



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

**ANÁLISIS TÉRMICO DE LA CALDERA PIROTUBULAR  
MARCA *POWER MASTER* MODELO 54**

**FIDEL PÉREZ MACAL**  
**Asesorado por Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza**

Guatemala, mayo de 2005



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS TÉRMICO DE LA CALDERA PIROTUBULAR  
MARCA POWER MASTER MODELO 54**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**FIDEL PÉREZ MACAL**

ASESORADO POR: ING. GILBERTO ENRIQUE MORALES BAIZA  
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECANICO INDUSTRIAL**

GUATEMALA, MAYO DE 2005



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Alvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. César Augusto Akú Castillo
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANALISIS TÉRMICO DE LA CALDERA PIROTUBULAR  
MARCA *POWER MASTER* MODELO 54**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial, con fecha mayo de 2004.

Fidel Pérez Macal



## **AGRADECIMIENTOS**

### **A Dios**

### **A mi madre**

Por su ayuda, apoyo y comprensión, en el cumplimiento de uno de mis objetivos en la vida, gracias.

### **A la Lavandería Montserrat**

Por su grandiosa colaboración en la realización de este trabajo de graduación.



## **DEDICATORIA A**

**Mi madre**

Rosa Marina Macal

**Mis hermanos**

Diego  
Mariana  
Elisa

**Mis amigos**

en especial a Marilia y Mayling

**La Facultad de Ingeniería**

**La Universidad de San Carlos de Guatemala**



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	6
LISTA DE SÍMBOLOS .....	8
GLOSARIO .....	9
RESUMEN .....	12
OBJETIVOS .....	13
INTRODUCCIÓN .....	14
1 GENERALIDADES Y FUNDAMENTOS .....	1
1.1 Generalidades de la empresa.....	1
1.1.1 Tipo de empresa .....	1
1.1.2 Descripción de las áreas de proceso .....	2
1.1.2.1 Procedimiento de lavado .....	2
1.1.2.2 Áreas de lavandería .....	3
1.1.2.3 Descripción del equipo .....	3
1.1.2.3.1 Máquinas de lavar.....	4
1.1.2.3.2 Extractoras centrífugas .....	5
1.1.2.3.3 Prensas.....	5
1.1.3 Importancia del mantenimiento del servicio .....	6
1.1.4 Control de la calidad del servicio .....	7
1.2 Conceptos fundamentales .....	8
1.2.1 Combustibles y combustión .....	8
1.2.1.1 Combustibles y sus características .....	8
1.2.1.1.1 Poder calorífico .....	8
1.2.1.1.2 Temperatura de combustión.....	9
1.2.1.1.3 Residuos de combustión.....	9

1.2.1.1.4	Densidad específica o relativa.....	10
1.2.1.1.5	Viscosidad .....	11
1.2.1.1.6	Punto de inflamación .....	12
1.2.1.2	Combustión.....	12
1.2.1.2.1	Reacción de combustión .....	13
1.2.1.2.2	Fases de la reacción de combustión.....	13
1.2.1.2.3	Clases de reacciones de combustión.....	14
1.2.1.2.4	Productos resultantes de la reacción de combustión .....	16
1.2.1.2.5	Medidas y análisis de los gases de combustión.....	16
1.2.2	Diagnóstico de la caldera .....	17
1.2.2.1	Conceptos generales .....	17
1.2.2.1.1	Presión y equilibrio mecánico .....	17
1.2.2.1.2	Primera ley de la termodinámica para un sistema cerrado.....	19
1.2.2.1.3	Trabajo cuasiestático de expansión.....	20
1.2.2.1.4	Definición de termodinámica de calor .....	22
1.2.2.1.5	Entalpía .....	23
1.2.2.1.6	Entropía y calidad de energía .....	24
1.2.2.1.7	Estequiometría.....	26
1.2.2.2	Análisis de la potencia de la caldera .....	27
1.2.2.2.1	Ciclo Rankine.....	27
1.2.2.2.2	Eficiencia de la caldera.....	30
1.2.2.3	Análisis de combustión de la caldera .....	31

1.2.2.3.1	Aire teórico, exceso de aire y relación aire combustible .....	31
1.2.2.3.2	Balance de energía para sistemas en estado permanente con flujo permanente y reacciones químicas .....	32
1.2.2.3.3	Entalpía de reacción y poderes caloríficos de los combustibles ...	34
2	CONDICIONES DEL ÁREA DE GENERACIÓN DE VAPOR .....	37
2.1	Área de generación de vapor .....	37
2.1.1	Descripción de la maquinaria y el equipo .....	37
2.1.2	Descripción de la caldera.....	38
2.1.3	Índices para realizar el mantenimiento .....	41
2.2	Descripción del mantenimiento.....	41
2.2.1	Control de la caldera.....	41
2.2.2	Mantenimiento preventivo.....	42
2.2.3	Mantenimiento correctivo.....	42
3	DIAGNÓSTICO DE LA CALDERA.....	43
3.1	Análisis de potencia de la caldera .....	43
3.1.1	Ciclo Rankine.....	43
3.2	Análisis de combustión de la caldera.....	47
3.2.1	Gasto másico de combustible y agua .....	47
3.2.2	Entalpía de reacción y poderes caloríficos de los combustibles .....	50
3.2.3	Balance de energía para sistemas en estado permanente con flujo permanente y reacciones químicas .....	51

3.2.4	Aire teórico, exceso de aire y relación aire combustible.....	56
3.2.5	Balance térmico de la caldera .....	58
3.3	Mejoramiento de la eficiencia de la caldera .....	60
3.3.1	Interpretación del análisis térmico .....	60
3.3.1.1	Análisis Orsat .....	61
3.3.1.2	Temperatura de los gases de escape .....	61
3.3.1.3	Eficiencia de la caldera .....	62
4	METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS TÉRMICO DE LA CALDERA.....	65
4.1	Condiciones del equipo .....	65
4.2	Registro de datos .....	66
4.3	Análisis de potencia .....	66
4.3.1	Algoritmo del análisis de potencia .....	67
4.4	Análisis térmico .....	67
4.4.1	Algoritmo del análisis térmico .....	68
4.5	Mantenimiento.....	68
4.5.1	Controles diarios.....	69
4.5.2	Supervisión periódica .....	69
4.5.2.1	Cuerpo de presión.....	70
4.5.2.2	Caja de humos .....	70
4.5.2.3	Equipo de regulación, control y seguridad .....	70
4.5.2.4	Equipos auxiliares .....	72
5	CONTROLES DE OPERACIÓN .....	73
5.1	Registro de datos .....	73
5.1.1	Plantilla de registro de datos .....	73
5.1.2	Interpretación de la plantilla.....	74
5.2	Análisis de potencia .....	74

5.2.1	Plantilla de análisis de potencia .....	74
5.2.2	Interpretación de la plantilla .....	75
5.3	Análisis térmico.....	75
5.3.1	Plantilla del análisis térmico.....	76
5.3.2	Interpretación de la plantilla .....	76
CONCLUSIONES .....		76
RECOMENDACIONES .....		79
REFERENCIAS.....		81
BIBLIOGRAFÍA .....		82
ANEXOS .....		83

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1. Mantenimiento preventivo y correctivo.....	7
2. Manómetro.....	18
3. Relaciones entre presión absoluta, presión atmosférica, presión manométrica y presión de vacío.....	19
4. Expansión cuasiestática de un gas dentro de un cilindro .....	21
5. Ciclo de Carnot .....	28
6. Ciclo Rankine simple .....	29
7. Sistema generalizado con flujo permanente con reacciones químicas.....	32
8. Caldera <i>Power master</i> .....	39
9. Dimensiones de la caldera (volumen de agua).....	47
10. Dimensiones del tanque de combustible .....	49
11. Balance térmico .....	60
12. Registro de datos.....	73
13. Plantilla del análisis de potencia .....	75
14. Plantilla del análisis térmico.....	76
15. O <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> contra. aire en exceso .....	114
16. Eficiencia de combustión del petróleo ( <i>fuel oil</i> ).....	114

## TABLAS

I. Características del funcionamiento de la caldera .....	38
II. Entalpías de compuestos .....	54
III. Porcentaje volumétrico (gases de escape) .....	56
IV. Balance térmico .....	59
V. Propiedades del agua saturada y vapor saturado.....	83
VI. Propiedades de los gases ideales .....	91
VII. Logaritmos de base 10 de la constante de equilibrio $K_p$ .....	109
VIII. Propiedades de los hidrocarburos .....	114

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>D</b>	Eficiencia térmica (%)
<b>P</b>	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
<b>GM</b>	Gasto másico (kg/hr)
<b>H</b>	Entalpía (kJ/kg)
<b>PCI</b>	Poder calorífico inferior(kJ/kg)
<b>PCS</b>	Poder calorífico superior (kJ/kg)
<b>Pn</b>	Presión nominal de trabajo (kPa)
<b>Pa</b>	Presión atmosférica (kPa)
<b>Tg</b>	Temperatura de gases de escape (°C)
<b>Te</b>	Temperatura del agua (°C)
<b>S</b>	Entropía (kJ/kg·K)
<b>X</b>	Calidad del vapor generado
<b>A</b>	Moles de CO <sub>2</sub>
<b>M</b>	Moles de CO
<b>E</b>	Moles de O <sub>2</sub>
<b>L</b>	Moles de H <sub>2</sub> O
<b>W</b>	Trabajo
<b>Kp</b>	Constante de equilibrio

## GLOSARIO

<b>Aire de combustión</b>	Es el aire que se introduce a la cámara de combustión del equipo para la oxidación del combustible.
<b>Aire teórico</b>	Es el aire estequiométricamente necesario para realizar una combustión completa.
<b>Caldera</b>	Equipo en el cual se transfiere el calor producido por la combustión a un fluido de trabajo para calentarlo y/o evaporarlo.
<b>Caldera de tubos de humo</b>	Son aquéllas en las cuales los gases productos de la combustión circulan por dentro de los tubos de la caldera y el agua por el exterior de ellos.
<b>Calor absorbido</b>	Es la cantidad de calor que absorbe un fluido de trabajo para calentarse y/o evaporarse.
<b>Calor liberado</b>	Calor producido por la combustión de un combustible.

<b>Calor perdido</b>	Calor que no es aprovechado por el fluido de trabajo.
<b>Combustible</b>	Sustancia capaz de reaccionar con el oxígeno en presencia de una fuente de ignición dando como resultado liberación de calor, luz y gases.
<b>Combustibles derivados del petróleo</b>	Combustibles asociados al petróleo (gas natural) u obtenidos de su refinación (Diesel, gasóleo, gas L.P., etc.).
<b>Combustión</b>	Reacción de oxidación rápida de un combustible durante la cual se produce calor y luz como productos principales.
<b>Eficiencia térmica</b>	Es la relación entre el calor absorbido y el calor liberado (expresado en porcentaje).
<b>Exceso de aire</b>	Es el aire que se introduce por encima del aire teórico para asegurar una combustión completa.
<b>Exceso de oxígeno</b>	Es el oxígeno que se introduce por encima del oxígeno teórico para asegurar una combustión completa.
<b>Gases de combustión</b>	Son los gases producto de la reacción del combustible con el aire de combustión.
<b>Mol</b>	Masa de un elemento en gramos, numéricamente

igual a la masa atómica.<sup>1</sup>

**Oxígeno teórico**

Es el oxígeno estequiométricamente necesario para realizar una combustión completa.

**Poder calorífico inferior (PCI)**

Es la diferencia entre el poder calorífico superior y la energía necesaria para evaporar toda la humedad presente en los gases de combustión.

**Poder calorífico superior (PCS)**

Cantidad de calor que produce una unidad de masa o de volumen de combustible durante su combustión. Considerando que la humedad presente en los gases de combustión se encuentra en fase líquida.

**Quemador**

Dispositivo que se utiliza para efectuar la mezcla aire-combustible y realizar la combustión.

## RESUMEN

La empresa de lavandería brinda un servicio de lavado, secado y planchado de prendas de vestir, para la realización de dichos servicios cuenta con maquinaria diseñada entre las cuales se encuentran: lavadoras, extractoras, prensas mecánicas, calderas, etc.

El presente trabajo de graduación se ha enfocado en el área de generación de vapor y específicamente en la caldera; a la cual se le determino índices con los que se procederá al mantenimiento, a la toma de lecturas de presiones, gastos másicos y temperatura. Así mismo, se procederá al análisis de la potencia de la caldera, utilizando la herramienta del ciclo de Rankine; en donde el resultado fundamental para futuros cálculos fue el calor de entrada o calor absorbido por la misma. Luego, el análisis de combustión, que dado las condiciones en que se encontraba la caldera se realizaron distintos cálculos para encontrar los gastos másicos y teniendo en cuenta la ecuación del balance de energía para flujos permanentes y reacciones químicas, balance estequiométrico y la ecuación de la constante de equilibrio, se formó un sistema de ecuaciones que involucra las incógnitas de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub> para encontrar las cantidades molales de dicho sistema.

Ya conocidas las variables se procedió a determinar las relaciones aire-combustible y a realizar el balance térmico de la caldera, a partir de ello se realizó la interpretación del análisis térmico. Finalmente se procedió a estructurar plantillas de recolección de datos para que al operador se le facilitara el algoritmo de resolución.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Mejorar el rendimiento de la caldera *Power master* modelo 54, por medio del cálculo de la eficiencia y balance térmico de la misma.

### **Específicos**

1. Identificar el estado del equipo en el departamento de generación de vapor
2. Establecer el indicativo para realizar el mantenimiento actual de la caldera *Power master* modelo 54
3. Calcular el rendimiento de combustible de la caldera
4. Calcular la eficiencia térmica del ciclo de vapor en la caldera
5. Determinar la eficiencia térmica del hogar de la caldera
6. Determinar la relación aire combustible de la caldera
7. Establecer índices para un mantenimiento adecuado de la caldera

## **INTRODUCCIÓN**

Para proporcionar un servicio de calidad que brinde satisfacción al cliente en una empresa de lavandería es importante contar con la maquinaria en buen estado y proveer a la misma un mantenimiento que garantice su operación eficaz.

El presente trabajo de graduación se enfoca al área de generación de vapor, específicamente a la caldera; donde se describirán sus tipos, partes y la condición actual en que ésta se encuentra, recordando que todo equipo debe proporcionar su materia de trabajo aprovechando todos sus insumos de la mejor manera posible, para lograr esto se mencionarán las principales características con la que cuenta el combustible utilizado, donde las anteriores serán utilizadas como parámetros, luego se procederá a la determinación de los índices que se utilizan para realizar su mantenimiento, ya conocida la situación actual de la caldera, para el cálculo de la eficiencia y balance térmico se utilizarán procedimientos donde se analizará el ciclo de potencia y de combustión, con la finalidad de determinar qué tanta energía absorbe la caldera de sus insumos y cómo ésta se distribuye, sirviendo estos últimos como posibles estándares para ordenar su mantenimiento.

También se especificarán los algoritmos que se deben de seguir para la realización de los cálculos en la determinación del análisis de potencia y térmico, así mismo plantillas de recolección de datos para la observación de las principales variables, herramientas fundamentales en las que se basa el presente trabajo.



