

REPÚBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR



FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

# TRABAJO DE DIPLOMA

*EN OPCIÓN AL TÍTULO DE*

# INGENIERO MECÁNICO

**Título: El proceso de combustión en la eficiencia del Generador de Vapor en el bloque # 2 de la ETE." Lidio Ramón Pérez".**

**Autor: Pedro Caballero Díaz.**

**Tutores: MsC. Carlos Zalazar Oliva.  
MsC.Manuel Suárez Feliú.**

**MOA, 2016  
"Año 58 de la Revolución"**

## **DECLARACIÓN DEL AUTOR**

Yo, Pedro Caballero Díaz:

Autor de este trabajo de diploma así como los tutores, MsC. Carlos Zalazar Oliva y MsC. Manuel Suárez Feliú, declaramos la propiedad intelectual al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

---

Pedro Caballero Díaz

---

MsC. Carlos Zalazar Oliva

---

MsC. Manuel Suárez Feliú

## **PENSAMIENTO**

### **PENSAMIENTO**

*No he visto nunca tantas posibilidades, que van a acabar de destruir, hacer añicos las calumnias y las campañas contra Cuba, que fortalecerán a nuestro país en todos los terrenos y llegará el momento en que ese inmenso capital humano se convierta en riqueza económica.*

**Fidel Castro Ruz**

**21.11.2002**

## **DEDICATORIA**

*Dedico la culminación de este trabajo, en especial, a mi familia que se ha sacrificado para ver realizar mis sueños.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A todo el colectivo de profesores y tutores que han hecho posible esta tarea.*

*A mi esposa e hijos.*

*A mi compañeros de trabajo, en especial a Juan Carlos Peña Céspedes, Osmar Ochoa Matos, Irabel Carmenatys Chaveco y a Rosalba Haydee Mondelo Olivero.*

*A la revolución por darme la oportunidad de estudiar y hoy alcanzar el nivel superior.*

A todos

**Muchas Gracias**

## **RESUMEN**

En el presente trabajo de diploma se realiza un estudio experimental en el banco de prueba o calibración del quemador, donde se evalúan los comportamientos de dos tipos diferentes de boquillas de atomización de los quemadores de petróleo del generador de vapor # 2 de la CT de Felton, quedando establecidos nuevos patrones operacionales de la presión delante de los quemadores. También se hace una descripción del ciclo térmico del proceso y del sistema de combustión de forma general. Además se efectúa el balance energético del generador de vapor # 2, tomándose como referencia para este tipo de análisis, el combustible suministrado en la actualidad a la CT (CM 1100 cSt), donde se comprueban los resultados y se demuestra que aún es factible la utilización de este tipo de combustible en la instalación, independientemente de los daños colaterales que este proporciona a las instalaciones térmicas de generación del país.

## **SUMMARY**

In the present work of diploma an experimental study in the trial bank or calibration of the burner is made, where the behavior of two different types of mouthpieces of atomization of the oil burners of the steam generator # 2 of the Power Plant of Felton are evaluated, remaining established new operational bosses of the pressure in front of the burners. A description also is made of the thermic cycle of the process and of the system of combustion of general way. Besides, an energy balance of the steam generator # 2 is accomplished, being taken as reference for this type of analysis, the fuel supplied at the present time to the Power Plant (CM 1100 cSt), where results are checked and it is proven that even the suchlike use of fuel in our installation is feasible, regardless of the collateral damages that this gives to generation's of the country thermic facilities.

# ÍNDICE

<u>Contenido</u>	<u>Pág.</u>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL DE LOS PROCESO DE COMBUSTIÓN</b> .....	3
1.1. Introducción .....	3
1.2. Estado del arte relacionado con trabajos precedentes .....	3
1.3. Descripción del flujo tecnológico de la central termoeléctrica de Felton .....	6
1.4. Descripción del generador de vapor de la CT “Lidio Ramón Pérez” .....	9
1.5. Descripción técnica del sistema de aire y gases de la caldera. ....	11
1.6. Características y componentes de los quemadores. ....	16
1.7. Generalidades de los proceso de combustión .....	18
1.8. Conclusión del capítulo 1 .....	24
<b>CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	25
2.1 Introducción .....	25
2.2 Descripción tecnológica del banco de prueba: .....	25
2.3 Descripción del banco de prueba de los quemadores .....	25
2.4 Descripción experimental del banco de prueba de los quemadores.....	28
2.5 Equipos de medición empleados en las prueba de comportamiento .....	31
2.6 Metodologías para evaluar la combustión en generador de vapor #2 y su rendimiento. ....	36
2.7 Conclusiones del capítulo 2 .....	42
<b>CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDO DE LA EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN ET FELTON</b> .....	43
3.1 Introducción .....	43
3.2 Resultados experimentales.....	43
3.3 Resultados obtenidos durante las prueba experimental en el banco de quemadores empleando boquillas de diámetro 2,7mm. ....	46
3.4 Resultados obtenidos durante las prueba experimental en el banco de quemadores empleando boquillas de diámetro 2,9mm. ....	47

3.5	Diferencias obtenidas durante las pruebas experimentales en el banco de quemadores empleando boquillas de diámetro 2,7mm y 2,9mm.....	48
3.6	Resultados de la evaluación de la combustión en el generador de vapor # 2 y su rendimiento .....	51
3.7	Valoración económica.....	54
3.8	Impacto medioambiental.....	55
3.9	Conclusiones del capítulo .....	56
	<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>57</b>
	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>58</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>59</b>
	<b>ANEXOS</b>	



## INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial de nuestro país después del triunfo de la Revolución Cubana exigió el incremento de las capacidades de generación de electricidad fundamentalmente con la utilización de petróleo como fuente de energía primaria procedente de la antigua Unión Soviética.

Como consecuencia de la política de desarrollo de la generación de electricidad se construye en el poblado de Felton de la provincia de Holguín la Central Térmica (CT) “Lidio Ramón Pérez”, sincronizándose la primera unidad al sistema eléctrico el 16 de febrero del 1996 y el 12 de diciembre del 2000 con una segunda unidad, cada una de 250 MW, además de un emplazamiento de generación fuel-oíl de una capacidad de 60 MW para una capacidad instalada de 560 MW.

Al ocurrir la caída del campo socialista en Europa, incluyendo el desplome de la Unión Soviética, se experimenta una brusca disminución en cuanto el suministro de petróleo y recursos para el mantenimiento, afectándose considerablemente la generación de electricidad del país.

Por lo que el uso de crudo cubano es una necesidad aun conociendo las dificultades que se originan durante la quema de este combustible, además de la disminución del rendimiento de los generadores de vapor, que se ensucian con una velocidad mayor. Esta suciedad se manifiesta en forma de incrustaciones duras en todas las superficies de transferencia de calor del eje convectivo (zona de alta temperatura) con una mayor incidencia en la zona del sobrecalentador #2, donde las incrustaciones con el transcurso del tiempo reducen tanto el área de flujo, y por consiguiente el rendimiento del generador de vapor, que limita la generación de vapor y por tanto la potencia generada, al extremo que se hace necesario en períodos de 5 a 6 meses, sacar la unidad generadora fuera de servicio y limpiar cuidadosamente manualmente o con agua a presión, todas las superficies de intercambio de la caldera.

La **Situación problemática** de la investigación la constituye:

El cambio del combustible de diseño al empleo del crudo cubano, con alto contenido de azufre implicó cambios y modernización en la tecnología del equipo de combustión (quemadores, intercambiadores de calor y otros equipos) y la necesidad de suministro



de mayor cantidad de aire para efectuar el proceso de combinación de los elementos combustibles del combustible y el oxígeno del aire atmosférico. De ahí que el presente trabajo de tesis, pretende identificar las causas de mal funcionamiento, empleando la información sobre cómo transcurre el proceso de combustión.

Con los elementos anteriores se plantea como **problema** a investigar el siguiente:

Desempeño deficiente del proceso de combustión en el generador de vapor # 2 de la Central Térmica "Lidio Ramón Pérez".

Como **objeto de estudio** se establece:

Sistema de combustión del generador de vapor # 2 de la Central Térmica "Lidio Ramón Pérez" de Felton.

El **campo de acción** de investigación se enmarca en:

Proceso de la combustión en el generador de vapor de la Central Térmica "Lidio Ramón Pérez" de Felton.

Dado el problema a resolver se plantea la siguiente **hipótesis**:

A partir de los resultados experimentales en el banco de prueba de los quemadores se define la selección de la boquilla y rango de operación más eficiente de los quemadores y una caracterización del generador de vapor # 2, de la Central Térmica "Lidio Ramón Pérez", a través de su eficiencia.

Se define como **objetivo general**:

Determinar los parámetros de operación que garanticen una combustión más efectiva y eficiencia en el generador de vapor.

Para cumplir el objetivo general se declaran los siguientes **objetivos específicos**:

1. Caracterizar los parámetros de operación de los quemadores para diferentes momentos de operación.
2. Comprobar el rendimiento del generador de vapor en función de los parámetros de operación de los quemadores.



De acuerdo a los objetivos propuestos, se plantean las siguientes **tareas de trabajo**:

1. Elaborar un diseño experimental que permita caracterizar a los quemadores en diferentes condiciones de explotación.
2. Influencia del comportamiento funcional de los quemadores en el rendimiento del generador de vapor.
3. Análisis de los resultados, impacto ambiental



## CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL DE LOS PROCESO DE COMBUSTIÓN

### 1.1. Introducción

Unos de los elementos fundamentales en la generación eléctrica en Centrales Térmicas (CT) son los procesos de la combustión, la eficiencia de este proceso afecta o favorece en gran medida al ciclo térmico, debido a numerosos factores que intervienen en la misma como: la composición química del combustible empleado, al aire para la combustión, tipo de quemadores de aceite con pulverización del vapor y con sistema automático que están diseñados para operar como quemadores de potencia. En el presente capítulo se establece como **objetivo** analizar las referencias bibliográficas referentes a los procesos de combustión en la CT y la descripción detallada de la instalación objeto de estudio.

### 1.2. Estado del arte relacionado con trabajos precedentes

A partir de la importancia que tienen los trabajos precedentes sobre la temática tratada se realizó una búsqueda bibliográfica relacionada con los procesos de combustión en centrales eléctricas

Rodríguez (2001) también se ha dedicado al estudio de los combustibles usado en los generadores de vapor el cual realiza un análisis del petróleo crudo nacional empleado en la empresa Ernesto Guevara a partir de los elementos químicos que lo componen, haciendo referencia a los efectos que producen cada uno de ellos durante su almacenamiento, transportación y quema en las instalaciones de la empresa. El trabajo muestra algunas recomendaciones prácticas para la manipulación y quema de este combustible, basado en la experiencia práctica aplicada en la planta de secaderos de la fábrica antes mencionada. Algunas de las conclusiones llegadas por el autor en este tema tan importante para la economía cubana se relacionan a continuación:

1. Con el tratamiento químico adecuado y operando con niveles de aire bajos en la caldera, se incrementa sustancialmente la producción de  $\text{CO}_2$ , se garantizan limpieza en las superficies de transferencia de calor y se reduce al mínimo la velocidad de corrosión de los metales.



2. El crudo mejorado tiene influencia directa en el potencial de corrosión de los electrofiltros y tratado con aditivo organometálico de base magnesio es posible controlar el potencial de corrosión a valores similares o inferiores alcanzados por el petróleo regular.

Al estudio de las centrales termoeléctricas dedica particular interés Rizhkin (1987), en su trabajo se abordan los aspectos técnicos generales para la explotación de este tipo de instalación, se analizan algunos parámetros económicos relacionados con el consumo de calor en las centrales termoeléctricas.

Por su parte Tanquero et al. (1997), dedica su trabajo al cálculo térmico de los diferentes equipos y agregados existentes en los generadores de vapor, recoge ecuaciones importantes para el análisis térmico de estos equipos y constituye una guía metodológica para la realización de cálculos relacionados con la temática.

Fernández (1994), plantea las leyes termodinámicas empleadas en el análisis de los procesos térmicos, los conceptos fundamentales empleados en el estudio de éstos y detalla con claridad la metodología empleada en la solución de problemas prácticos. Otro aporte importante de este trabajo es que describe otra forma de análisis térmico de los procesos industriales a partir de la inserción del concepto de exergía el cual es aplicado para realizar el balance exergético de varios equipos industriales entre los que se figuran: la turbina de gas, las bombas, calentadores y generadores de vapor.

También aportó temas de considerable interés Kasatkin et al. (1971), donde aborda sobre los agentes calentadores, métodos de calentamiento, calentamiento con vapor de agua y vapor encerrado así como los procedimientos básicos para la realización del balance térmico en estos equipos.

Resulta útil el aporte dado por Muhica (2001), al efectuar la evaluación termoeconómica del ciclo de la central termoeléctrica Ernesto Che Guevara. El trabajo está encaminado a facilitar la toma de decisiones en la modernización y expansión de la planta, para ello se determinan los principales indicadores del ciclo térmico modernizado, también la investigación expone el cálculo de las pérdidas de energía en los equipos tecnológicos principales de la central termoeléctrica, el impacto económico y ambiental de la propuesta estudiada.



Al estudio de los generadores de vapor instalados en la empresa René Ramos Latour también se han dedicado algunos trabajos, Del Valle (2002) realiza una evaluación verificativa de la eficiencia en la planta eléctrica de esta empresa, a partir de la instalación de dos generadores de vapor, en este trabajo se establecen comparaciones con parámetros anteriores del mismo proceso lo que demostró que hubo un aumento considerable de la eficiencia en la producción de níquel hasta el 95 %.

De forma análoga Abreu (2003), realizó una evaluación de la eficiencia del generador de vapor No. 10 de la CTE basándose en este trabajo el autor realizó un cálculo verificativo de la eficiencia de la instalación, teniendo en cuenta la utilización de crudo nacional mejorado y la aplicación de la tecnología aditivación – emulsión del combustible, permitiéndole llegar entre otras a las siguientes conclusiones:

La tecnología de aditivación aplicada a partir de septiembre del 2002 logró incrementar la eficiencia del generador de vapor en 1.1 %.

Esta tecnología debe mejorarse en lo que respecta al ensuciamiento del calentador de aire regenerativo, con la misma se logra disminuir las emulsiones de contaminantes al medio ambiente.

Otro trabajo importante en este sentido fue dado por Suárez (2005) quien realizó un diagnóstico del sistema de generación de la central termoeléctrica de la empresa antes mencionada, el autor muestra un profundo análisis del proceso de generación de vapor existente en la instalación y expone resultados importantes basados en el estudio detallado de los generadores de vapor presente en el proceso, este trabajo muestra además varias recomendaciones que constituyen un punto de partida para el correcto análisis térmico de las instalaciones productoras de vapor.

En el manual de operaciones de la Central Termoeléctrica de la empresa Pedro Sotto Alba se detalla el proceso de generación de vapor y se ofrecen las principales características de las maquinas y agregados que componen la planta.

Caballero y Gonzáles (2007) calcularon los rendimientos y los consumos de combustible de las calderas de la empresa Pedro Sotto Alba y Ernesto Che Guevara, pero no establecieron el comportamiento de los parámetros más influyentes respecto a la eficiencia.



Al diagnóstico de los generadores de vapor 1 y 2 de la CT "Lidio Ramón Pérez se dedicó Lahens (2001), el cual tomó como referencia la influencia de la temperatura de los gases en la eficiencia y consumo de combustibles de los generadores de vapor.

