionan de esta manera, sino que nos encontramos muchos como por ejemplo en las cocinas y lavanderías, donde el consumo además de ser intermitente o discontinuo, lo que 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 de su 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 que cantidad del tiempo total estuvo realmente trabajando el generador de vapor, y con ello podemos decir en que medida se encuentra sobredimensionada la caldera.

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

**Donde:**

$tt_q$  – tiempo de trabajo del quemador (h)

$tt_{gv}$  – tiempo de trabajo del generador de vapor (h).

Del análisis de la fórmula anterior se concluye que para que el generador de vapor cumpla con los requisitos de selección y eficiencia antes mencionados la igualdad debe ser 1. La obtención de valores inferiores a la unidad nos señalan 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.

### **1.7.-Otras consecuencias negativas.**

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

### **1.8.-Generalidades del proceso de combustión.**

La combustión es el proceso Físico Químico Complejo, durante el cual los componentes quemables se combinan con el oxígeno liberando una determinada cantidad de calor.

En el generador de vapor, la fuente del calor lo es generalmente una reacción de combustión entre una sustancia combustible y el aire portador del oxígeno que es el comburente. Esta reacción ocurre en el horno y de la efectividad con que se realice, depende en gran medida de la eficiencia de la caldera.

**Para que un sistema de combustión pueda considerarse eficiente debe cumplir los siguientes requisitos:**

- Rango de regulación apropiado a las necesidades operativas.
- Considerable estabilidad de operación.
- Posibilidades de controlar la forma y dimensión de la llama.
- Espacio necesario para la combustión.
- Control automático adecuado.

### **1.9.-Coeficiente de exceso de aire.**

El mantenimiento de la correcta relación aire combustible es el factor más importante en el logro de una combustión eficiente. Este coeficiente es esencial para incrementar la eficiencia de las calderas y hornos al ser proporcional a la mayor pérdida que existe en estos equipos. El coeficiente de exceso de aire alfa (para otros autores ó lambda) es la relación que existe entre el volumen de aire real que se suministra para la combustión y el volumen del aire teórico necesario para que esta se produzca.

**El coeficiente de exceso de aire depende de:**

- El tipo de combustible.
- La forma en que se prepara.
- La forma en que combustiona.
- El tipo de quemador utilizado.
- La construcción del horno.

### **1.10.-Combustibles de composición elemental conocida.**

La determinación del volumen de los gases producto de la combustión es fundamental en el cálculo del generador de vapor, pues son estos los que transfieren el calor al vapor, al agua y al aire, a través de las paredes metálicas de los tubos. En general los productos de la combustión de combustibles orgánicos (fósiles y vegetales) están compuestos por los siguientes gases:

- Nitrógeno ( $N_2$ ) proveniente de la composición elemental del combustible y del aire.

- Dióxidos ( $\text{CO}_2$  y  $\text{SO}_2$ ) proveniente de la oxidación del C y S del combustible.
- Vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) proveniente de la oxidación del  $\text{H}_2$  del combustible, de la evaporación de la humedad del combustible y del vapor de agua que entra con el aire.
- Oxígeno ( $\text{O}_2$ ) proveniente del aire que se suministra en exceso. El oxígeno proveniente del combustible se considera en el balance de la reacción y por ende se tiene en cuenta para calcular el aire teórico, por lo tanto se asume que no queda como oxígeno libre.
- Gases producidos por los elementos minerales no combustibles y  $\text{NO}_x$ ,  $\text{H}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  todos importantes en cuanto a la contaminación, pero de volúmenes despreciables.

En los cálculos se considera que el carbono se oxida totalmente, lo que no introduce un error apreciable. Esta consideración de que el CO es 0 % solo es válida para el cálculo de los volúmenes de los productos de la combustión. Igual consideración, que con el carbono, se hace con relación al azufre.

**Tabla 1.1: Composición del combustible.**

Elemento	Fuel-oil (%)	Diesel (%)
Carbono	84.31	87
Hidrógeno	10.83	12.6
Oxígeno	0.3	-
Nitrógeno	0.3	0.1
Agua	1.0	-
Azufre	2.9	1.2
Humedad	1.4	0.1
Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	965.0	860.0

### **1.11.-Calor específico de combustión.**

El calor específico de combustión de una sustancia es la cantidad de calor que desprende durante la combustión completa de su unidad de masa. Es conocido también como valor calórico, potencia calorífica o calor de combustión, el nombre usado aquí se corresponde con las Normas Cubanas. Los combustibles sólidos y líquidos se expresa en  $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$  y en los gaseosos  $\left[ \frac{kJ}{m^3 N} \right]$  en el Sistema Internacional de Unidades que será el utilizado.

Por otra parte, durante la determinación del calor de combustión existen dos posibilidades:

1. Determinarlo obteniendo en los productos gaseosos, en forma de vapor, el agua producto de la humedad del combustible y del hidrógeno quemado. En este caso se habrá determinado el calor específico de combustión inferior ( $Q_i^P$ ).
2. Determinarlo de tal forma que los vapores de agua se condensen y se enfríen hasta una temperatura inferior al punto de rocío, de manera que cedan al calor que tomaron para su evaporación. En este caso se habrá determinado el calor específico de combustión superior ( $Q_s^P$ ).

### **1.12.-Generalidades de la pérdida por calor sensible.**

#### **1.12.1.-Pérdidas por calor sensible ( $q_2$ ) con los gases de escape de las calderas pirotubulares.**

La eficiencia de las calderas pirotubulares oscilan entre un 75 a 85 % siendo afectada fundamentalmente por las pérdidas de calor sensible por los gases, debido a la elevada temperatura de los gases y a las pérdidas por radiación que estas unidades puede ser del orden de la pérdida por calor sensible, sobre todo a baja carga.

En las calderas de dos pases la temperatura de los gases puede alcanzar valores superiores a los 300<sup>0</sup>C debido a la limitada superficie de transferencia de calor disponible y a la no utilización de superficies recuperativas en general.

Si se analizan las pérdidas en calderas pirotubulares en condición de cargas parciales su comportamiento, según resultados de evaluaciones realizadas en unidades de esta tipo, se observa que el peso relevante está en la pérdida de calor sensible con los gases toma valores entre 8 a 30 % y la pérdida por radiación, que a cargas parciales supera el 5 %. Con un aumento de la temperatura de los gases de salida de 12 a 16 °C, la pérdida de calor sensible ( $q_2$ ) aumenta aproximadamente en 1 %. Es por ello que resulta deseable tener la más baja temperatura posible para los gases de salida.<sup>5</sup>

Existe una diferencia significativa con respecto al comportamiento de las calderas acuotubulares donde las pérdidas por radiación presentan valores menores del 2 % y las pérdidas por calor sensible que oscilan entre 8 a 10 %.

En las calderas las pérdidas de calor con los gases varían durante los periodos de arranque y estabilización, debido a la variación de la temperatura. Por otra parte, durante la parada se mantiene una pérdida de calor por la chimenea debido a la circulación de aire por convección natural.

Sin embargo un profundo enfrentamiento de los gases exige una mayor superficie de transferencia, lo que a su vez provoca una mayor resistencia hidráulica al flujo de gases y por consiguiente un mayor consumo de energía del tiro inducido.

Es por eso que el valor óptimo de la temperatura de salida de los gases se escoge a partir de un balance técnico-económico que compare el costo de la superficie de transferencia complementaria y el aumento en tiro con la economía en combustible obtenido.

Actualmente, en calderas energéticas potentes, el valor óptimo de la temperatura de salida de los gases oscilan entre 110 a 150 °C, dependiendo del costo del combustible y de su humedad. Mientras más caro es el combustible el valor óptimo se inclina hacia los valores más bajos. Para combustibles con mucha humedad, ella es superior.

---

<sup>5</sup> Garay Pérez, Ing. Luis, *Generadores de vapor*.(pp. 94-96)

### **1.13.-Factores que influyen en esta pérdida.**

La magnitud de esta pérdida depende fundamentalmente de dos factores, los cuales son:

- Coeficiente de exceso de aire a la salida del generador.
- Temperatura de los gases a la salida del generador.

Dentro de las causas que pueden provocar un incremento de esta pérdida durante la operación de la caldera están:

- Incremento del exceso de aire suministrado al horno.
- Excesivas infiltraciones de aire en los conductos de gases en calderas con tiro balanceado.
- Ensuciamiento exterior de las superficies de calentamiento.
- Incrustaciones interiores de las superficies de calentamiento por alteraciones en el régimen químico del agua de la caldera.
- Deficiente bañado de las superficies por roturas en las mamparas deflectoras de gases.

#### **1.13.1.-Coeficiente de exceso de aire a la salida del generador.**

Su influencia se debe a que la cantidad total de calor que sale depende de la cantidad de gases, y esto, para una determinada cantidad de combustible, depende exclusivamente del coeficiente de exceso de aire a la salida del generador de vapor.

**Nótese:** que este valor dependerá del coeficiente empleado en el horno y de las infiltraciones.

#### **1.13.2.-Temperatura de los gases a la salida del generador.**

No necesita comentario, pues se conoce que la temperatura es una indicación directa de la cantidad de calor (entalpía) que posee una sustancia. Con el objetivo de mantener en el menor valor posible la pérdida por calor sensible en los gases de

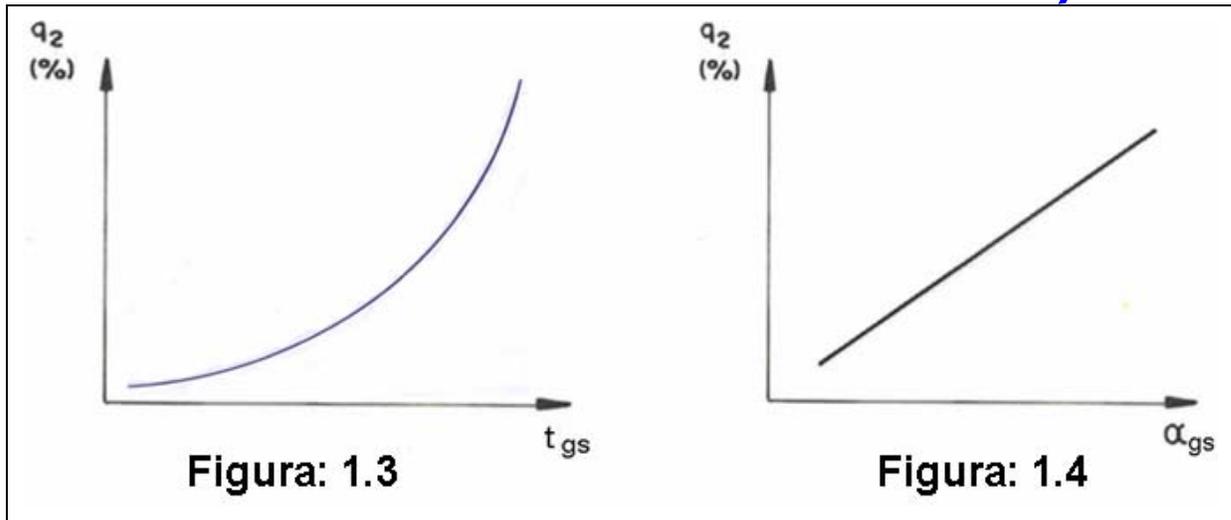
escape, debe tratarse de llevar a un mínimo tanto el coeficiente de exceso de aire a la salida, como la temperatura.

Para lograr que el exceso de aire sea el mínimo, debe mantenerse en el horno el coeficiente mínimo que garantice una buena combustión, sin que se sobrepase el necesario, y a la vez, mantener también en el mínimo las infiltraciones, teniendo cerrados todos los registros y con una correcta hermeticidad todos los conductos de gases.

La disminución de la temperatura de los gases a la salida de la caldera se logra mediante la colocación de equipos recuperadores de calor, generalmente calentadores de aire, economizadores y secadores de combustible. No obstante, que para la disminución de la pérdida de calor sensible sea necesario disminuir la temperatura de los gases a la salida, esta disminución se ve limitada por dos factores.

- Diferencia de temperatura mínima existente con un potencial de temperatura adecuado que provoque la transferencia de calor, para que el costo del equipo sea razonable, pues cuanto menor es la diferencia puede provocar la transferencia de calor en el equipo siguiente. Si la temperatura es más alta resulta que el equipo será más costoso, lo que requiere reclamar una mayor área de transferencia de calor. El potencial que se considera más económico es aproximadamente  $100^{\circ}\text{C}$ , lo que hace que la temperatura mínima de los gases a la salida se estipule teóricamente sobre los  $130^{\circ}\text{C}$  para calentadores de aire.
- Temperatura que garantice el menor efecto corrosivo de los gases. La presencia en los gases de dióxido de azufre, conjuntamente con vapor de agua, hace que se produzca ácido sulfúrico y sí la temperatura desciende mucho se provoca la condensación y de inmediato comienza a depositarse en la superficie de los tubos, atacándolos químicamente y destruyéndolos.

Con el objetivo de llevar a un mínimo la formación de ácido y a su vez poder disminuir la temperatura de salida de los gases para reducir la pérdida de calor sensible.



Las figuras 1.3 y 1.4 representan las variaciones de  $q_2$  con respecto a la temperatura de salida y al coeficiente de exceso de aire en los gases de escape.

#### 1.14.-Formas de disminuir la pérdida de calor sensible.

- Disminuir lo más posible el coeficiente de exceso de aire durante la proyección o reconstrucción del generador y mantenerlo en el valor correcto durante la operación a cada valor de demanda.
- Mantener limpias las superficies de transferencia de calor tanto por dentro como por fuera.
- Mantener una correcta hermeticidad en las paredes, los registros y las mirillas. No abrir innecesariamente los registros o las mirillas.
- Lograr que la temperatura de los gases a la salida, durante la proyección, se haga lo más baja posible. En la operación debe mantenerse en el valor establecido como óptimo.
- Controlar que no existan defectores de gases rotos que provoquen un desvío de dichos gases sin que pasen por la superficie de transferencia, lo que disminuiría el calor transferido y aumentaría su temperatura a la salida.

### **1.15.-Conclusiones Parciales del Capítulo I**

1. La eficiencia de las calderas piro-tubulares oscilan entre 75 y 85 % siendo afectadas fundamentalmente por las pérdidas de calor sensible por los gases, debido a la elevada temperatura de los gases y a la pérdidas por radiación que estas unidades pueden ser del orden de las pérdidas por calor sensible, sobre todo a baja carga.
2. El rango superior de trabajo de las calderas piro-tubulares oscila hasta capacidades de 30 t/h y presiones de hasta 3 MPa, estas calderas que están instaladas en los centros que se analizan en este trabajo, tiene capacidades hasta 4 t/h y utilizan combustible líquido. Se utilizan para la producción de vapor en el proceso de la elaboración de los alimentos.
3. La pérdida por calor sensible con los gases toma valores entre 8 a 30 % y la pérdida por radiación a cargas parciales superan el 5 % en este tipo de instalaciones.
4. La temperatura de los gases depende de las características del combustible, su preparación y precalentamiento, por lo cual en la medida que estos combustibles sean más costosos se deben tomar medidas para disminuir la temperatura de los gases de escape.

# Capítulo II



## **CAPÍTULO II: CARACTERIZACIÓN DE LOS CENTROS Y SIMULACIÓN EXPERIMENTAL.**

Existen entidades en nuestra provincia que agrupan en su conjunto a unidades Educativas tales como el Tecnológico 5 de Septiembre, la Escuela Formadora de Maestros y un Comedor-Escolar para la elaboración de alimentos para algunas escuelas y empresas que se encuentran localizadas en esta región. El objetivo principal a abordar en este trabajo es la gran utilización de los generadores de vapor que en este caso están representados por calderas pirotubulares de diferentes capacidades y parámetros de operaciones instaladas en las mismas.

### **2.1.- Sistema de generación de vapor en los distintos centros.**

Los sistemas de generación en estos centros tienen como objetivo principal la producción de vapor para la elaboración de los alimentos, el mismo está compuesto por dos subsistemas que son, la producción de vapor (sala de caldera) y la unidad de utilización del vapor (cocina); Estos subsistemas se unen mediante dos tuberías, una de vapor y la otra de retorno del condensado.

### **2.2.- Características de la Instalación en el Tecnológico 5 de Septiembre.**

La sala de caldera del Tecnológico 5 de Septiembre, cuenta con los siguientes componentes:

- 1) Una Caldera.
- 2) Un Suavizador.
- 3) Un Colector del vapor.
- 4) Una Bomba de alimentación de agua.
- 5) Un Magnetizador.
- 6) Un Tanque de combustible exterior.
- 7) Un Tanque de alimentación de agua exterior.

### **2.3.- Características de la Instalación en la Escuela Formadora de Maestros de Cienfuegos "Conrado Benítez García".**

La sala de caldera de la Escuela Formadora de Maestros de Cienfuegos "Conrado Benítez García", cuenta con los siguientes componentes:

- 1) Una Caldera.
- 2) Un Suavizador.
- 3) Un Colector del vapor.
- 4) Una Bomba de alimentación de agua.
- 5) Una Bomba de combustible.
- 6) Un Magnetizador.
- 7) Tres Tanques de combustible.
- 8) Tres Tanques de alimentación de agua.

### **2.4.- Características de la Instalación en el Comedor Escolar.**

En la sala de caldera del Comedor Escolar, cuenta con los siguientes componentes:

- 1) Una Caldera.
- 2) Un Suavizador.
- 3) Un Colector del vapor.
- 4) Dos Bombas de alimentación de agua.
- 5) Un Magnetizador.
- 6) Un Tanque de combustible.
- 7) Un Tanque de alimentación de agua.

### **2.5.-Característica del proceso de generación.**

El proceso operativo de generación de vapor es de naturaleza físico-químico. El petróleo mediante la reacción química de combustión libera una cantidad de calor, que el agua líquida alimentada a la caldera la absorbe y se convierte el vapor saturado. El vapor al llegar a la cocina en los equipos de cocción cede parte de calor, sobre todo el latente. El proceso de generación de vapor, consiste en diferentes sistemas como son el tratamiento del agua, almacenamiento y bombeo del agua a la caldera, suministro del combustible al quemador y la distribución y uso del vapor.