# **1 GENERALIDADES Y FUNDAMENTOS**

A continuación se brindará información necesaria para familiarizarse con el equipo y procesos que existen en una lavandería, al mismo tiempo los conocimientos teóricos para la comprensión de los análisis de capítulos posteriores.

## **1.1 Generalidades de la empresa**

El ámbito en el cual se desenvuelve la empresa involucra mantenimiento, área de lavandería, descripción de los equipos, etc.; los cuales se describirán en capítulos posteriores.

### **1.1.1 Tipo de empresa**

Esta empresa se dedica al servicio de lavado, secado y planchado de prendas, al decir prendas se refiere a pantalones, camisas, chumpas, manteles, toallas, trajes de boda, etc.<sup>2</sup> En general a todo aquello que sea lavable sin importar el material con que esté fabricado. La extensa variedad de servicios con la que cuenta la empresa le permite a sus clientes satisfacer sus necesidades en cualquiera de los ramos relacionados, adicionalmente, los precios de tales servicios son altamente competitivos en el mercado.

Para la realización de dichos servicios cuenta con maquinaria especialmente diseñada, ésta es operada por personal capacitado con una amplia experiencia en el ramo. Adicionalmente, a la maquinaria se le proporciona un mantenimiento en general, lo cual garantiza que el servicio sea de calidad y que llene las expectativas de sus clientes.

### **1.1.2 Descripción de las áreas de proceso**

Seguidamente se detallará como está estructurado el proceso de lavado, así como también la estructura del área de lavandería y al mismo tiempo el tipo de equipo con que se cuenta.

#### **1.1.2.1 Procedimiento de lavado**

La ropa sucia es recibida, clasificada y pesada en una misma área, la cual está separada de las otras áreas de la lavandería. La ropa sucia es transportada por medio de carritos manuales o por el mismo encargado de recepción, luego es clasificada según su tipo, color, peso, etc. Entonces el encargado lleva la ropa al área de lavado donde según el tipo de ropa así es el tiempo en la máquina de lavado y así es la cantidad de detergente que se utiliza. Después que ha terminado el ciclo de lavado se procede a la extracción de agua, terminada esta parte, la ropa continúa a las mesas para extenderla y clasificarla según el tipo de proceso que se le deba de aplicar, existe el planchado a mano y doblaje, el planchado por prensa y doblado por mesa y por último el secado y doblaje sin planchado. Pasadas estas etapas se vuelve a clasificar la ropa para el almacenado y se pasa a la sección de almacenamiento de ropa limpia, donde el encargado de recepción cumple con la función de entregar al cliente su ropa.

### **1.1.2.2 Áreas de lavandería**

#### Área de ropa sucia

- Almacenamiento de detergentes
- Clasificación de la ropa (tipo, color, peso)

#### Área de lavado

- Lavadoras
- Extractoras
- Carros con canastas si son necesarias para el traslado de la ropa limpia

#### Área de procesamiento de la ropa limpia

- Tómbolas de sacado (secadoras)
- Sector de planchado
- Mesa de clasificación
- Prensas mecánicas
- Planchadoras manuales
- Perchas para cerchas de colgar ropa

#### Área de preparación y empaque o doblaje de ropa limpia

- Mesa o mostrador para doblaje de ropa
- Carros para el traslado de la ropa

### **1.1.2.3 Descripción del equipo**

A continuación se describe el funcionamiento y es uso de los diferentes equipos que posee la lavandería.

### **1.1.2.3.1 Máquinas de lavar**

El servicio de lavado es ejecutado en las máquinas de lavar, las cuales son las unidades más importantes de la lavandería, ya que todas las otras fases dependen de ellas.

El tiempo de lavado varía de acuerdo con las piezas a ser lavadas, el grado de suciedad, la fórmula usada en el lavado y la capacidad de la lavadora.

En general, consisten en dos cilindros de acero inoxidable, uno interno y otro externo teniendo una puerta para la entrada y salida de carga. El cilindro interno, que recibe la carga de ropa, es provisto de agujeros en toda su superficie de manera de contener la carga y permitir una constante circulación del agua. Este cilindro es controlado por un motor eléctrico que tiene un movimiento de rotación alternada.

El cilindro externo es parcialmente llenado con agua fría o caliente de acuerdo con las fases del lavado y con la fórmula de lavado, todas las fases de lavado se realizan automáticamente.

Existe también las lavadoras de alimentación lateral, se llaman así por alimentarse y abrirse a lo largo de una generatriz del cilindro. Éstas son por lo regular de mayor capacidad de las convencionales, en términos generales, pueden obtenerse en capacidades desde 50 Kgs. (110 Lbs.) hasta 375 Kgs. (820 Lbs.) de ropa

### **1.1.2.3.2 Extractoras centrífugas**

Las extractoras centrífugas son máquinas destinadas a retirar el agua de las piezas de ropa; ya que retiran aproximadamente el 50% de la humedad. Su instalación está cerca de las máquinas de lavar. Generalmente el extractor está constituido por dos cilindros de acero inoxidable, uno fijo y otro interno rotativo. El cilindro interno, provisto de agujeros en toda su superficie, gira a altas revoluciones que varían normalmente entre 1000 a 1800 rpm. Los de baja revolución giran entre 500 a 600 rpm.

El trabajo de estas unidades consiste solamente en extraer el agua de la ropa por la acción de la fuerza centrífuga, ya que el agua es lanzada al cilindro externo y enseguida al alcantarillado.

### **1.1.2.3.3 Prensas**

Estas máquinas tienen formas diversas, de acuerdo al fin para el cual son destinadas, y por lo general son calentadas a vapor. En las superficies de planchado, las prensas son compuestas de dos partes: una almohadilla fija y una móvil de acero inoxidable llamada cabeza, por donde circula el vapor.

La pieza a ser planchada es colocada sobre la almohadilla (parte fija), y por medio de un pedal el cual se acciona con el pie, baja la cabeza. A manera de presar fuertemente la ropa sobre la parte fija, procediéndose al planchado por presión y calor.

### **1.1.3 Importancia del mantenimiento del servicio**

En general, lo que una empresa ofrece a sus clientes es un servicio o un producto, pero no hay que dejar de pensar que un producto es en última instancia un satisfactor humano y que sirve para cubrir una necesidad; y como un servicio es la utilidad que ofrece una cosa o las acciones de un persona, para lograr la satisfacción directa o indirecta de una necesidad, entonces podemos decir que un producto es un servicio, ya que ambos son satisfactores humanos.<sup>3</sup>

La calidad del servicio es un factor que no puede permanecer constante, sufre transformaciones, debido a que los clientes pueden quedar completamente satisfechos o en cierta medida. A partir de esto, se puede decir que el mantenimiento del servicio es la función más importante para lograr que el cumpla con la satisfacción esperada del cliente.

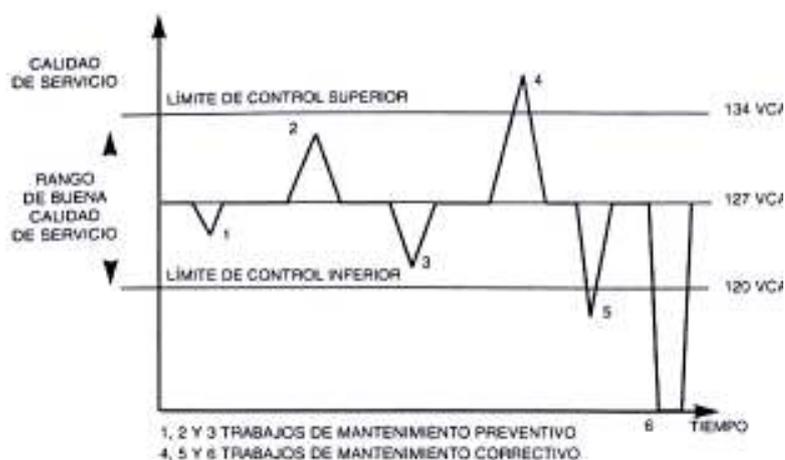
Un aparato o dispositivo es diseñado en tal forma que proporcione un servicio con una calidad suficiente para dar satisfacción a una necesidad; por esto, es lógico pensar que si la máquina fue diseñada adecuadamente, todos sus componentes cumplen una función y mientras que esta necesidad no se modifique el personal de mantenimiento debe lograr que los atributos que éstos dan no se modifiquen.

En necesario aclarar que existe una relación bastante estrecha entre un servicio y una máquina, pero el enfoque será dirigido a este último, porque, es la que se debe mantener dentro de la calidad deseada.

### 1.1.4 Control de la calidad del servicio

La finalidad del mantenimiento preventivo es hacer que la máquina opere dentro del rango de buena calidad, en la figura 1 se muestran los rangos en los cuales operan los distintos mantenimientos. El análisis térmico pretende establecer el límite de control inferior de eficiencia en la cual debería trabajar la caldera. Al acercarse a este límite deberá procederse a realizar el mantenimiento preventivo, si por alguna razón cae fuera del rango de buena calidad la línea de la gráfica, deberá procederse a un paro de la máquina y realizar un mantenimiento correctivo.

**Figura 1. Mantenimiento preventivo y correctivo**



Fuente: Enrique Dounce Villanueva. **La Productividad en el Mantenimiento Industrial**, Pág. 20

Analizando la figura anterior, estos dos tipos de mantenimientos: el mantenimiento preventivo que es la actividad que se realiza con el objetivo de que la calidad se encuentre dentro de los límites especificados y el mantenimiento correctivo que se origina a partir de alguna falla, han dejado de prestar la calidad de servicio esperada.

## **1.2 Conceptos fundamentales**

Todo trabajo debe contar con una base teórica que brinde procedimientos y herramientas que ayuden a la mejor comprensión del problema a estudiar y también que sirvan como base para todos los análisis a realizar.

### **1.2.1 Combustibles y combustión**

Los fundamentos esenciales para la comprensión del funcionamiento de la caldera se basan principalmente en la combustión, en donde se deben tomar en cuenta las características del combustible para ver como afecta la reacción de combustión.

#### **1.2.1.1 Combustibles y sus características**

Las características de un combustible, y en particular las de un industrial, son las que van a determinar la posibilidad de utilizar esa sustancia en un momento determinado, una de las propiedades que más interesa de un combustible es su poder calorífico.

##### **1.2.1.1.1 Poder calorífico**

Es la cantidad de calor generado al quemar una unidad de masa del material considerado como combustible. El poder calorífico está relacionado con la naturaleza del producto. Existen varias unidades para esta propiedad

Kcal/Kg      kJ/kg      Kcal/mol

Existen dos clases de poder calorífico: el poder calorífico inferior (PCI) y el poder calorífico superior (PCS).

**PCS**

Es el poder calorífico total. Es la cantidad de calor desprendida en la combustión de un Kg de combustible cuando se incluye el calor de condensación del agua que se desprende en la combustión.

**PCI**

Es el poder calorífico neto. Es el calor desprendido en la combustión de 1 Kg de combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión no condensa.

**1.2.1.1.2 Temperatura de combustión**

La temperatura de combustión va a aumentar con el poder calorífico y con la cantidad de residuos y productos que se generen en la combustión.

**1.2.1.1.3 Residuos de combustión**

Es lo que no arde en un combustible. Son de dos clases, según la fase en la cual se encuentren:

Gaseosos: están en el seno de los humos o gases que se desprenden de los combustibles.

Sólidos: cenizas o escorias.

Las cenizas o escorias de un combustible están formados por la parte orgánica de un combustible. Son perjudiciales tanto por su naturaleza como por su cantidad.

#### 1.2.1.1.4 Densidad específica o relativa

Fue la primera medida que se utilizó para catalogar los combustibles líquidos. Los combustibles se comercializan en volumen, por ello es importante saber la densidad que tienen a temperatura ambiente.

Se define la densidad específica como:

$$\text{Densidad específica o relativa} = \frac{\text{Densidad absoluta de un producto (a una temperatura)}}{\text{Densidad del agua líquida (a 4°C)}}$$

La escala más comúnmente utilizada es la escala en grados API (a 15°C)

API definió sus densímetros perfectamente, estableciendo sus características y dimensiones en las especificaciones.

La densidad específica o relativa de los combustibles líquidos varían, pero los más ligeros serán los que tengan menor contenido en átomos de carbono. De este modo, las gasolinas serán las que tengan menor densidad específica, mientras que los *fuel-oil* serán los que mayor densidad específica muestren.

Es importante conocer la densidad específica y la temperatura a la que se midió, porque los combustibles líquidos, como ya se dijo, se comercializan midiendo su volumen, el cual va a variar con la temperatura.

#### 1.2.1.1.5 Viscosidad

Mide la resistencia interna que presenta un fluido al desplazamiento de sus moléculas. Esta resistencia viene del rozamiento de unas moléculas con otras. Puede ser absoluta o dinámica, o bien relativa o cinemática.

La fluidez es la relación inversa de la viscosidad. Por ello la medida de la viscosidad es importante porque va a dar una idea de la fluidez del combustible; permite apreciar la posibilidad del bombeo de un producto en una canalización y de este modo permite saber si se puede tener un suministro regular. La viscosidad es muy importante en el caso de los *fuel-oils*, ya que éstos se clasifican siguiendo criterios de viscosidad a una determinada temperatura

La unidad de la viscosidad es el *Poise*:  $\text{g.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}$

La viscosidad cinemática se define como:

$$\text{Viscosidad cinemática} = \frac{\text{viscosidad dinámica}}{\text{densidad a la misma temperatura}}$$

La viscosidad relativa se define como:

$$\text{Viscosidad relativa} = \frac{\text{viscosidad absoluta}}{\text{viscosidad agua a } 20^{\circ}\text{C (1 Poise)}}$$

Para medir la viscosidad en combustibles líquidos se emplea un viscosímetro de vidrio. Es muy importante decir la temperatura a la cual se ha evaluado la densidad. Existen diversas escalas para expresar la viscosidad de un producto petrolífero y existen también ecuaciones de correlación entre ellas.

El hecho de que un combustible (o un líquido en general) tenga la viscosidad muy alta quiere decir que tiene poca fluidez.

#### **1.2.1.1.6 Punto de inflamación**

Se define como la mínima temperatura a la cual los vapores originados en el calentamiento a una cierta velocidad de una muestra de combustible se inflaman cuando se ponen en contacto con una llama piloto de una forma determinada. Esto en lo que se refiere a un combustible líquido. El punto de inflamación da una idea de la cantidad de compuestos volátiles o muy volátiles que puede tener un combustible.

#### **1.2.1.2 Combustión**

La combustión es el conjunto de procesos físico-químicos por los cuales se libera controladamente parte de la energía interna del combustible. Una parte de esa energía se va a manifestar en forma de calor y es la que interesa.

La reacción de un elemento químico con el oxígeno se llama oxidación. La combustión no es más que una reacción de oxidación, en la que normalmente se va a liberar una gran cantidad de calor.

Los combustibles tienen en su composición unos elementos principales, combustibles (C, H, S) y otros no combustibles, como el V, Ni, Na, Si,...

El comburente más habitual usado en la combustión es el aire (21% O, 79% N<sub>2</sub> ).