Es positivo y resulta beneficioso la quema del combustible Crudo Cubano Mejorado, ya que aunque la eficiencia disminuye de un 92 % a un 87% según se comprobó en los cálculos realizados en el Balance Energético, esta eficiencia no es considerada baja, ni la planta es ineficiente si la comparamos con otras plantas del país (Batista, 2004).

Con el cambio del combustible de fuel oíl a crudo nacional la eficiencia exergética de la caldera solo varió en un 0,941 %, valor considerado no significativo, por lo que está fundamentada la utilización de crudo nacional desde el punto de vista de la eficiencia (Cuza, 2011). Además se evaluó los resultados de la eficiencia para dos tipos de combustibles, el mazut y el crudo mejorado a través de un balance típico de los generadores de vapor, en el cual no se establecen valores prácticos para determinar políticas operacionales.

Al compararse los resultados del comportamiento de los generadores de vapor con los aditivos Pentol y Bycosin, las caídas de presiones con el uso del Pentol en el eje convectivo alcanza el valor de 1,92 kPa y en los Calentadores de Aire Regenerativo (CAR) de 1,84 kPa, los que se mantienen por debajo del normativo, relacionados con las deposiciones encontradas en estas superficies, por lo que se decide el uso del aditivo Bycosin en ambos generadores de vapor (Espinosa, 2013).

El trabajo anterior citado analiza el tratamiento con los aditivos y se hace una evaluación de los resultados obtenidos con los aditivos de la firma Bycosin en donde se concluyó que el generador de vapor #2 trabajaba con menor eficiencia que el generador de vapor #1, (Leyva, 2013)

### **1.3. Descripción del flujo tecnológico de la central termoeléctrica de Felton**

A la central termoeléctrica el combustible llega desde la base de almacenamiento de combustibles de CUPET, hasta dos tanques de recepción y almacenamiento, con capacidad de 15 000 m<sup>3</sup> cada uno, estos cuentan con dispositivos interiores (serpentín) y exteriores (calentador) para el calentamiento del combustible entre 65 y 70 °C , con el fin de facilitar su bombeo.



El combustible es succionado desde los tanques por dos bombas, situadas en la casa de petróleo primer impulso, y transportado con una presión constante de 0,45 MPa hasta la succión de las bombas del segundo impulso, las cuales elevan la presión hasta 3,2 MPa. En el segundo impulso se hace pasar el combustible por dos calentadores de superficie a vapor para aumentar la temperatura hasta aproximadamente 150 °C. Además del combustible, se suministra la cantidad de aire necesario para la combustión en caldera, donde como consecuencia en el proceso de oxidación, se desprende gran cantidad de calor. El aire es succionado desde la atmósfera por dos ventiladores de tiro forzado (VTF), se precalienta en los precalentadores de aire a vapor hasta 75 °C y finalmente se eleva su temperatura hasta 315 °C en los calentadores de aire regenerativos (CAR).

Por otra parte al domo de la caldera le llega agua de alimentar que es distribuida a las paredes de agua donde al absorber el calor desprendido por la combustión se transforma en una mezcla agua – vapor que retorna (por circulación natural) nuevamente al domo, en el mismo es separado el vapor del agua, el vapor saturado sale del domo y pasa por cuatro etapas de sobrecalentamiento donde aprovechando el calor de los gases de escape se convierte en vapor sobrecalentado que sale de la caldera con 13,7 MPa y 525 °C .

El vapor es conducido hacia la turbina entrando al cilindro de alta presión, en esta se transforma la energía térmica del vapor en energía cinética en los alabes fijos y esta última en energía mecánica de rotación a través de los alabes móviles. El vapor retorna a la caldera donde eleva su temperatura en dos etapas de recalentamiento, siendo conducido al cilindro de media presión con 525 °C y 3,2 MPa, desde el cilindro de media presión pasa al cilindro de baja presión desde donde va hacia el condensador con 0,005 MPa. El condensado es almacenado en el pozo caliente del condensador con una temperatura de 50 °C, donde es transportado por dos juegos de bombas de condensado de primera y segunda etapa hasta el tanque de agua de alimentar. Durante el recorrido pasa por el sistema regenerativo de baja presión donde se aprovecha el calor del vapor proveniente de las extracciones de turbina para ir incrementando paulatinamente la temperatura del condensado.



En el tanque de alimentación se calienta el agua hasta los 150 °C por medio del vapor de la extracción IV de turbina, se le elimina el oxígeno libre y los gases incondensables que son emitidos a la atmósfera y es succionado por las bombas de agua de alimentación que elevan la presión hasta 15,7 MPa para incorporarla a la caldera, pasándola antes a través de dos calentadores de alta presión donde se eleva la temperatura del agua hasta 235 °C, la cantidad de agua que se suministra a la caldera es controlada por un sistema de válvulas de regulación que garantizan que se mantenga el balance de masa entre la cantidad de vapor que sale de la misma y la cantidad de agua que se suministra, con el fin de asegurar el funcionamiento correcto de esta.

La energía mecánica presente en el eje de la turbina es entregada al rotor del generador eléctrico que está directamente acoplado al árbol de esta, es un generador trifásico con una potencia activa nominal de 250 MW y máxima de 275 MW, la potencia aparente de 294,12 MVA, el factor de potencia de 0,85, el voltaje nominal de 15,7 kV. El generador es enfriado por hidrógeno por la parte exterior de las bobinas y además de esto posee un sistema de enfriamiento con agua desmineralizada por el interior de los conductores del estator.

Los conductores de salida del generador eléctrico están conectados a un transformador de voltaje trifásico con una potencia aparente de 325 MVA, la tensión de entrada al mismo es de 15,7 kV, la tensión en la parte secundaria es de 242 kV, este transformador es el encargado de elevar el nivel de voltaje para la transmisión de la electricidad a largas distancias con el mínimo de pérdidas. Esto se muestra en la figura 1.1. Esquema del proceso tecnológico de la Empresa Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez”.

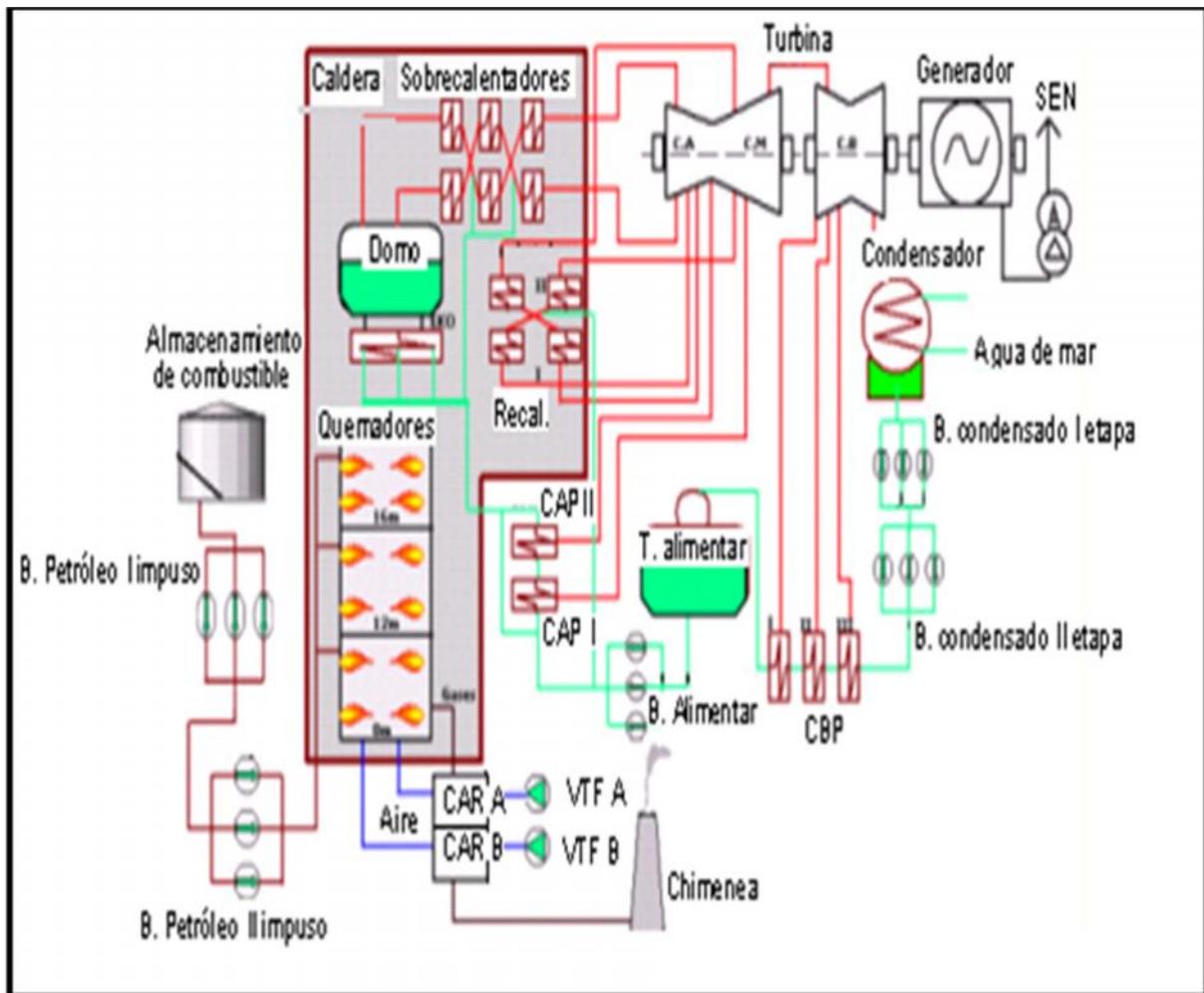


Figura 1.1. Esquema tecnológico de la Empresa Termoeléctrica “Lidio Ramón Pérez”.

#### 1.4. Descripción del generador de vapor de la CT “Lidio Ramón Pérez”

El generador de vapor #2 de la ETE de Felton es de una capacidad de 855 t/h de vapor, el cual suministra la cantidad de vapor necesaria para que la turbina produzca 250 MW. Esta caldera de fabricación Eslovaca, perteneciente a la firma SES TLMACE está instalada en la CT “Lidio Ramón Pérez”, en Felton, Holguín. Los datos técnicos del generador de vapor se muestran en la tabla 1.1.



Tabla 1.1 Datos técnicos del generador de vapor.

Datos técnicos del generador de vapor	Valor	Unidad
Potencia Nominal del Vapor	855	t/h
Presión Nominal del vapor sobrecalentado	139	MPa
Temperatura Nominal del Vapor Sobrecalentado	525±8	C
Presión Nominal del vapor recalentado	3,46	MPa
Temperatura del vapor recalentado	335/525	C
Flujo del vapor recalentado, t/h	733,4	t/h
Temperatura del agua de alimentar a la salida de los CAP	240	C
Cantidad de quemadores	12	U
Etapas de sobrecalentamiento	4	U
Etapas de recalentamiento	2	U
Cantidad de ventiladores de tiro forzado	2	U
Cantidad de recirculadores de gases	2	U
Cantidad de precalentadores	2	U
Cantidad de calentadores de aire generativos	2	U
Etapas de atemperamientos.	3	U

La caldera es de horno presurizado y de circulación natural del agua con un domo de un solo sector puro, formado por ciclones interiores. El atemperamiento es con agua de alimentar proveniente de la rama de alimentar. La disposición de esta es del tipo "A". Tiene una productividad de 855 t/h de vapor, con una presión de trabajo de 140 kg/cm<sup>2</sup>, la presión de entrada al recalentamiento es de 34,6 kg/cm<sup>2</sup> y el combustible que consume para la generación de vapor es mazut. Las superficies evaporativas constituyen el circuito de agua-vapor de la caldera formado por paneles de tuberías soldados a cabezales, los que conforman la cámara de combustión o el primer tiro de la caldera y las paredes laterales del segundo tiro. Esta se muestra en la figura 1.2. Esquema del generador de vapor.

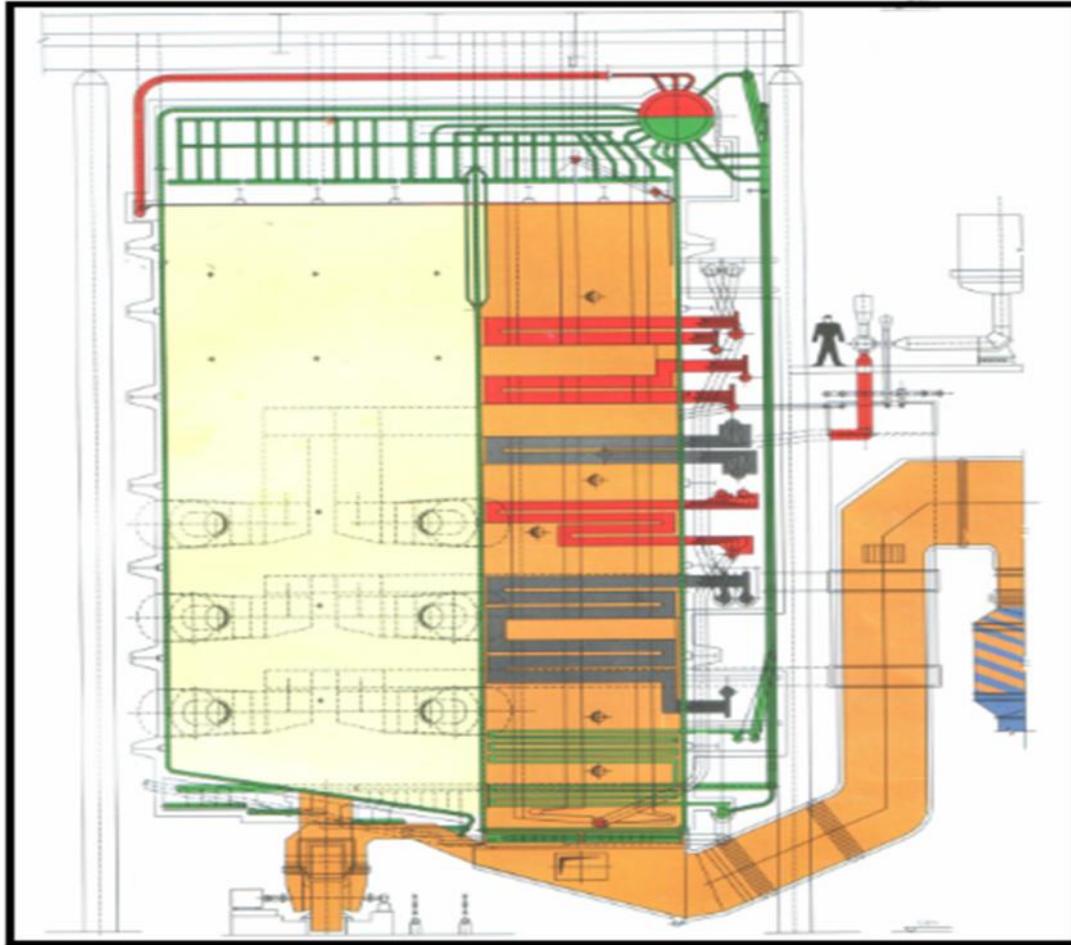


Figura 1.2. Esquema del generador de vapor.

La caldera está compuesta por las siguientes superficies evaporativas:

- Pared frontal y piso del horno
- Pared intermedia
- Paredes laterales
- Pared trasera

### 1.5. Descripción técnica del sistema de aire y gases de la caldera.

El sistema de aire y gases del generador de vapor # 2 está compuesto básicamente por un conjunto de equipos y accesorios capaces de garantizar un trabajo eficiente y seguro del generador de vapor (figura 1.3). Sinóptico de sistema aire gases del generador de vapor.