**Tabla 2.1: Características constructivas de las calderas en los siguientes centros.**

<b>Características constructivas de las Calderas</b>			
	<b>5 de Septiembre</b>	<b>Escuela Formadora</b>	<b>Comedor Escolar</b>
<b>Características.</b>	<b>Valores</b>	<b>Valores</b>	<b>Valores</b>
Modelo.	CMS/C440		607
N <sup>o</sup> de fabricación/Año	04-2002		1968
Producción de vapor.	440 Kg/h	1120 Kg/h	600 Kg/h
Presión de cálculo.	10 Bar	10,5 Kg/cm <sup>2</sup>	12 Kg/cm <sup>2</sup>
Presión de prueba.	15 Bar		15 Kg/cm <sup>2</sup>
Presión de Trabajo.	6 Bar	7 Kg/cm <sup>2</sup>	7 Kg/cm <sup>2</sup>
Superficie de calentamiento.	16 m <sup>2</sup>		20 m <sup>2</sup>
Rendimiento.	88 %	88 %	88 %
Tipo de acero del casco.	20 K	20 K	20 K
Espesor del casco.	10 mm	16 mm	16mm
Tipo de combustible.	Diesel	Fuel Oil	Diesel
Temperatura de cálculo.	183 °C		183 °C
Fecha de prueba.	13-03-2000		
Temperatura del vapor saturado.	158,85 °C	158,85 °C	158,85 °C
Número de pasos de la caldera.	3	2	3
Volumen.	1,53		
Naturaleza del fluido.	Agua	Agua	Agua
Quemador	RAY	BALTUR	Steam bloc

## **2.6.-Diseño y Simulación Experimental.**

La provincia de Cienfuegos tiene instaladas 104 calderas pirotubulares distribuidas en diversos organismos. La Empresa ALASTOR atiende de forma sistemática, un total de 75 calderas. Para realizar la caracterización se tomaron las 3 unidades anteriormente mencionadas que representan adecuadamente la población.

**Datos técnicos de las calderas y parámetros de funcionamiento de las mismas.**

- Marca.
- País.
- Año de fabricación.
- Tipo de combustible.
- Números de pases.
- Tipo de quemador.
- Capacidad nominal.
- Hora de operación.
- Uso del vapor.

**Mediciones tomadas durante el funcionamiento de las calderas:**

- Temperatura de los gases de salida.
- Tiempo de trabajo del quemador en 5 horas.
- Funcionando el quemador.
- Sin funcionar el quemador.
- Temperatura del agua alimentar.
- Temperatura del combustible.
- Presión del vapor.
- Presión del Combustible.

**2.7.-Planificación y metodología de la investigación.**

Es necesario una adecuada planificación para la realización de las pruebas experimentales debido a la necesidad de obtener una caracterización y evaluación correcta de los resultados de la misma, por lo que se hace necesario llevar a cabo una secuencia lo más lógica y ordenada posible, de las operaciones que se realicen.

Las pruebas por las calderas se realizaron con una duracion de 2 días, se efectuaron mediciones con intervalos de 10 minutos, midiendo los parámetros que aparecen en la hoja de control. (Anexo 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09).

Después de haber procesado los datos experimentales tomados se determinaron los

cálculos siguientes:

- Eficiencia térmica
- Las pérdidas térmicas
- Eficiencia exergética
- El cálculo del factor de carga
- El exceso de temperatura

La medición de los parámetros se efectuó con la instrumentación existente en cada unidad.

### **2.8.-Metodología del cálculo.**

Existen muchas instalaciones en las cuales los generadores de vapor pirotubulares están sobredimensionados trayendo como consecuencia gran cantidad de arranques y paradas.

Para evitar este efecto perjudicial a la eficiencia energética y a la estructura mecánica de las calderas, se realiza un balance carga-capacidad de la producción de vapor y la demanda de los equipos en la industria, hasta lograr mantener, casi constante, el funcionamiento de la caldera.

### **2.9.-Eficiencia Térmica de los generadores de vapor.**

- **Ecuación del balance térmico.**

El balance térmico de una caldera operando a régimen estacionario puede escribirse de la siguiente forma simplificada:

$$Q_d = Q_u + \sum Q_p \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (2.1)$$

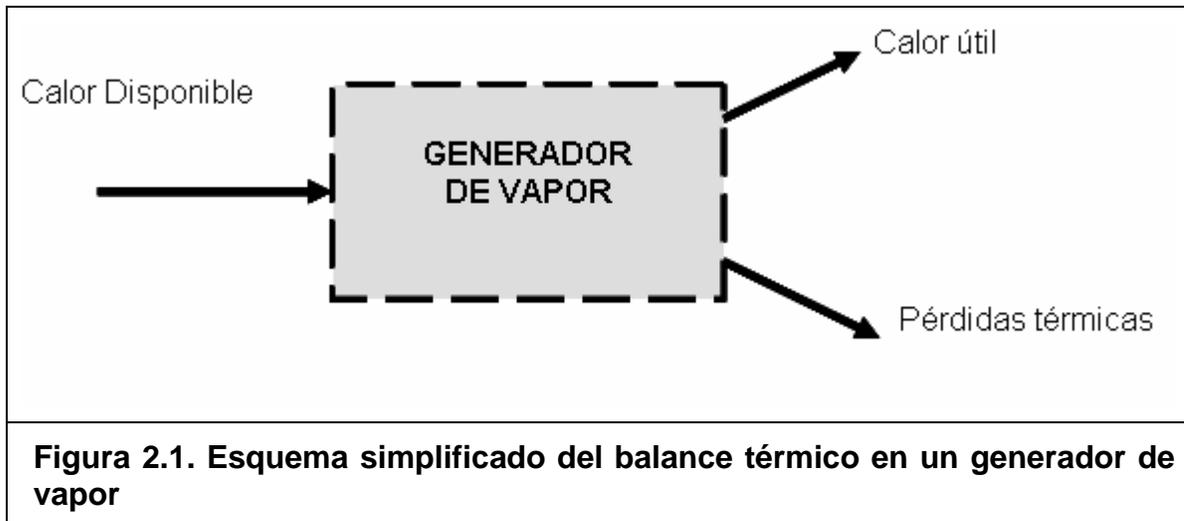
**Donde:**

$Q_d$  - Calor disponible.

$Q_u$  - Calor útil.

$\sum Q_p$  - Pérdidas térmicas, representa la suma de todas las pérdidas que ocurren

en los procesos de combustión y transferencia de calor en el generador de vapor.



### 2.10.-Método para determinar la eficiencia térmica de un generador de vapor (Normas Europeas).

Existen dos métodos para determinar la eficiencia de un generador de vapor a partir de la ecuación de balance térmico en los métodos directo e indirecto.

#### 2.10.1.-Metodología del Método Directo.

Se basa en relacionar directamente la producción del generador de vapor con el consumo, y determinar la eficiencia como el porcentaje que representa el calor útil (producción) y el calor disponible (consumo).

$$\eta = \left[ \frac{Q_u}{Q_d} \right] \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.2)$$

**Donde:**

$\eta$  - La eficiencia de un generador de vapor.

$Q_d$  - Calor Disponible.

$Q_u$  - Calor útil.

### 2.10.1.1.-Cálculo del calor útil y disponible.

- **Calor Disponible.**

$$Q_d = Q_i^p + i_c ; \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (2.3)$$

**Donde:**

$Q_i^p$  - Poder calorífico o valor calórico inferior del combustible.

$i_c$  - Calor físico del combustible o entalpía del combustible.

- **Calor específico de la combustión.**

Calor específico de la combustión inferior ( $Q_i^p$ ).

$$Q_i^p = 339,2C^p + 1030,4H^p - 108,9(O^p - S^p) - 25,14W^p ; \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (2.4)$$

Calor específico de la combustión superior ( $Q_s^p$ )

$$Q_s^p = 339,2C^p + 1257H^p - 108,9(O^p - S^p) ; \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (2.5)$$

**Donde:**

$C^p$  -Carbono (%)

$H^p$  -Hidrógeno (%)

$O^p$  -Oxígeno (%)

$N^p$  -Nitrógeno (%)

$S^p$  -Azufre (%)

$A^p$  -Ceniza (%)

$W^p$  -Humedad (%)

**NOTA:** Las composiciones químicas de los combustibles Diesel y Fuel- Oil se pueden encontrar en el Capítulo I de la Tabla: 1.1.

- **Calor físico del combustible o entalpía del combustible.**

$$i_c = C_c \cdot T_c ; \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (2.6)$$

**Donde:**

$T_c$  - Temperatura del combustible suministrado al quemador, °C.

$C_c$  - Calor específico del combustible,  $\left[ \frac{kJ}{kg^{\circ}C} \right]$ .

( $T_c \Rightarrow$  Los valores pueden encontrarse en el Anexo 10).

- **Calor específico del combustible.**

El combustible líquido puede calcularse por:

$$C_c = 1,738 + 0,0025 \cdot T_c ; \left[ \frac{kJ}{kg^{\circ}C} \right] \quad (2.7)$$

- **Calor útil.**

Representa la energía transferida al agente de trabajo por unidad de masa del combustible.

$$Q_U = [D_v (h_{vsat} - h_{aa})] / B_c ; \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (2.8)$$

**Donde:**

$Q_U$  - Calor útil.  $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$

$D_v$  -Flujo de vapor producido por la caldera (saturado o sobrecalentado),  $\left[ \frac{kg}{h} \right]$

$h_{vsat}$  - Entalpía del vapor producido  $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$ .

$h_{aa}$  - Entalpía del agua de alimentación  $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$ .

$B_C$  - Gasto del combustible,  $\left[ \frac{kg}{h} \right]$ .

( $D_v, h_{vsat}, h_{aa}$  y  $B_C \Rightarrow$  Los valores pueden encontrarse en el Anexo 10).

### 2.10.2.-Metodología del Método Indirecto.

Este método parte de determinar la suma de las pérdidas térmicas expresadas en porcentaje del calor disponible y luego determinar, indirectamente, la eficiencia como el porcentaje restante.

$$\eta = 100 - \sum q_p \quad [\%] \quad (2.9)$$

Donde:

$\eta$  - La eficiencia de un generador de vapor.

$\sum q_p$  - La sumatoria de las pérdidas térmicas.

$$\sum q_p = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \quad [\%] \quad (2.10)$$

#### 2.10.2.1.-Determinación de los volúmenes de los gases de escape a la salida de la caldera.

- Determinación de la cantidad de aire teórica.

$$V^0 = 0,0889(C^p + 0,375S^p) + 0,265H^p - 0,0333O^p; \left[ \frac{m^3N}{kg} \right] \quad (2.11)$$

Donde:

$V^0$  - Volumen de aire teórico seco ( $m^3N$  de aire / kg de combustible).

$C^p$  - Carbono del combustible (%).

$S^p$  - Azufre del combustible (%).

$H^p$  - Hidrógeno del combustible (%).

$O^p$  - Oxígeno del combustible (%).

• **Determinación de los volúmenes de los productos de la combustión.**

Se verá primeramente la determinación del volumen para el caso de una combustión estequiométrica en la que  $\alpha = 1$ .

$$V_g^0 = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0; \left[ \frac{m^3 N}{kg} \right] \quad (2.12)$$

**Donde:**

a)  $V_g^0$  - Volumen total teórico de gases. Expresado en  $\frac{m^3 N}{kg} \Rightarrow \frac{\text{gases}}{\text{combustible}}$ .

b)  $V_{RO_2}$  - Volumen total real de gases triatómicos.

$$V_{RO_2} = 1,866 \left[ \frac{C^p + 0,375S^p}{100} \right]; \left[ \frac{m^3 N}{kg} \right] \quad (2.13)$$

c)  $V_{N_2}^0$  - Volumen total teórico del nitrógeno.

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V^0 + 0,8 \frac{N^p}{100}; \left[ \frac{m^3 N}{kg} \right] \quad (2.14)$$

d)  $V_{H_2O}^0$  - Volumen total teórico del vapor de agua.

$$V_{H_2O}^0 = 0,111 \cdot H^p + 0,0124 \cdot W^p + 0,00161 \cdot d \cdot V^0; \left[ \frac{m^3 N}{kg} \right] \quad (2.15)$$

**Donde:**

$0,111 \cdot H^p$  - Volumen de vapor de agua producto del hidrógeno del combustible.

$0,01224 \cdot W^p$  - Volumen de vapor de agua producto de la humedad del combustible.

$0,00161 \cdot d \cdot V^o$  - Volumen teórico de vapor de agua producto de la humedad que entra con el aire.

$d$  - humedad de aire (*gramos de agua / kg de aire seca*). Se determina en las tablas sicrométricas. Generalmente  $d = 15 - 18 \text{ g / kg}$  para Cuba.

Se pasará ahora al cálculo de los volúmenes reales de los productos de la combustión ( $\alpha > 1$ ). En este caso el volumen real de gases ( $V_g$ ) será el volumen total teórico de gases, más el volumen de aire seco en exceso, más la humedad correspondiente a ese aire en exceso.

$$V_g = V_g^0 + (\alpha - 1)V^0 + 0,00161 \cdot d(\alpha - 1)V^0 ; \left[ \frac{m^3 N}{kg} \right] \quad (2.16)$$

En esta ecuación todos los términos resultan conocidos. Sustituyendo  $V_g^0$  por sus términos constituyentes tenemos:

$$V_g = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 + (\alpha - 1)V^0 + 0,00161 \cdot d(\alpha - 1)V^0 ; \left[ \frac{m^3 N}{kg} \right] \quad (2.17)$$

### 2.10.2.2.-Determinación del coeficiente de exceso de aire.

Este método se puede utilizar para determinar el coeficiente de exceso de aire de forma aproximada, es a partir del % de gases triatómicos en gases secos.

$$\alpha = \frac{RO_2^{max}}{RO_2} \quad RO_2^{max} = \frac{21}{1 + \beta} \quad (2.18)$$

**Donde:**

$RO_2 = \% CO_2$  - En los gases de escape. Pueden tomarse el valor del  $CO_2$  en el Anexo15.

Para combustibles sólidos y líquidos:

$$\beta = \frac{2,37 \cdot (H^p - 0,126 \cdot O^p)}{C^p + 0,375 \cdot S} \quad (2.19)$$

**Donde:**

$\beta$ -es un coeficiente característico del combustible.

**NOTA:** El valor del exceso de aire puede tomarse en el Anexo16.

### 2.10.2.3.-Determinación de la entalpía de los productos de la combustión.

La entalpía puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$I_g = I_g^0 + (\alpha - 1)I_a^0 + I_c ; \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (2.20)$$

**Donde:**

- a)  $I_g$  - Entalpía total de la masa de gases por kg de combustible en el punto evaluado con coeficiente de exceso de aire ( $\alpha > 1$ ) y con una temperatura  $\theta$ .
- b)  $I_g^0$  - Entalpía de los gases por kg de combustible con  $\alpha = 1$  y temperatura  $\theta$ .
- c)  $I_c$  -Entalpía de la ceniza volátil que escapa con los gases. ( $I_c = 0$ , Para combustible líquido).

$$I_g^0 = V_{RO_2} (C\theta)_{RO_2} + V_{N_2}^0 (C\theta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 (C\theta)_{H_2O} ; \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (2.21)$$

**Donde:**

- $\theta$  - Temperatura de los productos de la combustión ( $^{\circ}C$ ).
- (C  $\theta$ ) - Producto de la capacidad térmica específica por la temperatura de los gases  $\left[ \frac{kJ}{m^3 N} \right]$ . Pueden tomarse los valores en el Anexo13.

- c)  $I_a^0$  - Entalpía de la cantidad de aire teórico a temperatura  $\theta$ , puede calcularse por la siguiente ecuación:

$$I_a^0 = V^0 + (C\theta)_a ; \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (2.22)$$

**Donde:**

- (C $\theta$ )<sub>a</sub>-Producto de la capacidad térmica específica del aire por la temperatura

de los gases. Pueden tomarse los valores en el Anexo 13.

#### 2.10.2.4.-Determinación de las pérdidas de calor de un generador de vapor durante su cálculo térmico.

- **Pérdidas de calor sensible con los gases de salida,  $q_2$ .**

Está asociada al hecho de que la entalpía de los gases de salida es superior a la del aire y al del combustible de entrada.

$$q_2 = \frac{(I_g - \alpha \cdot I_{a28^0c}^o) \left(1 - \frac{q_4}{100}\right)}{Q_d} \cdot 100 \quad ; [\%] \quad (2.23)$$

**Donde:**

$I_g$  -Entalpía de los gases a la salida del generador de vapor.

$I_{a28^0c}^o$  - Entalpía de la cantidad de aire teórico.

$\alpha$  -Coeficiente de exceso de aire a la salida del generador de vapor.

$q_4$  - Pérdida por combustible no quemado %, en las calderas que trabajan con combustible líquido ( $q_4 = 0$ ).

- **Pérdidas de calor por combustión incompleta,  $q_3$ .**

$$q_3 = \left[ \frac{126 \cdot CO \cdot V_g}{Q_d} \right] \cdot 100 \quad ; [\%] \quad (2.24)$$

**Donde:**

$q_3$  - Pérdida por combustión incompleta expresada en [%] del calor disponible.

$V_g$  - Volumen de gases secos,  $\left[ \frac{m^3 N}{kg} \right] \left[ \frac{m^3 N}{m^3 N} \right]$ .

$Q_d$  - Calor disponible,  $\left[ \frac{kJ}{kg} \right] \left[ \frac{kJ}{m^3 N} \right]$ .

$CO$  - El volumen del monóxido de Carbono es entre  $[0,1 - 1,5\%]$ . Puede tomarse el valor  $q_3$  en el Anexo 16.

- **Pérdida por combustible no quemado -  $q_4$ .**

Se considera  $q_4 = 0$  (Para combustible líquido).

- **Pérdidas de calor por radiación y convección,  $q_5$ .**

Conociendo las pérdidas por radiación a carga nominal, para cargas diferentes se pueden estimar como:

$$q_5 = q_{5nom} \cdot \frac{D_{nom}}{D} ; [\%] \quad (2.25)$$

**Donde:**

$q_5$  - Pérdidas por radiación,  $[\%]$ .

$q_{5nom}$  - Pérdidas por radiación a carga nominal,  $[\%]$ . Se puede sacar del Anexo

14. Se entra con la capacidad nominal de la caldera en  $\left[\frac{t}{h}\right]$  y sacar el valor de la pérdida por radiación a carga nominal.

$D$  - Flujo de vapor real,  $\left[\frac{kg}{h}\right]$ .

$D_{nom}$  - Capacidad nominal,  $\left[\frac{kg}{h}\right]$ .

- **Pérdidas con el calor físico de los residuos del horno,  $q_6$ .**

Se considera  $q_6 = 0$  (Para combustible líquido).

- **Cálculo del error absoluto entre los dos métodos.**

$$error = |\eta_{indirecto} - \eta_{directo}| \quad (2.26)$$

### 2.11.-Rendimiento Exergético.

El Rendimiento Exergético ( $\eta_b$ ) mide el grado de perfección termodinámico de un sistema.