Se llama calor de combustión a la disminución de entalpía de un cuerpo. Será entonces el calor que se libera cuando el combustible arde en una llama o cuando los componentes principales reaccionan con el oxígeno.

#### **1.2.1.2.1 Reacción de combustión**

Se trata de una reacción de oxidación con la particularidad de que se realiza muy rápidamente, es exotérmica. Esta reacción se produce entre los elementos combustibles y el oxígeno del comburente. Para que un combustible sufra la combustión, es necesario que alcance su temperatura de ignición. Se define el punto de ignición de un combustible como la temperatura a la cual, una vez iniciada la llama, ya no se extingue. Esta temperatura es de 20 a 60°C más alta que la temperatura de inflamación.

En una reacción de oxidación se tiene

Primer miembro	Segundo miembro
Combustible + comburente	Gases de combustión + calor

#### **1.2.1.2.2 Fases de la reacción de combustión**

Se pueden distinguir tres fases en la reacción de combustión

Fase de prerreacción (formación de radicales)

Los compuestos hidrocarbonados se descomponen dando lugar a la formación de radicales, que son unos compuestos intermedios inestables y muy activos, para que de este modo el carbono y el hidrógeno puedan reaccionar con el oxígeno.

Fase de oxidación

En esta fase se produce la combinación entre los elementos y el oxígeno. Es una fase muy exotérmica y es cuando tiene lugar la propagación de la llama.

Fase de terminación

Aquí es cuando se forman los compuestos estables. El conjunto de estos compuestos es lo que se llama gases de combustión.

### **1.2.1.2.3 Clases de reacciones de combustión**

Las reacciones se pueden clasificar según el modo en el cual transcurran de la siguiente manera:

#### **a) Combustión neutra o estequiométrica**

Es aquella que se produce cuando el aire empleado aporta la cantidad justa de oxígeno para que todos los reactivos se transformen en productos. Para que la estequiometría se cumpla, hay que considerar todos los elementos que sufren la reacción de combustión en el combustible. Cuando la reacción tenga lugar totalmente, entonces no habrá H, O, S y C, que se transformarán en productos correspondientes que irán en los gases de combustión. Como inertes aparecerá, por lo menos, el nitrógeno.

A veces, a los gases de combustión se les llama poder comburívoro o poder fumígeno. Se define éste como los gases húmedos totales procedentes de una combustión neutra o estequiométrica.

### **b) Combustión incompleta o imperfecta**

Es aquella en la que por defecto en el suministro de aire no hay oxígeno necesario para que se produzca la oxidación total del carbono. Esto quiere decir que no todo el carbono se va a transformar en  $\text{CO}_2$  y aparecerá como producto de combustión de CO. Aparecen entonces los inquemados. Los inquemados también se pueden producir por defecto en el aparato quemador. Los inquemados se definen como la materia combustible que ha quedado sin quemar o parcialmente quemada. Pueden ser de dos clases:

Sólidos: carbono (hollín). Provocan un ennegrecimiento de los humos de combustión

Gaseosos: CO,  $\text{H}_2$

Cuando aparecen inquemados es señal de que no se ha aprovechado bien el combustible, por lo que la combustión que se está realizando no es eficiente y se deberían tomar medidas para mejorarla.

### **c) Combustión completa**

Para que se produzca una combustión completa se hace necesario aportar un exceso de aire, es decir, de oxígeno. El exceso se realiza sobre la cantidad estequiométricamente necesaria para que todos los productos combustibles sufran la oxidación (tanto el C como el O ó el H). En este caso no se van a producir inquemados. En la práctica se hace difícil conseguir la combustión completa. Por ello es necesario aportar un exceso de aire. El exceso de aire se define como la cantidad de aire por encima del teórico que hay que aportar para que se realice la combustión completa del combustible.

#### **1.2.1.2.4 Productos resultantes de la reacción de combustión**

En general, los productos de combustión se llaman humos. Se definen éstos como la masa de compuestos que resultan de un proceso de combustión. Mayoritariamente están formados por óxidos de los elementos combustibles de un combustible, y los elementos del combustible que no sufren reacción, donde hay que incluir el N<sub>2</sub> del aire que no va a reaccionar con el oxígeno.

Otros elementos que pueden aparecer en los humos pueden ser pequeñas proporciones de elementos en suspensión, como carbón u hollín. Los humos pueden clasificarse en secos (sin agua) o húmedos (con agua).

#### **1.2.1.2.5 Medidas y análisis de los gases de combustión**

Los gases de combustión se evalúan cualitativa y cuantitativamente. Mediante el análisis de estos gases se podrá saber si la reacción de combustión va bien o mal. Se puede conocer también la energía que se está produciendo y la que se puede estar perdiendo. Para todo esto, lo primero es tomar muestras de los gases de combustión. La toma de muestras se realiza principalmente de dos maneras:

Por aspiración

Por filtro

En ambos casos se recogen los gases para llevarlos a analizar. Estas muestras se recogen tanto en conductos intermedios como en la mismas chimenea de salida de gases.

Los puntos en los que se toma la muestra vienen condicionados por lo que se quiera exactamente de esa muestra. Hay que tener en cuenta que la composición de los gases va variando desde la salida de la cámara de combustión hasta que sale por la chimenea.

## **1.2.2 Diagnóstico de la caldera**

Para la determinación de buenos índices que indiquen el estado de funcionamiento actual de la caldera se utilizarán herramientas que se describirán a continuación.

### **1.2.2.1 Conceptos generales**

Para poder realizar el diagnóstico de la caldera, es necesario comprender diversos conceptos entre los que están: presión y equilibrio mecánico, entalpía, estequiometría, ciclo Rankine, análisis de potencia de la caldera, eficiencia de la caldera, entre otros; los cuales se muestran seguidamente.

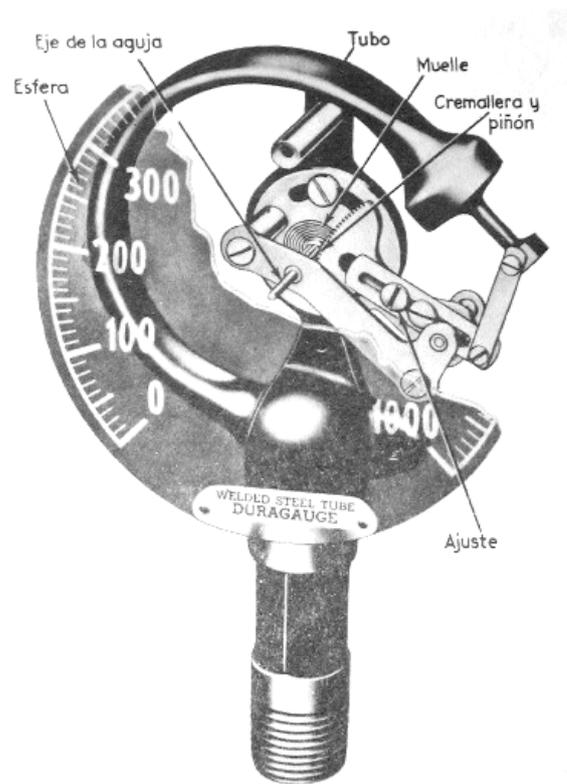
#### **1.2.2.1.1 Presión y equilibrio mecánico**

La presión termodinámica  $p$  se define como la fuerza total normal por unidad de área ejercida por el sistema sobre su frontera. Recibe también el nombre de presión absoluta.

La presión de un sistema se mide frecuentemente con manómetros (véase figura 2), usando la presión atmosférica como punto de referencia, para tal caso la presión absoluta se relaciona con la presión manométrica de la siguiente manera:

Presión absoluta = presión atmosférica + presión manométrica

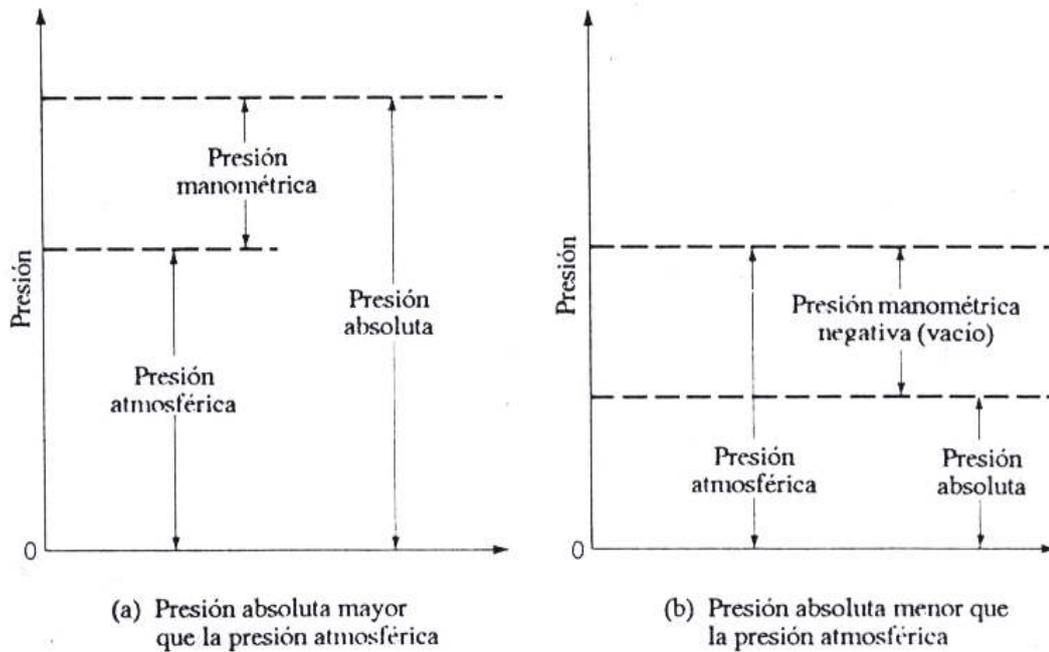
**Figura 2. Manómetro**



Fuente: W: H: Severns, **La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases**, Pág. 9

Una presión por debajo de la presión atmosférica, será negativa, en la práctica común se aplica el término llamado vacío. Cuando la presión absoluta es cero, se dice que tiene el vacío perfecto. La relación entre la presión absoluta, presión manométrica, presión atmosférica y de vacío se muestra en la figura.3.

**Figura 3. Relaciones entre presión absoluta, presión atmosférica, presión manométrica y presión de vacío**



Fuente: Francis F. Huang, *Ingeniería termodinámica*, Pág. 29

### 1.2.2.1.2 Primera ley de la termodinámica para un sistema cerrado

La primera ley de la termodinámica es considerada como el principio de la conservación de la energía, la cual dice que la energía no puede crearse ni destruirse. Existen solamente tres manifestaciones de la energía consideradas en la primera ley: energía interna, calor y trabajo. Aplicada a los cambios que ocurren en los sistemas cerrados, la primera ley puede escribirse de la siguiente manera:

$$\text{Calor absorbido por el sistema} = \text{aumento de su energía interna} + \text{trabajo efectuado por el sistema}$$

El contenido de energía de un sistema cerrado (de masa constante) puede ser cambiado, sin implicar transferencia alguna de masa, por conducción térmica, radiación, compresión o expansión mecánica. Se dividirá la transferencia de energía en dos categorías: trabajo y calor.

Esto quiere decir que el cambio de estado de sistema cerrado se puede llevar a cabo mediante trabajo efectuado sobre él o por él y mediante adición de calor al sistema o su extracción de él. Se empleará el símbolo  $W$  para designar el trabajo y el símbolo  $Q$  para designar el calor.

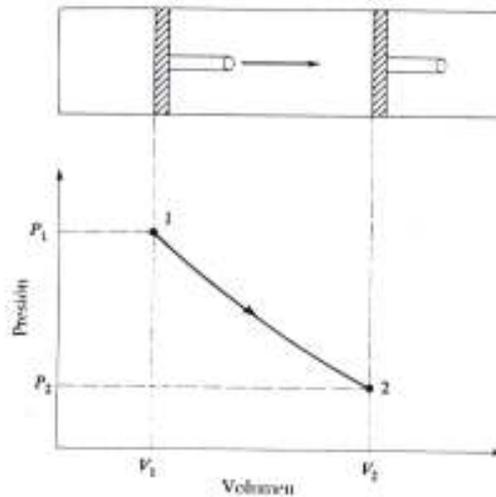
El calor añadido a un sistema implica absorción de energía y un trabajo realizado por el sistema implica consumo de energía, entonces adoptando la convención de que la adición de calor sea positiva y que el trabajo realizado por el sistema sea también de signo positivo, la primera ley de la termodinámica para un sistema cerrado puede escribirse matemáticamente de la siguiente manera:

$$Q_{12} = E_2 - E_1 + W_{12}$$

#### **1.2.2.1.3 Trabajo cuasiestático de expansión**

Al considerarse un gas en el interior de un cilindro desde el estado 1 al estado 2, tal como se muestra en la figura 4 (parte superior). Si el proceso de expansión se realiza cuasiestáticamente, se puede trazar su trayectoria sobre un diagrama de presión volumen, como se muestra en la parte inferior de la figura 4.

**Figura 4. Expansión cuasiestática de un gas dentro de un cilindro**



Fuente: Francis F. Huang, **Ingeniería termodinámica**, Pág. 54

La fuerza ejercida por el pistón sobre el gas es infinitesimalmente más pequeña que la fuerza ejercida por el gas sobre el pistón, la cual es el producto de la presión del gas por área del pistón, dado que esa fuerza actúa en el sentido del movimiento del pistón, el trabajo realizado por el gas sobre el pistón al recorrer la distancia  $dx$  es:

$$dW = pA dx$$

Donde  $p$  es la presión del gas y  $A$  es el área del pistón. Pero  $A dx = dV$ , el cambio en el volumen del gas mientras el pistón recorre la distancia  $dx$ , por lo tanto,

$$dW = p dV$$

Integrando la ecuación, se encuentra que la cantidad total de trabajo realizado por el gas a medida que se expande cuasiestáticamente es:

$$W_{12} = \int_1^2 p dV$$

Que es simplemente el área bajo la curva de la trayectoria en el diagrama presión volumen. Debe señalarse que esta expansión se aplica también a cualquier sustancia que es sometida a un cambio de estado cuasistáticamente, durante el cual el cambio de volumen sea pertinente.

#### 1.2.2.1.4 Definición de termodinámica de calor

El calor es un concepto importante. El calor es simplemente energía transferida, sin transferencia de masa a través de la frontera de un sistema cuando esa energía no puede ser considerada como trabajo

$$Q_{12} = E_2 - E_1 + W_{12}$$

Uno puede estar tentado a usar esta ecuación como la ecuación para la definición de calor. Admitiendo esta definición, se acepta el calor, igual que en el caso del trabajo, como energía en tránsito.