- Dos ventiladores de tiro forzado (VTF)
- Dos precalentadores de aire por vapor
- Dos calentadores de aire regenerativos (CAR)
- Dos ventiladores de recirculación de gases (VRG)

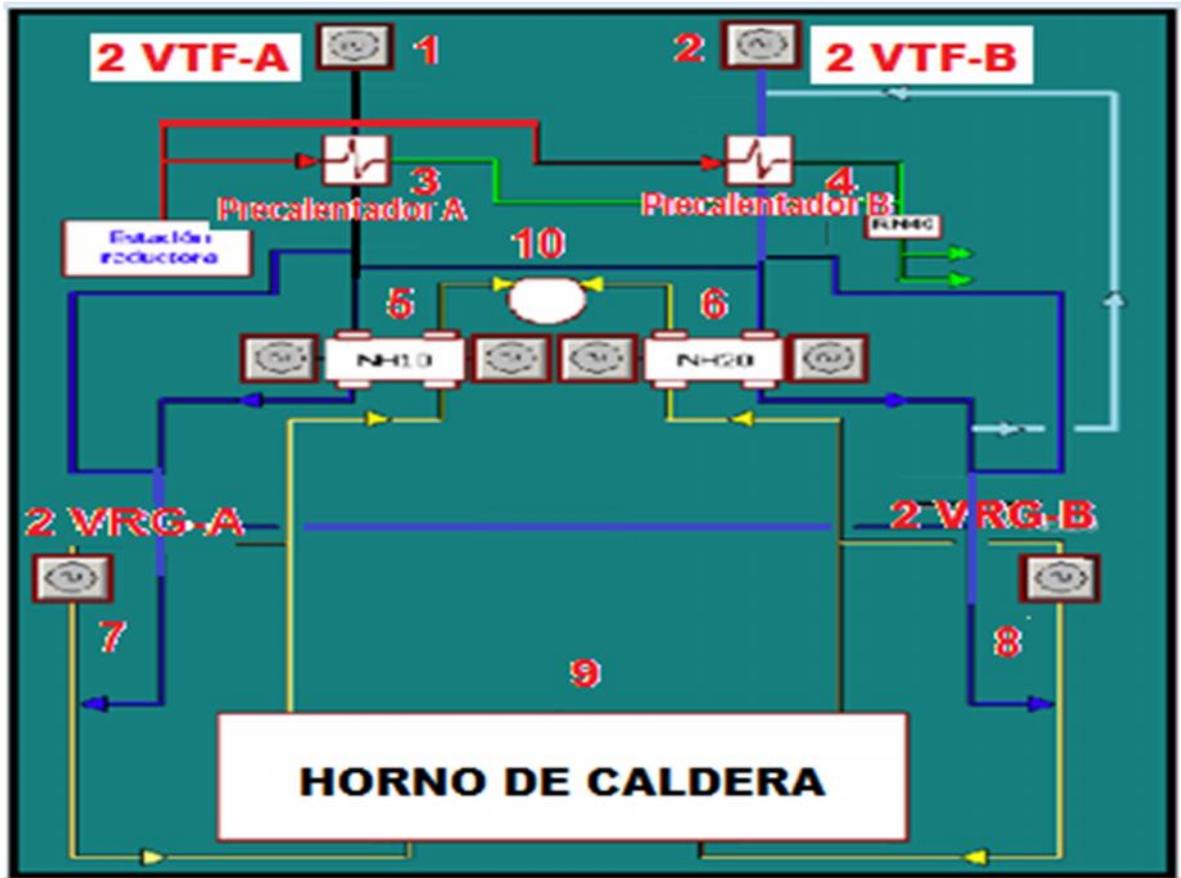


Figura 1.3. Sinóptico del sistema aire-gases del generador de vapor.

Donde:

1. Ventilador de tiro forzado A del Bloque #2, (2VTF-A)
2. Ventilador de tiro forzado B del Bloque #2, (2VTF-B)
3. Precalentador de aire A
4. Precalentador de aire B
5. Calentadores de aire regenerativo A
6. Calentador de aire regenerativo B
7. Ventilador recirculador de gases A del Bloque#2, (2VRG-A)
8. Ventilador recirculador de gases B del Bloque #2,(2VRG-B)



9. Horno de caldera
10. Chimenea

### Descripción del circuito de aire:

Por el lado de aire el circuito comienza en los VTF. El aire procedente de los VTF pasa por los precalentadores de aire y se eleva su temperatura hasta 75 °C con el objetivo principal de elevar la temperatura del aire a la entrada del CAR para reducir la posibilidad del punto de rocío en el lado frío de los mismos; de los precalentadores el aire pasa a los CAR donde eleva su temperatura hasta 305 °C y de éstos se distribuye hacia las cajas de aire de los quemadores para participar en la combustión.

Antes de llegar al CAR existe un puente de gases entre ambos conductos de descarga de los respectivos VTF con una compuerta intermedia. De dicho puente salen dos líneas, una a cada lado de la compuerta que van cruzadas hacia las compuerta de sellaje de los conductos de gases antes de la entrada del CAR. El cruzamiento de esta línea tiene como objetivo poder mantener el aire de sellaje desde la otra sección en caso que se dispare el VTF y CAR de la sección correspondiente a dicha compuerta de sellaje. También existe un puente de aire a la salida del CAR entre ambos conductos de aire con el objetivo de igualar las presiones del aire en ambas secciones antes de entrar a los quemadores. Después de este puente sale una línea de aire de cada conducto que va hacia el sellaje de la compuerta del conducto de recirculación de gases situada entre el VRG y la caldera correspondiente a cada sección. En la tabla 1.2 se muestran los datos técnicos de los ventiladores de tiro forzado

Tabla 1.2. Datos técnicos de los ventiladores de tiro forzado, (VTF).

Datos técnicos de los ventiladores de tiro forzados	
Flujo de aire	137 m <sup>3</sup> /s
Temperatura del aire	32 C
Presión a la salida	11000 Pa
Potencia absorbida del ventilador	1825 kW
Revoluciones criticas	1744 rad/s
Enfriamiento por agua	Temperatura máx. 30 C
Consumo de agua	8 l/min



Potencia del motor	2000 kW
Voltaje	6000 V
Revoluciones del motor	1190 rad/s
Eficiencia del motor	95,5 %
Corriente	232 A

### Los precalentadores de aire:

Los calentadores de aire tienen como objetivo proteger a los CAR, ante todo su extremo frío, contra los efectos desfavorables de la corrosión debida a las bajas temperaturas. Estos precalentadores están situados a la salida de los VTF y antes de los CAR y son dos uno por cada lado. Utiliza para su trabajo vapor procedente del cabezal #1 de servicio de planta. Ver tabla 1.3. Datos técnicos de los precalentadores de aire.

En la tabla se muestran los datos técnicos de los precalentadores de aire.

Tabla 1.3. Datos técnicos de los precalentadores de aire.

Datos técnicos de los precalentadores de aire	
Temperatura del aire	75 C
Temperatura del vapor	250 C
Presión del vapor	0,98 MPa
Consumo de vapor	30 t

### Descripción del circuito de gases del sistema aire de gases:

Los gases salen de la caldera con una temperatura de 350 °C y entran al CAR, los que salen después de ceder el calor al aire en el mismo a 145 °C. Antes de entrar al CAR, una determinada cantidad de gases se recirculan hacia la caldera mediante un ventilador denominado "Ventilador de Recirculación de Gases (VRG)"; el objetivo principal de esta recirculación de gases es mantener la temperatura adecuada en el vapor recalentado principalmente a potencias inferiores a 150 MW porque para potencias superiores a esta el volumen de gases que se genera producto de la combustión generalmente es suficiente para alcanzar dicha temperatura. Este flujo de gases de recirculación se regula mediante las compuertas de regulación en la entrada



del VRG en función del flujo y temperatura del vapor recalentado a la salida del recalentador No 2.

Los ventiladores son radiales, de succión por ambos lados, los rodamientos son lubricados con aceite de circulación desde la estación de lubricación del mismo.

En la tabla 1.4 se muestran los datos técnicos de los ventiladores recirculadores de gases (VRG)

Tabla 1.4. Datos técnicos de los ventiladores recirculadores de gases, (VRG)

Datos técnicos de los ventiladores recirculadores de gases (VRG)	
Capacidad	35 m <sup>3</sup> /s
Presión de descarga	4,3 kPa
Temperatura de los gases	350 C
Potencia absorbida	180 kW
Potencia del motor	250 kW
Voltaje	6 kV

### Los Calentadores de aire regenerativos (CAR).

Estos tienen como función la de calentar el aire para la combustión utilizando los gases de escape, aprovechando el calor que estos tienen antes de salir a la atmósfera por la chimenea (Ver tabla 1.5). Datos técnicos de los calentadores de aire regenerativos (CAR).

Tabla 1.5. Datos técnicos de los calentadores de aire regenerativos, (CAR).

Datos técnicos de los calentadores de aire regenerativos, (CAR).	
Superficie de calefacción.	35 352 m <sup>2</sup>
Temperatura de gases a la entrada	350 C
Temperatura de gases a la salida.	145 C
Temperatura de aire a la entrada	75 C
Temperatura de aire a la salida	305 C
Flujo de gases	102 m <sup>3</sup> /s
Flujo de aire	97,2 m <sup>3</sup> /s



### 1.6. Características y componentes de los quemadores.

Los quemadores de aceite, con pulverización del vapor y con sistema automático de seguridad, están destinados para operar como quemadores de potencia del generador de vapor, esto se muestra Según la tabla 1.6. Datos técnicos de los quemadores. Anexo 1. Imágenes de los quemadores. Según (Kantor, 2004).

Los quemadores cumplen cinco funciones diferentes:

- Enviar el combustible a la zona de combustión.
- Suministrar la cantidad correcta de aire para la correcta combustión
- Mezcla aire-combustible
- Encienden la mezcla
- Remover los productos de combustión

En la tabla 1.6 se muestran los datos técnicos de los quemadores de atomización a chorro de vapor.

Tabla 1.6. Datos técnicos de los quemadores.

Datos técnicos de los quemadores	Valores	Unidad
Número de quemadores en la caldera	12	
Potencia nominal del quemador de aceite	6000	kg/h
Sobrepresión del aceite combustible en la entrada del quemador	2,45	MPa
Poder calorífico del combustible líquido	41,2	kJ/kg
Vapor para pulverizar combustible	1,2	MPa
Temperatura de vapor	230	C
Temperatura del aire de combustión	315	C
Diferencia de presión en el lado de aire de combustión entre la caja de aire y la cámara de combustión, a la potencia nominal	2,4	kPa
Presión de combustible pesado	Min. -0,6 Max.-2,4	MPa
Flujo por cada quemador de combustible pesado	Max-100/91 Min-50	Lts/min
Flujo por cada quemador de aire	Max-15	m <sup>3</sup> /s
Presión mínima de vapor	Min-0,35 Max-1,2	MPa



### 1.6.1. Componentes del quemador

Los quemadores del generador de vapor #2 de la CT están compuestos de los siguientes accesorios:

**1- Manguito interior (nipple) de aceite del quemador:** El nipple es diseñado para pulverizar mediante vapor el combustible líquido y para regular por reducción la presión en la tubería de admisión. El combustible entra en el manguito interior, pasando por el recinto exterior hacia el inyector pasa a través del centro del nipple. A la vista lateral del nipple para el combustible está destinada la boquilla más próxima a la tapa del quemador y el vapor de pulverización está destinado a la boca interior.

**2- Encendedor eléctrico de gas o quemador de encendido:** Se emplea el quemador suministrado por la empresa Hegwein. Se pone en el mismo cuenta para su funcionamiento del transformador de encendido que excita el chispero del encendedor eléctrico de gas durante 13 segundos de encendido y deja entrar el gas de encendido en el encendedor.

**3- Vigilador de llama:** El sensor o detector de la llama es del sistema IRIS si durante el arranque del quemador no se produce ninguna falla en el vigilador ultravioleta en el tiempo establecido desde el momento de abertura de la emisión de combustible registra la llama.

**4- Mando neumático:** El mecanismo descansa fijado en la brida de la clapeta de aire. Sirve para conmutar de una posición límite a otra (de abrir o de cerrar), uniéndose con el árbol extendido de una hoja de la clapeta. Los micros interruptores forman parte del accionamiento neumático, se desplaza de una a otra posición límite por medio del aire de presión de control que pasa una vez hacia la parte anterior del cilindro y otra hacia su parte superior, operando por la corredera de distribución situada en el cilindro neumático.

Se utiliza fijada mediante bridas, entre la caja de aire del quemador y el conducto de aire. Sirve para cerrar y abrir la entrada de aire a la combustión en el quemador. Funciona por el mecanismo de neumático descrito anteriormente.

**6- Torbellinador de aire:** Este descansa, fijado por tornillos, en la línea central,



hallándose por una medida de 0 hasta 100mm (aproximadamente) entrada en la parte de salida del difusor interior. Es de material refractario y su destino es optimizar la mezcla del combustible con el aire y además, para mantener la llama en la proximidad del quemador en pleno alcance de las características de potencia.

### 1.7. Generalidades de los proceso de combustión

Se entiende por combustión toda reacción química que va acompañada de gran desprendimiento de calor; puede ser sumamente lenta, de tal manera que el fenómeno no valla acompañado de una elevación de temperaturas sensible a nuestros sentidos, como sucede en la oxidación del hierro en el aire húmedo, fenómeno conocido como combustión lenta con desprendimiento de calor muy rápido como la detonación (Elías, 2003).

La combustión se define también como un proceso químico en el cual se combinan algunos componentes del combustible con el oxígeno (combustible) liberando gran cantidad de calor.

Los elementos del combustible que se oxidan liberando calor por una oxidación rápida de la materia combustible carbono (C), el hidrogeno (H) y el azufre (S). Este último es un elemento que se considera contaminante porque si bien libera calor en su combustión sus gases traen problemas de corrosión en los equipos y de contaminación ambiental.

Haremos una breve descripción de como ocurre el proceso de combustión para entender mejor el proceso de combustión. El carbono del combustible reacciona con el oxígeno de dos maneras una en su combustión completa y otra en su combustión incompleta.



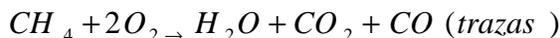
Otro factor indispensable es la mezcla íntima y adecuada del combustible (se entiende los volátiles) y el comburente, que suele ser aire. Seguidamente, cuando la mezcla es la correcta se debe producir la ignición. A partir de este momento el calor generado permite mantener un nivel de temperatura que asegura la continuidad de la reacción.



Las reacciones de combustión pueden llevarse a cabo con el aire justo: reacción estequiométrica. Con exceso de aire, en este caso hay oxígeno en los gases producto de la combustión. O con defecto de aire, ahora en los gases de combustión se detecta la presencia de inquemados (Elías, 2003).

En los procesos industriales es difícil conseguir una combustión completa, o sin la presencia de inquemados. Durante el proceso de combustión se presentan oscilaciones de la temperatura que es preciso corregir de manera constante. Esta corrección suele llevarse a cabo por medio de la cantidad de aire. Cuando la masa de comburente varía la hidrodinámica de la mezcla se altera y las probabilidades de que aparezcan inquemados, aunque sea de forma instantánea, es muy grande. De hecho esta contingencia ya la prevé el diagrama de combustión, donde la posibilidad de tener inquemados es muy elevada.