Aparatos que no producen trabajo útil.

$$\eta_b = \frac{B_{sal}}{B_{ent}} \quad (2.27)$$

$$\eta_{Exergetico} = \frac{\Delta E}{E_{com}} = \frac{E_v - E_{aa}}{E_{com}} * 100 ; [\%] \quad (2.28)$$

Donde:

$$E_v - \text{Exergía del vapor} \left[ \frac{kJ}{s} \right] [kW].$$

$$E_{aa} - \text{Exergía del agua} \left[ \frac{kJ}{s} \right] [kW].$$

$$E_{com} - \text{Exergía del combustible} \left[ \frac{kJ}{s} \right] [kW].$$

**En cualquier caso, si los procesos son reversibles:  $\eta_b = 1$ .**

#### 2.11.1.-Determinación de las Exergías de las sustancias en flujo (E).

- **Exergía del vapor.**

$$e_v = (h_{vsat} - h_0) - T_0 (S_{vsat} - S_0) ; \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (2.29)$$

$$E_v = D_v [(h_{vsat} - h_0) - T_0 (S_{vsat} - S_0)] ; \left[ \frac{kJ}{s} \right] [kW] \quad (2.30)$$

Donde:

$$T_0 - \text{Temperatura del agua a Medio Ambiente} [K].$$

$D_v = D_{aa}$  -Flujo de vapor producido por la caldera (saturado o sobrecalentado),

$$\left[ \frac{kg}{h} \right]$$

$h_{vsat}$  - Entalpía del vapor producido,  $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$ .

$h_0$  - Entalpía del agua a condición al Medio Ambiente,  $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$ .

$S_{vsat}$  - Entropía del vapor producido,  $\left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$ .

$S_0$  - Entropía del agua a condición al Medio Ambiente,  $\left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$ .

( $T_0, D_v = D_{aa}, h_{vsat}, h_0, S_{vsat}$  y  $S_0 \Rightarrow$  Los valores pueden encontrarse en el Anexo 10).

- **Exergía del agua.**

$$e_{aa} = (h_{aa} - h_0) - T_0(S_{aa} - S_0) ; \left[ \frac{kJ}{kg} \right] \quad (2.31)$$

$$E_{aa} = D_{aa} [(h_{aa} - h_0) - T_0(S_{aa} - S_0)] ; \left[ \frac{kJ}{s} \right] [kW] \quad (2.32)$$

**Donde:**

$h_{aa}$  - Entalpía del agua de alimentación,  $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$ .

$S_{aa}$  - Entropía del agua de alimentación,  $\left[ \frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$ .

( $D_{aa}, h_{aa}$  y  $S_{aa} \Rightarrow$  Pueden tomarse los valores en el Anexo 10).

- **Exergía del combustible (Diesel y Fuel-Oil).**

$$E_{com} = Q_d \cdot B_c ; \left[ \frac{kJ}{s} \right] [kW] \quad (2.33)$$

**Donde:**

$$Q_d - \text{Calor disponible, } \left[ \frac{kJ}{kg} \right].$$

$$B_c - \text{Gasto de combustible, } \left[ \frac{kg}{h} \right].$$

## 2.12.-Método de cálculo del factor de carga y exceso de temperatura.

- **Factor de carga.**

$$\varphi = \frac{tt_q}{tt_{gv}} \quad (2.34)$$

**Donde:**

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

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

$tt_q$  y  $tt_{gv}$  - Pueden tomarse los valores en los Anexos 07,08 y 09.

- **Exceso de temperatura.**

$$\phi = \frac{t_r}{t_{vs}} \quad (2.35)$$

**Donde:**

$t_r$  - temperatura real de los gases a la salida (°C).

$t_{vs}$  - temperatura de vapor saturado + 60°C (°C)

$t_r$  y  $t_{vs}$  - Pueden tomarse los valores en los Anexos 01,02, 03, 04, 05 y 06.

Un grupo significativo de calderas de la provincia de Cienfuegos se encuentra sobredimensionadas y se requiere una evaluación sistemática de las pérdidas de mayor cuantía y el rendimiento de estas instalaciones, lo cual se ve limitado por la

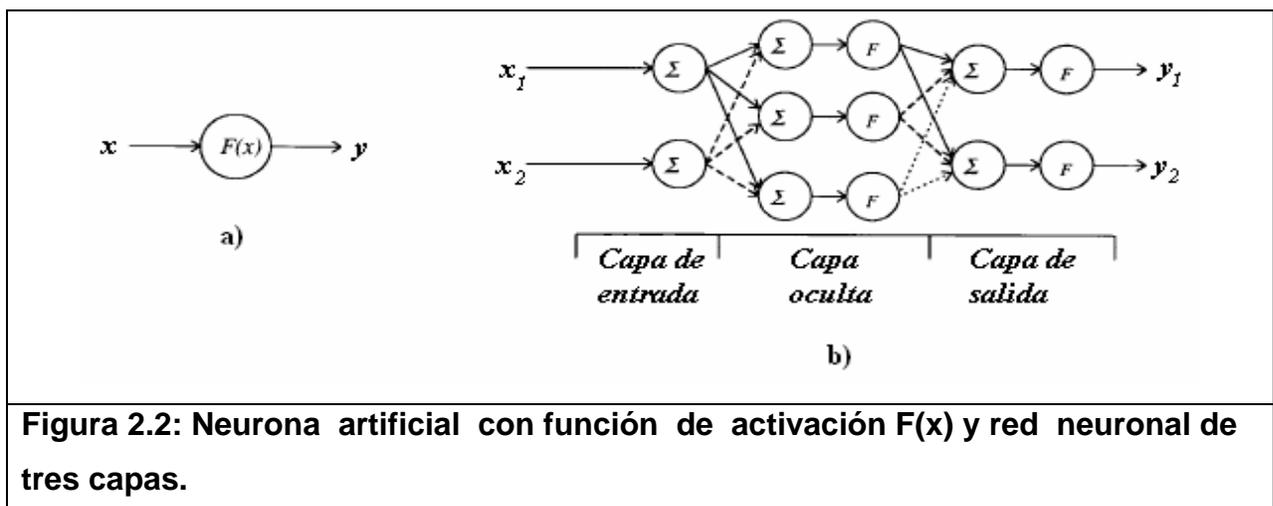
dificultad de las mediciones por falta de instrumentación en estas calderas.

Por esta razón, las técnicas como la Inteligencia Artificial, en particular las redes neuronales artificiales; (RNA), pueden ser aplicadas para resolver estas dificultades y conseguir un modelo matemático a partir de los datos de explotación reales. 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. En el capítulo III se exponen los fundamentos necesarios para la comprensión del modelo obtenido.

### 2.13.-Fundamentos de las RNA.

Las redes neuronales artificiales están inspiradas en el modo en que las redes de neuronas biológicas del cerebro procesan información y son sistemas compuestos de elementos de cálculos básicos conectados en paralelo. Estos elementos básicos, llamados neuronas (Figura 2.2a), aceptan una entrada y producen un valor de salida basado generalmente en una función no lineal llamada función de transferencia.

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



**Figura 2.2: 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 2.2b 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 2.2b), 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 2008, empleado en esta aplicación.

## **2.14.-Conclusiones Parciales del Capítulo II**

1. En este capítulo se hace una descripción de los centros en que se ha realizado este trabajo, los cuales son, el Tecnológico 5 de Septiembre, la Escuela Formadora de Maestros y El Comedor Escolar. Donde se incluyen las características generales de cada uno, tales como: generación de vapor, características de las instalaciones y por último las características técnicas de cada caldera.
2. Los parámetros e indicadores que más influyen en las operaciones de las calderas son las siguientes, pérdidas térmicas, la eficiencia térmica y exergética, el exceso de temperatura y el factor de carga. Con los análisis de estos indicadores podemos observar el estado de funcionamiento de la caldera o el sobredimensionamiento.
3. Dentro de las pérdidas térmicas, las que más afectan durante el funcionamiento en una caldera pirotubular son: pérdidas por calor sensible, pérdidas por radiación y pérdidas por combustión incompleta y la demás pérdidas se consideran 0 para el combustible líquido
4. El logaritmo para hacer los cálculos de los indicadores para las operaciones fundamentales de las calderas empleamos varios métodos y expresiones para la evaluaciones del presente trabajo, los métodos son los siguientes:
  - I. Rendimiento térmico.
    - Método directo
    - Método indirecto
  - II. Factor de carga y exceso de la temperatura.
  - III. Rendimiento exergético.
5. En general, las Redes Neuronales Artificiales han sido claramente aceptadas como nuevos sistemas muy eficaces para el tratamiento de la información en muchas disciplinas. Ellos han dado como resultado una variedad de aplicaciones comerciales (tanto en productos como en servicios).

# Capítulo III



## **CAPÍTULO III: RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS Y OBTENCIÓN DE LOS MODELOS APLICANDO RNA.**

Estos resultados se han obtenido a través de las metodologías de cálculos presentadas en el Capítulo II. Las metodologías que se utilizan para la realización de estos cálculos son:

- **La metodología del cálculo de la eficiencia térmica de la Norma Europea.**

- **Balance del Método Directo.**

Pasos para la realización del Método Directo.

1. Cálculo del Calor útil ( $Q_U$ ).
2. Cálculo del Calor específico inferior del combustible ( $Q_i^P$ ).
3. Cálculo de la Capacidad térmica específica del combustible ( $C_c$ ).
4. Cálculo del Calor disponible ( $Q_d$ ).
5. Cálculo de la Eficiencia Térmica del Método Directo ( $\eta$ ).

- **Balance del Método Indirecto.**

Pasos para la realización del Método Indirecto.

1. Cálculo de la Cantidad de aire teórico ( $V^0$ )
2. Cálculo del Volumen total real de gases triatómicos ( $V_{RO_2}$ ).
3. Cálculo del Volumen total teórico del nitrógeno ( $V^0_{N_2}$ ).
4. Cálculo del Volumen total teórico del vapor de agua ( $V^0_{H_2O}$ ).
5. Cálculo de los Volúmenes de los productos de la combustión ( $V_g^0$ ).
6. Cálculo del Volumen real de gases ( $V_g$ ).
7. Cálculo del exceso de aire ( $\alpha$ ).
8. Cálculo de la entalpía total de los productos de combustión ( $I_g$ ).
9. Cálculo de las pérdidas térmica.
10. Cálculo de la Eficiencia Térmica del Método Indirecto ( $\eta$ ).

- **Cálculos del rendimiento exergetico.**
  - Cálculo de la exergía de vapor.
  - Cálculo de la exergía de agua.
  - Cálculo de la exergía del combustible.
  
- **Cálculo del Factor de carga.**
  - Tiempo de trabajo del quemador de la caldera en un día (h).
  - Tiempo total de trabajo del generador en un día (h).
  
- **Cálculo del exceso de temperatura.**
  - Temperatura real de los gases de salida (°C ).
  - Temperatura de vapor saturado + 60 °C (°C).

### 3.1.-Resultados del Balance térmico de las calderas en los distintos centros aplicando los Métodos Directo e Indirecto.

- **Tabla 3.1- Resultados del Método Directo.**

Símbolos	Unidades	5 de Septiembre (Combustible Diesel).	Escuela Formadora de Maestros (Fuel-Oil).	Comedor Escolar (Combustible Diesel).
$Q_U$	$kJ/kg$	35021	25361,13	32365,5
$Q_i^P$	$kJ/kg$	42621,61	40005,13	42621,61
$C_c$	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$	1,80	2,11	1,80
$i_c$	$kJ/kg$	45	317	45
$Q_d$	$kJ/kg$	42666,61	40322,13	42666,61
$\eta$	%	82	63	76

• **Método Indirecto**

**Tabla 3.2- Resultados de los volúmenes de los productos de la combustión.**

Símbolos	Unidades	Combustible Diesel.	Combustible Fuel-Oil.
$V^0$	$m^3 N/kg$	11,11	10,45
$V_{RO_2}$	$m^3 N/kg$	1,63	1,59
$V^0_{N_2}$	$m^3 N/kg$	8,78	8,26
$V^0_{H_2O}$	$m^3 N/kg$	1,69	1,52
$V_g^0$	$m^3 N/kg$	12,1	11,33
$V_g$	$m^3 N/kg$	13,53	12,68

**Tabla 3.3- Resultados de las entalpías de los productos de la combustión.**

Símbolos	Unidades	5 de Septiembre (Temp de los gases a salida 175 °C)	Escuela Formadora de Maestros (Temp de los gases a salida 400 °C )	Comedor Escolar (Temp de los gases a salida 350 °C)
$I_g^0$	$kJ/kg$	3150,9	6516,32	6041,04
$I_{a28^0c}^0$	$kJ/kg$	1483,2	1395,08	1483,2
$I_a^0$	$kJ/kg$	2768,1	5664	5249,47
$I_g$	$kJ/kg$	3496,9	7225	6697,22

**Tabla 3.4- Resultados de las pérdidas térmicas. La eficiencia del Método Indirecto y el error entre los dos Métodos.**

Símbolos	Unidades	5 de Septiembre (Temp de los gases a salida 175 °C)	Escuela Formadora de Maestros (Temp de los gases a salida 400 °C )	Comedor Escolar (Temp de los gases a salida 350 °C)
$q_2$	%	4,28	14,03	11,79
$q_3$	%	0,5	0,5	0,5
$q_4$	%	0	0	0
$q_5$	%	6	14,34	4
$q_6$	%	0	0	0

$\Sigma q_p$	%	10,78	28,87	16,29
$\eta$	%	89	71,13	83,71
<i>error</i>	%	7	8,13	7,71

### 3.2.-Análisis de las pérdidas y las variables adimensionales.

- **Pérdidas por calor sensible.**

Las pérdidas por calor sensible en los tres centros, son superiores al 11 %, lo que ratifica lo expuesto en los parámetros anteriores con respecto a las potencialidades de energía disponible.

- **Pérdidas por radiación.**

Las pérdidas por radiación en los tres centros en las calderas evaluadas son superiores al 6%. Este resultado se justifica por el bajo factor de carga con que trabajan estas calderas por lo que guardan una relación directa con esta pérdida.

- **Pérdida por incombustión química.**

Esta pérdida por incombustión química varía de 0,2 a 0,8% en los análisis de gases efectuados, el contenido de CO oscilaba de 0,1 a 1,5%.

- **Rendimiento térmico.**

Los resultados obtenidos en la determinación del rendimiento térmico aplicando los métodos Directo e Indirecto en el Tecnológico 5 de Septiembre y el Comedor Escolar, tienen valores superiores de 75 % y 80%. En el caso de la Escuela Formadora de Maestros aplicando los mismos Métodos los valores son de 63 y 71,13% respectivamente. Entre ambos Métodos los errores oscilan entre 7 y 9%.

### 3.3.-Resultados del Rendimiento Exergético en los distintos centros ya analizados.

Tabla 3.5- Resultados de las exergías de las sustancias en flujo y el Rendimiento Exergético.

Símbolos	Unidades	5 de Septiembre (Combustible Diesel).	Escuela Formadora de Maestros (Combustible Fuel-Oil).	Comedor Escolar (Combustible Diesel).
$e_v$	$kJ/kg$	746,07	746,07	746,07
$E_v$	$kW$	58,02	51,81	103,62
$e_{aa}$	$kJ/kg$	21,84	7,17	0,71
$E_{aa}$	$kW$	1,95	0,49	0,10
$E_{com}$	$kW$	237,04	276,65	474,07
$\eta_{Exergetico}$	%	23,65	18,55	21,84

Los resultados obtenidos en la determinación del rendimiento exergético son muy bajas en estas calderas ya que la irreversibilidad es provocada por la diferencia de la temperatura de los gases y el agua.

### 3.4.-Resultados de los cálculos del factor carga y exceso de temperatura.

Tabla 3.6- Resultados del factor de carga y el exceso de temperatura por los dos días de control.

Parámetros	5 de Septiembre (Combustible Diesel).	Escuela Formadora de Maestros (Combustible Fuel-Oil).	Comedor Escolar (Combustible Diesel).
Factor de carga	$\varphi = 0,55$	$\varphi = 0,73$	$\varphi = 0,42$
Factor de carga	$\varphi = 0,44$	$\varphi = 0,62$	$\varphi = 0,69$
Exceso de Temp	$\varphi = 0,80$	$\varphi = 1,83$	$\varphi = 1,60$
Exceso de Temp	$\varphi = 1,19$	$\varphi = 2,06$	$\varphi = 1,65$

En los resultados del factor de carga se observa que las instalaciones del Tecnológico 5 de Septiembre y el Comedor Escolar tienen un sobredimensionamiento alrededor de un 40% lo que corrobora que las condiciones de trabajo actualmente no se corresponden con los diseños realizados para estos centros, lo que indica una mala distribución de las calderas en función de la demanda. Esto repercute en gran medida en la pérdida por radiación y hace que se incremente sensiblemente el costo de producción de vapor. En el caso de la Escuela Formadora de Maestros se observa por algunos momentos del día que el factor de carga varía, lo que demuestra que en esos casos la caldera trabaja con sobredimensionamiento parcial.

Los resultados del exceso de temperatura en las calderas analizadas demuestran que los valores de trabajo se corresponden con los rangos de operación recomendados en este tipo de instalaciones. Se observa que las calderas tienen un exceso de temperatura entre 0,8 y 2,06, esto indica la potencialidad térmica en los gases de escape en las calderas evaluadas.

### **3.5.-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 2008. 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 la temperatura de los gases a la salida ( $T_{gs}$ ), presión de vapor ( $P_{vapor}$ ), temperatura del agua de alimentación ( $T_{aa}$ ), producción del vapor ( $Prod_{vapor}$ ), flujo de combustible ( $F_{com}$ ) y la capacidad nominal de las calderas. La salida de la red es la pérdida por calor sensible ( $q_2$ ) y la eficiencia térmica aplicando el Método Indirecto que están determinados por los parámetros operacionales anteriormente mencionados.

Para el diseño de la red se toma como criterio la selección de un número de neuronas en la primera capa y en la última capa igual al número de variables de entrada y salida respectivamente. El número de neuronas de la capa oculta se selecciona de acuerdo al comportamiento de la red durante el entrenamiento y determina la arquitectura final de la red seleccionada como se verá en el epígrafe 3.6.

La función transferencia de las neuronas de la primera y segunda 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 tomados durante el funcionamiento de las calderas ya analizadas y datos de otras investigaciones anteriores (ver Anexos 11 y 12). Estos valores fueron normalizados a su valor máximo. 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 T.g.s.N, P.vapor N, T.aaN, Prodvap N, Fcomb N y Capacidad Nominal N, los cuales son importados al espacio de trabajo del Matlab. La versión del Matlab utilizada selecciona automáticamente un 70% de los datos para el entrenamiento de la red, un 15% para su validación y el 15% restante para prueba.