Una vez que esta forma de energía atraviesa la frontera del sistema, como en el trabajo, desaparece y se convierte en parte del contenido de energía del sistema o del entorno. La transferencia positiva de calor es adición del calor al sistema y la transferencia negativa de calor es desecho de calor por el sistema. Cuando un sistema está rodeado por una pared adiabática, no habrá transferencia de calor a través de su frontera. Aplicando la primera ley a un sistema cerrado que experimenta un cambio de estado adiabáticamente, se tiene:

$$dE = -dW_{ad}$$

y que

$$dQ = dE + dW$$

Esto quiere decir que el trabajo es el mismo para todas las trayectorias posibles cuando un sistema cerrado es sometido a un proceso adiabático entre dos estados dados de equilibrio, el calor se mide en un proceso midiendo el trabajo  $W_{12}$  ejecutado durante el proceso bajo estudio y midiendo el trabajo adiabático  $W_{ad} = -(E_2 - E_1)$  durante el proceso adiabático entre los estados.

#### 1.2.2.1.5 Entalpía

Considérese un cambio diferencial de estado para un sistema cerrado estacionario. La primera ley se da en general como

$$dQ = dU + dW$$

Limitándose al estudio de una sustancia para que sólo el trabajo ( $p dV$ ) es relevante. Entonces la ecuación se convierte en

$$dQ = dU + p dV$$

Además, si el proceso es a presión constante y cuasiestático puede escribirse como

$$dQ = d(U + p V)$$

ahora se define la nueva función como

$$H \equiv U + p V$$

Redefiniendo entonces

$$DQ = dH$$

Se observa que  $\Delta H$  es la medida del efecto calorífico en un proceso cuasiestático de presión constante de una sustancia para la que sólo el trabajo  $p dV$  es pertinente.

#### **1.2.2.1.6 Entropía y calidad de energía**

Dado que la energía se ha definido como la capacidad para desarrollar trabajo, es razonable definir la calidad de la energía en función de su potencialidad para desarrollar trabajo.

Se puede decir entonces que la calidad de cada unidad de energía en un sistema A es mayor que la calidad de cada unidad de energía en el sistema B, si cada unidad de energía en el sistema A potencialmente puede efectuar más trabajo que cada unidad de energía en el sistema B. Lo anterior significa que la energía en un depósito de trabajo sería de la más alta calidad. Aquella parte del contenido de energía en un sistema dado que potencialmente puede proporcionar trabajo recibe el nombre de trabajo disponible del sistema. Se representará con  $E_d$  el trabajo disponible de un sistema cuyo contenido total de energía es  $E$  y  $E_{nd}$  como energía no disponible del sistema.

$$E = E_d + E_{nd}$$

En general, cuando un sistema cerrado efectúa un cambio de estado, se tendrá un cambio en su contenido total de energía y un cambio en su trabajo disponible. Definiremos la entropía  $S$ , de tal manera que un cambio en ella,  $dS$ , durante un cambio de estado se relacione con el cambio en energía  $dE$  y el cambio en trabajo disponible  $dE_d$  correspondientes, evaluando este último con respecto a un depósito estándar:

$$dS = c(dE - dE_d)$$

Donde  $C$  es una constante positiva arbitraria cuyo valor depende del depósito estándar. La definición anterior implica que la entropía es proporcional a la energía no disponible del sistema y que se trata de una propiedad extensiva.

De acuerdo con la primera ley de la termodinámica,  $dE = 0$  para un sistema aislado y conforme al principio de la degradación de la energía,  $dE_d$  debe ser negativo para el mismo sistema. Por lo tanto, se debe tener para un sistema aislado,

$$(dS)_{\text{ais}} \geq 0$$

Ésta constituye una expresión matemática de la segunda ley de la termodinámica: la entropía de un sistema aislado nunca puede disminuir.

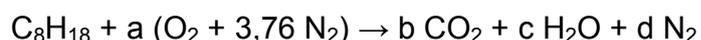
### 1.2.2.1.7 Estequiometría

Una ecuación química es esencialmente una relación que muestra las cantidades relativas de reactivos y productos involucrados en una reacción química. Los cálculos estequiométricos son aquellos que se realizan para conocer con precisión la cantidad que se va a obtener de un determinado producto, conocidas las cantidades de los reactivos o, por el contrario, las cantidades de reactivo que se han de utilizar para obtener una determinada cantidad de producto. La expresión cantidad estequiométrica indica la cantidad exacta que se necesita de una sustancia de acuerdo con una ecuación química.

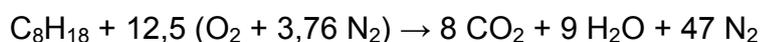
Para efectuar los cálculos estequiométricos se siguen una serie de etapas. Primero se escribe la ecuación química igualada. Puesto que lo más fácil es utilizar relaciones de moles como base de cálculo, la segunda etapa consiste en transformar en moles la información suministrada. En la tercera etapa se examinan las relaciones molares en la ecuación química para obtener la respuesta a la pregunta que haya sido formulada.

#### Reacción teórica

Es la reacción de combustión total, pasando todo el C a CO<sub>2</sub> y H a H<sub>2</sub>O. Es una característica del combustible, independiente del proceso de combustión posterior.

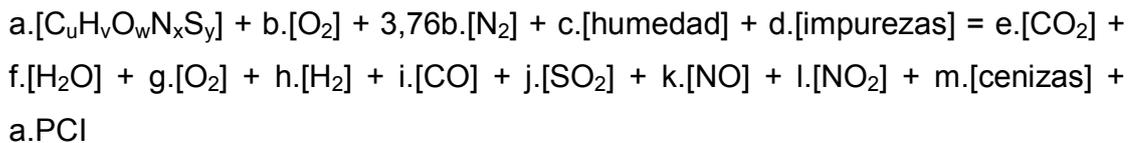


El ajuste de la ecuación se realiza con balances individuales (C, H, O, N, ...). De esta manera, se puede deducir la ecuación química estequiométrica:



### Reacción real

Es una característica del proceso de combustión, que recoge en una ecuación el balance de materia e incluye elementos que no están contemplados en el modelo de la reacción teórica.



$[C_uH_vO_wN_xS_y]$  es 1 mol de materia combustible (compuesto o mezcla), o 1 kg.

### 1.2.2.2 Análisis de la potencia de la caldera

Una herramienta fundamental para la determinación de la eficiencia de la caldera es el ciclo de Rankine; en el cual se busca encontrar la cantidad de energía absorbida por la caldera, la cual se explicará en el siguiente inciso.

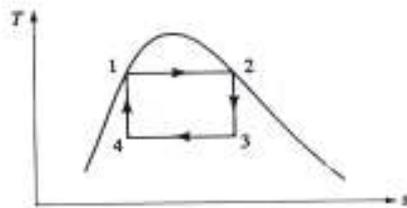
#### 1.2.2.2.1 Ciclo Rankine

El ciclo de Rankine está constituido por las siguientes etapas:

- Calentamiento reversible a presión constante
- Expansión adiabática reversible
- Enfriamiento reversible a presión constante
- Compresión adiabática reversible

Dado que el proceso de añadir calor a la sustancia de trabajo se efectúa reversiblemente, el área bajo la curva formada por las trayectorias  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$  en el diagrama T-s (figura 5) representa la cantidad total de calor añadido al sistema.

**Figura 5. Ciclo de Carnot**



Fuente: Francis F. Huang, **Ingeniería termodinámica**, Pág. 433

Si se hace que esta área sea igual al área bajo la línea horizontal  $6 \rightarrow 7$ , se puede escribir

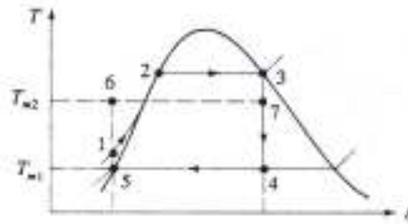
$$T_{m2} (s_1 - s_6) = Q_{ent}$$

Donde  $T_{m2}$  se conoce como temperatura media efectiva de la adición de calor. De la misma manera, se puede escribir

$$T_{m1} (s_4 - s_5) = |Q_{sal}|$$

donde  $T_{m1}$  recibe el nombre de temperatura media efectiva de la sustracción de calor.

**Figura 6. Ciclo Rankine simple**



Fuente: Francis F. Huang, **Ingeniería termodinámica**, Pág. 435

Por definición, la eficiencia térmica del ciclo,

$$\eta_t = \frac{Q_{\text{ent}} - |Q_{\text{s,al}}|}{Q_{\text{ent}}}$$

en los términos de temperaturas medias efectivas arriba definidas, la eficiencia térmica del ciclo  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 1$  (ver figura 6) se puede escribir como

$$\eta_t = \frac{T_{m2} (s_1 - s_6) - T_{m1} (s_4 - s_5)}{T_{m2} (s_1 - s_6)}$$

pero  $s_7 = s_4$  y  $s_6 = s_5$ ; la ecuación se reduce entonces

$$\eta_t = \frac{T_{m2} - T_{m1}}{T_{m2}}$$

Los cálculos relacionados con el funcionamiento de un ciclo de Rankine son relativamente sencillos. Suponiendo que para efectuar la parte del ciclo cada componente del equipo opera en estado permanente con flujo también permanente y que los cambios de energía cinética y de energía potencial son despreciables, se tiene, al considerar la primera ley, los siguientes resultados:

$$Q_{\text{ent}} = h_3 - h_1$$

$$W_T = h_3 - h_4$$

$$Q_{\text{s,al}} = h_5 - h_4$$

$$W_p = h_5 - h_1$$

de esta manera, la eficiencia del ciclo se puede expresar como

$$\eta_t = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{ent}}}$$
$$\eta_t = \frac{(h_3 - h_4) + (h_5 - h_1)}{h_3 - h_1}$$
$$\eta_t = \frac{(h_3 - h_4) - (h_1 - h_5)}{h_3 - h_1}$$

#### 1.2.2.2.2 Eficiencia de la caldera

La eficiencia de una caldera se define como la razón entre el calor absorbido por el agua de alimentación al convertirse en vapor en la caldera, y la energía total disponible del combustible suministrado.

Es decir, la eficiencia es una medida del aprovechamiento del combustible por la caldera al generar una determinada cantidad de vapor.

No es económicamente factible la fabricación de una caldera que funcione con muy pocas pérdidas de calor o sin ellas y por consiguiente, la eficiencia de una caldera siempre es menor del 100%. No obstante, algunas de las pérdidas de calor pueden reducirse al máximo o eliminarse mediante prácticas apropiadas de operación y mantenimiento.

La eficiencia de una caldera de vapor en condiciones de funcionamiento es:

$$\eta_t := \frac{[m_s \cdot (h - h_f)]}{m_f \cdot \text{PCS}}$$

donde

$\eta_t$  = rendimiento del generador de vapor.

$m_s$  = gasto másico de agua, kg/hr

$m_f$  = peso total de combustible quemado por hora, en kg.

PCS = potencia calorífica superior del combustible quemado , en kJ/kg.

### **1.2.2.3 Análisis de combustión de la caldera**

Como se sabe, en toda caldera existen insumos y productos; los cuales poseen características que se utilizan en conjunto que pueden ser utilizados para establecer índices de mantenimiento.

#### **1.2.2.3.1 Aire teórico, exceso de aire y relación aire combustible**

El oxígeno para la combustión normalmente proviene del aire, donde se encuentra en una proporción de un 21% del volumen total. La mayor parte del 79% es nitrógeno. El nitrógeno es de menor importancia en la producción de calor puesto que sólo un porcentaje muy pequeño forma parte de las reacciones químicas de la combustión.

Sin embargo, tiene un efecto significativo en la eficiencia de la caldera ya que parte del calor liberado por la reacción de la combustión tiene que ser utilizado para calentar el nitrógeno a la misma temperatura de llama más baja que si se usara oxígeno puro.

Se denomina aire teórico (aire seco) a la cantidad de aire necesaria para una combustión perfecta. Cualquier cantidad de aire que exceda el aire teórico se le conoce como exceso de aire, es decir 110% de aire teórico es equivalente al 10% de aire en exceso. El aire mezclado con el combustible en el quemador, se denomina aire primario. Otro parámetro importante de aplicación en los procesos de combustión es la razón aire-combustible (AC), tomando como base un mol de combustible,

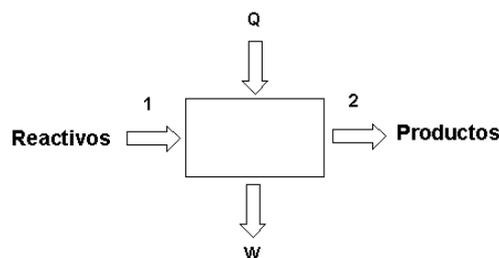
$$AC := \frac{m_{\text{aire}}}{m_{\text{CH}}}$$

### 1.2.2.3.2 Balance de energía para sistemas en estado permanente con flujo permanente y reacciones químicas

Despreciando los cambios en energía cinética y en energía potencial, se tiene, de la primera ley para flujo permanente a través de un sistema en estado permanente, (ver figura 7)

$$Q = H_{p2} - H_{R1} + W$$

**Figura 7. Sistema generalizado con flujo permanente con reacciones químicas**



Donde

$H_{p2}$  = entalpía de los producto en el estado 2

$H_{R1}$  = entalpía de los reactivos en el estado 1

Puesto que se tiene un cambio en la composición del sistema, resultan también cambios en las propiedades químicas de las sustancias involucradas. Los datos de entalpía necesarios para la evaluación de  $(H_{p2} - H_{R1})$ , deben ser en principio, valores absolutos. Esto significa que las diversas tablas de propiedades termodinámicas de cada sustancia a utilizar, no pueden utilizarse para la determinación de  $(H_{p2} - H_{R1})$ . Para eliminar esta dificultad, conviene volver a escribir  $(H_{p2} - H_{R1})$  de la siguiente manera:

$$H_{p2} - H_{R1} = (H_{p2} - H_{p0}) - (H_{R1} - H_{R0}) + (H_{p0} - H_{R0})$$

Donde

$H_{p0}$  = entalpía de los productos en un estado estándar  $T_0$  (generalmente 25°C) y  $p_0$  (1 atm)

$H_{R0}$  = entalpía de los reactivos en el mismo estado estándar que  $H_{p0}$

Los primeros términos encerrados entre paréntesis en el lado derecho de la ecuación pueden escribirse:

$$H_{p2} - H_{p0} = \sum_P n_i (\bar{h}_{p2} - \bar{h}_{p0})_i$$
$$H_{R1} - H_{R0} = \sum_R n_i (\bar{h}_{R1} - \bar{h}_{R0})_i$$

Resulta claro que el cálculo en las ecuaciones puede obtenerse utilizando las tablas de propiedades termodinámicas para diferentes sustancias simples comprensibles, ya que se tiene únicamente cambios de entalpía para la misma sustancia, entre dos estados. Resulta que la cantidad  $(H_{p0} - H_{R0})$  se denomina entalpía de reacción estándar, donde Q se puede escribir como :

$$Q = \sum_P n_i (\bar{h}_{p2} - \bar{h}_{p0})_i - \sum_R n_i (\bar{h}_{R1} - \bar{h}_{R0})_i + \Delta H^\circ + W$$

donde  $\Delta H^\circ = H_{p0} - H_{R0}$  = entalpía de reacción estándar.