El primer inquemado, y más común, que aparece es el monóxido de carbono (CO). Se trata de un gas venenoso, cuya ecuación de formación:



Suponiendo que la mezcla sea correcta, que:

- Cuanto más carbono esté presente en el combustible, mayor potencial de formación de CO.
- La producción de CO disminuye con el incremento del exceso de aire.
- La producción de CO aumenta con el incremento de la temperatura.

Si bien desde el punto de vista técnico una CE = 99 %, es un buen resultado, transponiendo este valor a la ecuación anterior resulta CO = 0,08081 %, o sea 808 ppm de CO, valor inaceptable desde la óptica medio ambiental.

### 1.7.1. Tipos de combustibles y sus características

En el petróleo natural, además de hidrocarburos, existen nitrógeno, azufre, oxígeno, coleserina, productos derivados de la clorofila y de las heminas (porfirinas) y, como elementos, trazas, vanadio, níquel, cobalto y molibdeno. Como consecuencia de los compuestos orgánicos nombrados, el petróleo presenta polarización rotatoria, lo cual revela claramente que se trata de un compuesto de origen orgánico, formado a partir



de restos animales y vegetales. Según (Ávila, 2010).

La composición química del petróleo es muy variable, hasta el punto de que los cuatro tipos fundamentales de hidrocarburos: parafinas(hidrocarburos saturados), olefinas (hidrocarburo sin saturados), naftenos (hidrocarburos cíclicos saturados o ciclo alcanos) e hidrocarburos aromáticos, no solamente son diferentes de un yacimiento a otro, sino también las diversas sustancias que es preciso eliminar más o menos completamente: gas, azufre (que junto con el sulfhídrico, mercaptanos y alcoholes pueden alcanzar un 3 %), agua más o menos salada, compuestos oxigenados y nitrogenados, indicios o vestigios de metales etc. Un análisis en el laboratorio proporciona primeramente indicaciones sobre la cantidad y calidad de los productos acabados que se pueden extraer del petróleo crudo:

- Alta tensión de vapor, revela la presencia de gas.
- Alta densidad y viscosidad, indican una reducida proporción de gasolina o un contenido importante de betún o parafina.

La clasificación del petróleo se basa en la clase de compuestos químicos que predominan en el petróleo crudo:

#### **Petróleo de base parafínicas.**

- Predominan los hidrocarburos saturados o parafínicos.
- Son muy fluidos de colores claros y bajo peso específico (aproximado a 0,85 kg/l).
- Por destilación producen abundante parafina y poco asfalto.

#### **Petróleo de base asfáltica o nafténica**

- Predominan los hidrocarburos etilénicos y diétilínicos, cíclicos ciclánicos (llamados nafténicos), y bencénicos o aromáticos.
- Son muy viscosos, de coloración oscura y mayor peso específico de 0,95 kg/l.
- Por destilación producen un abundante residuo de asfalto.

#### **Petróleo de base mixta**

De composición de bases intermedias, forma dos por toda clase de hidrocarburos:

- Saturados, no saturados (etilénicos y acetilénicos) y cíclicos (ciclánicos o nafténicos



y bencénicos o aromáticos).

- La mayoría de los yacimientos mundiales son de este tipo.

A su vez la composición de los hidrocarburos que integran el petróleo varía según su lugar de origen:

- Petróleos americanos: hidrocarburos de cadenas abiertas o alifáticas.
- Petróleos de Pensilvania: hidrocarburos saturados (alcanos de nº. de C = 1 a 40).
- Petróleos de Canadá: hidrocarburos no saturados.
- Petróleos rusos: hidrocarburos cíclicos con 3, 4, 5 ó 6 átomos de carbono en cadena abierta o cerrada.

### 1.7.2. Clases del petróleo cubano

En nuestro país, en los procesos de combustión de los generadores de vapor, se han utilizado diferentes clases de petróleo, obtenidos a partir del petróleo crudo, mezclado con otras sustancias para el mejoramiento de sus propiedades, que inciden en el proceso de combustión (Ávila, 2010).

#### Estas clases son:

1. FC900 - Está compuesto por crudo cubano mezclado con fuel oil de alto contenido de vanadio con una proporción de 45-55 ppm y un dispersante de asfaltenos a 100 % (este combustible comenzó a producirse en el año 1996).
2. Crudo mejorado 650 (CM-650).
3. Crudo mejorado 1100 (CM-1100).
4. Crudo mejorado 1400 (CM-1400).

Los crudos mejorados 650, 1100 y 1400 son obtenidos al mezclar petróleo crudo con nafta y un dispersante de asfaltenos a 100 ppm. (Estos combustibles comienzan a elaborarse a partir del año 1997).

Los números que representan a cada uno de estos combustibles definen la viscosidad en CentiStokes (cSt) a 50 °C. En el anexo 2 se muestran las especificaciones del CM-650, al ser el crudo analizado en esta investigación.



### 1.7.3. Métodos para mejorar los procesos de combustión

Existen diferentes métodos, el método directo es el más simple y fácil de aplicar.

$$\text{Eficiencia} = (\text{Energía saliente} / \text{Energía entrante}) * 100$$

- Las condiciones de la caldera deben ser controladas
- Sirve para comparar tendencias de rendimiento por comparaciones previas.
- La mejor comparación se obtiene cuando la caldera es nueva o después de una limpieza y revisión general.

El método Indirecto: Se llama método de pérdidas

$$\text{Eficiencia} = (\text{Energía entrada} - \text{perdida}) / \text{Energía entrada} * 100$$

- Se requiere medir los gases de combustión y un análisis detallado del combustible.
- Se requiere de muchos datos y cálculos
- Pérdidas debido a la humedad del combustible (Se aplica para el carbón)
- Pérdidas debida a la combustión, el hidrogeno de combustible que también forma agua y va a la chumacera como vapor (Se considera una pérdida inherente no controlable.
- Pérdidas debido a la humedad del aire usado para la combustión (razón para precalentar el aire en calderas grandes)
- Perdidas debida al calor llevado a la chimenea por los gases de combustión.
  - Alto exceso de aire revelador por un análisis de los gases de combustión.
  - Suciedad o incrustaciones de las superficies de transferencias del lado del agua y del fuego o gases.
  - Pobre circulación del agua en comparación con los flujos del lado de los gases de combustión.
- Velocidad de gas demasiado alta a través de la caldera (demasiado tiro)
- Pérdidas debido a la combustión incompleta por:
  - Suministro de aire insuficiente
  - Hogar frío o baja carga
  - Pobre atomización o pulverización de los combustibles, especialmente



aplicables a calderas de combustibles sólidos.

#### 1.7.4. Parámetros fundamentales que intervienen en el proceso de combustión

Los parámetros fundamentales que intervienen en el proceso de combustión de la CT:

##### **Sistema Combustible**

- Presión del combustible delante de los quemadores
- Flujo del combustible delante de los quemadores
- Temperatura del combustible delante de los quemadores
- Presión de vapor de atomización delante de los quemadores
- Flujo de vapor de atomización delante de los quemadores
- Cantidad de quemadores en servicio
- Posición de la reguladora de combustible delante de los quemadores

##### **Sistema aire**

- Flujo de aire a los quemadores
- Exceso de aire antes de los CAR
- Exceso detrás de los CAR
- Temperatura del aire detrás de los CAR
- Temperatura del aire detrás de los precalentadores de aire
- Temperatura ambiente
- Por ciento de apertura de las compuertas de regulación de los VTF.
- Flujo de vapor a los precalentadores de aire
- Coeficiente de exceso de aire

##### **Sistema gases**

- Temperatura teórica de los gases de combustión
- Presión del Horno
- Temperatura de los gases detrás del horno
- Temperatura de los gases entre pasos de los tiros de la caldera (Horno, y Eje convectivo)
- Temperatura de los gases detrás de las superficies de intercambio de calor (



Sobrecalentador 3, Sobrecalentador 4, Recalentador 2, Recalentador 1 y detrás de Economizador)

- Temperatura de los gases detrás de los CAR
- Por ciento de apertura de las compuertas de regulación de los VRG

### **1.8. Conclusión del capítulo 1**

1. Quedó establecido el marco teórico que sustenta la presente investigación. El mismo evidenció que los trabajos precedentes se orientan, fundamentalmente, al análisis termoenergético del generador de vapor # 2 de la CT de Felton y por tanto no profundizan en los aspectos más importantes del proceso de combustión.



## CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Introducción

Un índice aproximado de la eficiencia de una instalación de un generador de vapor en un momento dado es indicado por el grado de combustión del combustible y por las pérdidas de calor a través de los gases de escape, que se determinan por el análisis de estos gases. Esta eficiencia de la combustión se relaciona únicamente con la operación del quemador y es afectada sensiblemente por la cantidad de exceso de aire que se suministra.

En el presente capítulo se presentará la metodología para investigar de manera experimental los parámetros óptimos de operación de los quemadores empleados en el generador de vapor # 2 de la Empresa Termoeléctrica de Felton, así como brindar un análisis integrado de la combustión a partir de los registros históricos de análisis de gases producto de combustión y las características del combustible utilizado en la instalación para el análisis de la eficiencia en el generador de vapor.

### 2.2 Descripción tecnológica del banco de prueba:

El banco de prueba de quemadores de la CT para las cañas de los quemadores, está construido con las medidas y disposición que adoptan las cañas de los quemadores en la caldera. Se hace necesario antes de armar las cañas, realizar las mediciones de los orificios de salida del atomizador (anexo 3), esta medición se realiza a través de un calibrador que debe ser de un material blando, por ejemplo teflón, construido con las medidas de cada uno de los orificios de la boquilla de atomización que son de diámetro por los orificios de combustible 3,5 y 2,9 mm y por los orificios de vapor 3,5 y 6,0 mm. La dureza de dichas piezas debe ser medida y controlada antes de ser introducidas en el almacén, con el fin de evitar deformaciones por esta causa, estando dentro de los parámetros establecidos. Este banco es una estructura metálica conformada y equipado por dispositivos y accesorios para evaluar o simular experimentalmente el comportamiento de los quemadores de la central térmica.

### 2.3 Descripción del banco de prueba de los quemadores

Con el objetivo de verificar las características de trabajo de los quemadores teniendo en



cuenta lo difícil que esto resulta durante su explotación en la cámara del horno y su importancia económica, se emplean de forma convencional, la simulación del trabajo de los quemadores a través de los bancos de calibración y comprobación para determinar las siguientes características:

- Características de consumo.
- Angulo de apertura del cono de atomización.
- Calidad de la atomización en el rango de variación de la presión.
- Hermeticidad de las piezas que conforman la cabeza del quemador.

### **Elementos que conforman el banco de prueba de quemadores.**

El banco de prueba de quemadores está compuesto por los siguientes elementos y accesorios como se muestra en la Figura 2.1.

- Bancaza de prueba de las cañas.
- Mordaza o culata fija de ajuste de la caña del quemador.
- Quemador.
- Cajón metálico.
- Mangueras de acoplamiento de los fluidos (agua, vapor, aire).
- Drenaje libre de residuales.
- Aro de referencia del Angulo del cono de atomización.
- Sistema de tuberías de agua, aire y vapor.
- Dispositivos de medición.
  - Un manómetro para las mediciones de la presión del agua.
  - Un monómetro para medir la presión del vapor de limpieza de las cañas.
  - Un manómetro para medir la presión de aire.
  - Placa de orificio para mediciones de flujo.
  - Un flujómetro.

### Descripción de la instalación:

El montaje de la instalación del banco de pruebas de los quemadores está en correspondencia de las facilidades de la propia CT, se utiliza una línea de agua del propio proceso tecnológico con una reductora de presión que garantice el rango de

presiones de trabajo del quemador, en esta prueba se someten a pruebas experimental diferentes boquillas de atomización empleadas en el proceso de combustión del generador de vapor # 2 de CT Felton, las cuales son sometidas a varios momentos de presiones (4, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 14, 15 kgf/cm) y de flujos (flujo mínimo, medio y máximo) en lo cual se evidencia un resultado y que dichas boquillas cumplen con las exigencia necesarias para ser utilizadas en el hogar del generador de vapor.



Figura 2.1. Banco de prueba de quemadores

Especificaciones de algunos componentes del banco de prueba del quemador:

Aro: Se utiliza para garantizar el ángulo de apertura del cono de atomización, los aros deben de desplazarse para determinar el ángulo del cono para diferentes tipos de quemadores. Además sus diámetros deben de coincidir con los diámetros de salida del difusor

Sistema de tuberías: Para su diseño deben tenerse en cuenta los valores de presiones de los diferentes fluidos. La línea de vapor se utiliza para el soplado del quemador antes de la prueba, para eliminar todas las partículas residuales de combustible.

Dispositivos de mediciones: Se debe de instalar mediciones manométricas en cada línea de la sustancia de trabajo (aire, agua, vapor), con la finalidad de comprobar las presiones antes del comienzo de cada prueba y estos instrumentos de medir tienen que tener las mismas condiciones a los instalados en el proceso de trabajo de los



quemadores en el generador de vapor.

Cajón metálico: Es un paraban que a la vez sirve de recuperador de las aguas residuales de las prueba y al mismo tiempo permite su evacuación a través de un drenaje libre.

## **2.4 Descripción experimental del banco de prueba de los quemadores**

La comprobación analítica del diseño del quemador es una tarea de alta complejidad, por consiguiente no podemos saber si la clase de quemador empleado es adecuado o no, para estar seguros que el quemador tendrá la capacidad suficiente para soportar la carga de la demanda máxima, las recomendaciones se basarán en los datos experimentales obtenidos en el banco de prueba; partiendo del supuesto que es preferible elegir un quemador un poco más grande que uno de menor capacidad.

### **2.4.1 Descripción del procedimiento experimental**

La verificación de los quemadores que se instalan en los generadores de vapor ha de efectuarse en un banco especial, estos bancos de calibración de los quemadores tienen que ser instalados obligatoriamente en todas las centrales eléctricas y salas de calderas industriales, la ejecución de las pruebas está regida por el procedimiento TL- OE - 4116 del sistema de calidad de la ETE y se realizan las siguientes mediciones:

- a) Hermeticidad interna y externa de las piezas que conforman el quemador.
- b) Angulo del cono.
- c) Flujo de combustible en función de la presión.
- d) Calidad de la atomización.
  - Control de las dimensiones de los orificios del atomizador (orificios de combustible y de vapor).
  - Después de armadas las cañas de los quemadores, se realizan las pruebas de hermeticidad interna, entre el conducto de combustible y el vapor, abriendo la válvula del líquido manteniendo cerrada la de vapor, en el caso de tener pase a través de los sellos o de la rosca para el conducto de vapor se observara incremento de presión en el manómetro que mide la presión de vapor, después de verificada la hermeticidad o reparado el daño se abre la válvula de aire, se le



inyecta agua a través del conducto de combustible y se verifica el estado de la hermeticidad exterior.