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

- **Función de entrenamiento.**

Los algoritmos de entrenamiento basados en el gradiente descendente son a menudo lentos para los problemas prácticos por lo que se selecciona un algoritmo basado en técnicas heurísticas (relisient backpropagation, TRAINRP) que aunque necesita un poco más de memoria, es mucho más rápido.

- **Función de comportamiento.**

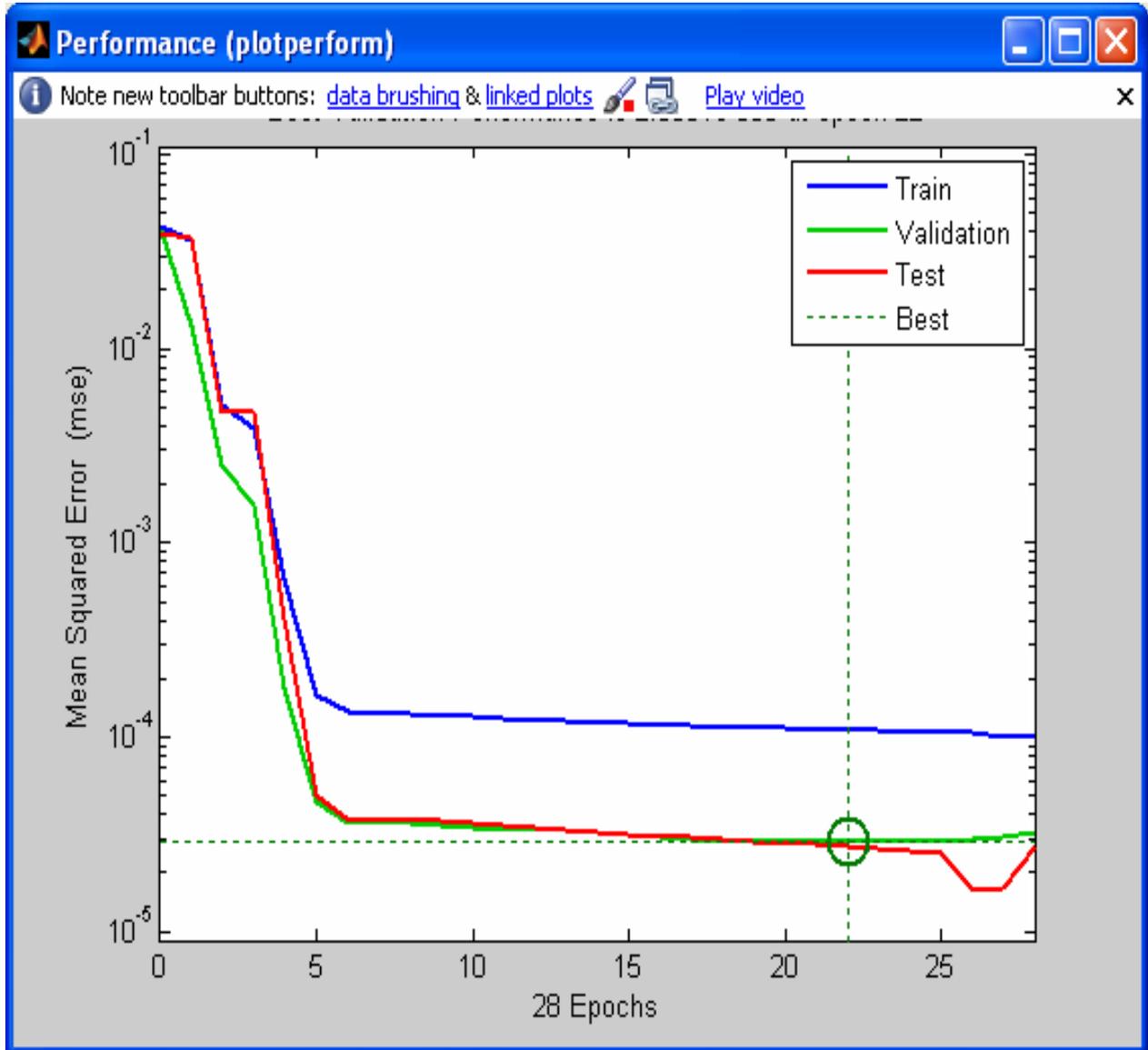
La función de comportamiento empleada es la MSERG. Esta es una función disponible en el Toolbox de redes neuronales del Matlab y consiste en una modificación del error medio cuadrático (MSE) al cual se le adiciona un término que es proporcional a la suma de los cuadrados de los pesos. Esta técnica se conoce como regularización y tiene como propósito mejorar la generalización de la red.

Las características del comportamiento de la red durante el entrenamiento para las calderas pirotubulares de combustible diesel y fuel-oil se muestran en las **Figuras 3:6 y 3:8** respectivamente. En estas figuras la curva en color rojo se corresponde con el comportamiento de la red para el conjunto de datos de prueba, la curva en color azul para el conjunto de datos de entrenamiento y la curva verde es la validación de los

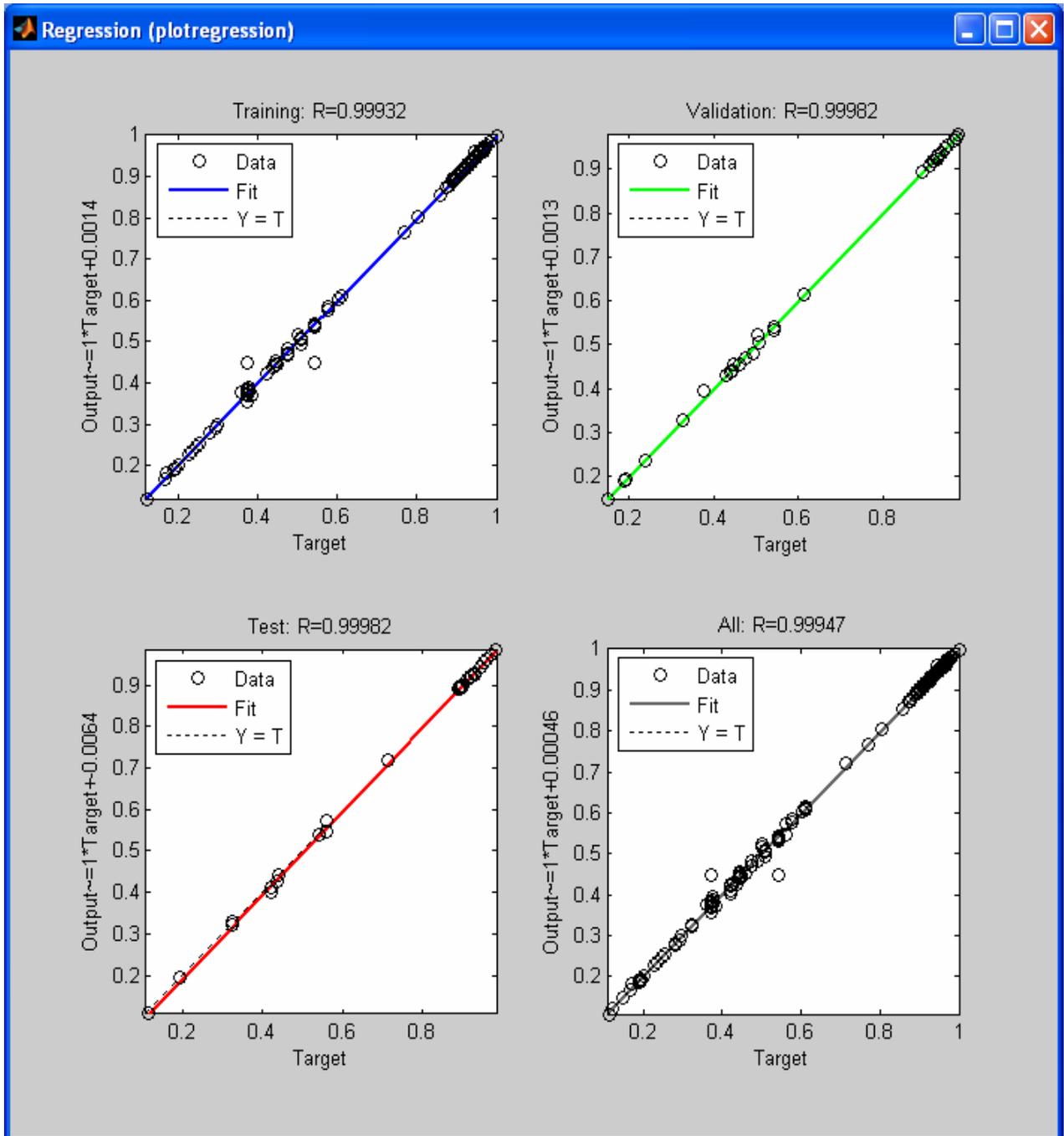
datos. Como puede apreciarse, en los tres casos el perfil de las curvas de prueba y la validación sigue al de entrenamiento con un valor de comportamiento similar por lo que la red generaliza muy bien los resultados.

El error medio obtenido es de  $6,45 \cdot 10^{-6}$  para la red que modela en la caldera de combustible diesel y de  $3,36 \cdot 10^{-7}$  para la red que modela en la caldera de combustible Fuel-oil.

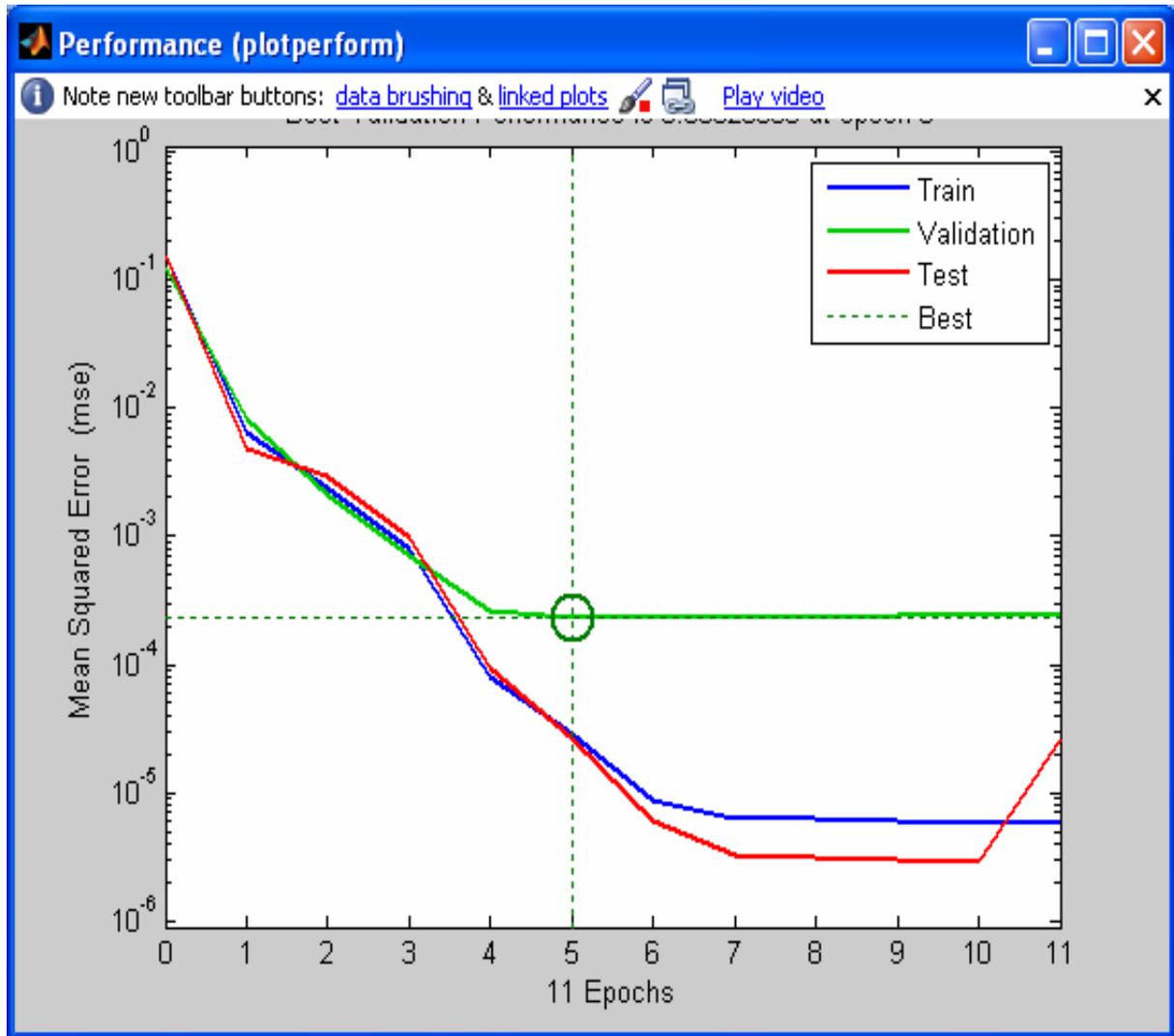
El análisis post-entrenamiento se realiza correlacionando los resultados que brinda la red como salida con los datos empleados como objetivos. Con esta regresión se comprueba la calidad de la red y los resultados se muestran en las **Figuras 3:7** y **3:9** para las RNA de las calderas Diesel y Fuel-Oil respectivamente. De estas figuras se puede observar que en ambos casos los coeficientes de correlación son cercanos a 1 lo que demuestra que la red reproduce correctamente la metodología de cálculo utilizada.



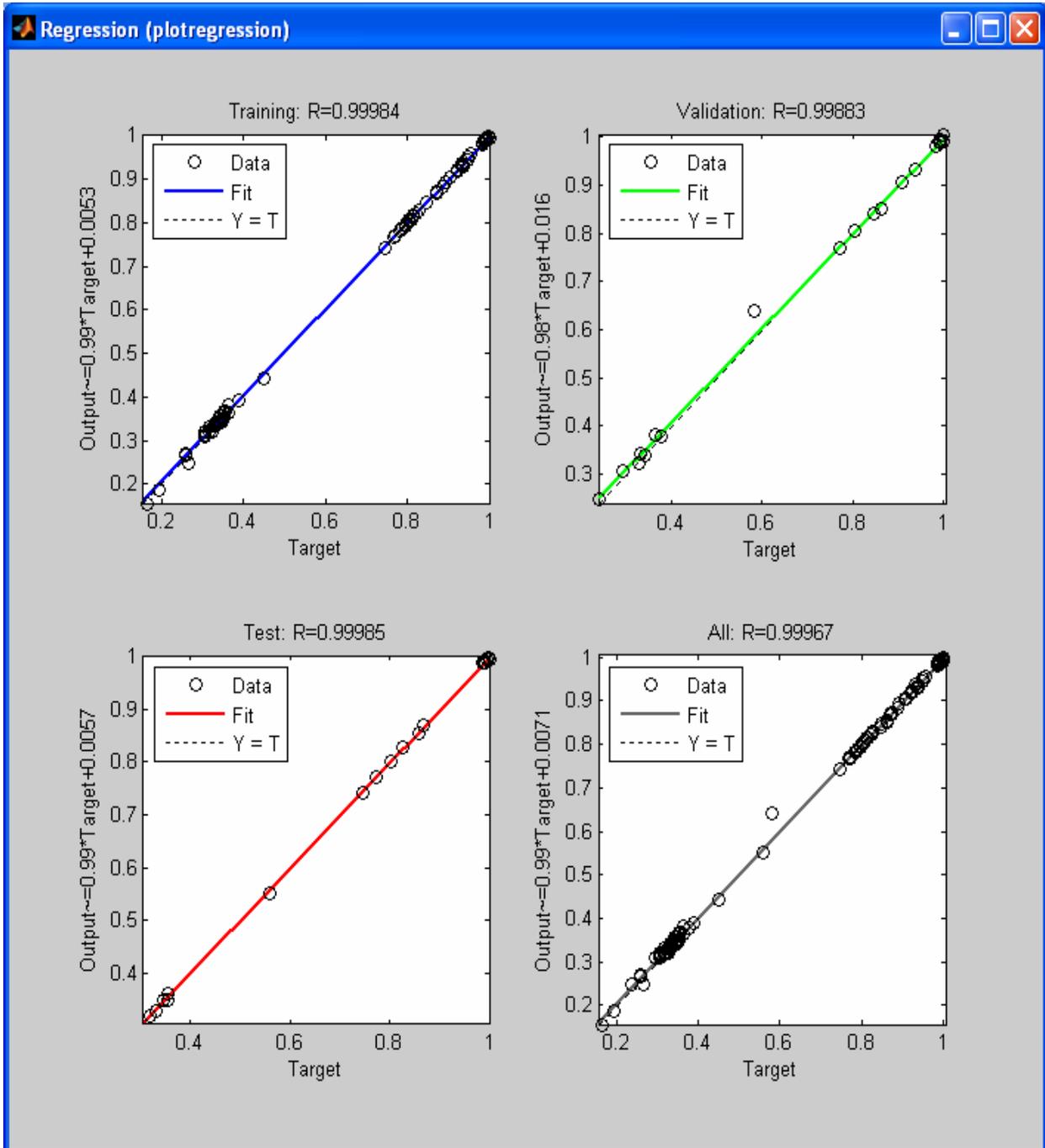
**Figura 3:6-**Comportamiento del entrenamiento de la RNA para la Caldera de combustible Diesel.



**Figura 3:7-** Resultados de la regresión para la RNA para la Caldera de combustible Diesel.



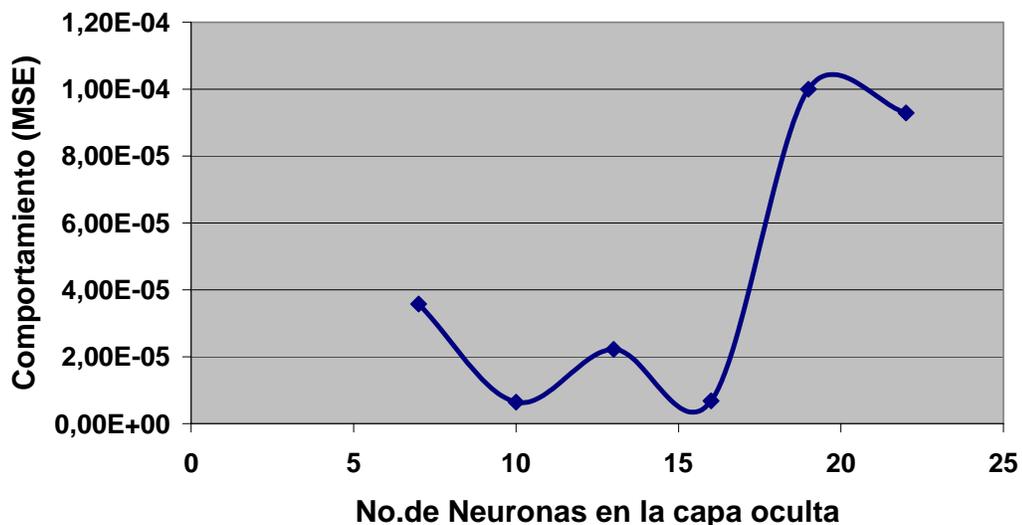
**Figura 3:8-** Comportamiento del entrenamiento de la RNA para la Caldera de combustible Fuel-Oil.



