



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA**





# UNS

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA  
CENTRAL DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

N° de Ingreso: 027241

Fecha de Ingreso: \_\_\_\_\_

Firma \_\_\_\_\_

## FACULTAD DE INGENIERÍA

### ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA

**AHORRO DE ENERGÍA MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DE LA  
COMBUSTIÓN Y MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA CALDERA DE LECHO  
FLUIDIZADO CIRCULANTE DE LA EMPRESA TRUPAL S.A.**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO EN ENERGÍA**

**AUTOR:**

**FLORES FLORES, ISMAEL JACOBO**

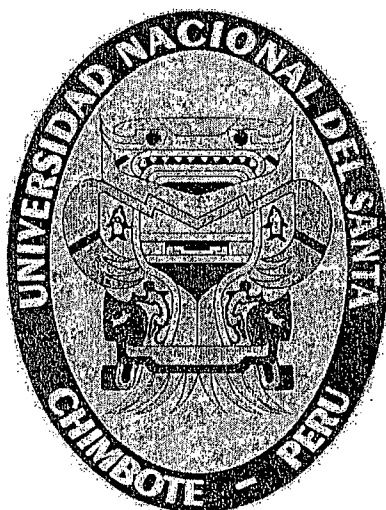
**ASESOR**

**GUEVARA CHINCHAYAN, ROBERT :**

**NUEVO CHIMBOTE - PERÚ**

**2014**

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA ACADÉMICA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN ENERGÍA



INFORME DE TRABAJO DE INGENIERÍA

**"AHORRO DE ENERGÍA MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DE LA COMBUSTIÓN Y MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA CALDERA DE LECHO FLUIDIZADO CIRCULANTE DE LA EMPRESA TRUPAL S.A"**

PARA OBTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO EN ENERGÍA

ASESOR : GUEVARA CHINCHAYAN, ROBERT

AUTOR : FLORES FLORES, ISMAEL JACOBO

NUEVO CHIMBOTE - PERU  
2014

## **DEDICATORIA**

*DIOS te dedico este trabajo, gracias por permitirme llegar hasta esta etapa en mi vida y carrera profesional, por estar siempre presente en todos los triunfos y derrotas en vida. Padre todo poderoso, que siempre me proteges, cuidas e iluminas, gracias.*

*A mis padres, Jacobo Flores Huamancondor y Rosario Flores Mallque por su infinito apoyo a lo largo de mi vida y por los consejos y valores en mí inculcados.*

*A mi familia, mis hermanos, Luzmila, Beatriz, Victoria, Daniel y Ana, que siempre con su ejemplo, consejos y cariño impulsaron en mí el deseo de superación.*

*A mis amigos por el aliento y la confianza que siempre depositan en mí.*



# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

## FACULTAD DE INGENIERIA

### ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA EN ENERGÍA

## CONFORMIDAD DEL ASESOR

La presente Tesis ha sido revisada y desarrollada en cumplimiento del Objetivo Propuesto y reúne las condiciones finales metodológicas, estando enmarcado dentro de las áreas y líneas de investigación conforme al Reglamento General para obtener el Grado Académico de Bachiller y el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa, Titulado:

**“OPTIMIZACIÓN DE CONTROL DE LA COMBUSTIÓN Y MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA CALDERA DE LECHO FLUIDIZADO CIRCULANTE DE LA EMPRESA TRUPAL S.A.”**

## **TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN ENERGIA**

**AUTOR: Bach. ISMAEL JACOBO FLORES FLORES**

---

Mg. Robert Guevara Chinchayán

ASESOR



# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

## FACULTAD DE INGENIERIA

### ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA EN ENERGÍA

## CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR

Damos conformidad del presente informe, desarrollado en cumplimiento del objetivo propuesto y conforme al Reglamento General para obtener el Grado Académico de Bachiller y el Título Profesional en la Universidad Nacional del Santa, Titulado:

**“OPTIMIZACIÓN DE CONTROL DE LA COMBUSTIÓN Y MEJORA DE LA EFICIENCIA EN LA CALDERA DE LECHO FLUIDIZADO CIRCULANTE DE LA EMPRESA TRUPAL S.A.”**

## **TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO EN ENERGIA**

**AUTOR: Bach. ISMAEL JACOBO FLORES FLORES**

Mg. Amancio Rojas Flores

PRESIDENTE

Mg. Robert Guevara Chinchayán

INTEGRANTE

Ing. Neil Velásquez Díaz

INTEGRANTE

## **AGRADECIMIENTO**

*Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que con su apoyo, han colaborado con la realización de este trabajo de titulación.*

*Especialmente a Don Robert Guevara Chinchayan, docente de la Facultad de Ingeniería en Energía, quien amablemente acepto ser mi tutor durante este largo tiempo, además por su valiosa colaboración, ideas, consejos y disponibilidad hacia mi persona para poder hacer posible el desarrollo y término de este proceso.*

*A mis colegas compañeros de trabajo y colaboradores de la empresa TRUPAL S.A., deseo expresar mis más sinceros agradecimientos por el apoyo brindado en el desarrollo de esta investigación.*

*Al cuerpo docente de la Universidad Nacional del Santa, especialmente a los profesores del Departamento de Ingeniería en Energía, por los conocimientos entregados durante mi formación profesional y personal.*

*A mi madre, Rosario Flores Mallque que en todo momento de mi vida me apoya de forma incondicional y es la que me encarrila siempre hacia el camino correcto.*

## ÍNDICE

RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	9
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>11</b>
1.1 PROBLEMÁTICA.....	12
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	16
1.2.1. Justificación Económica:.....	16
1.2.2. Justificación Social:.....	16
1.2.3. Justificación Científica:.....	16
1.3. HIPOTESIS .....	16
1.4. OBJETIVOS:.....	17
1.4.1. Objetivo General:.....	17
1.4.2. Objetivos Específicos:.....	17
1.5. DESCRIPCION DE LA EMPRESA TRUPAL S.A. ....	17
1.5.1 Actividades y Productos .....	18
1.5.2 Visión, Misión y Valores .....	18
1.5.3 Ubicación Geográfica (Colindancias) .....	19
<b>CAPÍTULO II: GENERALIDADES.....</b>	<b>21</b>
2.1. VISIÓN GENERAL DE LA CALDERA CFB.....	21
2.2. CICLO DE AGUA Y VAPOR.....	23
2.2.1. Economizador: .....	23
2.2.2. Domo de vapor y circuito de tubos de agua.....	24
2.2.3. Sobrecalentadores y Atemperación.....	25
2.3. AIRE PRIMARIO Y FORZADO.....	26
2.4. SALIDA DE GASES Y EXTRACCION DE ESCORIA.....	28
2.4.1. Vía de flujo de salida de gas.....	29
2.4.2. Ciclón y válvula-J.....	29
2.4.3. Enfriadores de escoria.....	30
2.5. ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE.....	31
2.6 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE LA CALDERA.....	32
2.6.1 Combustión del hogar.....	32



<b>CAPÍTULO III: MARCO TEORICO .....</b>	<b>35</b>
3.1. LECHOS FLUIDIZADOS .....	35
3.1.1. Introducción.....	35
3.1.2. Eficiencia de la combustión del carbono.....	39
3.1.3. Eliminación de SO <sub>2</sub> .....	42
3.1.4. Transferencia de calor. ....	44
3.1.5. Emisiones de óxido de nitrógeno .....	45
3.2. PROCESO DE COMBUSTIÓN.....	47
3.2.1. Introducción.....	47
3.2.2. Balances de materia en combustión completa.....	48
3.2.3. Aire estequiométrico.....	49
3.2.4. Exceso de aire .....	49
3.2.3. Reacciones químicas de combustión .....	50
3.2.4. Características de los combustibles .....	52
3.2.5. Análisis de combustibles .....	53
3.2.6. Poder calorífico .....	55
3.2.7. Balance de combustión de un combustible sólido .....	56
3.2.8. Energía disponible en los gases de combustión .....	59
3.2.9. Función de Gibbs .....	63
3.3. CONCEPTOS DE LA METODOLOGÍA .....	68
3.3.1. Metodología Lean Six Sigma.....	68
3.3.2. Ciclo Shewhard Demig.....	68
3.3.3. Desarrollo de la metodología Six Sigma.....	68
3.3.4. Programa computacional EES .....	76
<b>CAPÍTULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>79</b>
4.1. MATERIALES Y HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS. ....	79
4.1.1. Sustancias.....	79
4.1.2. Instrumentos.....	79
4.1.3. Software .....	80
4.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	80
4.2.1. Definición del Problema.....	80