- Pruebas de flujo, contra presión, que consisten en aplicar una presión de aire de alrededor de 0,7 - 1,0 MPa y una presión de líquido de 0,6 MPa, midiendo en estos parámetros el flujo de líquido, el ángulo del cono y la calidad de la atomización (grueso de las gotas 100 - 300 micrones y como máximo 500 micrones).
- Para conocer el ángulo del cono se coloca la caña ras con la camisa simulada, se conecta la manguera de agua al conducto de combustible y la de aire al conducto de vapor de atomización, se abre la válvula de agua y se observa la presión, debiendo tener una presión entre 1,6 y 1,8 MPa, posteriormente se abre la válvula de aire de atomización a una presión de 0,8 a 1,0 MPa comprobando que el cono no sobrepasa el aro colocado en el banco en la parte más ancha de la atomización obtenida.
- Para determinar el estado de la atomización (gotas), se abre la válvula de líquido, percatándonos de que prácticamente sale un chorro, posteriormente comenzamos a abrir lentamente la válvula de aire, observando que poco a poco aparece la dispersión, a medida que aumentamos la presión de aire hasta el valor de trabajo, observaremos que las gotas se van reduciendo, así como la longitud del chorro, el cual no debe sobrepasar los 2,5 m.

Es importante tener en cuenta que las cañas destinadas a los distintos pisos de quemadores tengan un flujo similar (figura 2.2) con una diferencia no mayor de 50 l/min, las boquillas de más flujo deben colocarse en los quemadores inferiores y las de menos flujo en los superiores, estas diferencias pueden estar dadas al aumento de los diámetros de los orificios por desgaste, sin embargo, las boquillas deben ser retiradas al aumentar el flujo más de 50 l/min. Al mismo tiempo debe observarse la calidad de la atomización, la cual consiste en la observación por experiencia, no debe observarse chorros o gotas muy gruesas, la medida de las gotas no debe sobre pasar los 500 micrones, sin embargo, la medida óptima se encuentra entre los 100 y 300 micrones.

En el caso de los generadores de vapor que queman combustible con bajo coeficiente de exceso de aire  $\alpha = 1,03$  % es de suma importancia que se considere la diferencia en



la productividad nominal de los quemadores que se instalan para la operación, esta diferencia no debe de superar a la norma en 1,5 %.

Las cañas de atomización con fluido auxiliar, trabajan en un rango de presión de combustible de 1,0 a 3,2 MPa, con un ángulo de cono de 60°, a 3,2 MPa aportan 5700 kg/h.

El banco de pruebas para las cañas de los quemadores está construido con las medidas y disposición que adoptan las cañas de los quemadores en la caldera. Para realizar las mediciones de los orificios del atomizador se emplea un calibrador que debe ser de un material blando, por ejemplo teflón, construido con las medidas de cada uno de los orificios de la boquilla de atomización, que son las siguientes: diámetro por los orificios de combustible 2,9 y 6 mm, por los orificios de vapor 3,5 mm por la entrada y la salida. Durante las mediciones de flujo contra presión de combustible se obtuvieron los valores mostrados en la tabla 2.1.

Para conocer el ángulo del cono se coloca la caña ras con la camisa simulada, se conecta la manguera de agua al conducto de combustible y la de aire al conducto de vapor de atomización, se abre la válvula de agua y se observa la presión, debiendo tener una presión entre 1,6 y 1,8 MPa, posteriormente se abre la válvula de vapor de atomización a una presión de 0,8 a 1,0 MPa comprobando que el cono no sobrepasa el aro colocado en el banco en la parte más ancha de la atomización obtenida.

Para determinar el estado de la atomización (gotas), se abre la válvula de líquido, percatándonos de que prácticamente sale un chorro, posteriormente comenzamos a abrir lentamente la válvula de aire, observando que poco a poco aparece la dispersión, a medida que aumentamos la presión de aire hasta el valor de trabajo, observaremos que las gotas se van reduciendo, así como la longitud del chorro, el cual no debe sobrepasar los 2, 5 m.

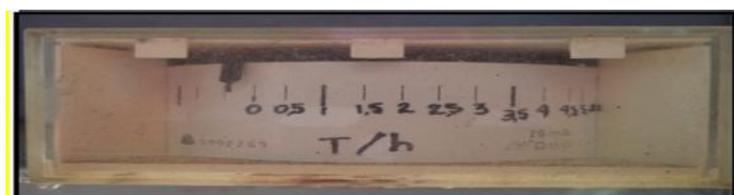


Figura 2.2. Medidor de flujo de combustible en el banco de prueba.

### Valores de prueba en el banco de quemadores.

Las pruebas de los quemadores en el banco se realizarán para determinar el mejor comportamiento de las boquillas que se usan en el proceso de combustión.

En este experimento se someten a evaluación dos tipos de boquillas una de diámetro de 2,7 mm y la otra de diámetro 2,9 mm.

Para realizar esta prueba se fijaron diferentes valores de presión para obtener flujos diferentes referencias de flujos. Ver tabla 2.1.

Tabla 2.1. Valores de prueba

Flujo de quemadores con boquilla de diámetro											
Presión kgf/cm <sup>2</sup>	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Flujo Mínimo m <sup>3</sup> /h	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Flujo Medio m <sup>3</sup> /h	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Flujo Máximo m <sup>3</sup> /h	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

### 2.5 Equipos de medición empleados en las prueba de comportamiento

El análisis químico de los combustibles empleados se realiza en los laboratorios de la Empresa Termoeléctrica de Felton, los cuales cuentan con equipos sofisticados y personal calificado que permiten obtener valores confiables para cada uno de los elementos que integran el combustible. De igual forma sucede con la medición de la composición química de los gases producto de la combustión, cuyos valores de mediciones fueron realizados con equipos especiales. Ver figura 2.3



Figura 2.3. Medición de Promedio de gases producto de la combustión.



Datos Técnicos

Tipo: Testo 400

Rango de medición. (Humedad/Temperatura): T: 0-100 % RH / 0-60 C

Máxima Presión: 1 bar

### 2.5.1 Instrumentos utilizados en el laboratorio para analizar el combustible

Para realizar en el laboratorio los distintos análisis del combustible se usan los equipos mostrados en la figuras 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 y 2.10.

- **Spectrophotomer génesis 10suv –bis ultra visible:** Para determinar el vanadio.



Figura 2.4. Spectrophotomer génesis 10suv –vis

Este equipo es para la determinación por espectrofotometría del contenido de vanadio en el combustible y determinación espectrofotométrica de varias soluciones o elementos químicos como el hierro, cobre y aluminio.

Datos técnicos

Tipo: 10 suv-vis

Voltaje: 100-240 V

Frecuencia: 50-60 Hz

- **Horno mufla:** Para determinar el % de ceniza en el petróleo.



Figura 2.5. Horno mufla Nabertherm

- **Baño termostático:** Para determinar la viscosidad cinética.

Datos Técnico

Voltaje: 110 V

Frecuencia: 50-60 Hz

Rango de medición: Temperatura de 0 a 1100 C

Rango de medición para el azufre: S= 500 C

Rango de medición para las cenizas: cen = 750 C



Figura 2.6. Viscosímetro o baño termostático

Mediante este equipo controlando la temperatura podemos determinar viscosidad a los líquidos opacos ejemplo aceite, petróleo y la viscosidad obtenida es cinemática. El grado de error en este equipo es de  $\pm 0,1$ .



Datos Técnicos

Voltaje 220 -230 V

Frecuencia de 50-60 Hz

Rango de medición de 0 – 200 C

Para determinación de temperatura del aceite rango de medición: 40-60 C

Para determinación de temperatura de CM 1100 cSt rango de medición: 50-80 C

- **Manta calefactora:** Para determinar % de agua y asfáltenos



Figura 2.7. Plancha de calentamiento para la determinación de porcentaje de agua

Grado de precisión es de  $\pm 0,2 \%$

Datos Técnicos

Voltaje: 220 V

Frecuencia: 50-60 Hz

Rango de medición: Temperatura de 10- 100 C

- **Equipo para carbón conradson.**



Figura 2.8. Equipo de carbón conradson

Datos Técnicos

Tipo: Mechero

- **Equipo para punto de inflamación.**



Figura 2.9. Equipo de punto de inflamación de copa cerrada

Para determinar el punto de inflamación del combustible.

Datos Técnicos

Voltaje: 110 V

Frecuencia: 50-60 Hz

Rango de medición: Temperatura de 10- 100 C

- **Calorímetro IKA C 2000:** Determinar el valor calórico.



Figura 2.10. Calorímetro adiabático IKA 4000

En este equipo se determina valores de combustión de escala de laboratorio tanto a líquido como a sólido.

Datos Técnicos

Tipo: IKA C 2000



Voltaje: 220 V

Frecuencia: 50-60 Hz

## 2.6 Metodologías para evaluar la combustión en generador de vapor #2 y su rendimiento.

El Balance Térmico de un generador de vapor posibilita determinar la eficiencia térmica, la capacidad, así como otras características operacionales, con el propósito de:

- Comparar el comportamiento real con el de garantía.
- Comparar diferentes métodos de operación.
- Determinar el comportamiento de diferentes componentes del generador de vapor.
- Comparar el comportamiento durante la combustión de diferentes combustibles.
- Determinar el efecto de cambios en el equipamiento.

### 2.6.1. Cálculo de los volúmenes de la combustión

#### Volumen de aire teórico ( $m^3/kg$ )

$$V^{\circ}a = 0,0889 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) + 0,265 \cdot H^t - 0,0333 \cdot O^t \quad (2.1)$$

Dónde:

$C^t$ : Cantidad de carbono en el combustible,  $kJ/m^3$ -

$S^t$ : Cantidad de azufre en el combustible, %.

$H^t$ : Cantidad de hidrogeno en el combustible, %.

$O^t$ : Cantidad de oxígeno en el combustible, %.

#### Volumen total real de gases triatómicos ( $m^3/kg$ )

$$V_{RO_2} = 0,01866 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) \quad (2.2)$$

Dónde:

$C^T$ : Cantidad de carbono en el combustible,  $kJ/m^3$ -

$S^t$ : Cantidad de azufre en el combustible, %.



### Volumen teórico de nitrógeno (m<sup>3</sup>/kg)

$$V^{\circ}_{N_2} = 0,79 \cdot V^{\circ}a + 0,008 \cdot N^t \quad (2.3)$$

Dónde:

V<sup>o</sup>a: Volumen teórico del aire, m<sup>3</sup>/kg.

N<sup>t</sup>: Cantidad de nitrógeno en el combustible, %.

### Volumen teórico de los gases secos (m<sup>3</sup>/kg)

$$V^{\circ}gS = V_{RO_2} + V^{\circ}_{N_2} \quad (2.4)$$

Dónde:

V<sub>RO<sub>2</sub></sub>: Volumen total real de gases triatómicos, m<sup>3</sup>/kg.

V<sup>o</sup>N<sup>2</sup>: Volumen teórico de nitrógeno, m<sup>3</sup>/kg.

### Volumen real de gases (m<sup>3</sup>/kg)

$$Vg = V^{\circ}g + (r - 1) \cdot Va \quad (2.5)$$

Dónde:

V<sup>o</sup><sub>g</sub>: Volumen teórico de gases, m<sup>3</sup>/kg.

r: Coeficiente del exceso de aire, adimensional.

V: Volumen del aire, m<sup>3</sup>/kg.

### Volumen real de aire (m<sup>3</sup>/kg)

$$Va = V^{\circ}a \cdot r \quad (2.6)$$

Dónde:

Va: Volumen del aire, m<sup>3</sup>/kg.

**Determinación del calor disponible** ( $kJ / kg$ )

$$Q_d = Q_{bc} + Q_{pca} + Q_{vat} + Q_{fc} \quad (2.7)$$

Dónde:

$Q_{bc}$ : Valor calórico inferior del combustible

$Q_{fc}$ : Calor físico del combustible

$Q_{pca}$ : Calor añadido en el precalentador de aire

$Q_{vat}$ : Calor suministrado por el vapor de atomización, ( $kJ / kg$ )

$$Q_{fc} = C_c * T_c \quad (2.8)$$

$C_c$ : Calor específico del combustible a la temperatura  $t$

$T_c$ : Temperatura del combustible suministrado al horno

Para combustible líquido ( $C_c$ ) puede calcularse por:

$$C_c = 1.738 + 0.0025 * T_c$$

Calor añadido en el Precalentador de aire.

Se considera este término si el aire es recalentado con vapor u otra fuente de energía externa.

**2.6.2. Calculo de poder calórico del combustible**

Determinación de poder calórico de combustible, ( $kJ / kg$ )

$$Q_b^t = 339 * C^t + 1030 * H^t - 109 * (O^t - S^t) - 24W^t \quad (2.9)$$

$C^t$ : Cantidad de carbono en el combustible, %

$H^t$ : Cantidad de hidrogeno en el combustible, %

$O^t$ : Cantidad de oxígeno en el combustible, %

$S^t$ : Cantidad de azufre en el combustible, %

$W^t$ : Cantidad de humedad en el combustible, %



### 2.6.3. Cálculo del coeficiente de exceso de aire

Para combustión incompleta

$$r = \frac{N_2}{N_2 - 3,76 \cdot (O_2 - 0,5 \cdot CO - 0,5 \cdot H_2 - 2 \cdot CH_4)} \quad (2.10)$$

$$N_2 = 100 - (CO + CO_2 + O_2) \quad (2.11)$$

Dónde:

$r$ : Coeficiente del exceso de aire, adimensional.

$N_2$ : Cantidad de dinitrógeno presente en los gases de escape, %.

$O_2$ : Cantidad de dióxígeno presente en los gases de escape, %.

$CO$ : Cantidad de monóxido de carbono presentes en gases de escape, %.

$CO_2$ : Cantidad de dióxido de carbono presentes en gases de escape, %.

$H_2$ : Cantidad de dihidrógeno presentes en gases de escape, %.

$CH_4$ : Cantidad de metano presentes en gases de escape, %.

### 2.6.4. Cálculo de las entalpías de los gases de la combustión y el aire

Las entalpías de los gases son las que caracterizan la capacidad de entrega de calor de los equipos del generador de vapor a los medios de trabajo como el agua, vapor o aire.

#### Entalpía teórica de los gases

$$I^o g = V_{RO_2} \cdot I_{RO_2} + V^o_{N_2} \cdot I_{N_2} + V^o_{H_2O} \cdot I_{H_2O} + 0,01 \cdot A^t \cdot A_{arr} \cdot I_{cen} \quad (2.12)$$

Dónde:

$A_{arr}$ : Fracción de ceniza arrastrada por los gases

$A^t$ : Por ciento de ceniza arrastrada por los gases

Para  $r = 1$   $I_{CO_2} = I_{RO_2}$

Todos los valores se expresan en  $kJ / m^3$  excepto  $I_{ceniza}$  se expresa en  $(kJ / kg)$ .



### Entalpía real de los gases

$$I_g = I^\circ_g + I^\circ_{aire} \cdot (r - 1) \quad (2.13)$$

$$I^\circ_{aire} = V^\circ_a \cdot i_{aire} \quad (2.14)$$

Dónde:

$I_g$  : Cantidad de calor de los gases producto de la combustión, kJ/kg

$i_{aire}$  : Se busca a la temperatura que entra el aire, kJ/kg

$I^\circ_g$  : Se busca a la temperatura de los gases de escape, kJ/kg

Tabla 2.5. Valores de entalpia para diferentes temperaturas. (Faires, 1991).