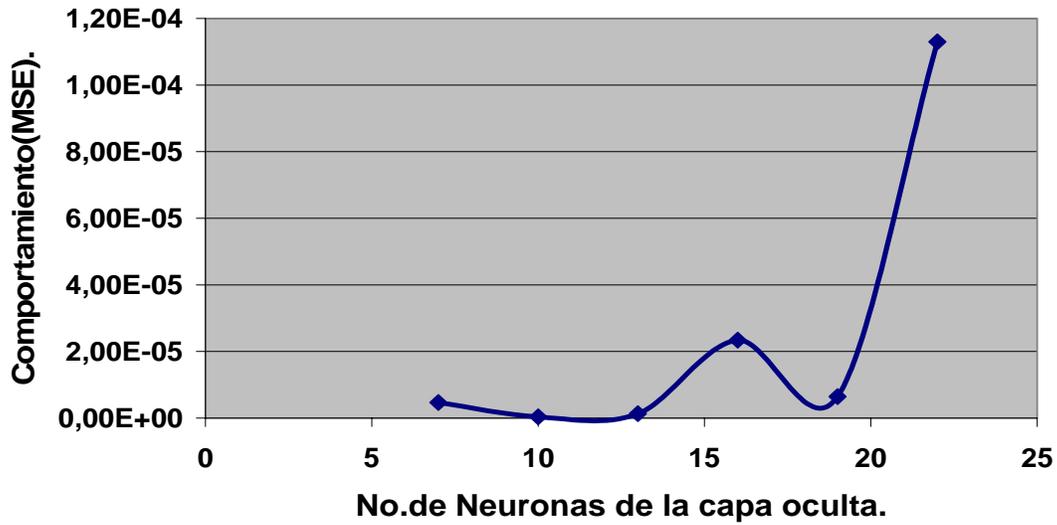
**Figura 3:9-** Resultados de la regresión para la RNA para la Caldera de combustible Fuel-Oil.

### 3.6.- Selección de la arquitectura de la RNA.

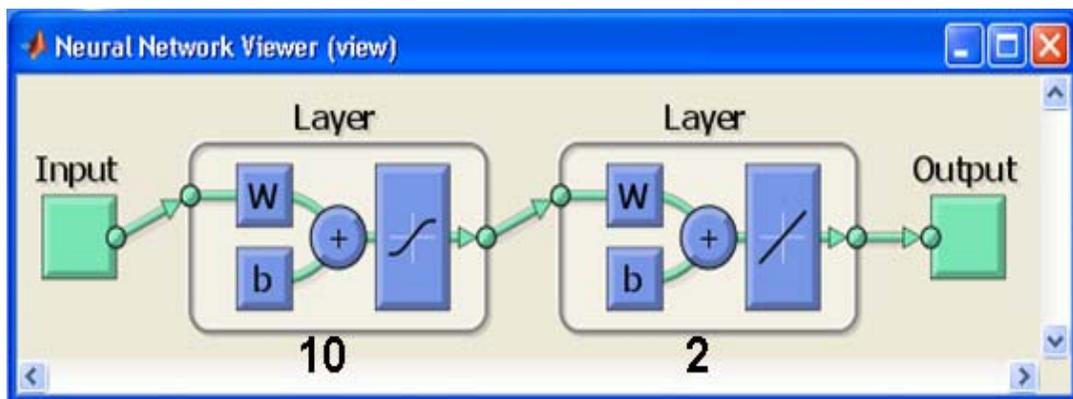
Seleccionar el número adecuado de neuronas de la capa oculta es un aspecto importante y para ello se entrenó la red variando el número de estas y manteniendo los demás parámetros de diseño constantes. El entrenamiento se realizó para 200 épocas variando el número de neuronas de la capa oculta (n). Las Figuras 3:10 y 3:11 muestran el comportamiento; MSE, como función del número de neuronas ocultas. Se puede observar que el comportamiento se logra para la caldera de combustible Diesel con 10 neuronas en la capa oculta y para la caldera de combustible Fuel-Oil con 10 también, razón por la cual se ha escogido como arquitectura 10-2. Con el propósito de su posterior identificación dentro del algoritmo desarrollado en lo adelante las redes se denominarán **net\_diesel** y **net\_fueloil** correspondientes a las calderas diesel y fuel-oil respectivamente.



**Figura 3:10-** Optimización del número de neuronas de la capa oculta para caldera de combustible Diesel. Arquitectura: 10-2, épocas: 200.



**Figura 3:11-** Optimización del número de neuronas de la capa oculta para caldera de combustible Fuel-Oil. Arquitectura: 10-2, épocas: 200.



**Figura 3:12-** Arquitectura de la red neuronal de dos capas.

### 3.7.- Código del programa en MATLAB 2008

- Código del programa en MATLAB 2008 para las calderas de combustible Diesel.

```
%Programa para el cálculo de q2 y la eficiencia por el método indirecto para
caldera de combustible diesel
% mediante un modelo neuronal.
clc
fprintf('PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR CALOR SENSIBLE\n');
fprintf('          Y LA EFICIENCIA EN CALDERAS PIROTUBULARES          \n');
fprintf('*****\n');
fprintf('DATOS DE ENTRADA\n');
Tgases=input('Temperatura de los gases de salida, °C, Tgases=');
Pvapor=input('Presión de vapor,MPa, Pvapor=');
TAa=input('Temperatura del agua de alimentar,°C, Taa=');
Prod=input('Producción de vapor real,kg/hr, Prod=');
Fcomb=input('Flujo de combustible,kg/hr, Fcomb=');
Cap=input('Capacidad nominal de la caldera,kg/hr, Cap=');

%Normalizar datos y crear vector de entrada
Ent=[Tgases/380; Pvapor/9.5; TAa/80; Prod/500; Fcomb/40; Cap/660];

%Simular la red.
salida=sim(netq2,Ent);

%Cálculo de la eficiencia y pérdidas por calor sensible
q2=salida(1)* 13.19;
Efic=salida(2)* 93.5;
disp('*****');
disp('RESULTADOS')
disp('*****');
fprintf('El porcentaje de pérdidas por calor sensible es = %8.4f\n',q2);
fprintf('La eficiencia estimada en porcentaje es = %8.4f\n',Efic);
```

- **Código del programa en MATLAB 2008 para las calderas de combustible Fuel-Oil.**

```
%Programa para el cálculo de q2 y la eficiencia por el método indirecto para
caldera de combustible Fuel-oil
% mediante un modelo neuronal.
clc
fprintf('PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR CALOR SENSIBLE\n');
fprintf(' Y LA EFICIENCIA EN CALDERAS PIROTUBULARES DE FUEL OIL \n');
fprintf('*****\n');
fprintf('DATOS DE ENTRADA\n');
Tgases=input('Temperatura de los gases de salida, °C, Tgases=');
Pvapor=input('Presión de vapor,MPa, Pvapor=');
TAa=input('Temperatura del agua de alimentar,°C, Taa=');
Prod=input('Producción de vapor real,kg/hr, Prod=');
Fcomb=input('Flujo de combustible,kg/hr, Fcomb=');
Cap=input('Capacidad nominal de la caldera,kg/hr, Cap=');

%Normalizar datos y crear vector de entrada
Ent=[Tgases/500; Pvapor/8; TAa/61; Prod/719.2; Fcomb/59.93; Cap/4000];

%Simular la red.
salida=sim(net_fueloil,Ent);

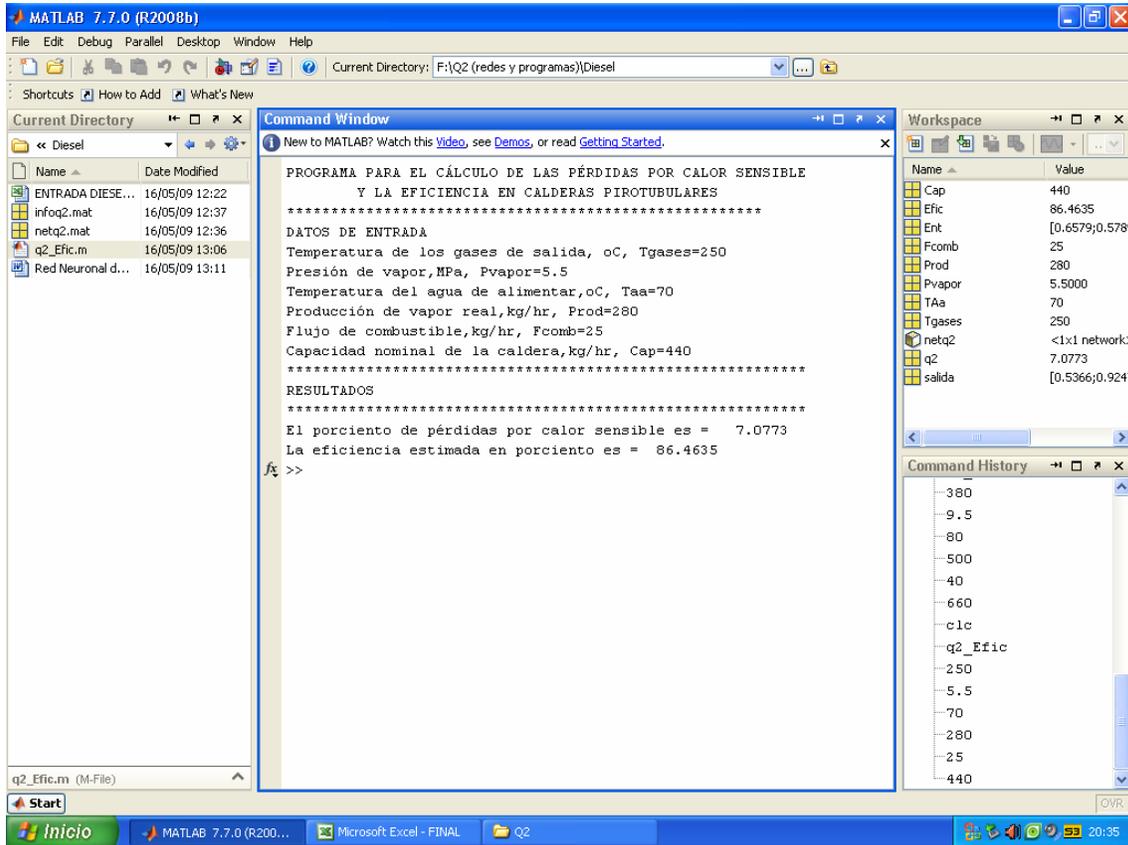
%Cálculo de la eficiencia y pérdidas por calor sensible
q2=salida(1)* 18.82;
Efic=salida(2)* 86;
disp('*****');
disp('RESULTADOS')
disp('*****');
fprintf('El porcentaje de pérdidas por calor sensible es = %8.4f\n',q2);
fprintf('La eficiencia estimada en porcentaje es = %8.4f\n',Efic);
```

**NOTA:** Los pesos, las polarizaciones y la arquitectura de cada RNA se muestran en los Anexos 17 y 18.

### 3.8.- Aplicación desarrollada.

La codificación mostrada en el epígrafe anterior corre sobre Matlab y solicita al usuario los datos de entrada necesarios para calcular con el modelo neuronal las pérdidas por calor sensible y la eficiencia de la caldera. En la **Figuras 3:13** y **3:14** se muestran las ventanas del Matlab durante una corrida de ejemplo para ambos casos.

**Ejemplo**



**Figura 3:13- Resultado de la programación para las calderas de combustible Diesel.**

PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR CALOR SENSIBLE  
Y LA EFICIENCIA EN CALDERAS PIROTUBULARES

\*\*\*\*\*

DATOS DE ENTRADA

Temperatura de los gases de salida, oC, Tgases=250  
 Presión de vapor,MPa, Pvapor=5.5  
 Temperatura del agua de alimentar,oC, Taa=70  
 Producción de vapor real,kg/hr, Prod=280  
 Flujo de combustible,kg/hr, Fcomb=25  
 Capacidad nominal de la caldera,kg/hr, Cap=440

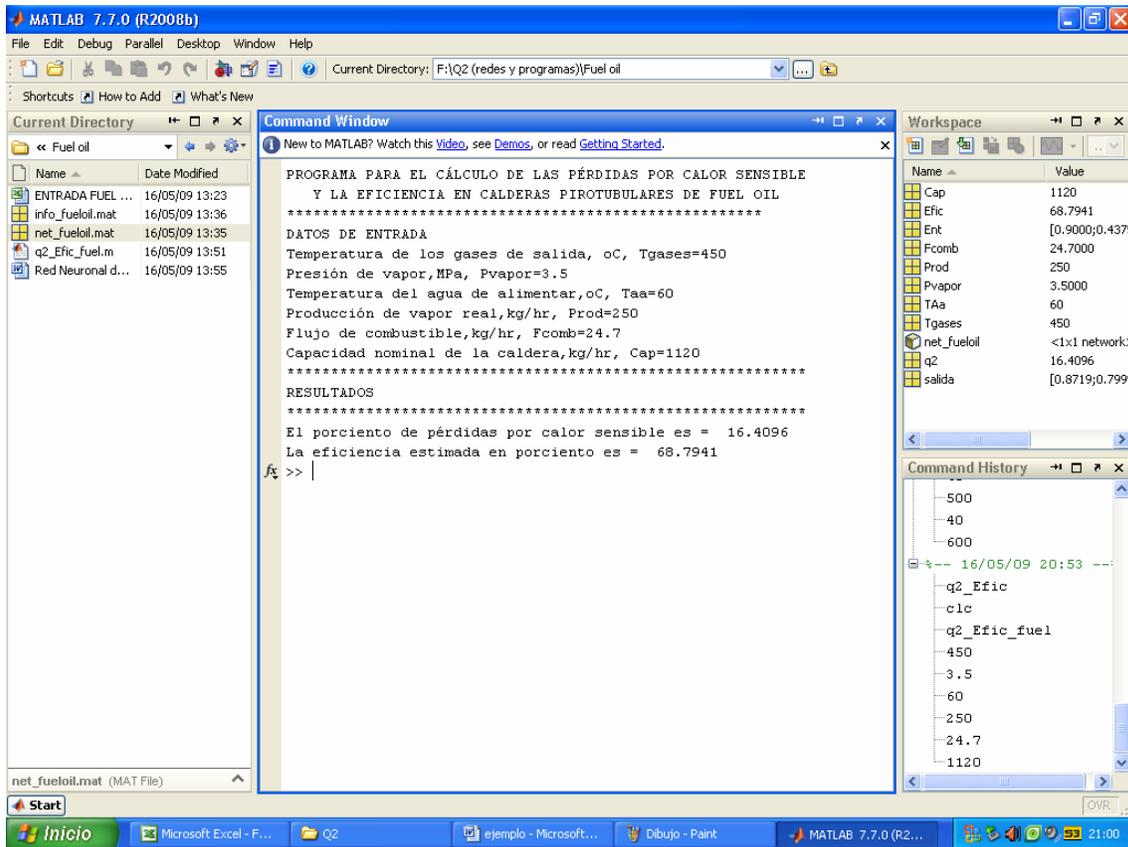
\*\*\*\*\*

RESULTADOS

\*\*\*\*\*

El porciento de pérdidas por calor sensible es = 7.0773  
 La eficiencia estimada en porciento es = 86.4635

## Ejemplo



**Figura 3:14- Resultado de la programación para las calderas de combustible Fuel-Oil.**

PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS POR CALOR SENSIBLE  
Y LA EFICIENCIA EN CALDERAS PIROTUBULARES DE FUEL OIL

```

*****
DATOS DE ENTRADA
Temperatura de los gases de salida, oC, Tgases=450
Presión de vapor,MPa, Pvapor=3.5
Temperatura del agua de alimentar,oC, Taa=60
Producción de vapor real,kg/hr, Prod=250
Flujo de combustible,kg/hr, Fcomb=24.7
Capacidad nominal de la caldera,kg/hr, Cap=1120
*****
RESULTADOS
*****
El porciento de pérdidas por calor sensible es = 16.4096
La eficiencia estimada en porciento es = 68.7941

```

### **3.9.- Conclusiones Parciales del Capítulo III**

1. La eficiencia promedio de estas calderas oscila entre 70,6 y 85,8 %, siendo la pérdida de mayor cuantía la pérdida por calor sensible en los gases de escape, en los centros analizados las calderas tienen valores superiores al 11 %, debido al elevado coeficiente de exceso de aire y al exceso de temperatura en los gases de escape. Le sigue, en orden de importancia, la pérdida por radiación y convección al medio circundante, que alcanza valores hasta del 14 % influenciada ésta por los bajos valores del factor de carga. Esto evidencia que para incrementar la eficiencia térmica de las calderas pirotubulares deben seguirse dos vías fundamentales:
  - A. Disminuir las pérdidas por calor sensible en los gases de escape de las calderas pirotubulares.
  - B. Reducir las pérdidas por radiación y convección al medio, mejorando fundamentalmente el factor de carga.
2. Los modelos obtenidos para el cálculo de la pérdida por calor sensible y el rendimiento termico de las calderas pirotubulares para los combustibles de Diesel y Fuel-Oil responden satisfactoriamente, y los resultados de la simulación se correlacionan con los datos experimentales con un  $R^2 > 0,999$  para ambos casos.

# *Capítulo* IV



## CAPÍTULO IV: VALORACIÓN TÉCNICO – ECONÓMICO DE LA PÉRDIDA EN DINERO POR LA PÉRDIDA DE CALOR SENSIBLE EN LAS CALDERAS.

### 4.1-Generalidades del costo.

La mayor parte de las inversiones, proyectos y medidas destinadas al mejor uso o al ahorro en procesos de transformación de la energía en la industria necesitan la solución de problemas que involucran restricciones, tanto científicas como económicas.