### 1.2.2.3.3 Entalpía de reacción y poderes caloríficos de los combustibles

Considerando el dispositivo que opera en estado permanente con flujo también permanente a presión constante y sin transferencia de trabajo, despreciando los cambios de energía cinética y de energía potencial, se tiene, de la primera ley,

$$Q = H_{P2} - H_{R1} = \Delta H$$

Si tanto los reactivos como los productos están a la misma temperatura, la cantidad  $\Delta H^\circ$  recibe el nombre de entalpía de reacción, consiste simplemente en la cantidad de calor trasferido por lo que con frecuencia se llama calor de reacción. Si la reacción química bajo consideración es un proceso de combustión, a la entalpía de reacción se le conoce también como entalpía de combustión.

En la practica, a la energía que es posible obtener quemando un combustible cuando los reactivos y los producto están a la misma temperatura se le conoce como poder calorífico del combustible, definiéndolo como poder calorífico =  $-\Delta H^\circ$ .

$$\text{Poder calorífico} = -\Delta H_o = \sum_{\text{P}} n_i (h^f_o)_i - \sum_{\text{R}} n_i (h^f_o)_i$$

La mayoría de los combustible comunes contienen hidrógeno que, al quemarse, forma  $\text{H}_2\text{O}$ .

El  $\text{H}_2\text{O}$  en los productos puede aparecer como líquido o como vapor, cuando aparece como líquido, el poder calorífico recibe el nombre de poder calorífico superior (PCS) del combustible, si aparece en la fase gaseosa, se llama poder calorífico inferior (PCI) del combustible.



## **2 CONDICIONES DEL ÁREA DE GENERACIÓN DE VAPOR**

Ante la presencia de un problema, es necesario conocer el ambiente para determinar la eficiencia de la caldera y para realizar su análisis térmico es necesario conocer el equipo y maquinaria con la cual cuenta el área de generación de vapor y con mayor importancia las características de la caldera, así como también los índices que le permiten al operador realizar el mantenimiento de la caldera.

### **2.1 Área de generación de vapor**

A continuación se brinda una descripción de la maquinaria y equipo con la cual se cuenta en el área de generación de vapor y al mismo tiempo la instrumentación que ésta posee, con el objetivo de conocer la situación actual sin omitir los índices que actualmente son utilizados para proceder al mantenimiento.

#### **2.1.1 Descripción de la maquinaria y el equipo**

En el área de generación de vapor, se cuenta con dos calderas, pero actualmente una está fuera de servicio, la otra caldera a la cual se le realizará el diagnóstico, tiene como función proveer de vapor a las distintas unidades de secado y planchado. Actualmente se cuenta con una prensa, una secadora (a base de vapor) y una máquina de lavado en seco, dichas máquinas tienen un perfil de consumo de vapor medio respecto a la capacidad de la caldera (según el encargado de la caldera).

La máquina de lavado en seco principalmente es utilizada para aquellas prendas de tejidos finos como lo son: casimires, cueros, sedas, terciopelos y todo tejido que puede desteñir o encogerse.

### 2.1.2 Descripción de la caldera

La empresa posee una caldera marca *Power master* modelo '54, dicha caldera no cuenta con un sistema de registros de datos que permita evaluar su rendimiento a través del tiempo, al mismo tiempo debido a que el precio de un análisis de gases Orsat en el mercado es alto, en consecuencia tampoco se tiene un indicador de cómo se está efectuando la combustión en la caldera.

El combustible utilizado es el Diesel, donde se asumirá que posee las características mostradas en la tabla VIII (ver anexo). Los datos que se necesitan y se recopilaron sin alterar el presupuesto para efectuar el análisis térmico se presentan en la siguiente tabla:

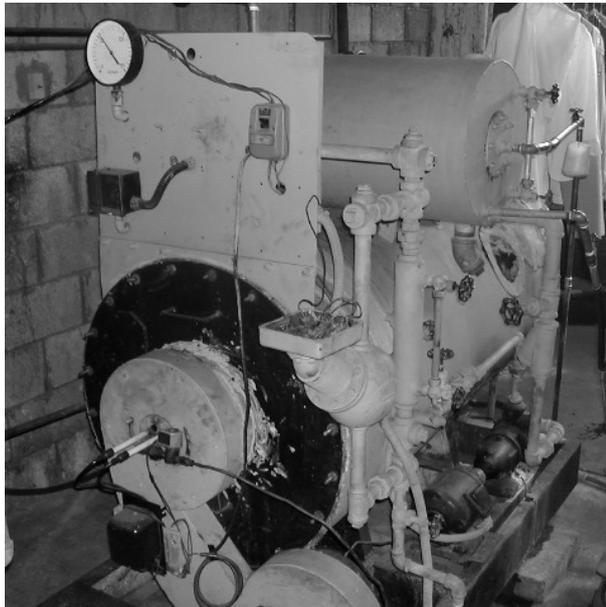
**Tabla I. Características del funcionamiento de la caldera**

Datos recopilados		
Presión nominal de trabajo	60 PSI	413.6854 kPa
Presión de admisión de agua	14.69594 PSI	101.325 kPa
Tipo de combustible	Diesel	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>
Gasto másico de combustible		2.7264 $\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
Gasto másico de agua		40.2 $\frac{\text{kg}}{\text{hr}}$
Temperatura de los gases de escape	320 °C	593.15 K
Temperatura ambiente	15 °C	288.15 K
Temperatura del combustible	15 °C	288.15 K
Temperatura del aire	15 °C	288.15 K

La caldera (ver figura 8, ) posee manómetro, regulador de presión, cilindro de condensado, quemador, en general todos los instrumentos necesarios para la operación de una caldera. No cuenta con contadores tanto de agua como de combustible y no posee un flote que permita accionar automáticamente la bomba de agua cuando el nivel está bajo. Esta es accionada manualmente cuando el operador ve por medio del visor de nivel de agua que la misma se encuentra baja, se observo también que la caldera es antigua pero la mantienen en condiciones óptimas de trabajo como también en condiciones seguras de funcionamiento.

Las instalaciones están estructuradas de tal manera que permiten la locomoción del personal sin obstáculo alguno, la ventilación es la adecuada debido a que posee un área de entrada de aire suficientemente grande. Se detallara en forma breve cada instrumento que posee la caldera.

**Figura 8. Caldera *Power master***



Válvulas de seguridad:

cuando la presión alcanza un punto predeterminado la válvula se dispara, quedando completamente abierta y permaneciendo así hasta que baja nuevamente la presión.

Regulador de presión:

este instrumento es utilizado para controlar la presión nominal de trabajo, cuando la presión es la adecuada, este dispositivo habilita y deshabilita los instrumentos para que se lleve a cabo la combustión, dependiendo si la presión de trabajo es mayor o menor de la nominal.

Grifos de prueba:

se colocan válvulas o grifos de prueba a tres niveles diferentes del indicador del nivel, lo que permite al operador cerciorarse de que el nivel del agua de una caldera coincide con la indicación del tubo de vidrio.

Purgadores:

en las calderas en las que se requieren cantidades apreciables de agua de repuesto, se producirá un aumento gradual en las sedimentaciones de sales solubles en el agua de la caldera. Estos sedimentos son eliminados por medio de la purga que tiene que efectuarse periódicamente o continuamente.

Instrumentos:

las calderas de vapor deben tener, forzosamente, un manómetro para la medición de la presión. Otros accesorios importantes pueden ser un indicador visual del nivel de agua, trampas de vapor, termómetro para los gases de escape, etc.

Condensadores de vapor:

son aparatos en los cuales se condensa el vapor de escape procedente de máquinas, donde puede ser utilizado como agua de alimentación para las calderas.

### **2.1.3 Índices para realizar el mantenimiento**

El tipo de mantenimiento que posee la empresa es preventivo, periódico y correctivo, no poseen índices que le permitan determinar el momento preciso de realizar un mantenimiento, tomando como base un análisis térmico de su caldera.

## **2.2 Descripción del mantenimiento**

A continuación se brinda una descripción de diversos factores que se toman en cuenta para realizar un mantenimiento adecuado, tal como el control de la caldera y los tipos de mantenimiento que se le deben de practicar a la misma como el mantenimiento preventivo y correctivo.

### **2.2.1 Control de la caldera**

El control de la caldera está a cargo de un solo operador, que momentos antes de poner en marcha la caldera revisa si:

- las válvulas de cierre del circuito de combustible están abiertas,
- las válvulas de cierre del circuito de agua de alimentación están abiertas,
- observa el agua en los niveles.

Durante el funcionamiento de la caldera el operador controla lo siguiente:

- aprovechando los momentos de reducida demanda de vapor de fábrica, se comprobará el correcto funcionamiento de los controles de presión,
- el gasto másico de agua y combustible,
- la purga, en los momentos indicados.

### **2.2.2 Mantenimiento preventivo**

El mantenimiento preventivo está indicado únicamente al transcurrir aproximadamente 6 meses, consiste en verificar las condiciones de los tubos y con un cepillo se limpian las superficies, se limpian los espejos refractarios, al mismo tiempo se verifica, limpia el quemador y la turbina que genera el aire para la combustión, también se quitan los registros y con agua a presión se limpia la superficie donde el agua tiene contacto con los tubos para quitar posibles incrustaciones de sarro u otros materiales que pudiera producir el agua. Se debe tener en cuenta que al agua se le agregan aditivos para que no genere incrustaciones y corroa a los tubos. Sin olvidar las válvulas de seguridad y otros dispositivos.

### **2.2.3 Mantenimiento correctivo**

La empresa no cuenta con los dispositivos y repuestos necesarios ante un fallo en la caldera, al momento de ocurrir esto, se procede a llamar a una empresa para que preste dicho servicio.

### 3 DIAGNÓSTICO DE LA CALDERA

Con los conocimientos teóricos, además de la información de la situación actual de la caldera se puede proceder con más confianza a realizar todo el análisis para determinar la eficiencia del balance térmico.

#### 3.1 Análisis de potencia de la caldera

Dado que ya se conoce la presión de trabajo nominal y la presión de admisión del agua, con estos datos se puede determinar la cantidad de calor necesaria para alcanzar la presión nominal, lo cual se realizará a continuación.

##### 3.1.1 Ciclo Rankine

En la tabla I, se observan las presiones de trabajo de la caldera, donde la presión nominal de trabajo es de 413.68 kPa y la de admisión es de 101.32 kPa, y recordado la fórmula para la eficiencia del ciclo termodinámico

$$\eta_t = \frac{(h_3 - h_4) - (h_1 - h_5)}{h_3 - h_1}$$

donde se procede a realizar los siguientes cálculos para encontrar las distintas entalpías:

$$\omega T = h_3 - h_4$$

De la tabla V de vapor saturado (ver anexo, de aquí en adelante se interpola de esta tabla a menos que se indique lo contrario) se encuentra que

$$h_3 = h_g \text{ a } 413.68 \text{ kPa}$$

interpolando para encontrar la entalpía  $h_3$

$$h_3 = 2739.05 \text{ kJ/kg}$$

Puesto que el proceso 3  $\rightarrow$  4 es isentrópico,  $h_4$  queda definida por  $p_4 = 101.32 \text{ kPa}$  y  $s_4 = s_3 = s_g \text{ a } 413.68 \text{ kPa} = 6.88 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ .

Encontrando las entalpías  $s_f$ ,  $s_{fg}$ ,  $s_g$  a una presión de 101.32 kPa entonces se interpola de nuevo y se encuentra que

$$s_f = 1.3061 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$s_{fg} = 6.05 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

$$s_g = 7.3562 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

Donde  $s_4 = s_3 = s_g \text{ a } 413.68 \text{ kPa}$  está contenida dentro de  $s_f$ ,  $s_g$  a 101.32 kPa, entonces se puede decir que el punto 4 cae dentro de la región del líquido mezclado con vapor, se puede entonces utilizar la siguiente expresión para determinar  $h_4$

$$h_4 = [h_g - (1 - x)_4 h_{fg}] \text{ a } 101.32 \text{ kPa}$$

para encontrar la calidad en el punto 4 se debe de utilizar

$$s_3 = s_4 = [s_g - (1 - x)_4 s_{fg}] \text{ a } 101.32 \text{ kPa}$$

$$6.88 = [7.3562 - (1 - x)_4 \cdot 6.05]$$

donde se puede encontrar la expresión

$$(1 - x)_4 = 0.0787$$

por lo tanto, se debe interpolar para encontrar la entalpías  $h_g$  y  $h_{fg}$  a 101.32 kPa y se obtiene que

$$h_{fg} = 2257.0631 \text{ kJ/kg}$$

$$h_g = 2675.8752 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = [h_g - (1 - x)_4 h_{fg}] \text{ a } 101.32 \text{ kPa}$$

$$h_4 = [2675.8752 - 0.0787 \cdot 2257.0631] = 2298.2443 \text{ kJ/kg}$$

entonces

$${}^0 T = 2739.05 - 2298.2443 = 440.8057 \text{ kJ/kg}$$

Para el condensador se tiene

$$q_{\text{sal}} = h_5 - h_4$$

Donde  $h_5 = h_f$  a 101.32 kPa e interpolando se encuentra que es igual a 418.8199 kJ/kg

$$q_{\text{sal}} = 418.8199 - 2298.2443 = -1879.4244 \text{ kJ/kg}$$

El signo negativo simplemente significa, de acuerdo con la convención impuesta, el calor sale del condensador.

Para la bomba resulta

$${}^{\omega} P = -v \cdot (p_1 - p_5)$$

Donde  $v$  se puede tomar como  $v_f$  a 101.32 kJ/kg que resulta ser de la interpolación igual a  $0.00104365 \text{ m}^3/\text{kg}$ , por lo tanto

$${}^{\omega} P = -0.00104365 \cdot (413.68 - 101.32) = -0.32599 \text{ kJ/kg}$$

donde el signo negativo indica que se está proporcionando trabajo.

$$h_1 = h_5 - {}^{\omega} P = 418.8199 - (-0.32599) = 419.1458 \text{ kJ/kg}$$

Para el generador de vapor se tiene,

$$q_{\text{ent}} = h_3 - h_1 = 2739.05 - 419.1458 = 2319.9042 \text{ kJ/kg}$$

quedando la eficiencia térmica del ciclo definida como

$$\eta_t = \frac{(440.8057 - 0.3259)}{2319.9042}$$

$$\eta_t = 0.1898 = 19 \%$$

### 3.2 Análisis de combustión de la caldera

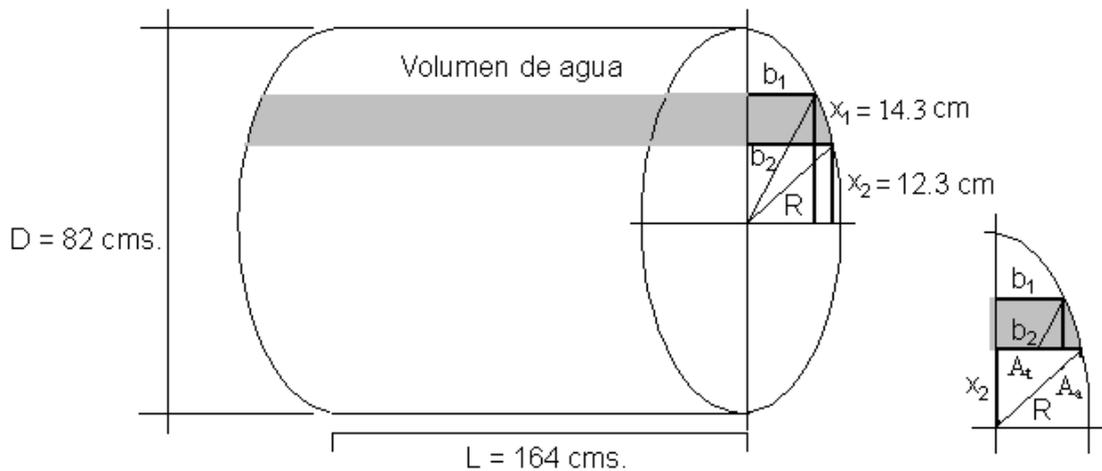
Dado que se conoce el tipo de combustible y las distintas temperaturas que juegan un papel fundamental en la caldera, se pueden realizar los cálculos necesarios para la determinación de las incógnitas.