$T^\circ C$	$I_{CO_2}$	$I_{N_2}$	$I_{H_2O}$	$I_{aire}$	$I_{ceniza}$
100	169,98	129,79	150,72	132,30	80,80
200	357,55	260	304,38	266,28	169,14
300	558,93	311,88	462,64	403,77	263,76
400	772	527	626	542	360

### Calculo de pérdida en los gases de escape ( $q_2$ )

Se produce al salir de la caldera los gases a una alta temperatura y arrastran una cantidad de calor hacia la atmósfera, está caracterizada por dos factores fundamentales:

- Coeficiente de exceso de aire.
- Temperatura de los gases de escape.

$$q_2 = \frac{(I_{ge} - r \cdot I_{af}) \cdot (100 - q_4)}{Q_d} \quad (2.15)$$



### Pérdida por incombustión química ( $q_3$ )

Estas pérdidas se originan porque no todos los carbonos y otras sustancias hallan oxígeno suficiente para sufrir una oxidación completa, lo que causa que la reacción sea incompleta y se desprende cierta cantidad de calor, la misma depende de:

#### Coeficiente de exceso de aire.

Mala selección de los equipos auxiliares (calentador, ventiladores, quemadores, etc.)

$$q_3 = \frac{(30,2 \cdot CO + 25,8 \cdot H_2 + 85,5 \cdot CH_4) \cdot V_{gs} \cdot (100 - q_4)}{Q_d} \quad (2.16)$$

### Pérdida por incombustión mecánica ( $q_4$ )

La magnitud de esta depende del combustible, del tipo de horno y de su temperatura. La determina el combustible que no reacciona en el proceso de combustión.

Los rangos de su magnitud son:

- 0,5 a 5 % para sólidos en cámara
- 2 a 15 % para sólidos en capa y pila
- 0 % para líquidos y gaseosos

$$q_4 = \left[ a_{esc} \cdot \frac{C_{esc}}{100 - C_{esc}} + a_{cen} \cdot \frac{C_{cen}}{100 - C_{cen}} + a_{arr} \cdot \frac{C_{arr}}{100 - C_{arr}} \right] \cdot \frac{327,8 \cdot A^t}{Q_d} \quad (2.17)$$

$$a_{esc} = \frac{B_{esc} \cdot A_{esc}}{B \cdot A^t} ; a_{cen} = \frac{B_{cen} \cdot A_{cen}}{B \cdot A^t} ; a_{arr} = 1 - a_{esc} - a_{cen} ; B = \frac{D}{d} \quad (2.18)$$

Dónde:

$a_{esc}$ ,  $a_{cen}$ ,  $a_{arr}$ : Fracción del contenido total de cenizas del combustible en la escoria, residuos en las tolvas de la zona convectiva, residuos en los gases de arrastre.

$C_{cen}$ ,  $C_{esc}$ ,  $C_{arr}$ : Contenido de elemento en la ceniza, escoria y los gases de arrastre.

$B_{esc}$ ,  $B_{cen}$ : Flujo de cenizas

d: índice de generación



**Calculo de bance térmico,**

$$Y_{GV_{MI}} = 100 - \sum_{n=2}^6 q_n \quad (2.19)$$

Dónde:

$\Sigma q_n$  : Sumatoria de las pérdidas.

**2.7 Conclusiones del capítulo 2**

1. Se determinó la metodología experimental para las pruebas en el banco de quemadores.
2. Se determinaron los instrumentos para las diferentes mediciones de análisis de gases y de las características del combustible.
3. Quedaron establecidas las expresiones matemáticas y el procedimiento de cálculo para la evaluación de los parámetros fundamentales que se relacionan con el proceso de combustión y la eficiencia en el generador de vapor.



## CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDO DE LA EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN ET FELTON

### 3.1 Introducción

En el capítulo se exponen los resultados, gráficos, tablas y comentarios necesarios para establecer un análisis estructurado para una caracterización de la operación de los quemadores y del rendimiento de los generadores de vapor.

### 3.2 Resultados experimentales

#### 3.2.1. Comportamiento de los quemadores.

Para el análisis del funcionamiento del equipo de combustión bajo diferentes condiciones de operación y diferentes dimensiones de las boquillas de los quemadores. Los resultados obtenidos mediante la experimentación se muestran en las tablas 3.1 y 3.2.

**Tabla 3.1.** Resultados de prueba con la boquilla con diámetro 2,7 mm

Resultados de prueba con la boquilla con diámetro 2,7 mm											
Presión kgf/cm <sup>2</sup>	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Flujo Mínimo m <sup>3</sup> /h	3,42	3,42	3,65	3,94	4,32	4,65	4,75	4,75	4,75	4,75	4,75
Flujo Mediom <sup>3</sup> /h	3,6	3,6	3,85	4,15	4,55	4,9	5	5	5	5	5
Flujo Máximom <sup>3</sup> /h	3,78	3,78	4,04	4,35	4,77	5,14	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25

**Tabla 3.2.** Resultados de prueba con la boquilla con diámetro 2,9 mm

Resultados de prueba con la boquilla con diámetro 2,9 mm											
Presión kgf/cm <sup>2</sup>	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Flujo Mínimo m <sup>3</sup> /h	3,04	3,18	3,68	3,71	4,32	4,47	4,61	4,75	4,75	4,75	4,75
Flujo Mediom <sup>3</sup> /h	3,2	3,35	3,87	3,9	4,55	4,7	4,85	5	5	5	5
Flujo Máximom <sup>3</sup> /h	3,36	3,52	4,07	4,1	4,78	4,94	5,09	5,25	5,25	5,25	5,25



### 3.2.2. Experimentación del comportamiento del generador de vapor # 2

Para el análisis obtenido experimentalmente, se tuvo en cuenta la evaluación o comportamiento de las magnitudes o variables que intervienen en el proceso de combustión y en la eficiencia del generador de vapor. Los parámetros operacionales que se seleccionaron, cumplen con el requerimiento de ser obtenidos a partir de fijar las potencias activa a la que se estaba generando (250 MW; 230 MW; 180 MW; 150 MW; 125 MW) en determinados momentos del día (horario pico y no pico) en tres días diferentes, a partir de los datos obtenidos, tomando como referencia los valores promedio de estas magnitudes y se obtuvieron los resultados fundamentales en el cálculo de la evaluación energética del generador de vapor. Aprovechando que la instalación cuenta con un sistema de automatización y control complejo (SCADA) donde se visualizan y almacenan los valores de las principales variables que intervienen en el proceso. En la tabla 3.3

**Tabla 3.3.** Valores funcionales obtenidos en la experimentación del generador de vapor #2 para las Potencias eléctricas de 250,230, 100, 150 y 125 MW.

No	Parámetros	UM	Potencias eléctricas (MW)				
			250	230	180	150	125
1	Potencia eléctrica	MW	250	230	180	150	125
2	Presión domo	MPa	15,00	14,80	14,3	14,00	13,85
3	Temperatura saturación	°C	342,26	341,19	338,4	336,77	335,92
4	Flujo vapor SC salida caldera	t/h	828,00	766,00	622,6	503,00	427,00
5	Presión vapor SC salida caldera	MPa	13,60	13,60	13,5	13,45	13,40
6	Temperatura vapor SC salida caldera	°C	527	527	527	527	527
7	Flujo vapor RC salida caldera	t/h	704,6	648,3	525,0	421,6	347,0
8	Presión vapor RC salida caldera	MPa	3,40	3,10	2,52	2,01	1,64
9	Temperatura vapor RC salida caldera	°C	517,5	518,0	521,7	516,0	517,0
10	Presión agua entrada caldera	MPa	15,9	15,6	15,1	14,8	14,6
11	Temperatura agua entrada caldera	°C	240	236	226	215	207
12	Flujo de petróleo a quemadores	t/h	62,5	58,0	48,5	39,8	34,0
13	Presión de petróleo a quemadores	MPa	1,04	1,0	0,90	0,91	0,90
14	Temperatura petróleo a quemadores	°C	129	132	136,5	136	135,5
15	Presión de vapor a quemadores	MPa	0,91	0,91	0,88	0,88	0,81
16	Temperatura de vapor a quemadores	°C	239	238	240	238	239,5
17	Flujo de vapor a quemadores	t/h	2,05	2,08	2,18	2,16	2,23
18	Temperatura aire ambiente	°C	35,6	29,4	29,6	28,4	27
19	Presión horno	kPa	2,62	2,36	1,81	1,30	1,10



20	Flujo aire	Nm <sup>3</sup> /s	203,00	188,83	169	141,20	129
21	Temperatura aire salida CAR A	°C	276,5	271	265	246	239
22	Temperatura aire salida CAR B	°C	266	262	264	269	270
23	Temperatura gases salida CAR A	°C	170,70	167	157	141	134
24	Temperatura gases salida CAR B	°C	124,30	122	128	136	136
25	Temperatura vapor salida RC	°C	517,50	517,3	521,75	516	516
26	Presión vapor salida RC	MPa	3,25	2,96	2,40	1,90	1,50
27	Temperatura vapor entrada al RC	°C	355	350	335	328	323
28	Presión vapor entrada al RC	MPa	3,52	3,22	2,59	2,05	1,66

Otros de los parámetros que se tuvo en cuenta para el análisis termoenergético del generador de vapor, son las propiedades a la salida de los gases de la combustión.

Para este análisis de gases en las diferentes potencia de la caldera se realizaron con el empleo del analizador portátil de gases TESTO.

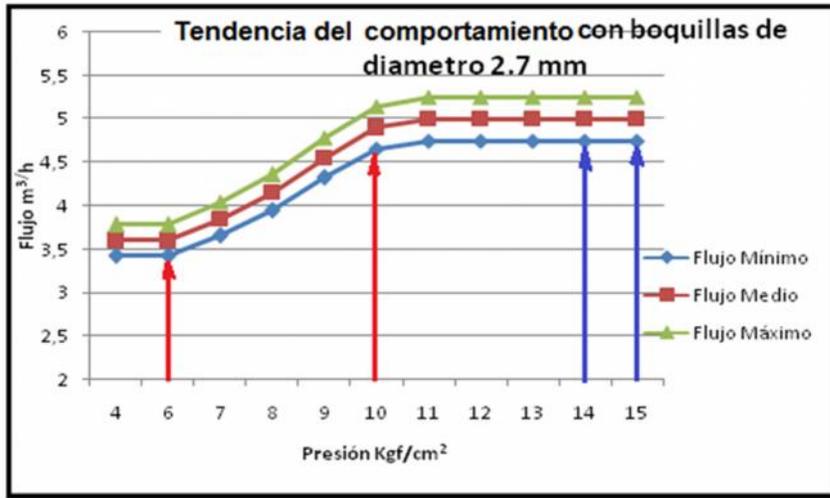
Los resultados promedios de las diferentes mediciones de los análisis de gases de combustión para los diferentes valores de potencia utilizados se muestran en la siguiente tabla 3.4.

**Tabla 3.4.** Resultados de los análisis de gases de la combustión.

Parámetros	U.M	Potencia eléctrica MW				
		250	230	180	150	125
O <sub>2</sub> entrada CAR A	%	0,70	1,03	2,00	2,00	3,25
O <sub>2</sub> entrada CAR B	%	1,10	1,53	2,05	2,23	3,30
Coeficiente de exceso de aire,	-	1,063	1,068	1,102	1,108	1,176
CO entrada CAR A	ppm	568,25	259,00	270,33	310,67	423,00
CO entrada CAR B	ppm	590,00	260,67	322,00	315,50	450,00
CO <sub>2</sub> entrada CAR A	%	15,12	15,12	14,28	14,39	13,44
CO <sub>2</sub> entrada CAR B	%	15,07	14,74	14,35	14,01	13,40
NO entrada CAR A	mg/m <sup>3</sup>	428,00	416,33	405,00	305,67	364,50
NO entrada CAR B	mg/m <sup>3</sup>	437,67	434,00	374,00	457,50	350,33
O <sub>2</sub> salida CAR A	%	1,98	2,57	3,75	3,33	5,35
O <sub>2</sub> salida CAR B	%	3,53	4,15	4,35	5,25	6,05
CO salida CAR A	ppm	503,25	157,33	21,50	155,33	5,50
CO salida CAR B	ppm	524,67	31,50	3,50	4,00	2,50
CO <sub>2</sub> salida CAR A	%	14,41	13,96	13,06	13,37	11,45
CO <sub>2</sub> CAR B	%	13,22	12,26	12,61	11,93	11,32
NO salida CAR A	mg/m <sup>3</sup>	417,25	423,67	361,50	288,00	351,00
NO salida CAR B	mg/m <sup>3</sup>	431,67	442,50	341,50	312,50	357,00

### 3.3 Resultados obtenidos durante las prueba experimental en el banco de quemadores empleando boquillas de diámetro 2,7mm.

A partir de las mediciones realizadas en los experimentos del comportamiento de las boquillas de los quemadores se obtuvieron los siguientes resultados. La figura 3.1 se representa la tendencia de los flujos de la sustancia de trabajo para diferentes presiones del quemador con boquilla de diámetro 2,7 mm .



**Figura 3.1.** Tendencia del comportamiento con la boquilla de diámetro 2,7 mm

Durante estas prueba, las mismas se realizaron variando en diferentes momentos los valores de presión respecto al flujo, donde se puede apreciar claramente el comportamiento de la calidad de la atomización y la proyección del ángulo del cono respecto al aro de medición, también queda demostrado que con valores bajos de presión del combustible delante del quemador no se debe de operar el quemador ya que con valores bajos de presión de combustible (desde 6 a 9 kg/cm<sup>2</sup>), no se recomienda la operación, porque fluctúa la estabilidad en el flujo de combustible, siendo este mejor y logrando una estabilidad de la atomización en valores superiores a los de 10 kg/cm<sup>2</sup>.

El comportamiento de los flujos obtenidos en la prueba experimental marca que entre los dos tipos de las boquillas seleccionadas, la diferencia no es notable respecto a su trabajo y comportamiento los dos tipos son adecuadas para ser sometidas a la operación en el propio horno para los diferentes momentos de la potencia y generación,

permitiendo la mantención de los parámetros óptimos del generador de vapor en valores cercanos a los de proyecto.

- Se selecciona la boquilla de 2,9 mm por presentar un mejor comportamiento durante esta prueba.
- El ángulo del cono de la boquilla de 2,7 mm y 2,9 mm a juicio de varios especialistas no es el más esperado.
- La variación en el diámetro del conducto de entrada de combustible entre las boquillas 2,7 mm y 2,9 mm, es la única diferencia existente entre las mismas.
- La presión a la que no se deben trabajar en ningún momento los quemadores es de 6 y 7  $\text{kgf/cm}^2$ , se producen intervalos en la atomización y de los 8 orificios que componen la salida del combustible, algunos de estos dejan de atomizar.

### 3.4 Resultados obtenidos durante las prueba experimental en el banco de quemadores empleando boquillas de diámetro 2,9mm.

De igual manera se hace el análisis del comportamiento del quemador a partir de las pruebas realizadas pero con otro tipo de boquilla con diámetro 2,9 mm, los resultados obtenidos se muestran en la figura 3.2 en donde se muestra la tendencia de los flujos del combustible a diferentes presiones con boquillas de 2,9 mm .