La combinación con los conceptos económicos se produce al establecer los precios de la energía disponible de todas las corrientes que intervienen en el proceso, determinado el precio de la energía disponible a partir de su costo de producción, el cual se calcula a través de las relaciones usuales de costo.

### 4.2.-Cálculo del dinero perdido con la influencia de la pérdida por calor sensible.

$$P_D = \frac{B_C \cdot Q_d \cdot \left( \frac{\sum q_p \%}{100} \right) \cdot \left( \frac{q_2 \%}{100} \right) \cdot c_c}{Q_i^p} ; \left[ \frac{\$}{h} \right] \quad (4.1)$$

Donde:  $P_D$  -Pérdida en dinero.

$B_C$  - Flujo de combustible.  $\left[ \frac{kg}{h} \right]$

$Q_d$  - Calor Disponible.  $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$

$Q_i^p$  - Poder calorífico o valor calórico inferior del combustible.  $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$

$\sum q_p$  - La sumatoria de las pérdidas térmicas. [%]

$q_2$  - Pérdidas de calor sensible con los gases de salida. [%]

$C_c$  - Costo del combustible.  $\left[ \frac{\$}{kg} \right]$

**Tabla 4.1- Pérdida de dinero por pérdida de calor sensible en el Tecnológico 5 de Septiembre.**

Tgs °C	$B_c$ kg/h	$Q_d$ kJ/kg	$Q_i^p$ kJ/kg	$\sum q_p$ %	$q_2$ %	$C_c$ \$/kg	$P_D$ \$/h
250	20	42666,61	42621,61	13,66	7,16	1	0,20
125	20	42666,61	42621,61	9,62	3,12	1	0,06
105	20	42666,61	42621,61	9,15	2,65	1	0,05
225	20	42666,61	42621,61	12,38	5,88	1	0,15
250	20	42666,61	42621,61	13,66	7,16	1	0,20
150	20	42666,61	42621,61	10,2	3,7	1	0,08
98	20	42666,61	42621,61	8,99	2,49	1	0,04
240	20	42666,61	42621,61	13,2	6,7	1	0,18
200	20	42666,61	42621,61	11,41	4,91	1	0,11
105	20	42666,61	42621,61	9,15	2,65	1	0,05
240	20	42666,61	42621,61	13,2	6,7	1	0,18
120	20	42666,61	42621,61	9,5	3	1	0,06
220	20	42666,61	42621,61	12,29	5,79	1	0,14
245	20	42666,61	42621,61	13,11	6,61	1	0,17
105	20	42666,61	42621,61	9,15	2,65	1	0,05
230	20	42666,61	42621,61	12,75	6,25	1	0,16
175	20	42666,61	42621,61	10,78	4,28	1	0,09

**Tabla 4.2- Pérdida de dinero por pérdida de calor sensible en la Escuela Formadora de Maestros.**

Tgs °C	$B_c$ kg/h	$Q_d$ kJ/kg	$Q_i^p$ kJ/kg	$\sum q_p$ %	$q_2$ %	$C_c$ \$/kg	$P_D$ \$/h
450	24,7	40322,13	40005,13	31,27	16,43	1	1,28
455	24,7	40322,13	40005,13	31,51	16,67	1	1,31
450	24,7	40322,13	40005,13	31,27	16,43	1	1,28
500	24,7	40322,13	40005,13	33,66	18,82	1	1,58
500	24,7	40322,13	40005,13	33,66	18,82	1	1,58
480	24,7	40322,13	40005,13	32,7	17,86	1	1,45
470	24,7	40322,13	40005,13	32,22	17,38	1	1,39
500	24,7	40322,13	40005,13	33,66	18,82	1	1,58
500	24,7	40322,13	40005,13	33,66	18,82	1	1,58
225	24,7	40322,13	40005,13	20,81	5,97	1	0,31
410	24,7	40322,13	40005,13	29,27	14,43	1	1,05
280	24,7	40322,13	40005,13	23,29	8,45	1	0,49
360	24,7	40322,13	40005,13	25,77	10,93	1	0,70
475	24,7	40322,13	40005,13	32,46	17,62	1	1,42
220	24,7	40322,13	40005,13	20,58	5,74	1	0,29

190	24,7	40322,13	40005,13	19,87	5,03	1	0,25
200	24,7	40322,13	40005,13	19,71	4,87	1	0,24

**Tabla 4.3- Pérdida de dinero por pérdida de calor sensible en el Comedor Escolares.**

Tgs °C	$B_c$ kg/h	$Q_d$ kJ/kg	$Q_i^p$ kJ/kg	$\sum q_p$ %	$q_2$ %	$C_c$ \$/kg	$P_D$ \$/h
350	40	42666,61	42621,61	16,28	11,78	1	0,77
345	40	42666,61	42621,61	16,05	11,55	1	0,74
350	40	42666,61	42621,61	16,28	11,78	1	0,77
195	40	42666,61	42621,61	9,25	4,75	1	0,18
350	40	42666,61	42621,61	16,28	11,78	1	0,77
190	40	42666,61	42621,61	9,57	5,07	1	0,19
360	40	42666,61	42621,61	16,75	12,25	1	0,82
315	40	42666,61	42621,61	14,64	10,14	1	0,59
240	40	42666,61	42621,61	11,2	6,7	1	0,30
380	40	42666,61	42621,61	17,69	13,19	1	0,93
210	40	42666,61	42621,61	9,46	4,96	1	0,19
350	40	42666,61	42621,61	16,28	11,78	1	0,77
215	40	42666,61	42621,61	10,07	5,57	1	0,22
200	40	42666,61	42621,61	9,41	4,91	1	0,19
200	40	42666,61	42621,61	9,41	4,91	1	0,19
250	40	42666,61	42621,61	11,66	7,16	1	0,33
300	40	42666,61	42621,61	13,93	9,43	1	0,53

#### 4.3.-Conclusiones Parciales del Capítulo IV.

1. En la evaluación termo-económica de las calderas para las condiciones evaluadas con combustible Fuel oil y Diesel se obtiene que en el rango de un aumento de la temperatura de los gases de salida entre 12 y 16 °C, la pérdida de calor sensible ( $q_2$ ) aumenta aproximadamente en 1 %. Cuando la temperatura de los gases de escape aumenta, se pueden ver en las tablas anteriores que la pérdida del dinero en \$/h aumenta, con respecto al porcentaje de la pérdida por calor sensible, influenciado por los periodos de parada del quemador y el sobredimensionamiento de estas instalaciones.
2. Con las calderas piro-tubulares que trabajan con combustible Diesel, cuando la temperatura de los gases de escape es 380°C, la pérdida por calor sensible es 6,7%

y ese porcentaje de pérdida por calor sensible, representa una pierde de dinero de 0,99\$/h.

*Conclusiones Generales*



**CONCLUSIONES GENERALES.**

1. En la evaluación realizada en las calderas pirotubulares de tres centros del Sector de Educación de la Provincia de Cienfuegos se destacan como resultado de su caracterización los factores de mayor incidencia en la eficiencia térmica los siguientes:
  - La elevada temperatura de salida de los gases de escape.
  - El bajo factor de carga con que trabaja estas calderas.
  - Estado de las superficies de transferencia de calor.
2. La eficiencia promedio de estas calderas oscila entre 70,6 y 85,8 %, siendo la pérdida de mayor cuantía la pérdida por calor sensible en los gases de escape, en los centros analizados las calderas tienen valores superiores al 11 %, debido al exceso de temperatura en los gases de escape y el sobredimensionamiento. Le sigue, en orden de importancia, la pérdida por radiación y convección al medio circundante, que alcanza valores hasta del 14 % influenciada ésta por los bajos valores del factor de carga.
3. La elevada pérdida por calor sensible en los gases de escape, superior al 11% en los centros estudiados, indican que existe un significativo potencial de ahorro disponible. El análisis de la factibilidad de aplicación de las vías existentes para disminuir esta pérdida señala como vías a implementar en las calderas pirotubulares instaladas en Cuba.
  - La intensificación de la transferencia de calor.
  - La recuperación de calor de los gases de escape.
4. Los valores de pérdidas por calor sensible y eficiencia pueden ser obtenidos simultáneamente a partir de redes neuronales artificiales diseñadas y entrenadas al efecto. Los resultados son similares a los obtenidos por la metodología de cálculo indirecto, pero requiere menor esfuerzo e información.
5. Para los cálculos de la pérdida por calor sensible y el rendimiento térmico en las calderas pirotubulares, utilizando redes neuronales, solo se necesitan algunos parámetros del funcionamiento como la temperatura de los gases a la salida (Tgs),

## *Conclusiones Generales*

presión de vapor ( $P_{vapor}$ ), temperatura del agua de alimentación ( $T_{aa}$ ), producción del vapor ( $Prod_{vapor}$ ), flujo de combustible ( $F_{com}$ ) y la capacidad nominal de las calderas.

6. Los modelos obtenidos para el cálculo de la pérdida por calor sensible y el rendimiento térmico de las calderas pirotubulares para los combustibles de Diesel y Fuel-Oil son precisos ya que sus resultados se correlacionan con los datos experimentales con un  $R > 0,999$  para ambos casos.

*Recomendaciones*



## **RECOMENDACIONES.**

A partir de los resultados de este trabajo se recomienda lo siguiente:

1. Realizar una valoración de la capacidad instalada en las calderas de los centros analizados con el objetivo de seleccionar las nuevas calderas con los parámetros de explotación.
2. Generalizar el algoritmo desarrollado a otras empresas del Alastor para mejorar sus indicadores energéticos.
3. Aplicar el resultado de esta investigación de manera inmediata como una herramienta en la operación, para hacer un análisis rápido de las calderas pirotubulares.
4. Continuar las investigaciones y ampliar el universo de datos para obtener modelos basados en RNA con los cuales se obtengan todas las pérdidas que se producen durante la explotación de la caldera.

# *Referencia Bibliográfica*



**REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.**

1. Calderas Piro tubulares. Available at: <http://www.babcock-wanson.es>
2. Alonso González, Adrián, 2007 Caracterización del Sobredimensionamiento de las Calderas en el Sector de la Salud en Cienfuegos.
3. Garay Pérez, Ing. Luis, 1972 Generadores de vapor. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
4. Diferentes tipos de Calderas. Available at: <http://www.conae.gob.mx>
5. Lapido Rodríguez, MSc Margarita, 1988. Incremento de la eficiencia térmica operacional en calderas piro tubulares. p. 16 - 25.
6. Arias Rodríguez, Daniel Abelardo, 2000. Teoría y práctica de los procesos de combustión. Combustibles sólidos.

# *Bibliografía*



**BIBLIOGRAFÍA.**

Borroto Nordel, Aníbal E; Borroto Bermúdez, Aníbal J , 2000. *Ahorro de Energía en la Generación y Distribución del Vapor*, Cienfuegos: Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez".

Alonso González, Adrián, 2007. Caracterización del Sobredimensionamiento de las Calderas en el Sector de la Salud en Cienfuegos.

Arias Rodríguez, Daniel Abelardo, 2000. Teoría y práctica de los procesos de combustión. Combustibles sólidos.

Demuth, H; Beale, M., 1998. *Neural network toolbox for use with*, Estados Unidos: Matlab. User's Guide.

Díaz Pérez, Edilio., 1997. Valoración Técnico-Económico de la sala de Calderas de la Universidad De Cienfuegos.

2009a. Calderas de Tubo de Fuego. Available at: <http://www.monografias.com>.

2009b. Cálculo del costo de producción de vapor. Available at: <http://www.infomipyme.com>.

2009c. Cálculo del costo de producción de vapor. Available at: <http://www.conae.gob.mx>.

2009d. Calderas de vapor. Available at: <http://ohm.utp.edu.co>.

2009e. Calderas. Available at: <http://ohm.utp.edu.co>.

2009f. Calderas de Vapor. Available at: <http://www.fimaco.com>.

2009g. Calderas de vapor saturado., Available at: <http://www.calderastandard.es>.

2009h. Calderas pirotubular para combustibles líquidos.

2009i. Calderas Pirotubulares. Available at: <http://www.babcock-wanson.es>.

2009j. Calderas. . Available at: <http://www.caloryfrio.com>.

2009k. Diferentes tipos de Calderas. Available at: <http://www.conae.gob.mx>.

2009l. Evaluaciones Técnica-Económica en una cadera pirotubular. Available at: <http://www.fao.org>.

2009m. Funcionamiento en las calderas Pirotubulares. Available at: <http://www.ergoprojects.com>,

- 2009n. Generalidades de las pérdidas en las calderas. . Available at: <http://es.wikipedia.org>.
- 2009o. Partes de una caldera Piro tubular. . Available at: <http://html.rincondelvago.com>.
- 2009p. Pérdida por calor sensible en una caldera piro tubular. . Available at:  
<http://books.google.com.cu>.
- 2009q. Pérdidas en las calderas piro tubulares. . Available at: <http://nzdl.sadl.uleth.ca>.
- 2009r. Pérdidas por gases de escape en una caldera piro tubular. Available at: <http://www.lamec-pellets.com>.
- 2009s. Red neuronales aplicando inteligencia artificial. Available at:  
<http://www.gamarod.com.ar>.
- 2009t. Red neuronales artificia. . Available at: <http://ohm.utp.edu.co>.
- 2009u. Red neuronales artificial. . Available at: <http://es.wikipedia.org>.
- 2009v. Red neuronales. Available at: <http://www.aernsoft.com>.
- 2009w. Red neuronales. . Available at: <http://www.geofisica.cl>.
- 2009x. Tipos de calderas. Available at: <http://www.caballano.com>.
- Garay Pérez, Ing. Luis, 1972. *Generadores de vapor*, La Habana: Editorial Pueblo y Educación. .
- González Rubio, M Ángel., 1982. *Generadores de vapor. Funcionamiento y explotación*, Santa Clara.: MES.
- Halpin, S. M., Burch, R. F., 1997. Applicability of neural networks to industrial and commercial power systems: A tutorial overview. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 33(5), p.1355-1361.
- Keenan H Joseph., 1936. *Steam Tables, Thermodynamic Properties of Water Including Vapor, Liquid, and Solid Phases*, New York.
- Lapido Rodríguez, Margarita., 1997. Disminución del costo de producción del vapor en calderas piro tubulares. Reporte de Investigación publicado por la División de Ingeniería Energética.
- Lapido Rodríguez, MSc Margarita, 1988. Incremento de la eficiencia térmica operacional en calderas piro tubulares. , p.16 - 25.

*Anexos*



**Anexo: 01**

**Control de parámetros del funcionamiento de la caldera para el día 16 de marzo del 2009(Combustible Diesel).**

<b>Tecnológico 5 de Septiembre.</b>				
<b>Control de parámetros del funcionamiento de la caldera.</b>				
<b>Horario de Control</b>	<b>Temp. Gases de salida °C</b>	<b>Temp. del combustible °C</b>	<b>Presión del vapor (Bar)</b>	<b>Presión del combustible (kgf /cm<sup>2</sup>)</b>
7:20	250	25	5,5	15
7:30	125	25	6	10
7:40	105	25	6	10
7:50	98	25	5,5	10
8:00	75	25	4,5	10
8:10	225	25	4,2	15
8:20	250	25	5,1	15
8:30	150	25	6	10
8:40	98	25	4	10
8:50	240	25	4,5	15
9:00	200	25	6	15
9:10	105	25	4,3	10
9:20	240	25	5,3	15
9:30	120	25	5,5	10
9:40	220	25	4,2	15
9:50	245	25	5,7	15
10:00	105	25	4,5	10
10:10	230	25	5	15
10:20	175	25	6	10
10:30	105	25	5	10
10:40	215	25	4,5	15
10:50	240	25	6	15
11:00	100	25	4,8	10
11:10	150	25	4,2	15
11:20	235	25	5,8	15
11:30	105	25	4,5	10
11:40	175	25	4	15
11:50	230	25	5,3	15
12:00	160	25	6	10
12:10	100	25	4,5	10

**Anexo: 02**

**Control de parámetros del funcionamiento de la caldera para el día 26 de marzo del 2009(Combustible Diesel).**

<b>Tecnológico 5 de Septiembre.</b>				
<b>Control de parámetros del funcionamiento de la caldera.</b>				
<b>Horario de Control</b>	<b>Temp. Gases de salida °C</b>	<b>Temp. del combustible °C</b>	<b>Presión del vapor (Bar)</b>	<b>Presión del combustible (kgf /cm<sup>2</sup>)</b>
7:20	60	25	4	10
7:30	240	24	3	15
7:40	260	25	4,5	15
7:50	135	25	5,15	10
8:00	95	25	5	10
8:10	125	25	4	15
8:20	155	25	6	10
8:30	100	25	5	10
8:40	55	25	4	10
8:50	200	25	3,5	15
9:00	255	25	5,8	15
9:10	105	25	5,5	10
9:20	85	25	4	10
9:30	240	25	4,8	15
9:40	130	25	5,9	10
9:50	100	25	5,5	10

**Anexo: 03**

**Control de parámetros del funcionamiento de la caldera para el día 18 de marzo del 2009(Combustible Fuel-Oil).**

<b>Escuela Formadora de Maestros</b>				
<b>Control de parámetros del funcionamiento de la caldera.</b>				
<b>Horario de Control</b>	<b>Temp. Gases de salida °C</b>	<b>Temp. del combustible °C</b>	<b>Presión de vapor ( kgf /cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Presión del combustible (kgf /cm<sup>2</sup>)</b>
7:30	450	150	3,5	25
7:40	455	150	4	24
7:50	450	150	3,5	22
8:00	500	150	4	24
8:10	500	150	4	23
8:20	480	150	4	24
8:30	470	150	4	23
8:40	500	150	4,5	25
8:50	500	150	7	24
9:00	225	125	5	5
9:10	410	150	6,5	23
9:20	280	126	4,5	6
9:30	360	150	4,5	23
9:40	475	140	6,5	6
9:50	220	130	4,2	6
10:00	190	130	3,5	21
10:10	200	125	3	6

**Anexo: 04**

**Control de parámetros del funcionamiento de la caldera para el día 27 de marzo del 2009(Combustible Fuel-Oil).**

<b>Escuela Formadora de Maestros</b>				
<b>Control de parámetros del funcionamiento de la caldera.</b>				
<b>Horario de Control</b>	<b>Temp. Gases de salida °C</b>	<b>Temp. del combustible °C</b>	<b>Presión de vapor ( kgf /cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Presión del combustible (kgf /cm<sup>2</sup>)</b>
8:10	425	150	3	20
8:20	420	150	2,5	22
8:30	450	150	4	21
8:40	440	150	3,5	22
8:50	450	145	5,3	22
9:00	250	130	5,9	7
9:10	325	145	4,5	21
9:20	400	145	5,75	19
9:30	400	155	6,5	18
9:40	200	130	4	18
9:50	150	140	2	8
10:00	125	140	0	8
10:10	125	140	0	8
10:20	185	140	1,0	20
10:30	400	145	3	18
10:40	445	145	5,5	20
10:50	440	155	6	20
11:00	400	150	6,5	20
11:10	255	130	6,4	7