#### 3.2.1 Gasto másico de combustible y agua

Dada la situación actual de la caldera, no cuenta con el instrumento necesario para medir el caudal másico, tanto de combustible como de agua. A continuación se mostrarán los cálculos necesarios para la determinación de los mismos.

#### Gasto másico de agua

Figura 9. Dimensiones de la caldera (volumen de agua)



A continuación se calcula el área formada por el arco para una altura  $x_i$  donde  $i = 1, 2$  y con un  $R = 36$  cm (véase figura 9, se eliminó el espesor de pared de la caldera) quedando definida con la siguiente expresión:

$$A_a := \frac{\left( \operatorname{asin}\left(\frac{x_i}{R}\right) \cdot \pi \cdot R^2 \right)}{2 \cdot \pi}$$

luego la expresión para el área formada por el triángulo:

$$A_t := \frac{\left[ \left( R^2 - x_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (x_i) \right]}{2}$$

quedando definida el área total como  $A_i = A_a + A_t$  o bien como

$$A_i := \frac{\left( \operatorname{asin}\left(\frac{x_i}{R}\right) \cdot \pi \cdot R^2 \right)}{2 \cdot \pi} + \frac{\left[ \left( R^2 - x_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \cdot (x_i) \right]}{2}$$

Para  $x_1 = 14.3$  cm.,  $x_2 = 12.3$  cm.  $L = 1.5$  m. y  $R = 36$  cm., y el tiempo que se llevó en evaporar este volumen de agua fue de 30 min.:

$$A_1 := \frac{\left[ \operatorname{asin}\left(\frac{14.3 \text{ cm}}{36 \text{ cm}}\right) \cdot \pi \cdot (36 \text{ cm})^2 \right]}{2 \cdot \pi} + \frac{\left[ \left[ (36 \text{ cm})^2 - (14.3 \text{ cm})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot (14.3 \text{ cm}) \right]}{2}$$

$$A_1 = 0.0501 \cdot \text{m}^2$$

$$A_2 := \frac{\left[ \operatorname{asin}\left(\frac{12.3 \text{ cm}}{36 \text{ cm}}\right) \cdot \pi \cdot (36 \text{ cm})^2 \right]}{2 \cdot \pi} + \frac{\left[ \left[ (36 \text{ cm})^2 - (12.3 \text{ cm})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cdot (12.3 \text{ cm}) \right]}{2}$$

$$A_2 = 0.0434 \cdot \text{m}^2$$

$$A := 2 \cdot (A_1 - A_2)$$

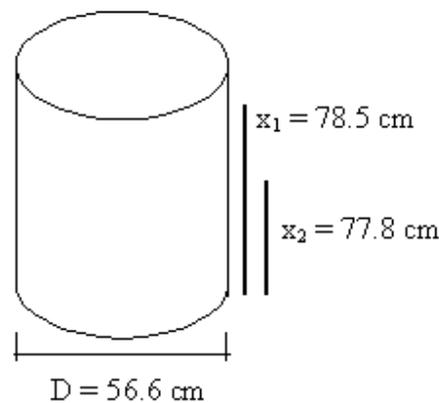
$$A = 0.0134 \cdot \text{m}^2$$

$$\text{Caudal} := \frac{L \cdot A}{30 \text{ min}} = \frac{1.5 \text{ m} \cdot 0.0134 \text{ m}^2 \cdot 60 \text{ min}}{30 \text{ min} \cdot 1 \text{ hr}} = 0.0402 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

$$\text{GM}_{\text{agua}} := \text{Caudal} \cdot \rho_{\text{agua}} = \left( 0.0402 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}} \right) \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 40.2 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

### Gasto másico de combustible

**Figura 10. Dimensiones del tanque de combustible**



Seguidamente se calculará el volumen consumido de combustible (véase figura 10), el tiempo fue de 30 min. Donde la expresión queda determinada como:

$$\text{Vol} := (x_1 - x_2) \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = (78.5 \text{ cm} - 77.8 \text{ cm}) \cdot \pi \cdot \left(\frac{56.6 \text{ cm}}{2}\right)^2 = 1.7612 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{GM}_{\text{comb}} := \frac{\text{Vol} \cdot \rho_{\text{comb}}}{30 \text{ min}} = \frac{\left[ (1.7612 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3) \cdot 774 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}}}{30 \text{ min}} = 2.7264 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

### 3.2.2 Entalpía de reacción y poderes caloríficos de los combustibles

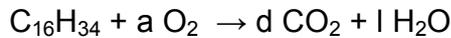
De donde se sabe que

$$\text{Poder calorífico} = -\Delta H_o = \sum_{\text{P}} n_i (h^f_o)_i - \sum_{\text{R}} n_i (h^f_o)_i$$

y de la tabla VIII se encuentra que para el combustible tipo Diesel, la potencia calorífica es de 10592 kcal/kg (se supone la inferior por la variabilidad que poseen en potencia los distintos combustible) y que su masa molecular es de 226.4 kg/kg<sub>mol</sub>, según el sistema SI, donde la potencia calorífica debe de estar especificada con dimensionales KJ/Kg<sub>mol</sub>, quedando de la siguiente manera:

$$\text{Potencia calorífica} = \left[ \left( 10592 \frac{\text{kCal}}{\text{kg}} \right) \cdot 4.1868 \frac{\text{KJ}}{\text{kCal}} \right] \cdot 226.4 \frac{\text{kg}}{\text{kg mol}} \rightarrow 10040066.97984 \cdot \frac{\text{KJ}}{\text{kg mol}}$$

También se debe encontrar la entalpía de formación  $h^f_o$  para el combustible, se sabe que la potencia calorífica se da cuando los reactivos como los productos están a la misma temperatura y asumiendo una combustión teórica.

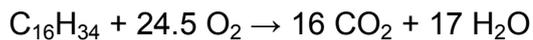


Haciendo el balance de masa

Carbono	$16 = d$	$d = 16$
---------	----------	----------

Hidrógeno	$34 = 2 \cdot l$	$w = 17$
-----------	------------------	----------

Oxígeno	$2 \cdot a = 2 \cdot d + l$	$a = 24.5$
---------	-----------------------------	------------



$$-\Delta H^\circ = d \cdot h_{\text{fco}_2}^\circ + w \cdot h_{\text{fh}_2\text{o}}^\circ - h_{\text{fC}_{16}\text{H}_{34}}^\circ$$

$$h_{\text{fC}_{16}\text{H}_{34}}^\circ = d \cdot h_{\text{fco}_2}^\circ + w \cdot h_{\text{fh}_2\text{o}}^\circ + \Delta H^\circ$$

$$h_{\text{fC}_{16}\text{H}_{34}}^\circ = 16 \cdot (-393790 \text{ KJ/kg}_{\text{mol}}) + 17 \cdot (-242000 \text{ KJ/kg}_{\text{mol}}) + 10040066.9798$$

KJ/kg<sub>mol</sub>

$$h_{\text{fC}_{16}\text{H}_{34}}^\circ = 374573.0202 \text{ KJ/kg}_{\text{mol}}$$

Donde el  $h_{\text{fC}_{16}\text{H}_{34}}^\circ$  es negativo según la convención de signos, ya que entrega energía.

### 3.2.3 Balance de energía para sistemas en estado permanente con flujo permanente y reacciones químicas

Se asumirá que los gases de escape están únicamente constituidos por  $\text{CO}_2$   $\text{CO}$   $\text{O}_2$   $\text{N}_2$   $\text{H}_2\text{O}$ , que son las variables a determinar, se comenzará por el análisis estequiométrico para la resolución del problema, que está definido de la siguiente manera:



Donde a, d, m, e, d y l están en  $\text{kg}_{\text{mol}}$

Haciendo el balance de masa

$$\text{Carbono (ec.1)} \quad 16 = d + m \quad m := 16 - d$$

$$\text{Hidrógeno} \quad 34 = 2 \cdot l \quad l := 17$$

$$\text{Oxígeno (ec. 2)} \quad 2 \cdot a = 2 \cdot d + m + 2 \cdot e + w \quad e := \frac{(2 \cdot a - 2 \cdot d - m - d)}{2}$$

$$\text{Nitrógeno} \quad 2 \cdot a \cdot 3.76 = 2 \cdot k \quad K = a \cdot 3.76$$

A continuación se realiza el balance de energía con reacciones químicas, donde la variable  $W = 0$  debido a que en la combustión no existe trabajo alguno, entonces se tiene que:

$$Q = \sum_P n_i (\bar{h}_{p2} - \bar{h}_{p0})_i - \sum_R n_i (\bar{h}_{R1} - \bar{h}_{R0})_i + \Delta H^\circ$$

y que tanto Q como  $\Delta H^\circ$  son negativos según la convención de signos, desarrollando la ecuación anterior para este caso se obtiene:

$$Q := d \cdot (h_{g\text{CO}_2} - h_{c\text{CO}_2}) + m \cdot (h_{g\text{CO}} - h_{c\text{CO}}) + e \cdot (h_{g\text{O}_2} - h_{c\text{O}_2}) + (a \cdot 3.76) \cdot (h_{g\text{N}_2} - h_{c\text{N}_2}) \\ + l \cdot (h_{g\text{H}_2\text{O}} - h_{c\text{H}_2\text{O}}) + d \cdot (h_{f\text{CO}_2}) + m \cdot (h_{f\text{CO}}) + l \cdot (h_{f\text{H}_2\text{O}}) - (h_{f\text{C}_{16}\text{H}_{34}})$$

a la cual se nombra como ec. 3, se debe de tomar en cuenta que toda reacción tiene que estar en equilibrio y dado que los gases de combustión se encuentran  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{O}_2$  se presenta también la siguiente reacción:



Cuya constante de equilibrio está expresada de la siguiente manera

$$K_p := \frac{(m^{v_{\text{CO}}} \cdot e^{v_{\text{O}_2}}) \cdot p^{v_{\text{CO}} + v_{\text{O}_2} - v_{\text{CO}_2}}}{d^{v_{\text{CO}_2}}}$$

donde  $v_{\text{CO}_2}$ ,  $v_{\text{CO}}$  y  $v_{\text{O}_2}$  representan la cantidad de dichos gases (ec.4). En la tabla VII se presenta el logaritmo de base 10 de la constante  $K_p$ . Así mismo, el número total de moles de los productos es:

$$M_t = d + m + e + 17 + a \cdot 3.76 \quad \text{ec(5)}$$

De la tabla I se tiene que el gasto másico de combustible es de 2.7264 kg/hr y el gasto másico de agua es de 40.2 kg/hr, se debe recordar que en la sección 3.1.1 se determinó que  $q_{\text{ent}} = 2319.9042 \text{ kJ/kg}$ .

Con estos datos se procederá a calcular la cantidad de calor que absorbió el agua en  $\text{kJ/kg}_{\text{mol-comb}}$ , estando definida por la siguiente fórmula:

$$Q := \frac{(GM_{\text{agua}} \cdot q_{\text{ent}})}{GM_{\text{comb}} \cdot \text{Peso}_{\text{comb}}}$$

$$Q := \frac{[GM_{\text{agua}} \cdot (q_{\text{ent}})]}{GM_{\text{comb}} \cdot \text{Peso}_{\text{comb}}} = \frac{\left(40.2 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}\right) \cdot \left(2319.9042 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)}{\left(2.7264 \frac{\text{kg}}{\text{hr}}\right) \cdot \left(226.4 \frac{\text{kg}}{\text{kg mol}_{\text{comb}}}\right)^{-1}}$$

$$Q = 7744314.0029 \frac{\text{kJ}}{\text{kg mol}_{\text{comb}}}$$

recordando que según la convención de signos Q es negativa, para las temperaturas de los gases de escape y combustible, sus respectivas entalpías se muestran en la tabla II, se interpoló de la tabla VI.

**Tabla II. Entalpías de compuestos**

	hg, hg/kg <sub>mol</sub> a 593.15 K	hf, hg/kg <sub>mol</sub> a 288.15 K
CO <sub>2</sub>	21953	9006.6
CO	17405	8379.9
O <sub>2</sub>	17709	8390.6
N <sub>2</sub>	17359	8379.1
H <sub>2</sub> O	20158	9569.1
Kp	10 <sup>-22.26</sup>	

Dado que hay cuatro ecuaciones y cuatro incógnitas, se procederá a encontrar las incógnitas por medio de sustitución de ecuaciones. A continuación sólo se mostrarán las ecuaciones ya simplificadas.