4.2.2. Descripción del proceso .....	81
4.2.3. Análisis del Proceso mediante Diagnóstico Energético.....	83
<b>CAPÍTULO 5: RESULTADOS .....</b>	<b>102</b>
5.1. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES SIGNIFICATIVAS.....	102
5.2. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES SIGNIFICATIVAS EN LA EFICIENCIA DE LA CALDERA.....	102
5.2.1. Formación de gases de combustión en función de la temperatura del lecho.....	103
5.2.2. Influencia del % de inquemados en la Energía generada y eficiencia del sistema. ....	104
5.2.3. Influencia de la t° del lecho en la Energía generada y eficiencia del sistema. ....	106
5.2.4. Influencia de la t° de los gases de escape en la Energía generada y eficiencia del sistema.....	108
5.2.5. Influencia del % exceso de aire en la Energía generada y eficiencia del sistema. ....	110
5.3. DETERMINACIÓN DE VARIABLES ÓPTIMAS.....	112
5.3.1. Maximización de la Eficiencia de la combustión y de la caldera .....	112
5.4 ESTIMACIÓN DEL AHORRO ECONÓMICO .....	112
<b>CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN.....</b>	<b>115</b>
<b>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES .....</b>	<b>116</b>
<b>CAPÍTULO 8: RECOMENDACIONES .....</b>	<b>118</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>119</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>120</b>
Grafico A.1: Diagrama T vs S del ciclo de vapor. ....	124
Anexo B: Descripción técnica de los equipos principales.....	125
Anexo C: Programa de combustión desarrollado en EES .....	139
Anexo D: Informes diarios de operación de la caldera de lecho fluidizado circulante.....	151
Anexo E: Tabla de entalpía de formación, función de Gibbs y entropía absoluta.....	164
Anexo F: Planos generales de la Caldera CFB TRUPAL SA .....	166

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación trata sobre el estudio y análisis del proceso de combustión de la caldera de Lecho Fluidizado Circulante (CFB) en la empresa TRUPAL S.A. y tiene como objetivo principal determinar la influencia de los diferentes parámetros que intervienen en el proceso de combustión en una caldera de lecho fluidizado circulante, para obtener y tabular información referente al tema, y así desarrollar con mayor eficiencia el proceso de generación de vapor que se traducirá como un ahorro económico importante.

La primera parte del trabajo describe las generalidades de la empresa y de la caldera CFB, conceptos básicos utilizados en la producción del vapor y descripción de todos los equipos que afectan la eficiencia de operación de una caldera.

En el desarrollo de la investigación se evaluó el proceso de combustión de la caldera de lecho fluidizado circulante y su entorno, haciendo uso de herramientas estadísticas y computacionales como el programa EES (Engineering Equation Solver) que nos permitió analizar la situación actual del proceso, cuantificar la cantidad de pérdidas centrándonos en dos factores más importantes como son: la temperatura del lecho y el carbón no quemado que se deposita en las cenizas, con lo cual se logró parametrizar las variables de operación.