**Anexo: 05**

**Control de parámetros del funcionamiento de la caldera para el día 19 de marzo del 2009(Combustible Diesel).**

<b>Comedor Escolar</b>				
<b>Control de parámetros del funcionamiento de la caldera.</b>				
<b>Horario de Control</b>	<b>Temp. Gases de salida °C</b>	<b>Temp. del combustible °C</b>	<b>Presión de vapor ( kgf /cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Presión del combustible (Mpa)</b>
6:30	350	25	5,5	0,2
6:40	345	25	4,3	0,2
6:50	350	25	5,75	0
7:00	195	25	4,5	0
7:10	350	25	5,5	0,2
7:20	190	25	4,5	0
7:30	360	25	5,5	0,2
7:40	315	25	4,3	0,2
7:50	240	25	5,3	0
8:00	380	25	5,1	0,2
8:10	210	25	5	0
8:20	350	25	4,5	0,2
8:30	215	25	5,3	0
8:40	200	25	4,5	0
8:50	200	25	4,5	0
9:00	250	25	5	0
9:10	300	25	5	0,2

**Anexo: 06**

**Control de parámetros del funcionamiento de la caldera para el día 19 de marzo del 2009(Combustible Diesel).**

<b>Comedor Escolar</b>				
<b>Control de parámetros del funcionamiento de la caldera.</b>				
<b>Horario de Control</b>	<b>Temp. Gases de salida °C</b>	<b>Temp. del combustible °C</b>	<b>Presión de vapor ( kgf /cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Presión del combustible (Mpa)</b>
8:10	360	25	5,5	0,25
8:20	340	25	4,5	0,3
8:30	360	25	5,75	0,25
8:40	360	25	4,5	0,3
8:50	350	25	5,5	0,2
9:00	190	25	4,5	0
9:10	360	25	5,5	0,2
9:20	350	25	4,3	0,2
9:30	240	25	5,3	0
9:40	380	25	5,1	0,2

**Anexo: 07**

<b>Funcionamiento y Parada del Quemador en la Caldera (16 de marzo). Tecnológico 5 de Septiembre Primer día de Control.</b>			
<b>Hora de Arranque</b>	<b>Hora de Parada</b>	<b>Tiempo de Funcionamiento (minutos)</b>	<b>Tiempo de Parada (minutos)</b>
8:00:22	8:24:05	23:43	15:45
8:39:50	8:59:20	19:30	11:34
9:10:54	9:24:35	13:41	12:05
9:36:40	9:51:20	14:40	12:12
10:03:32	10:19:20	15:48	17:48
10:37:08	10:50:32	13:24	19:18
11:09:50	11:23:33	13:43	14:57
11:38:30	11:57:23	18:53	
<b>Total Tiempo ( minutos)</b>		<b>131:22</b>	<b>102:19</b>
<b>Tiempo total que trabaja la caldera por un día (Horas).</b>		<b>3:57:01</b>	

<b>Funcionamiento y Parada del Quemador en la Caldera (26 de marzo). Tecnológico 5 de Septiembre Segundo día de Control.</b>			
<b>Hora de Arranque</b>	<b>Hora de Parada</b>	<b>Tiempo de Funcionamiento (minutos)</b>	<b>Tiempo de Parada (minutos)</b>
7:23:26	7:45:40	22:14	22:22
8:08:02	8:18:59	10:57	29:11
8:48:10	9:01:45	13:35	22:01
9:23:46	9:36:38	12:52	
<b>Total Tiempo ( minutos)</b>		<b>58:58</b>	<b>13:34</b>
<b>Tiempo total que trabaja la caldera por un día (Horas).</b>		<b>2:13:12</b>	

**Anexo: 08**

<b>Funcionamiento y Parada del Quemador en la Caldera (18 de marzo). Escuela Formadora de Maestros Primer día de Control.</b>			
<b>Hora de Arranque.</b>	<b>Hora de Parada.</b>	<b>Tiempo de Funcionamiento (minutos)</b>	<b>Tiempo de Parada (minutos)</b>
7:28:30	8:49:05	80:35	11:18
9:00:23	9:14:22	13:59	10:28
9:24:50	9:38:50	14:00	18:20
9:57:10	10:00:03	2:53	
<b>Total Tiempo ( minutos)</b>		<b>110:47</b>	<b>39:66</b>
<b>Tiempo total que trabaja la caldera por un día (Horas).</b>		<b>2:31:33</b>	

<b>Funcionamiento y Parada del Quemador en la Caldera (27 de marzo). Escuela Formadora de Maestros Segundo día de Control.</b>			
<b>Hora de Arranque</b>	<b>Hora de Parada</b>	<b>Tiempo de Funcionamiento (minutos)</b>	<b>Tiempo de Parada (minutos)</b>
8:10:20	8:52:22	42:02	13:30
9:05:52	9:26:20	20:28	51:14
10:17:34	11:02:40	45:06	
<b>Total Tiempo ( minutos)</b>		<b>107:36</b>	<b>64:44</b>
<b>Tiempo total que trabaja la caldera por un día (Horas).</b>		<b>2:52:20</b>	

**Anexo: 09**

<b>Funcionamiento y Parada del Quemador en la Caldera (19 de marzo). Comedor Escolares Primer día de Control.</b>			
<b>Hora de Arranque.</b>	<b>Hora de Parada.</b>	<b>Tiempo de Funcionamiento (minutos)</b>	<b>Tiempo de Parada (minutos)</b>
6:25:10	6:32:26	7:16	5:01
6:37:27	6:49:11	11:44	11:54
7:10:05	7:09:20	8:15	12:03
7:21:23	7:29:50	8:27	7:45
7:37:35	7:45:03	7:28	8:41
7:53:44	8:01:20	7:36	15:11
8:16:31	8:22:31	6:00	15:39
8:38:10	8:43:31	5:21	8:09
8:51:40	8:56:01	4:21	12:46
9:08:47	9:16:05	7:18	
<b>Total Tiempo ( minutos)</b>		<b>72:26</b>	<b>95:49</b>
<b>Tiempo total que trabaja la caldera por un día (Horas).</b>		<b>2:50:55</b>	

<b>Funcionamiento y Parada del Quemador en la Caldera (19 de marzo). Comedor Escolar Primer día de Control.</b>			
<b>Hora de Arranque.</b>	<b>Hora de Parada.</b>	<b>Tiempo de Funcionamiento (minutos)</b>	<b>Tiempo de Parada (minutos)</b>
8:05:10	8:12:26	7:16	1:01
8:13:27	8:20:11	6:44	12:54
8:33:05	8:40:20	7:15	7:03
8:47:23	8:57:50	10:27	2:45
9:01:35	9:10:03	8:28	4:41
9:14:44	9:33:20	18:36	00:21
9:33:31	9:40:31	7:00	
<b>Total Tiempo ( minutos)</b>		<b>65:46</b>	<b>28:45</b>
<b>Tiempo total que trabaja la caldera por un día (Horas).</b>		<b>1:35:20</b>	

**Anexo: 10**

**Datos de los parámetros necesarios para la realización del balance térmico en cada uno de los centros analizados.**

<b>Símbolos</b>	<b>Unidades</b>	<b>5 de Septiembre (Combustible Diesel).</b>	<b>Escuela Formadora de Maestros (Fuel- Oil).</b>	<b>Comedor Escolar (Combustible Diesel).</b>
$P_v$	Bar	6	6	6
$P_{aa}$	Mpa	0,3	0,8	0,7
$T_v$	°C	158,85	158,85	158,85
$T_a$	°C	70	60	40
$D_v$	Kg/h	280	250	500
$B_c$	Kg/h	20	24,7	40
$h_{aa}$	KJ/kg	255,3	251,12	167,56
$h_{vsat}$	KJ/kg	2756,8	2756,8	2756,8
$S_{aa}$	KJ/kg	0,95325	0,8312	0,5725
$S_{vsat}$	KJ/kg	6,7600	6,7600	6,7600
$S_0$	KJ/kg	0,43455	0,43455	0,43455
$h_0$	KJ/kg	125,75	125,75	125,75
$T_c$	°C	25	150	25
$T_g$	°C	175	400	350

**Anexo: 11**

**Datos para entrenamiento y validación RN de la caldera para el combustible Diesel.**

T.g.s.N	P.vapor N	T.vapor N	T.aa.N	Prod vapor N	F.comb N	Capacidad Nominal N	q <sub>2</sub> N	Eficiencia (Ind) N
0,657895	0,578947368	0,875007035	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,54284	0,92342246
0,328947	0,631578947	0,893972649	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,23654	0,966631016
0,276316	0,631578947	0,893972649	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,20091	0,971657754
0,257895	0,578947368	0,875007035	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,18878	0,973368984
0,197368	0,473684211	0,832517305	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,14784	0,979144385
0,592105	0,442105263	0,818279025	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,44579	0,937112299
0,657895	0,536842105	0,858799032	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,54284	0,92342246
0,394737	0,631578947	0,893972649	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,28052	0,960427807
0,257895	0,421052632	0,808317857	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,18878	0,973368984
0,631579	0,473684211	0,832517305	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,50796	0,928342246
0,526316	0,631578947	0,893972649	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,37225	0,947486631
0,276316	0,452631579	0,823118915	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,20091	0,971657754
0,631579	0,557894737	0,867015589	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,50796	0,928342246
0,315789	0,578947368	0,875007035	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,22745	0,967914439
0,578947	0,442105263	0,818279025	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,43897	0,938074866
0,644737	0,6	0,882773369	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,50114	0,929304813
0,276316	0,473684211	0,832517305	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,20091	0,971657754
0,605263	0,526315789	0,854634476	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,47384	0,93315508
0,460526	0,631578947	0,893972649	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,32449	0,954224599
0,276316	0,526315789	0,854634476	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,20091	0,971657754
0,565789	0,473684211	0,832517305	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,42229	0,940427807
0,631579	0,631578947	0,893972649	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,50796	0,928342246
0,263158	0,505263158	0,845967697	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,19257	0,972834225
0,394737	0,442105263	0,818279025	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,28052	0,960427807
0,618421	0,610526316	0,886543981	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,49128	0,930695187
0,276316	0,473684211	0,832517305	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,20091	0,971657754

0,460526	0,421052632	0,808317857	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,32449	0,954224599
0,605263	0,557894737	0,867015589	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,47384	0,93315508
0,421053	0,631578947	0,893972649	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,29795	0,957967914
0,263158	0,473684211	0,832517305	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,19257	0,972834225
0,157895	0,421052632	0,808317857	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,1213	0,982887701
0,631579	0,315789474	0,751589847	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,50796	0,928342246
0,684211	0,473684211	0,832517305	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,57695	0,918609626
0,355263	0,542105263	0,862963588	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,25398	0,964171123
0,25	0,526315789	0,854634476	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,1721	0,975721925
0,328947	0,421052632	0,808317857	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,23654	0,966631016
0,407895	0,631578947	0,893972649	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,2934	0,958609626
0,263158	0,526315789	0,854634476	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,19257	0,972834225
0,144737	0,421052632	0,808317857	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,11296	0,984064171
0,526316	0,368421053	0,781585908	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,37225	0,947486631
0,671053	0,610526316	0,886543981	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,56027	0,920962567
0,276316	0,578947368	0,875007035	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,20091	0,971657754
0,223684	0,421052632	0,808317857	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,16603	0,97657754
0,631579	0,505263158	0,845967697	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,50796	0,928342246
0,342105	0,621052632	0,890314593	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,24564	0,965347594
0,263158	0,578947368	0,875007035	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,19257	0,972834225
0,921053	0,578947368	0,875007035	0,5	1	1	0,909090909	0,8931	0,89540107
0,907895	0,452631579	0,823118915	0,5	1	1	0,909090909	0,87566	0,897860963
0,921053	0,605263158	0,886543981	0,5	1	1	0,909090909	0,8931	0,89540107
0,513158	0,473684211	0,832517305	0,5	1	1	0,909090909	0,36012	0,970588235
0,921053	0,578947368	0,875007035	0,5	1	1	0,909090909	0,8931	0,89540107
0,5	0,473684211	0,832517305	0,5	1	1	0,909090909	0,38438	0,967165775
0,947368	0,578947368	0,875007035	0,5	1	1	0,909090909	0,92873	0,890374332
0,828947	0,452631579	0,823118915	0,5	1	1	0,909090909	0,76876	0,912941176
0,631579	0,557894737	0,867015589	0,5	1	1	0,909090909	0,50796	0,94973262
1	0,536842105	0,858799032	0,5	1	1	0,909090909	1	0,880320856
0,552632	0,526315789	0,854634476	0,5	1	1	0,909090909	0,37604	0,968342246

0,921053	0,473684211	0,832517305	0,5	1	1	0,909090909	0,8931	0,89540107
0,565789	0,557894737	0,867015589	0,5	1	1	0,909090909	0,42229	0,961818182
0,526316	0,473684211	0,832517305	0,5	1	1	0,909090909	0,37225	0,968877005
0,526316	0,473684211	0,832517305	0,5	1	1	0,909090909	0,37225	0,968877005
0,657895	0,526315789	0,854634476	0,5	1	1	0,909090909	0,54284	0,944812834
0,789474	0,526315789	0,854634476	0,5	1	1	0,909090909	0,71494	0,920534759
0,592105	0,578947368	0,875007035	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,44579	0,937112299
0,597368	0,568421053	0,87106759	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0	1
0,594737	0,578947368	0,875007035	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0	1
0,594737	0,6	0,882773369	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0	1
0,460526	0,610526316	0,886543981	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,32449	0,954224599
0,068421	0,526315789	0,854634476	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0	1
0,921053	0,589473684	0,878890202	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,8931	0,874010695
0,263158	0,473684211	0,832517305	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,19257	0,972834225
0,918421	0,631578947	0,893972649	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0	1
0,263158	0,473684211	0,832517305	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0,19257	0,972834225
0,065789	0,421052632	0,808317857	0,875	0,56	0,625	0,666666667	0	1
0,657895	0,421052632	0,808317857	0,5	1	1	0,909090909	0,54284	0,944812834
0,657895	0,421052632	0,808317857	0,5	1	1	0,909090909	0,54284	0,944812834
0,592105	0,526315789	0,854634476	0,5	1	1	0,909090909	0,44579	0,958502674
0,657895	0,421052632	0,808317857	0,5	1	1	0,909090909	0,54284	0,944812834
0,526316	0,421052632	0,808317857	0,5	1	1	0,909090909	0,54284	0,944812834
0,592105	0,473684211	0,832517305	0,5	1	1	0,909090909	0,44579	0,958502674
0,592105	0,526315789	0,854634476	0,5	1	1	0,909090909	0,44579	0,958502674
0,947368	0,578947368	0,875007035	0,5	1	1	0,909090909	0,92873	0,890374332
0,894737	0,684210526	0,91175643	0,5	1	1	0,909090909	0,85747	0,900427807
0,947368	0,684210526	0,91175643	0,5	1	1	0,909090909	0,92873	0,890374332
0,947368	0,684210526	0,91175643	0,5	1	1	0,909090909	0,92873	0,890374332
0,947368	0,684210526	0,91175643	0,5	1	1	0,909090909	0,92873	0,890374332
0,960526	0,684210526	0,91175643	0,5	1	1	0,909090909	0,94693	0,887807487
0,947368	0,684210526	0,91175643	0,5	1	1	0,909090909	0,92873	0,890374332

0,526316	0,526315789	0,854634476	0,5	1	1	0,909090909	0,37225	0,968877005
0,657895	0,421052632	0,808317857	0,5	1	1	0,909090909	0,54284	0,944812834
0,526316	0,421052632	0,808317857	0,5	1	1	0,909090909	0,37225	0,968877005
0,657895	0,473684211	0,832517305	0,5	1	1	0,909090909	0,54284	0,944812834
0,657895	0,526315789	0,854634476	0,5	1	1	0,909090909	0,54284	0,944812834
0,605263	0,421052632	0,808317857	0,5	1	1	0,909090909	0,47384	0,954545455
0,657895	0,421052632	0,808317857	0,5	1	1	0,909090909	0,54284	0,944812834
0,526316	0,526315789	0,854634476	0,5	1	1	0,909090909	0,37225	0,968877005
0,921053	0,631578947	0,893972649	0,5	1	1	0,909090909	0,8931	0,89540107
0,921053	0,684210526	0,91175643	0,5	1	1	0,909090909	0,8931	0,89540107
0,947368	0,684210526	0,91175643	0,5	1	1	0,909090909	0,92873	0,890374332
0,934211	0,631578947	0,893972649	0,5	1	1	0,909090909	0,9113	0,892834225
0,947368	0,578947368	0,875007035	0,5	1	1	0,909090909	0,92873	0,890374332
0,921053	0,526315789	0,854634476	0,5	1	1	0,909090909	0,8931	0,89540107
0,921053	0,631578947	0,893972649	0,5	1	1	0,909090909	0,8931	0,89540107
0,855263	0,631578947	0,893972649	0,5	1	1	0,909090909	0,8044	0,907914439
0,578947	0,947368421	0,986999831	0,6375	0,45892	0,40975	1	0,43897	0,918930481
0,552632	0,842105263	0,959142327	0,75	0,45892	0,40975	1	0,37604	0,927807487
0,526316	0,842105263	0,959142327	0,6125	0,45892	0,40975	1	0,37225	0,928342246
0,586842	0,936842105	0,984298497	0,625	0,45892	0,40975	1	0,44958	0,917433155
0,581579	0,947368421	0,986999831	0,6875	0,45892	0,40975	1	0,44276	0,918395722
0,565789	0,947368421	0,986999831	0,75	0,45892	0,40975	1	0,42229	0,921283422
0,571053	0,921052632	0,976194496	0,7125	0,45892	0,40975	1	0,42911	0,920320856
0,594737	1	1	0,65	0,45892	0,40975	1	0,4602	0,915935829
0,565789	0,842105263	0,959142327	0,75	0,45892	0,40975	1	0,42229	0,921283422
0,576316	0,815789474	0,947267713	0,725	0,45892	0,40975	1	0,43594	0,919358289
0,581579	0,921052632	0,976025663	0,7875	0,45892	0,40975	1	0,44276	0,918395722
0,578947	0,894736842	0,973380607	0,675	0,45892	0,40975	1	0,43897	0,918930481
0,592105	0,894736842	0,973380607	0,6625	0,45892	0,40975	1	0,44579	0,917967914
0,605263	0,947368421	0,986999831	0,7375	0,45892	0,40975	1	0,47384	0,914010695
0,552632	0,789473684	0,944228713	0,75	0,45892	0,40975	1	0,37604	0,927807487