De la ecuación 1 y 2 la sustituimos en la 3, obteniendo (ec5):

$$a := \frac{-1 \cdot (d \cdot h_{gco2} - 1 \cdot d \cdot h_{cco2} + 16 \cdot h_{gco} - 16 \cdot h_{cco} - 1 \cdot d \cdot h_{gco} + d \cdot h_{cco} - 1 \cdot d \cdot h_{go2} + d \cdot h_{co2} - 8 \cdot h_{go2} + 8 \cdot h_{co2} + 1 \cdot h_{gh2o} - 1 \cdot h_{ch2o} + d \cdot h_{fco2} + 16 \cdot h_{fco} - 1 \cdot h_{fco} \cdot d + 1 \cdot h_{fh2o} - 1 \cdot h_{fc16h34} - 1 \cdot Q)}{(h_{go2} - 1 \cdot h_{co2} + 3.76 \cdot h_{gn2} - 3.76 \cdot h_{cn2})}$$

Como se desea tener en fracciones molales las distintas incógnitas, en la ecuación 4 cada incógnita se dividirá entre  $M_t$  y luego se sustituirán las ecs. 1 y 2, obteniendo (ec.6) lo siguiente:

$$K_p := \frac{\left[ \frac{16-d}{d + (16-d) + \frac{(2a-2d-(16-d)-d)}{2} + 17 + a \cdot 3.76} \right] \cdot \left[ \frac{\frac{(2a-2d-(16-d)-d)}{2}}{d + (16-d) + \frac{(2a-2d-(16-d)-d)}{2} + 17 + a \cdot 3.76} \right]^{\frac{1}{2}}}{\left[ \frac{d}{d + (16-d) + \frac{(2a-2d-(16-d)-d)}{2} + 17 + a \cdot 3.76} \right]} \cdot p^2$$

dado que  $K_p$  es una constante, solamente se tienen dos ecuaciones (ecs. 5 y 6) con dos incógnitas cuya solución (ec. 7) para  $d$  está dada por

$$0 := (16-d) \cdot \frac{\left( \frac{1803103964380689686}{296059328080865203} \cdot d - \frac{21418517016346004662}{296059328080865203} \right)}{d} + \frac{\left( \frac{-73814662457001553298}{296059328080865203} + \frac{9139366407244109487}{296059328080865203} \cdot d \right)}{d} - \frac{4600072258239637}{85070591730234615865843651857942052864}$$

$$d = 11.8787$$

ya que se encontró d se pueden calcular las demás incógnitas siguiendo las ecuaciones aquí planteadas en un orden descendente, donde se obtiene lo mostrado en la tabla III:

**Tabla III. Porcentaje volumétrico (gases de escape)**

**Solución A**

Estado	Ecuación	Compuesto	Moles
Productos	7	Dióxido de carbono	11.8787
	1	Monóxido de carbono	4.1213
	2	Exceso de oxígeno	3.5527E-15
	Balance	Nitrógeno	84.3719
	Balance	Agua	17
Reactivos	5	Oxígeno	22.4393

**Solución B**

Estado	Ecuación	Compuesto	Moles
Productos	7	Dióxido de carbono	16
	1	Monóxido de carbono	0
	2	Exceso de oxígeno	25.1002
	Balance	Nitrógeno	186.4967
	Balance	Agua	17
Reactivos	5	Oxígeno	49.6002

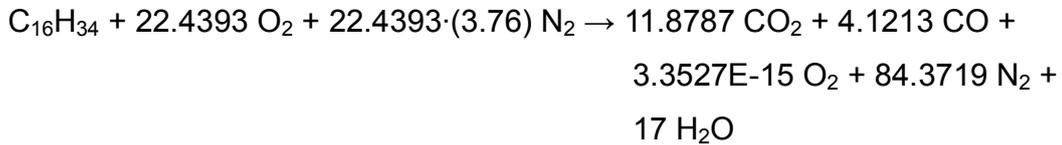
**3.2.4 Aire teórico, exceso de aire y relación aire combustible**

**Solución teórica**



$$\text{AC}_{\text{teórico}} := \frac{\text{Peso aire}}{\text{Peso combustible}} = \frac{24.5 \cdot 32 + 24.5 \cdot 3.76 \cdot 28.2}{16 \cdot 12 + 34 \cdot 1} = 14.9636 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg combustible}}$$

### Solución A



Al quemar un hidrocarburo con aire insuficiente, es razonable considerar que todo el hidrógeno se transforma en agua debido a su afinidad con el oxígeno, con el resultado de que no habrá el oxígeno adecuado para transformar todo el carbono en dióxido de carbono. Se debe tener en cuenta que si la cantidad de aire suministrado es considerablemente menor que la del aire teórico, pueden presentarse algunos hidrocarburos en los productos de la combustión.

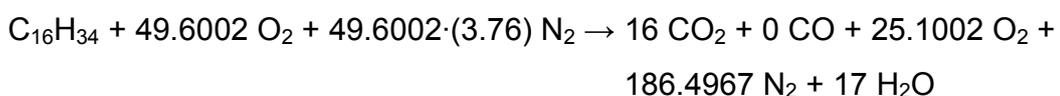
El aire en exceso quedó definido de la siguiente forma:

$$\text{Aire}_{\text{exceso}} := 100 \cdot \left( \frac{\text{Aire}_i}{\text{Aire}_{\text{teórico}}} - 1 \right) = 100 \cdot \left( \frac{22.4393 \text{ O}_2 + 22.4393 \cdot 3.76 \text{ N}_2}{24.5 \text{ O}_2 + 24.5 \cdot 3.76 \text{ N}_2} - 1 \right) = -8.411 \%$$

Este porcentaje indica que no se tiene en la combustión al menos el aire teórico requerido, en consecuencia como se mencionó anteriormente, en los gases de escape habrá CO. La relación aire combustible está definida como sigue:

$$\text{AC} := \frac{\text{Peso}_{\text{aire}}}{\text{Peso}_{\text{combustible}}} = \frac{22.4393 \cdot 32 + 22.4393 \cdot 3.76 \cdot 28.2}{16 \cdot 12 + 34 \cdot 1} = 13.705 \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{\text{combustible}}}$$

### Solución B



La cantidad de oxígeno que teóricamente se necesita para quemar el combustible es de 24.5 moles, pero en la realidad no existe combustión perfecta por factores de diseño del equipo, quemador y de la naturaleza impura del combustible.

Por consiguiente, solamente se trabajará con la solución A, por lo que en la práctica el oxígeno óptimo no corresponde al teórico, sin embargo suele expresarse como porcentaje del mismo. El exceso de aire provoca arrastre de calor de la combustión a los gases de escape, el exceso de nitrógeno presente en los gases al pasar de la temperatura ambiente a la temperatura de los gases sustrae calor de la combustión, reduciendo la eficiencia del sistema.

$$\text{Aire}_{\text{exceso}} := 100 \cdot \left( \frac{\text{Aire}_i}{\text{Aire}_{\text{teórico}}} - 1 \right) = 100 \cdot \left( \frac{49.6002 \text{ O}_2 + 49.6002 \cdot 3.76 \text{ N}_2}{24.5 \text{ O}_2 + 24.5 \cdot 3.76 \text{ N}_2} - 1 \right) = 102.4498 \%$$

Además, un alto exceso de aire disminuye la cantidad de CO<sub>2</sub> presente en los gases de la combustión, como se observa en la figura 15 (ver anexo) que ante un exceso de aire de 102.4498 %, la presencia de CO<sub>2</sub> en los gases correspondería a un 7.5 %, nuevamente se afirma que la solución B es matemáticamente factible pero no lo es químicamente.

### 3.2.5 Balance térmico de la caldera

El balance térmico comprende la distribución del calor resultante de la combustión del combustible en la caldera, donde la distribución es de la siguiente manera:

$$Q = 7744314.0029 \frac{\text{kJ}}{\text{kg mol}_{\text{comb}}}$$

$$E_{\text{CO}_2} := d \cdot (h_{\text{gco}_2} - h_{\text{cco}_2}) = 11.8787 \cdot (21953 - 9006.6) = 1.538 \cdot 10^5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg mol}_{\text{comb}}}$$

$$E_{\text{CO}} := m \cdot (h_{\text{gco}} - h_{\text{cco}}) = 4.1213 \cdot (17405 - 8379.9) = 3.72 \cdot 10^4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg mol}_{\text{comb}}}$$

$$E_{\text{O}_2} := e \cdot (h_{\text{go}_2} - h_{\text{co}_2}) = 3.3527 \cdot 10^{-15} \cdot (17709 - 8390.6) = 3.124 \cdot 10^{-11} \frac{\text{kJ}}{\text{kg mol}_{\text{comb}}}$$

$$E_{\text{N}_2} := a \cdot 3.76 \cdot (h_{\text{gn}_2} - h_{\text{cn}_2}) = 84.3719 \cdot (17359 - 8379.1) = 7.577 \cdot 10^5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg mol}_{\text{comb}}}$$

$$E_{\text{H}_2\text{O}} := l \cdot (h_{\text{gh}_2\text{o}} - h_{\text{ch}_2\text{o}}) = 17 \cdot (20158 - 9569.1) = 1.8 \cdot 10^5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg mol}_{\text{comb}}}$$

$$E_{\text{perdida}} := \text{PCS} + d \cdot (-393790) + m \cdot (-110600) + l \cdot (-242000) - (-374573.0202)$$

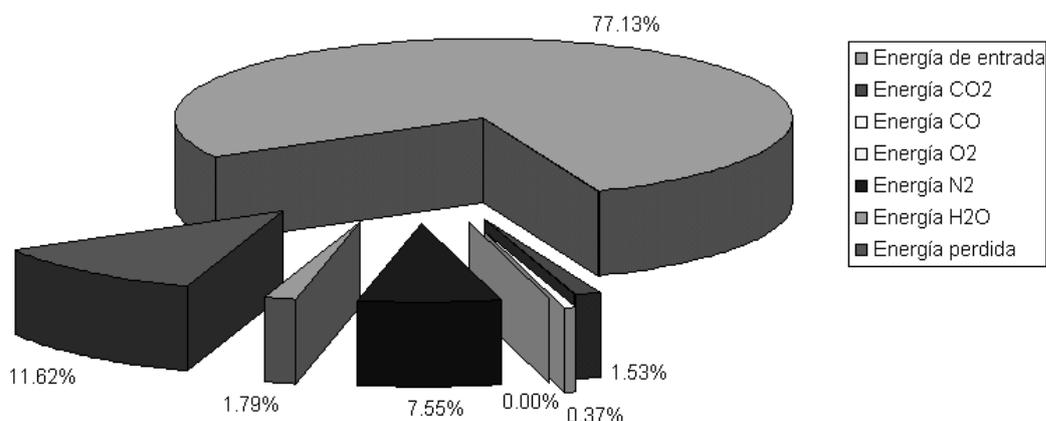
$$10040066.9798 + 11.8787 \cdot (-393790) + 4.1213 \cdot (-110600) + 17 \cdot (-242000)$$

$$-(-374573.0202) = 1.167 \cdot 10^6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg mol}_{\text{comb}}}$$

**Tabla IV. Balance térmico**

Energía de entrada	7744314.003	0.77134087	77.13%	77.13%
Energía CO <sub>2</sub>	1.54E+05	0.01531862	1.53%	11.24%
Energía CO	3.72E+04	0.00370515	0.37%	
Energía O <sub>2</sub>	3.12E-11	3.1115E-18	0.00%	
Energía N <sub>2</sub>	7.58E+05	0.07546762	7.55%	
Energía H <sub>2</sub> O	1.80E+05	0.01792817	1.79%	
Energía perdida	1.17E+06	0.11623428	11.62%	11.62%
			100%	

**Figura 11. Balance térmico**



Como se observa en la tabla IV y figura 11, la mayor parte de la energía generada por la combustión del combustible es absorbida por el agua de la caldera, mientras que el 11.24 % de la energía es distribuida entre los distintos gases de escape, que manifiestan esta energía por la temperatura en la que se presentan, el 11.62 % de la energía es perdida por la presencia del CO en la combustión que es originada por el faltante de aire.

### **3.3 Mejoramiento de la eficiencia de la caldera**

De acuerdo a los resultados obtenidos se procederá a la interpretación de estos.

#### **3.3.1 Interpretación del análisis térmico**

Para la interpretación del análisis térmico se enfocarán tres puntos que se explicarán posteriormente, ya que los mismos desempeñan un papel importante en la determinación del análisis térmico.

### **3.3.1.1 Análisis Orsat**

Usualmente el análisis del gas de combustión se usa para indicar la relación entre el aire de combustión y el grado de perfección de la combustión. Los porcentajes CO y CO<sub>2</sub> pueden ser utilizados como indicadores de la combustión, el porcentaje de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> son indicadores de la cantidad de aire de combustión en exceso, con una mezcla óptima, se obtiene un valor máximo de CO<sub>2</sub> y no muestra CO y O<sub>2</sub>.

Los datos obtenidos para los distintos gases reflejan que no es está aprovechando al máximo la cantidad de combustible suministrado, porque en los gases de escape está contenido CO, que es combustible sin reaccionar, el O<sub>2</sub> es aproximadamente cero causa por la cual está apareciendo CO en los gases de escape.

### **3.3.1.2 Temperatura de los gases de escape**

Una elevada temperatura en la chimenea indica que el valor está siendo desperdiciado a la atmósfera, la temperatura debe estar tan baja como sea posible pero sin causar corrosión de extremo frío, que es causada generalmente por la formación de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), que es originado por la presencia de azufre en el combustible que al reaccionar y mezclarse con el oxígeno y vapor de agua forma el ácido sulfúrico.

La presencia de temperaturas altas podrían estar generadas por algunas de las siguientes condiciones:

- Exceso de tiro
- Superficies de calefacción sucias

- Diseño pobre de las superficies de intercambio de calor

La lectura de la temperatura en la chimenea fue de 320 °C, no puede ser tomada como alta ni baja, para lograr clasificarla se debe de tener una temperatura de referencia la cual puede ser obtenida al momento de realizar un mantenimiento a la caldera y tomar la lectura de la temperatura de los gases. Con esto se conocerá la mejor temperatura a la que los gases deberían salir, si la temperatura no disminuye, esto puede ser producido por la primera o tercera de las condiciones antes mencionadas. Es recomendable que la temperatura en los gases sea tomada como un indicador para efectuar un mantenimiento preventivo, ya que mantener en condiciones de trabajo esta temperatura puede incrementar los costos de operación de la caldera.

### 3.3.1.3 Eficiencia de la caldera

Como se mencionó en apartados anteriores la eficiencia está definida como

$$\eta_t := \frac{[m_s \cdot (h - h_f)]}{m_f \cdot PCS}$$

donde

$\eta_t$  = rendimiento del generador de vapor.

$m_s$  = gasto masico de agua, kg/H

$m_f$  = peso total de combustible quemado por hora, en kg.

PCS = potencia calorífica superior del combustible quemado , en kJ/kg.

$$\eta_t := \frac{40.2 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \cdot \left( 2739.05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 419.1458 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)}{2.7264 \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \cdot 44346.5856 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} \cdot 100 = 77.13 \%$$

Si se observa la figura 16 (ver anexo), se encuentra que para una temperatura neta de  $320^{\circ}\text{C} - 15^{\circ}\text{C} = 305^{\circ}\text{C}$  y con  $\text{CO}_2 = 11.8787\%$ , la eficiencia de combustión tabulada está entre el rango de 75 a 80 %, comparando con la eficiencia calculada se ve que está entre dicho rango.

### **Nota**

Dado que todo modelo trata de representar parte de la realidad, los porcentajes de los distintos gases pueden ser tomados como indicativos para realizar el mantenimiento, pero debe de tenerse en cuenta que no pueden ser exactamente iguales a los tomados con un analizador de gases Orsat, primero porque toda medición no es exacta.

Segundo por la exactitud matemática, aunque la mayoría de las operaciones antes realizadas fueron hechas en un software matemático y tercero por las suposiciones que aquí se impusieron y por las que están impuestas en los conceptos teóricos. Las ecuaciones antes mencionadas están estructuradas para una temperatura de entrada de aire y combustible iguales de caso contrario se deben de agregar la sumatoria de los reactivos en la ecuación.



## 4 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS TÉRMICO DE LA CALDERA

Conociendo ya el panorama para el desarrollo del cálculo de la eficiencia del balance térmico se procederá a establecer los algoritmos, datos y la condición del equipo para llevar a cabo los cálculos antes realizados.

### 4.1 Condiciones del equipo

Las condiciones que debe cumplir el equipo para realizar la prueba de eficiencia son las siguientes:

- a) La caldera a probar no debe estar afectada por otros equipos.
- b) Durante la prueba no se deben de realizar purgas.
- c) Durante la prueba no se debe de realizar soplado de hollín.
- d) No debe de haber fugas de gases de combustión ni infiltraciones de aire.
- f) La temperatura del agua a la entrada de la caldera deberá permanecer constante, con una variación de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Calderas de vapor

- a) La caldera debe probarse a su máxima capacidad, variación máxima de  $\pm 15\%$ .
- b) La presión de prueba de la caldera debe ser la presión normal de operación y permanecer constante (variación máxima de  $\pm 7\%$ ).