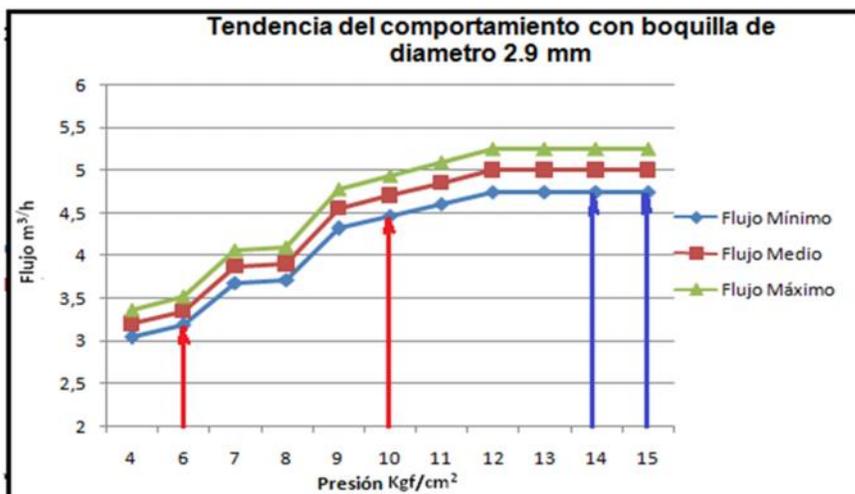


Figura 3.2. Tendencia del comportamiento con la boquilla de diámetro 2,9 mm

Durante estas prueba las mismas se realizaron variando en diferentes momentos los



valores de presión respecto al flujo, donde se puede apreciar claramente el comportamiento de la calidad de la atomización y la proyección del ángulo del cono respecto al aro de medición, también queda demostrado que con valores bajos de presión del combustible delante del quemador no se debe de operar el quemador ya que con valores bajos de presión de combustible (desde 6 a 9 kg/cm<sup>2</sup>), no se recomienda la operación, porque fluctúa la estabilidad en el flujo de combustible, siendo este mejor y logrando una estabilidad de la atomización en valores superiores a los de 10 kg/cm<sup>2</sup>.

El comportamiento de los flujos obtenidos en la prueba experimental marca que entre los dos tipos de las boquillas seleccionadas, la diferencia no es notable respecto a su trabajo y comportamiento los dos tipos son adecuadas para ser sometidas a la operación en el propio horno para los diferentes momentos de la potencia y generación, permitiendo la mantención de los parámetros óptimos del generador de vapor en valores cercanos a los de proyecto.

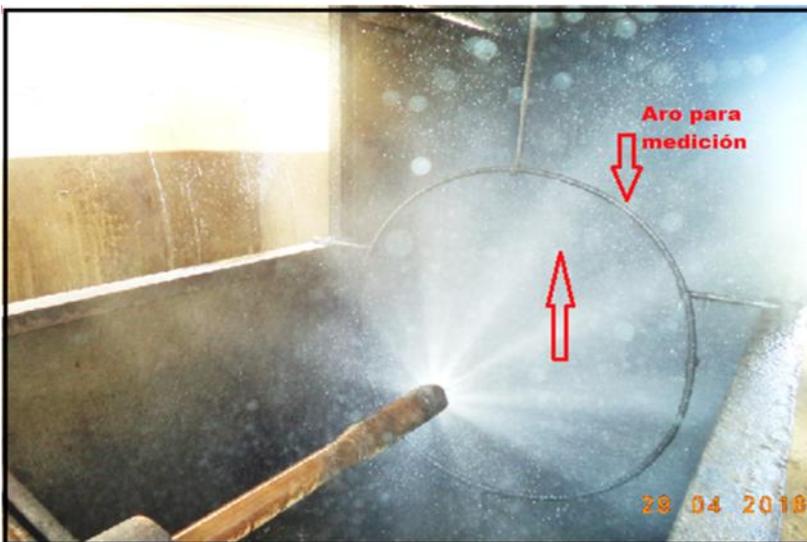
- Se selecciona la boquilla de 2,9 mm por presentar un mejor comportamiento durante esta prueba.
- El ángulo del cono de la boquilla de 2,7 mm y 2,9 mm a juicio de varios especialistas no es el más esperado.
- La variación en el diámetro del conducto de entrada de combustible entre las boquillas 2,7 mm y 2,9 mm, es la única diferencia existente entre las mismas.
- La presión a la que no se deben trabajar en ningún momento los quemadores es de 6 y 7 kgf/cm<sup>2</sup>, se producen intervalos en la atomización y de los 8 orificios que componen la salida del combustible, algunos de estos dejan de atomizar.

### **3.5 Diferencias obtenidas durante las pruebas experimentales en el banco de quemadores empleando boquillas de diámetro 2,7mm y 2,9mm.**

En las pruebas experimentales realizadas en el banco de prueba o calibración de los quemadores, se sometieron a prueba dos tipos de boquilla con diámetros diferentes (boquilla 2,7 mm y 2,9 mm respectivamente) para diferentes parámetros de presión (4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 kg/cm<sup>2</sup>), las variaciones de la presión con respecto al

flujo, la esparción del cono y la calidad de la atomización son semejantes en ambas boquillas, teniendo en cuenta las características de diseño, para ambas boquillas se cumplen las mismas exigencias técnicas (ángulo de entrada 123 y ángulo de salida 119, diámetro de conducto de entrada de vapor 3,5 mm, conducto de salida del combustible 6,0 mm y solamente variando el conducto de entrada de combustible entre las boquillas seleccionadas y sometidas a pruebas.

En las siguientes imágenes se exponen tres momentos donde se puede demostrar el comportamiento de los resultados de la atomización durante la realización de las pruebas experimental en el banco de calibración o prueba de la CT, en la primera imagen se aprecia un comportamiento incorrecto del ángulo de atomización respecto al aro de medición, en la segunda imagen una atomización deficiente y en la tercera imagen la atomización correcta o adecuada, esto se demuestra en las figuras 3.3, 3.4 y 3.5.



**Figura 3.3.** Atomización inadecuada en banco de quemadores

- La atomización en figura 3.3 es deficiente, sobrepasa los bordes del aro, siendo inadecuado el ángulo de atomización.
- El diámetro de las gotas es grande, mayor que los valores óptimos.
- Este patrón de comportamiento es típico de altas presiones de combustible y bajas presiones del fluido auxiliar (vapor de atomización).



**Figura 3.4.** Atomización deficiente en banco de quemadores

- Este cono da origen a una llama larga más de la distancia recomendada y a la formación de NO<sub>x</sub>, CO y H<sub>2</sub>S, producto a la ausencia en el interior del cono de zona rica en oxígeno.
- Ángulo inadecuado en comparación con el de diseño.



**Figura 3.5.** Atomización adecuada en banco de quemadores

- El ángulo y calidad de atomización próximo al opimo, persiste aún la formación de



partículas gruesas de combustible, NO<sub>x</sub> y H<sub>2</sub>S.

### 3.6 Resultados de la evaluación de la combustión en el generador de vapor # 2 y su rendimiento

Para realizar la evaluación de la eficiencia en el generador de vapor # 2 se utilizó la metodología descrita en el epígrafe 2.6 para lo cual se procede al montaje de las fórmula en una hoja de cálculo de Excel (anexo 4). En la tabla 3.5 se muestran los resultados de la evaluación, tomándose como referencia para este tipo de análisis las características del combustible suministrado en la actualidad a la CT (CM 1100 cSt), donde se comprueban los resultados y se demuestra que es factible la utilización de este en la instalación, independientemente de los daños colaterales que se originan y de los resultados deficientes obtenidos en este análisis en diferentes valores de la potencia.

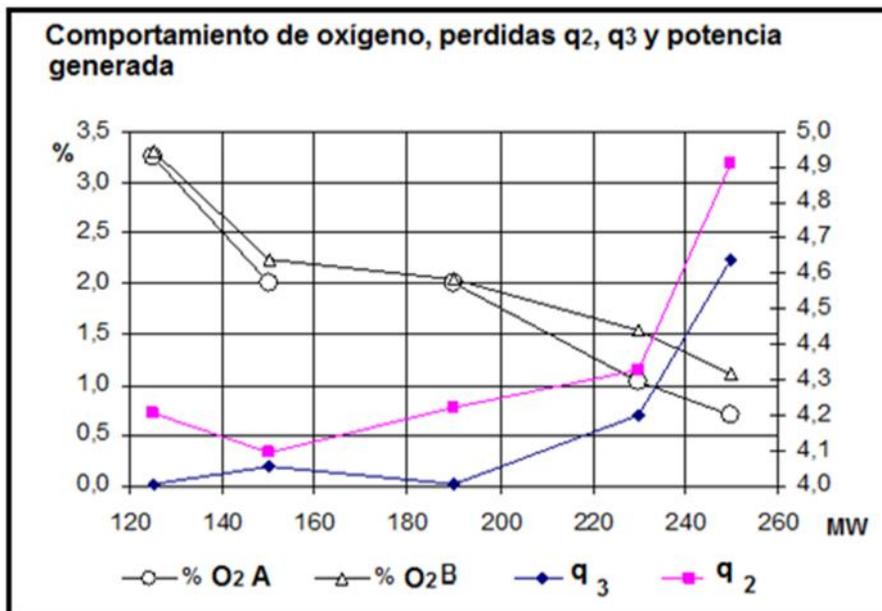
**Tabla 3.5.** Resultados de la evaluación de la eficiencia en el generador de vapor.

Parámetros	Símb	U.M.	Potencia eléctrica MW				
			250	230	190	150	125
Volumen de aire teórico	V <sup>o</sup> a	m <sup>3</sup> /kg	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1
Volumen de gases triatómico	V <sub>RO2</sub>	m <sup>3</sup> /kg	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55
Volumen total de nitrógeno	V <sup>o</sup> N <sub>2</sub>	m <sup>3</sup> /kg	7.72	7.72	7.72	7.72	7.72
Volumen real de gases	V <sub>g</sub>	m <sup>3</sup> /kg	11.12	11.17	11.56	11.63	11.70
Volumen real de aire	V <sub>a</sub>	m <sup>3</sup> /kg	10.39	10.44	10.77	10.33	11.42
Calor disponible	Q <sub>d</sub>	kJ/kg	38682.7	38685.7	38705.8	38709.4	38749.6
Poder calórico del combust.	Q <sub>b</sub> <sup>t</sup>	kJ/kg	37713	37713	37713	37713	37713
Coef. exc. aire ent. CAR A	α	-	1,063	1,068	1,102	1,108	1,176
Coef. exc. aire salida CAR B	α	-	1,152	1,185	1,228	1,248	1,354
Pérdas.de calor gases salida	q <sub>2</sub>	kcal/kg	4,91	4,33	4,22	4,09	4,20
Pérdidas incomb. química	q <sub>3</sub>	kcal/kg	2,24	0,70	0,02	0,20	0,03
Sumatoria Perdidas de calor	q	kcal/kg	13,39	11,31	10,64	10,85	10,93
Eficiencia caldera	η <sub>c</sub>	%	86,61	88,69	89,36	89,15	89,07
Consumo de combustible	Be	t/h	65,12	60,28	52,32	43,44	37,41
Cons. Específico de Comb.	Ce	g/kW-h	256.82	257,12	257,50	257,67	260,11

### Análisis de tendencias de los resultados del análisis de la eficiencia

En el presente trabajo se calculan las pérdidas de los gases de escape,  $q_2$  y las pérdidas químicas  $q_3$  y se efectúa un análisis de tendencia que se hace corresponder con los valores de oxígeno obtenidos en la entrada de ambos CAR, para ello se fijan las potencias a las que se genera, para hacer un análisis integrado de estos resultados a estas potencias de generación.

Para caracterizar la combustión en el generador de vapor #2, se hace necesario llevar a cabo este tipo de análisis. En la figura 3.6 se muestra el comportamiento de las pérdidas de calor en los gases de escape y las pérdidas de calor por incombustión química en función del porcentaje de oxígeno a la entrada del CAR.



**Figura 3.6.** Gráfico de tendencias de porcentaje de oxígeno, O<sub>2</sub>, las pérdidas  $q_2$ ,  $q_3$  y la carga.

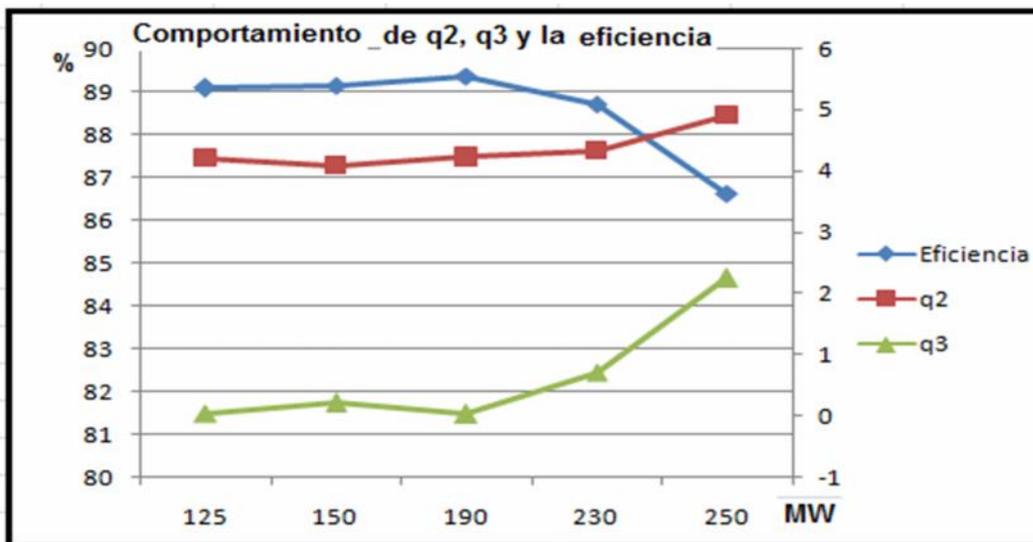
El exceso de aire en el punto de régimen con que se trabajó a máxima carga de 1,052 y 1,074 en las ramas A y B respectivamente, con un contenido de oxígeno de 0,7 % en la rama izquierda y 1,1 % en la rama, esto demuestra un comportamiento desventajoso por estar operando sin valores de reserva de exceso de aire.

En la figura 3.6 se muestran los resultados donde se puede apreciar que el valor de pérdidas con los gases de salida  $q_2$  fueron de 4,91, 4,33, 4,22, 4,09 y 4,20 % para las



cargas de 250, 230, 190, 150 y 125 MW respectivamente, que resultan ser todas inferiores a las de origen (pérdidas totales de 6 %), lo cual está relacionado con las bajas temperaturas de gases de salida obtenidos para las cargas de prueba. En la carga de 150 MW se encuentra el menor valor de pérdidas  $q_2$  debido fundamentalmente, al empleo de menor exceso de aire en relación con las cargas de 190 y 125 MW. En el gráfico presentado se observa el cambio que ocurre en la pendiente de las curvas de contenido de oxígeno en esta carga con relación al resto.

El valor de la pérdida de calor por incombustión química  $q_3$  (figura 3.7) tuvo su valor más alto a 250 MW con 2,24 %, que está relacionado los valores de contenido de monóxido de carbono más altos obtenidos a esta carga por los defectos explicados anteriormente. Para las cargas de 230, 190, 150 y 125 MW las pérdidas de calor por incombustión química fueron de 0,7, 0,02, 0,20 y 0,03 % y se aprecia el incremento en la carga de 150 MW correspondiente con al empleo de menor exceso de aire mencionado anteriormente.