0,586842	0,842105263	0,959142327	0,7	0,45892	0,40975	1	0,44958	0,917433155
0,526316	0,631578947	0,893972649	0,5	0,5908	0,5275	0,772727273	0,37225	0,927914439
0,710526	0,831578947	0,956215882	0,625	0,5908	0,5275	0,772727273	0,61183	0,894117647
0,710526	0,842105263	0,959142327	0,6875	0,5908	0,5275	0,772727273	0,61183	0,894117647
0,705263	0,815789474	0,947267713	0,75	0,5908	0,5275	0,772727273	0,605	0,895080214
0,710526	0,842105263	0,959142327	1	0,5908	0,5275	0,772727273	0,61183	0,894117647
0,710526	0,815789474	0,947267713	1	0,5908	0,5275	0,772727273	0,61183	0,894117647
0,710526	0,842105263	0,959142327	1	0,5908	0,5275	0,772727273	0,61183	0,894117647
0,710526	0,789473684	0,941639935	0,875	0,5908	0,5275	0,772727273	0,61183	0,894117647
0,657895	0,710526316	0,921886431	0,625	0,5908	0,5275	0,772727273	0,54284	0,903850267
0,684211	0,736842105	0,928414655	0,75	0,5908	0,5275	0,772727273	0,57695	0,899037433
0,671053	0,736842105	0,928414655	0,5625	0,5908	0,5275	0,772727273	0,56027	0,901390374
0,710526	0,789473684	0,944228713	0,6625	0,5908	0,5275	0,772727273	0,61183	0,894117647
0,684211	0,713684211	0,921886431	0,875	0,5908	0,5275	0,772727273	0,57695	0,899037433
0,644737	0,684210526	0,91175643	0,8375	0,5908	0,5275	0,772727273	0,50114	0,90973262
0,552632	0,705263158	0,918509764	0,975	0,5908	0,5275	0,772727273	0,37604	0,927379679
0,710526	0,842105263	0,959142327	1	0,5908	0,5275	0,772727273	0,61183	0,894117647

Anexo: 12

**Datos para entrenamiento y validación RN de la caldera para el combustible Fuel-Oil.**

T.g.s.N	P.vapor N	T.vapor N	T.aa.N	Prod vapor N	F.comb N	Capacidad Nominal N	q <sub>2</sub> N	Eficiencia (Ind) N
0,9	0,4375	0,814880009	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,873007439	0,799186047
0,91	0,5	0,842750689	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,88575983	0,796395349
0,9	0,4375	0,814880009	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,873007439	0,799186047
1	0,5	0,842750689	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	1	0,771395349
1	0,5	0,842750689	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	1	0,771395349
0,96	0,5	0,842750689	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,948990436	0,78255814
0,94	0,5	0,842750689	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,923485654	0,788139535
1	0,5625	0,867980989	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	1	0,771395349
1	0,875	0,967963387	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	1	0,771395349
0,45	0,625	0,89104031	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,317215728	0,920813953
0,82	0,8125	0,950595552	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,766737513	0,82244186
0,56	0,5625	0,867980989	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,448990436	0,891976744
0,72	0,5625	0,867980989	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,580765143	0,863139535
0,95	0,8125	0,950595552	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,936238045	0,785348837
0,44	0,525	0,853136185	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,304994687	0,923488372
0,38	0,4375	0,814880009	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,267268863	0,931744186
0,4	0,375	0,783606173	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,258767269	0,933604651
0,85	0,375	0,783606173	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,809245484	0,813139535
0,84	0,3125	0,747755677	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,796493092	0,815930233
0,9	0,5	0,842750689	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,873007439	0,799186047
0,88	0,4375	0,814880009	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,847502657	0,804767442
0,9	0,6625	0,903948835	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,873007439	0,799186047
0,5	0,7375	0,928240333	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,377258236	0,907674419
0,65	0,5625	0,867980989	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,559511158	0,867790698
0,8	0,71875	0,916329285	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,745483528	0,827093023
0,8	0,8125	0,950595552	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,745483528	0,827093023

0,4	0,5	0,842750689	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,258767269	0,933604651
0,3	0,25	0,705450918	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,195005313	0,94755814
0,25	0	0	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,164187035	0,954302326
0,25	0	0	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,164187035	0,954302326
0,37	0,125	0,268790706	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,238044633	0,938139535
0,8	0,375	0,783606173	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,745483528	0,827093023
0,89	0,6875	0,912280702	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,860255048	0,801976744
0,88	0,75	0,932054216	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,847502657	0,804767442
0,8	0,8125	0,950595552	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,745483528	0,827093023
0,51	0,8	0,946957695	0,983607	0,34762779	0,412148	0,28	0,389479277	0,905
0,44	0,57	0,872733674	0,901639	1	1	1	0,304994687	0,99744186
0,47	0,7225	0,924309101	0,836066	1	1	1	0,341126461	0,989534884
0,49	0,75	0,932054216	0,819672	1	1	1	0,365037194	0,984302326
0,48	0,71875	0,924309101	0,95082	1	1	1	0,353347503	0,986860465
0,466	0,5	0,842750689	0,983607	1	1	1	0,336344315	0,990581395
0,45	0,59375	0,882004342	0,885246	1	1	1	0,317215728	0,994767442
0,48	0,75	0,932054216	0,868852	1	1	1	0,353347503	0,986860465
0,472	0,5625	0,867980989	0,983607	1	1	1	0,343783209	0,988953488
0,43	0,6875	0,912280702	0,983607	1	1	1	0,293304995	1
0,44	0,595	0,916329285	0,983607	1	1	1	0,304994687	0,99744186
0,472	0,71875	0,924309101	0,901639	1	1	1	0,343783209	0,988953488
0,49	0,75	0,932054216	0,852459	1	1	1	0,365037194	0,984302326
0,482	0,70875	0,920377868	0,95082	1	1	1	0,355472901	0,986395349
0,44	0,54375	0,863110955	0,885246	1	1	1	0,304994687	0,99744186
0,46	0,5625	0,867980989	0,934426	1	1	1	0,329436769	0,992093023
0,48	0,70875	0,920377868	0,983607	1	1	1	0,353347503	0,986860465
0,464	0,75	0,932054216	0,655738	0,64458535	0,644585	0,625	0,334218916	0,991627907
0,458	0,85	0,961157073	0,737705	0,64458535	0,644585	0,625	0,326780021	0,993255814
0,46	0,80875	0,950595552	0,819672	0,64458535	0,644585	0,625	0,329436769	0,992674419
0,472	0,95625	0,990788007	0,836066	0,64458535	0,644585	0,625	0,331562168	0,992209302
0,47	1	1	0,918033	0,64458535	0,644585	0,625	0,341126461	0,990116279

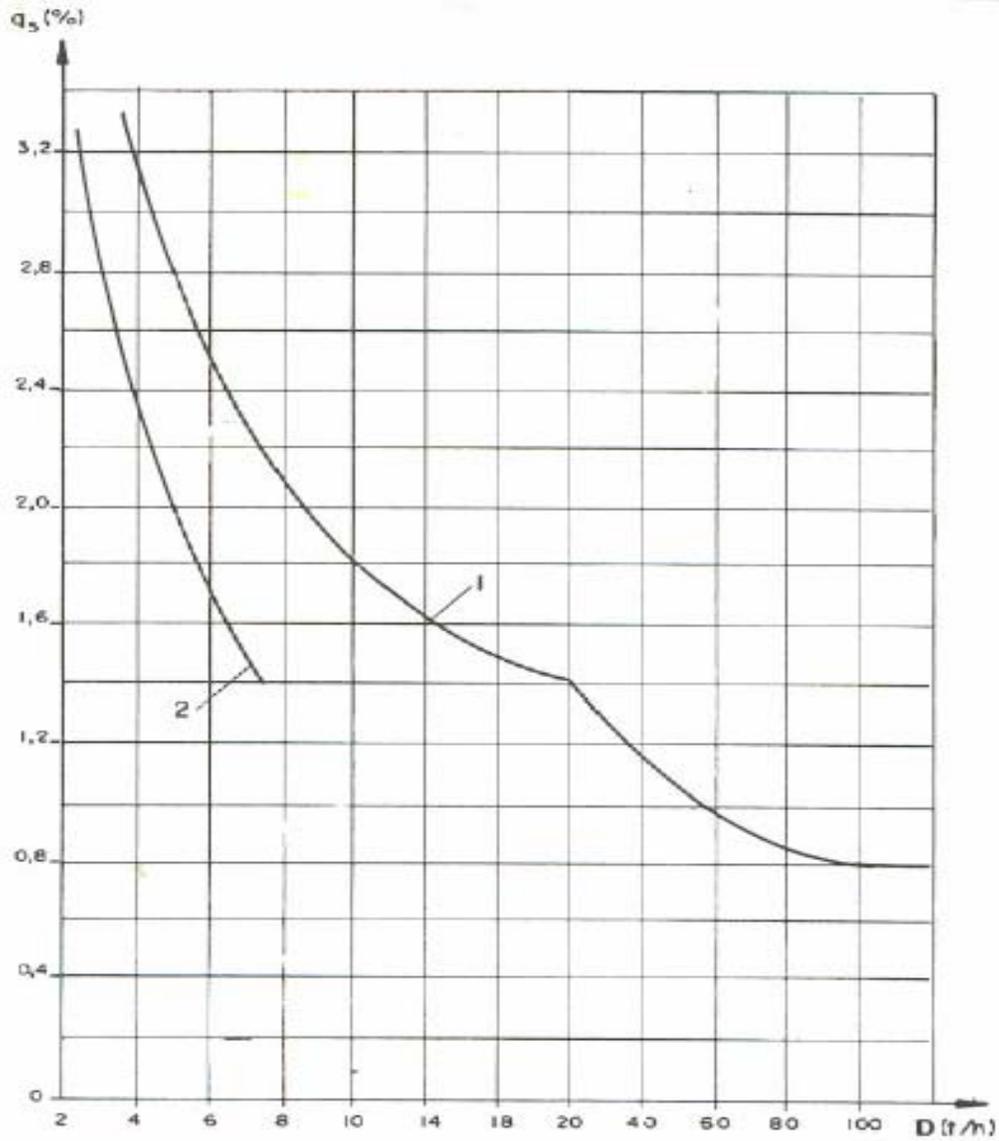
0,454	0,9175	0,977938156	0,983607	0,64458535	0,644585	0,625	0,321997875	0,994302326
0,45	0,8375	0,957636566	0,852459	0,64458535	0,644585	0,625	0,317215728	0,995348837
0,48	0,92875	0,981223963	1	0,64458535	0,644585	0,625	0,353347503	0,98744186
0,47	0,9425	0,984451094	0,983607	0,64458535	0,644585	0,625	0,341126461	0,990116279
0,458	0,8625	0,96456023	1	0,64458535	0,644585	0,625	0,326780021	0,993255814
0,46	0,75	0,932054216	0,95082	0,64458535	0,644585	0,625	0,329436769	0,992674419
0,462	0,79375	0,946957695	0,901639	0,64458535	0,644585	0,625	0,331562168	0,992209302
0,48	0,95	0,987619551	0,934426	0,64458535	0,644585	0,625	0,353347503	0,98744186
0,49	1	1	0,868852	0,64458535	0,644585	0,625	0,365037194	0,984883721
0,472	0,9725	0,996948894	0,983607	0,64458535	0,644585	0,625	0,343783209	0,989534884
0,476	0,8125	0,950595552	0,967213	0,64458535	0,644585	0,625	0,348565356	0,988488372

**Anexo 13**

**Producto de la capacidad térmica específica a presión constante para la temperatura (CO) de aire, gases y ceniza de la combustión.**

$\theta$ (°C)	RO <sub>2</sub> (kJ/m <sup>3</sup> N)	N <sub>2</sub> (kJ/m <sup>3</sup> N)	O <sub>2</sub> (kJ/m <sup>3</sup> N)	H <sub>2</sub> O (kJ/m <sup>3</sup> N)	Aire (kJ/m <sup>3</sup> N)	Ceniza (kJ/kg)
10	170	130	132	151	132	81
200	358	260	267	305	267	169
300	559	392	407	463	403	264
400	773	527	551	627	542	360
500	997	665	700	795	685	459
600	1 224	805	851	968	831	561
700	1 462	947	1 006	1 148	981	663
800	1 705	1 094	1 161	1 337	1 131	768
900	1 953	1 244	1 320	1 525	1 282	876
1 000	2 204	1 395	1 479	1 726	1 437	985
1 100	2 460	1 546	1 638	1 927	1 596	1 098
1 200	2 719	1 697	1 802	2 133	1 756	1 207
1 300	2 979	1 852	1 965	2 346	1 915	1 362
1 400	3 243	2 011	2 129	2 560	2 078	1 584
1 500	3 507	2 166	2 296	2 782	2 242	1 760
1 600	3 771	2 326	2 464	3 004	2 405	1 877
1 700	4 039	2 485	2 631	3 231	2 569	2 066
1 800	4 307	2 644	2 799	3 461	2 732	2 188
1 900	4 576	2 807	2 971	3 691	2 900	2 388
2 000	4 848	2 967	3 143	3 930	3 067	2 514
2 100	5 120	3 130	3 310	4 165	3 235	-
2 200	5 393	3 293	3 486	4 404	3 402	-

**Anexo: 14**



Pérdida por radiación versus  $D_N$ .

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



**Anexo 16**

Combustible	Modo de combustión	$q_3$ (%)
Sólidos	Llama	0,0 - 0,5
	Suspensión	0,2 - 1,0
	Semisuspensión	0,5 - 1,5
	Capa y pila	0,5 - 2,0
Líquidos	Llama	0,0 - 0,5
Gases	Llama	0,0 - 0,5

Los valores del coeficiente de exceso de aire oscilan entre 1.05 y 1.4

En general los valores están en el rango:

- |                              |                      |  |
|------------------------------|----------------------|--|
| • Para combustibles sólidos  | $\alpha = 1.15-1.4$  |  |
| • Para combustibles líquidos | $\alpha = 1.05-1.15$ |  |
| • Para combustibles gaseosos | $\alpha = 1.05- 1.1$ |  |

## Anexo 17

### Pesos y polarizaciones de la red para caldera de combustible diesel.

$lw = [-0.088157 \ 0.021761 \ -0.096424 \ -1.2325 \ 0.904 \ 0.80926;$   
 $1.043 \ -0.082293 \ -0.76773 \ 0.73361 \ -0.12276 \ -0.98447;$   
 $0.61313 \ -0.086201 \ -0.28435 \ 0.99813 \ -0.91888 \ -0.79864;$   
 $0.22041 \ 0.21422 \ 0.5349 \ -1.0036 \ -0.68846 \ 0.16873;$   
 $1.5226 \ 1.2293 \ -0.61832 \ 1.0795 \ -1.2628 \ 0.094677;$   
 $-1.6198 \ 0.11162 \ 0.16536 \ -1.4575 \ 0.21442 \ -0.97004;$   
 $0.49238 \ 0.048698 \ -0.30148 \ 1.2765 \ 0.76855 \ -0.85786;$   
 $-1.7767 \ 0.80572 \ -0.15824 \ 0.51758 \ -0.69895 \ 1.1794;$   
 $-1.4499 \ -1.4523 \ 0.38956 \ -0.92637 \ 1.1833 \ -1.2561;$   
 $1.1166 \ 0.0075846 \ -0.91257 \ 0.72957 \ -1.2172 \ 0.26126]$

$Lw = [0.24794 \ 1.103 \ -0.22083 \ 0.46142 \ 0.52749 \ -0.77872 \ -0.028285 \ -0.45748 \ 0.80746$   
 $0.30732;$   
 $-0.64992 \ -0.88986 \ -0.92911 \ -0.5938 \ -0.39777 \ 0.57745 \ 0.30724 \ 0.44485 \ -0.46761 \ -$   
 $0.37913]$

$B1 = [2.66;$   
 $-1.9532;$   
 $-1.1617;$   
 $-0.8961;$   
 $-0.025349;$   
 $-1.1962;$   
 $0.56787;$   
 $-0.84261;$   
 $-0.79573;$   
 $2.2028]$

$B2 = [-0.14932;$   
 $-0.24902]$

## Anexo 18

### Pesos y polarizaciones de la red para caldera de combustible Fuel-Oil.

$lw = [0.86657 \ 1.1823 \ 0.42262 \ 0.82567 \ -0.31906 \ 0.38753;$   
 $0.77416 \ 0.4732 \ -0.40838 \ -0.39627 \ 1.6698 \ 0.70423;$   
 $0.18253 \ -0.28015 \ -0.65698 \ 0.23529 \ 1.2674 \ -1.3288;$   
 $-0.55505 \ 0.26411 \ 0.23131 \ -1.0594 \ 0.48438 \ 0.73814;$   
 $-0.41696 \ 1.5896 \ 1.4859 \ 0.07576 \ 0.019587 \ 0.19873;$   
 $0.55854 \ 0.63053 \ 0.86348 \ 0.39219 \ -0.45151 \ -1.5405;$   
 $-0.75882 \ 0.65978 \ 0.10174 \ 0.89201 \ -1.1427 \ 0.82579;$   
 $0.85668 \ 0.50837 \ -0.15782 \ 0.42364 \ 0.31744 \ 0.28632;$   
 $-0.040149 \ -1.4638 \ 0.31281 \ 0.086134 \ 0.88213 \ 0.983;$   
 $0.35929 \ 0.43666 \ 1.2632 \ 1.1191 \ 1.4952 \ -0.19718]$

$Lw = [0.25545 \ 0.2808 \ -0.51518 \ -1.4073 \ 0.18986 \ 0.19734 \ -0.42168 \ 0.49487 \ -0.052315$   
 $0.094537;$   
 $-0.13132 \ -0.51593 \ 0.58159 \ 1.5185 \ -0.17073 \ -0.27548 \ 0.52489 \ -0.12607 \ 0.23023 \ -$   
 $0.20244]$

$B1 = [-1.5222;$   
 $-2.2108;$   
 $-1.7896;$   
 $0.46565;$   
 $0.84962;$   
 $-0.33447;$   
 $-0.96087;$   
 $1.1543;$   
 $2.0153;$   
 $-2.5054]$

$B2 = [-0.097494;$   
 $-0.23795]$

**Anexos de los gráficos del sobredimensionamiento en los centros analizados.**