## **4.2 Registro de datos**

### Variables a medir

- Combustible: flujo, presión, temperatura y densidad.
- Calderas de vapor: presión del vapor generado, flujo y temperatura de agua de alimentación y gases de escape.

### Información complementaria

- Combustible líquido: PCI y densidad.

### Instrumentos y equipo para medición

Los instrumentos y equipos para la medición de los parámetros indicados anteriormente son

- Indicador de presión del vapor generado, manómetro de la caldera.
- Medidor de flujo para el combustible.
- Medidor de flujo del agua de alimentación.
- Termómetro para medir la temperatura del combustible y ambiente.
- Termómetros para medir la temperatura de los gases de escape de la caldera.

## **4.3 Análisis de potencia**

A continuación se detallan los pasos que debe seguir el operador o encargado de los cálculos del análisis de potencia.

#### 4.3.1 Algoritmo del análisis de potencia

- Tener la presión nominal ( $P_n$ ) y la de entrada de agua ( $P_a$ ) en kPa (ver tabla I).
- Interpolar de la tabla X la entalpía  $h_g$  y entropía  $s_g$  para vapor a  $P_n$  (punto 3).
- Interpolar de la misma tabla la entropía  $s_f$ ,  $s_{fg}$ ,  $s_g$  a  $P_a$ . (punto 4)
- Comprobar que la entropía a  $P_n$  está entre las entropías  $s_f$   $s_g$  calculadas en el paso anterior.
- Si el paso anterior fue verdadero, calcular la calidad del vapor con la siguiente ecuación  $s_3 = s_4 = [s_g - (1 - x)_4 s_{fg}]$  a  $P_a$ .
- Con la calidad del vapor ya determinada, calcular la entalpía 4 con la siguiente ecuación a  $P_a$   $h_4 = [h_g - (1 - x)_4 h_{fg}]$ .
- Calcular el trabajo proporcionado.
- Interpolar la entalpía  $h_f$  a  $P_a$  (punto 5).
- Calcular calor de salida.
- Calcular el trabajo efectuado por la bomba de agua.
- Calcular la entalpía en el punto 1.
- Calcular el calor de entrada.
- Calcular la eficiencia del ciclo termodinámico.

#### 4.4 Análisis térmico

A continuación se detallan los pasos que debe seguir el operador o encargado de los cálculos del análisis térmico.

#### 4.4.1 Algoritmo del análisis térmico

- Calcular el combustible y agua consumidos en kg/hr (ver 3.2.1).
- Calcular la energía absorbida por el sistema en  $\text{kJ/kg}_{\text{mol\_comb}}$

$$Q := \frac{(GM_{\text{agua}} \cdot q_{\text{ent}})}{GM_{\text{comb}} \cdot \text{Peso}_{\text{comb}}}$$

- Iterpolar de la tabla VI a temperatura de los gases de escape y temperatura del combustible, las entalpías para los distintos gases.
- Iterpolar de la tabla VII para encontrar la constante de equilibrio a temperatura de los gases de escape.
- Simplificar las ecuaciones 5 y 6, y resolver las 2 ecuaciones que contienen 2 incógnitas cada una.
- Una vez calculadas d y a utilizar las ecuaciones del balance de masa para encontrar m, e, l, y nitrógeno.
- Establecer la ecuación estequiométrica.
- Calcular la relación aire-combustible.
- Calcular la eficiencia de la caldera.
- Calcular la energía en los gases de escape para los distintos gases (ver 3.2.5).
- Calcular la energía perdida debido a la presencia de CO.
- Calcular la distribución de la energía en porcentaje.
- Hacer una gráfica tipo pie para visualizar la distribución de la energía.

#### 4.5 Mantenimiento

Para mantener la caldera en condiciones óptimas de trabajo se deben de considerar los siguientes puntos que a continuación se detallarán.

#### **4.5.1 Controles diarios**

Día a día los programas de operación y mantenimiento, tienen gran efecto sobre el nivel de eficiencia. Algunas sugerencias son

- Mantener el exceso de aire propuesto, así como la adecuada temperatura de salida, para una máxima eficiencia y buen rendimiento térmico de la unidad.
- Registrar el porcentaje de O<sub>2</sub> o exceso de aire equivalente y la temperatura de salida, al menos una vez por turno, anotando la carga de la unidad y el combustible quemado.
- Ante la formación de ceniza y hollín por los combustibles, mantener limpias las superficies soplando el hollín al menos una vez por turno (superficial).
- Establecer un programa de limpieza más frecuente cuando disminuya el rendimiento.
- Examinar quincenalmente de preferencia o mensualmente la operación de la compuerta del ventilador, hacer los ajustes necesarios para obtener el nivel de aire deseado, teniendo como referencia la cantidad de aire en exceso.
- Comprobación del control de llama en marcha continua
- Comprobación del control de llama durante el encendido.<sup>4</sup>

#### **4.5.2 Supervisión periódica**

Fundamentalmente debe de consistir en mantener en óptimas condiciones todo instrumento sin afectar el funcionamiento normal del equipo.

#### **4.5.2.1 Cuerpo de presión**

Zona de agua y vapor: periódicamente y como mínimo cada 6 meses, se procederá a destapar el registro de hombre situado en la parte superior del tambor de agua y vapor del generador.

A través de este registro se comprobará el estado de limpieza corrosiones, incrustaciones, etc., de las superficies de calefacción, actuando en consecuencia.

Circuito de humos: periódicamente y como mínimo una vez cada 3 meses, se procederá a la limpieza del hollín de los tubos del generador, mediante cepillo, aire comprimido, etc., retirando para ello las tapas que la caldera incorpora a tal fin.

#### **4.5.2.2 Caja de humos**

Al mismo tiempo que se efectúa la operación descrita en el circuito de humos, se procederá a la limpieza de las partes internas de la caja de humos, así como repasar los tornillos de sujeción, etc., para conseguir una perfecta estanqueidad en su posterior montaje.

#### **4.5.2.3 Equipo de regulación, control y seguridad**

Equipo de regulación: periódicamente y como mínimo cada 6 meses, se procederá a la revisión y limpieza de los equipos de regulación de combustión, nivel, etc., así como a su posterior puesta a punto.

A tal fin, se seguirán las instrucciones específicas que faciliten las firmas fabricantes de los citados equipos y que serán incluidas en la información general de entretenimiento y servicio que se entrega al futuro usuario del generador.

Equipo de control: se comprobará periódicamente y como mínimo cada 3 meses la correcta señalización del manómetro general del generador, sustituyéndose en caso de existir diferencias sensibles en la lectura de los mismos respecto a los utilizados para comprobación. Los indicadores de nivel se purgarán, como mínimo, una vez al día.

Equipo de seguridad

a) Seguridad por exceso de presión de vapor

Por lo menos una vez por semana se harán saltar las válvulas de seguridad para evitar posibles agarrotamientos de las mismas.

Al mismo tiempo se comprobará el correcto funcionamiento de los presostatos de regulación, si es posible, diariamente.

b) Seguridad por fallo de corriente eléctrica

Se revisará diariamente, desconectando el interruptor general del armario de control, simulando de esta forma un fallo de corriente y volviéndolo a conectar, comprobándose entonces que el relé de fallo de corriente bloquea el equipo de combustión, no permitiéndolo encender mientras no se actúe sobre el pulsador de desbloqueo.

#### **4.5.2.4 Equipos auxiliares**

Quemador: periódicamente se comprobará el estado del filtro de combustible, procediéndose a su limpieza en caso necesario.

Siempre que sea posible y como mínimo una vez al día, se realizará una inspección visual del encendido del quemador y forma de la llama, ajustando los controles de aire o combustible si se da el caso de mal funcionamiento.

Siempre que se observe un contenido de hollín en los humos, se deberá corregir la regulación de la mezcla aire/combustible para subsanar esta anomalía. A este respecto se aconseja efectuar un análisis de humos, consistente en la comprobación del CO<sub>2</sub>, opacidad y temperatura de los humos, con el objetivo de asegurarse por completo que el quemador está trabajando correctamente.

Bomba de alimentación: se comprobará diariamente el estado de las prensas y juntas del cuerpo de bomba, realizándose la reposición de las mismas en el caso de que éstos presenten fugas.

Periódicamente se comprobará el funcionamiento general de la bomba, ausencia de ruidos así como de caudal. En el caso que se compruebe una merma importante en el caudal o presión de impulsión, se deberá proceder a una profunda revisión y realizar el cambio de rodets si fuera preciso.

Grifería: periódicamente y como mínimo una vez por semana, se efectuará una inspección general, y reponiendo estos elementos en caso preciso.



### **5.1.2 Interpretación de la plantilla**

La plantilla (figura 12) está constituida por 6 columnas principales, 2 de las cuales están subdivididas por 2 columnas cada una, la primera columna indica el número de medición, la segunda la fecha en la cual se realizará ésta, la tercera indica la presión de trabajo de la caldera, la cuarta (primera subcolumna) indica la temperatura a la cual se está introduciendo el agua, (la segunda subcolumna) detallará el volumen de agua entre las mediciones.

La quinta (primera subcolumna) indica la temperatura a la cual se está introduciendo el combustible, (la segunda subcolumna) detallará el volumen de combustible entre las mediciones, la sexta, tiene gran importancia ya que sólo con observar como varían los datos, puede decirse y la eficiencia de la caldera está disminuyendo o se mantiene constante.

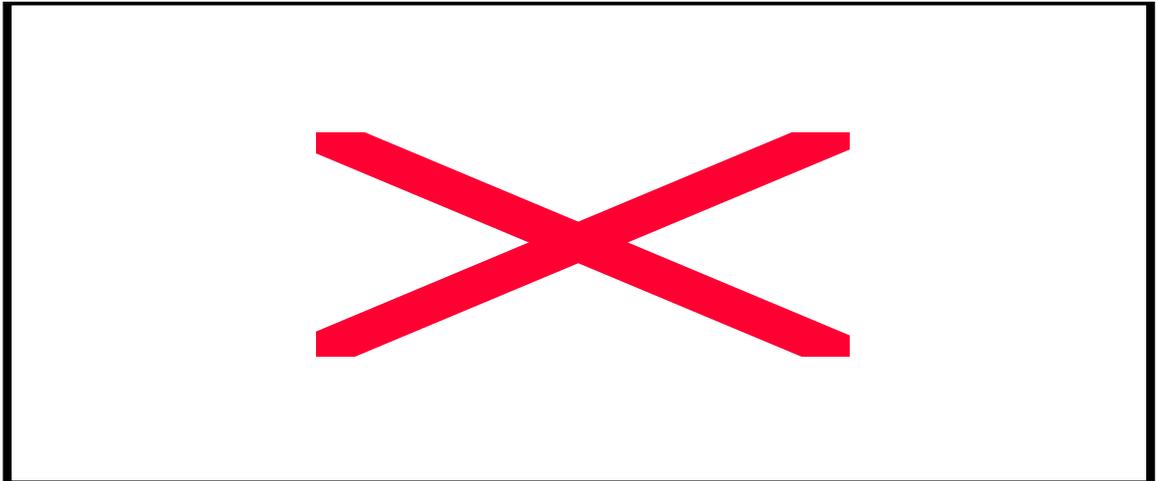
## **5.2 Análisis de potencia**

Es necesario tener una plantilla que permita llevar a cabo la secuencia de los cálculos a realizar.

### **5.2.1 Plantilla de análisis de potencia**

A continuación se muestra la plantilla de análisis de potencia en donde se indican las distintas variables a determinar.

**Figura 13. Plantilla del análisis de potencia**



### **5.2.2 Interpretación de la plantilla**

Esta plantilla (figura 13) está estructurada de tal forma que le sea fácil al encargado de la caldera llevar la secuencia de los pasos a seguir para el cálculo de la eficiencia del ciclo, a esto se le adjuntó las fórmulas más importantes para el cálculo.

En la plantilla se encuentran las distintas entalpías, entropías y calidad de vapor, también se muestra el diagrama del ciclo para que el encargado pueda visualizar qué punto del ciclo corresponde a cada operación y así mismo pueda asociar la presión que corresponde a cada operación.

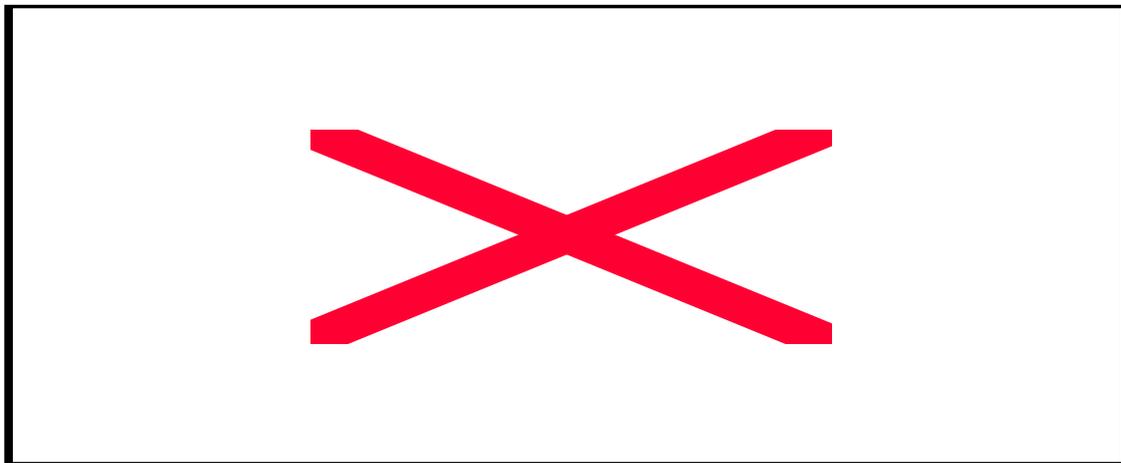
### **5.3 Análisis térmico**

Es necesario tener una plantilla que permita llevar a cabo la secuencia de los cálculos a realizar.

### 5.3.1 Plantilla del análisis térmico

A continuación se muestra la plantilla de análisis térmico en donde se indican las distintas variables a determinar.

**Figura 14. Plantilla del análisis térmico**



### 5.3.2 Interpretación de la plantilla

Con las mediciones de temperatura, volumen de combustible y agua (ver figura 14), dado que se conocen las densidades para el agua y combustible, se calcula el gasto másico de agua y combustible. Una vez calculados estos datos en la siguiente columna se calcula la cantidad de calor que es absorbido por el sistema, donde debe de estar en  $\text{kJ/Kg}_{\text{mol}_{\text{comb}}}$ , se deberán calcular por separado, evitando saturar la tabla.

Los principales indicadores  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  se encuentran realizando las interpolaciones correspondientes para todos los gases involucrados a una temperatura dada (en dimensionales K), luego resolviendo las ecuaciones 5 y 6 se obtienen los principales indicadores de la combustión.