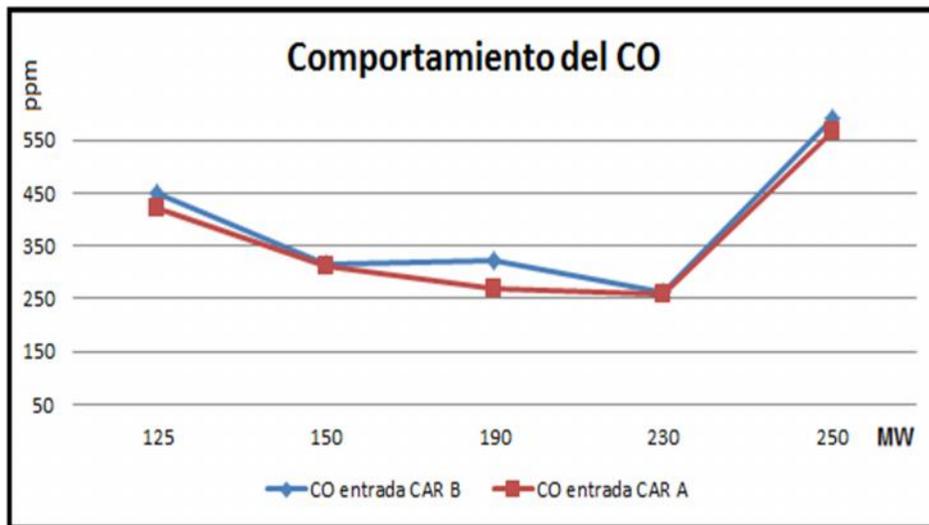
**Figura 3.7.** Gráfico de tendencias de porcentaje de las pérdidas  $q_2$ ,  $q_3$  y la eficiencia del generador de vapor respecto a la carga.

En función de las pérdidas señaladas anteriormente, se obtuvieron valores de eficiencia de caldera de 86,61, 88,69, 89,36, 89,15 y 89,07 % para las cargas de 250, 230, 190, 150 y 125 MW respectivamente y que, podrían ser inferiores de no haber sido por las bajas temperaturas de gases de salida. La carga más eficiente con relación al trabajo

de la caldera resultó ser la de 190 MW, mientras que la carga máxima, por todos los defectos señalados anteriormente resultó la más ineficiente.

### Análisis de tendencia del comportamiento del CO.

El análisis siguiente corresponde a la tendencia del comportamiento del CO a la entrada de los CAR, este se muestra en la figura 3.8.



**Figura 3.8.** Gráfico de tendencias de comportamiento del CO

Por su parte los valores de CO estuvieron oscilando entre 300 y 500 ppm, con picos de 700 ppm a la máxima carga, mientras que en el resto de las cargas se comportó por debajo de 350 ppm. El estado de la combustión para 250 MW está prácticamente en el límite permisible, por lo que cualquier variación de las condiciones de operación implica pasar a mala combustión.

### 3.7 Valoración económica

La presencia de altos valores de monóxido de carbono y por consiguiente incremento de las pérdidas de calor por incombustión química se debe fundamentalmente a la ausencia de zonas ricas de oxígeno en el interior del cono durante la atomización del combustible. Esto obliga a que el funcionamiento del quemador se produzca con elevado exceso de aire, aumentando las pérdidas de calor con los gases de escape. Lo antes dicho conduce a la reducción de la eficiencia de la combustión y por consiguiente del rendimiento del generador de vapor.



Con la aplicación de la metodología descrita en el presente trabajo de tesis se alcanza una eficiencia de combustión del 88,57 %. Con este régimen de funcionamiento en la unidad 2 durante el año 2015 se consumieron 395 589 t de combustible con un consumo específico bruto de 257,1 g/kWh. Siguiendo las recomendaciones expuestas en el trabajo se logra incrementar la eficiencia en 2,0 % con una reducción del consumo específico bruto de 2,5 g/kWh.

Teniendo en cuenta lo antes planteado el consumo específico bruto disminuye a 254,6 g/kWh y la cantidad de combustible baja a 391 790 t, lo cual reporta un ahorro de:

$$\text{Ahorro combustible anual} = 395589 - 391790 = 3798 \text{ t/año}$$

Partiendo de que la empresa paga por cada tonelada de combustible consumida 180,21 CUC, el ahorro económico que se alcanza es de:

$$\text{Ahorro económico anual} = 3798 \cdot 180,21 = 684437,58 \text{ CUC/año}$$

### 3.8 Impacto medioambiental

La operación de las centrales eléctricas (CE) produce emisiones de gases contaminantes procedentes de la combustión. Estas emisiones constituyen el principal problema ambiental de las CE que queman combustible fósil y la composición específica de las mismas depende del tipo de combustible que se queme y de las características tecnológicas de la instalación.

Producto al proceso de combustión del combustible en la CTE se emite a la atmósfera SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> entre otros elementos contaminantes como son hollín y cenizas; a partir del año 1997 tiene lugar un incremento de esta carga contaminante debido al inicio de la quema del combustible FC-900, aumentando sus valores en el año 2000 con la puesta en servicio del bloque #2 y aún más en el año 2002 con el comienzo de la quema de crudo nacional.

Estas sustancias contaminantes emitidas a la atmósfera por la entidad producen efectos de contaminación tanto locales, regionales como globales, ya que pueden traer aparejados las lluvias ácidas con sus consecuentes efectos desfavorables, además la



emisión de estos gases traen consigo un aporte al efecto invernadero y al debilitamiento de la capa de ozono, así como la afectación de la salud de las personas, la vegetación al provocar lesiones en las hojas, el ensuciamiento de fachadas; por lo que se deben de adoptar las medidas pertinentes para garantizar una combustión eficiente y completa del combustible en las calderas para que sean emitidos a la atmósfera la menor cantidad de partículas contaminantes.

Por cada tonelada de combustible que se quema en la caldera #2 de la CTE se emiten  $2,75 \times 10^{-5}$  toneladas de  $\text{CO}_2$  contaminante a la atmósfera (Ochoa, 2011). Teniendo en cuenta que en la referida unidad en el año 2015 se quemaron 695 589 t de combustible, significando que fueron emitidas 10,9 toneladas de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera en el periodo analizado.

Tomando con referencia que el ahorro estimado es de 3 798 t de combustible se dejarían de emitir  $0,1 \cdot 10^{-4}$  toneladas de  $\text{CO}_2$  teniendo lugar una disminución de la carga contaminante al medio ambiente con su respectiva repercusión positiva sobre el mismo.

### 3.9 Conclusiones del capítulo

1. El funcionamiento de los quemadores no es el óptimo, el ángulo y la calidad de la atomización son incorrectos.
2. Los quemadores no deben funcionar con presiones de combustible inferior a  $10 \text{ kg/cm}^2$ , desde el punto de vista de lograr una buena calidad en la atomización.
3. Para altas cargas se incrementan las pérdidas de calor por incombustión química,  $q_3$ , aumentando las pérdidas de calor con los gases de escape,  $q_2$ . El incremento de CO es muestra de la existencia de un defecto en el lugar donde se produce la combustión y como consecuencia el calor que debe ser entregado en el horno por radiación se traslada al eje convectivo incrementando la temperatura de los gases producto de combustión.
4. Queda establecida o definida una nueva metodología experimental durante las pruebas realizadas en el banco de prueba del quemador al establecer nuevo patrones de presión del combustible delante la operación del quemador



## **CONCLUSIONES GENERALES**

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en este trabajo podemos concluir que:

1. Resulta provechoso para la generación del país y de la propia CT el empleo del CM 1100 cSt, aunque disminuyen los valores de la eficiencia del generador de vapor hasta un 88,57%, no es considerado bajo ó crítica respecto al rendimiento actual de otras centrales térmicas del resto de país.
2. Queda demostrado a través de las pruebas experimentales realizadas en el banco de calibración del quemador que las boquillas de 2,9 mm son las más adecuadas para la operación, estableciéndose como parámetro la presión mínima del combustible delante de los quemadores de 10 kgf/cm para poner fuera de servicio los mismos.
3. Representa para el país un ahorro considerado de divisas por conceptos de ahorro de portadores energéticos porque se dejarían de utilizar 3 798 t/año de combustible, que representan un valor de 684 437,58 CUC/año, por lo que dejar de emitir  $0,1 \cdot 10^{-4}$  toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmosfera representaría un gran beneficio social.



## **RECOMENDACIONES**

- 1- Emplear los resultados obtenidos en el presente análisis o pruebas experimentales de los quemadores para la toma de decisiones en relación con el buen funcionamiento del equipo de combustión.
- 2- Reflejar a través de instrucciones normativas todos los cambios obtenidos durante las pruebas realizadas, con el objetivo de elevar la preparación técnica de operarios y técnicos que se vinculan directamente con el proceso tecnológico.
- 3- Participar en cursos de superación nacional e internacional referido a los combustibles crudos mejorados, para que técnico y especialistas cubanos logren un mejor dominio respecto al tema tratado.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ABREU, J. Evaluación de la eficiencia actual del generador de vapor 10 de la Central Termoeléctrica de la Empresa René Ramos Latour. Trabajo de Diploma. ISMM. 2003. 70p.
2. BATISTA LEYVA, LESTER. Comportamiento del combustible crudo cubano mejorado en la central termoeléctrica "Lidio Ramón Pérez". Trabajo de Diploma. ISMM. 2004. 74p.
3. CABALLERO, B. A; Y. GONZÁLEZ. Diagnóstico energético de los Generadores de Vapor de las empresas productoras de níquel en Moa. Trabajo de Diploma. ISMM 2007. 43p.
4. CUZA CARCÍA, OBDULIA. Influencia del cambio de combustible en el generador de vapor de la Termoeléctrica de Felton. Tesis de Maestría. ISMMM. 2011. 75p.
5. DEL VALLE, R. Balance energético verificativo de la planta eléctrica de la empresa René Ramos Latour. Trabajo de Diploma. ISMM 2002. 64 p.
6. ESPINOSA GONZÁLEZ, CARLOS PABLO. Influencia de los aditivos en la quema del crudo cubano utilizado en la termoeléctrica Lidio Ramón Pérez de Felton. Trabajo de Diploma. ISMM, 2013. 60p
7. FERNÁNDEZ, E. Termodinámica Técnica. La Habana: Editorial "Félix Varela, 1994. Tomo I. 290p.
8. LAHENZ, V. Calculo de la eficiencia en los generadores de vapor. Trabajo de Diploma. ISMM 2001. 56p.
9. LEYVA ROJAS, ROBERTO. Determinación de los parámetros de la combustión en los generadores de vapor de la Empresa Termoeléctrica de Felton. Trabajo de Diploma. ISMM, 2013. 54p
10. MUHICA, J. Evaluación termoeconómica del ciclo de la central termoeléctrica de la empresa Ernesto Guevara. Trabajo de Diploma. ISMM, 2001. 62p

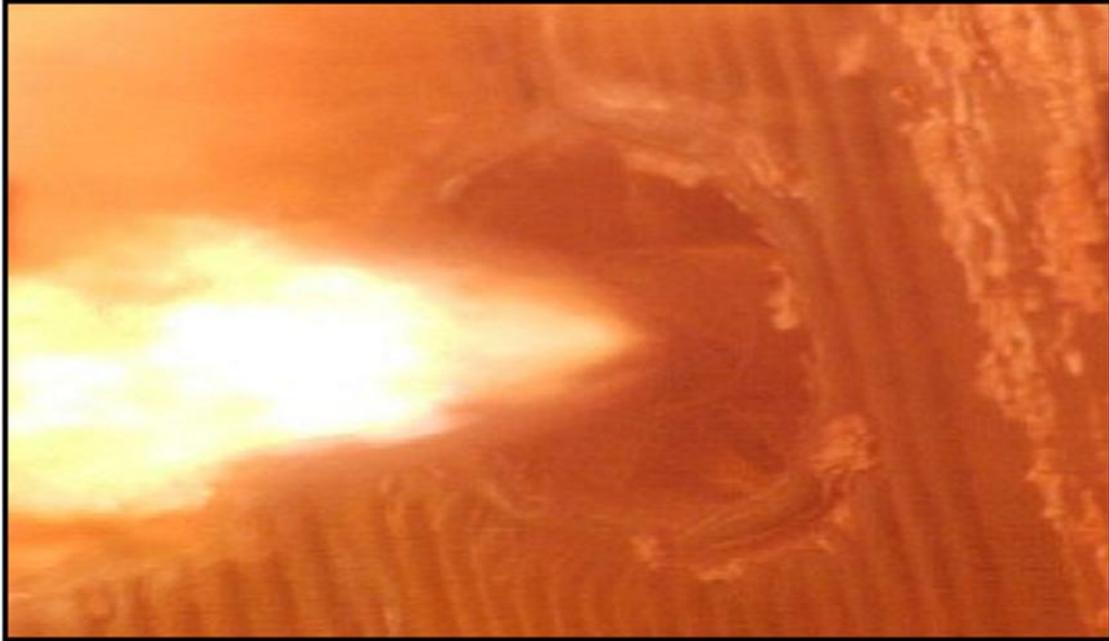


11. OCHOA MATOS, OSMAR. Procedimiento para racionalizar el consumo de energía eléctrica en el transporte del combustible CM650 en la termoeléctrica de Felton. Tesis de Maestría. ISMMM. 2011. 91p.
12. RIZHKIN, Y. V. Centrales termoeléctricas. Primera y segunda parte. Editorial pueblo y educación. Ciudad de La Habana. 1987. 370p.
13. RODRÍGUEZ, Y. Análisis del petróleo crudo nacional empleado en la empresa Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma. ISMM. 2001. 80p
14. SUÁREZ, V. Diagnóstico del sistema de generación de vapor de la Central Termoeléctrica perteneciente a la empresa "Comandante René Ramos Latour". Trabajo de Diploma. ISMM, 2005. 70p
15. TANQUERO, N. Guía metodológica para proyectos del curso de generadores de vapor. Editorial ISPJAE. La Habana. Cuba. 1997. 120 p.



## ANEXOS

Anexo 1. Quemador Tangencial( Fuente: Xavier Elias, Bogota. Agosto 2003.





## Anexo 2. Propiedades químicas de algunos de los petróleos crudos mejorados

<b>PRODUCTO: PETROLEO CRUDO NACIONAL MEJORADO (PCNM) , PCNM-1400 PCNM-1100 PCNM-650</b>					
<b>USO: CENTRALES TERMO ELÉCTRICAS</b>					
<b>INDICES DE CALIDAD</b>	<b>U/M</b>	<b>METODO DE ENSAYO</b>	<b>VALOR ESPECIFICADO</b>		
			<b>1400</b>	<b>1100</b>	<b>650</b>
Viscosidad A 50 °C	mm <sup>2</sup> /s	ASTM-D 445 / D 88	1400	1100	650
Azufre total	% m/m	ASTM-D129 / 1552 / 2622	8,0	8,0	7,5
Temperatura inflamación	°C	ASTM-D 93	Ambiente	Ambiente	Ambiente
Temperatura de fluidez	°C	ASTM-D 97	+15	+15	+15
Carbón conradson	% m/m	ASTM-D 189	15	15	14
Densidad A 15 °C	g/cm <sup>3</sup>	ASTM-D 1298	0.9994	0.9959	0.9924
Gravedad A 15 °C	°API	ASTM-D 1298 / 287	10	10,5	11
Valor calórico neto	kcal/kg	ASTM-D 240 / 4868	9000	9000	9100
Agua por destilación	% v/v	ASTM-D 95	2,0	2,0	2,0
Sedimentos por extracción	% m/m	ASTM-D 473	0,15	0,15	0,15
Cenizas	% m/m	ASTM-D 482	0,1	0,1	0,1
Asfáltenos	% m/m	IP 143	18	18	18
Vanadio	ppm	ASTM-D 1548/ D 5863	150	150	150
Sodio	ppm	ASTM-D 1318/ D 5863	280	280	150
Aluminio + silicio	ppm	ISO 10478	80	80	80



Anexo 3. Boquilla de 2.9 mm y distribuidor