Como resultados se logró determinar los valores óptimos de las

variables críticas del proceso de combustión cercanos a los de diseño pero adecuado a nuestra realidad y las cantidades de gases producidos en función de la temperatura del lecho, la cantidad de carbono no quemado depositado en las cenizas y la relación que existe entre las variables de operación más importantes y el rendimiento de la caldera.

La parte final del proyecto presenta la determinación de los valores óptimos de variables dentro del proceso para maximizar el rendimiento de la caldera logrando una mejora de la eficiencia de 73.96% hasta 84.36% consiguiendo así un ahorro estimado en \$ 1'155,168.00 al año solo por consumir menos combustible, se plantea también una serie de recomendaciones y propuestas de mejora para lograr la estandarización y optimización en la operación y así el sostenimiento del trabajo realizado abarcando procesos, instalaciones y equipos.

## ABSTRACT

The present research work deals with the study and analysis of the combustion process of the boiler Circulating Fluidized Bed (CFB ) in the company Trupal SA and has as main objective to determine the influence of the different parameters involved in the combustion process in a circulating fluidized bed boiler to obtain and tabular information about the topic , and develop a more efficient process steam generation translate as significant cost savings .

The first part of the paper describes an overview of the company and the CFB boiler, basic concepts used in the production of steam and description of all equipment affecting operation efficiency of a boiler .

In the course of the investigation the combustion process of circulating fluidized bed boiler and its environment was evaluated using statistics and computational tools as EES (Engineering Equation Solver ) program that allowed us to analyze the current situation of the process, quantify the amount of lost focus on two major factors such as : the bed temperature and unburned carbon in the ash is deposited , which was achieved parameterized operating variables .

As a result it was possible to determine the optimum values of critical variables in the combustion process near the design but adapted to our situation and the amount of gases produced as a function of the bed temperature , the amount of unburnt carbon deposited ashes and the

relationship between the variables of major operation and performance of the boiler.

The final part of the project is to determine the optimal values of variables within the process to maximize boiler efficiency achieving improved efficiency of 73.96 % to 84.36 % thus achieving an estimated \$ 1'155 , 168.00 savings per year just for consume less fuel, a number of recommendations and suggestions for improvement to achieve standardization and optimization in operation and so the support of the work done covering processes, facilities and equipment also arises .

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

En la actualidad en nuestro país, son varias las empresas agroindustriales que además de producir azúcar, papel u otro producto, se están dedicando a la generación de energía eléctrica, utilizando como combustible el bagazo de la caña, carbón, gas u otro combustible. Por esto es importante conocer el funcionamiento de una caldera, la cual genera el vapor necesario para hacer funcionar los turbogeneradores y demás equipos. Es de hacer notar, que en las calderas que trabajan en plantas de cogeneración, la producción de vapor no se mantiene constante. Por esta razón, se citará una generalización de lo que son calderas, sus accesorios y equipos auxiliares. Se mencionan también los medios y operaciones que determinan la eficiencia de una caldera, si éstas trabajan eficientemente, se obtendrá una buena producción de vapor y un consumo normal del combustible.

Dado la escala del consumo de combustible en una caldera de lecho fluidizado circulante es necesario obtener información que permita disminuir toda pérdida por concepto de carbono no quemado, que deriva en la acumulación de dicho combustible en las cenizas, por lo cual se debe investigar y tabular las variables más importantes con el objeto de disminuir dicha pérdida y por ende mejorar el rendimiento de la caldera y de la planta.

El ámbito del estudio, contempla analizar el proceso de combustión, calculando de forma teórica el rendimiento de la caldera, y comparando estos resultados con los estándares actuales de funcionamiento del equipo.

## 1.1 PROBLEMÁTICA

TRUPAL S.A. cuenta dentro de sus instalaciones con una caldera de lecho Fluidizado Circulante con una capacidad de 130 ton/h de vapor instalada con tecnología china la cual se adquirió en el año 2009 con la finalidad de innovar sus procesos de generación de vapor y energía con un menor costo de producción ya que las calderas anteriores a esta consumían petróleo bunker lo cual no resultaba rentable para la empresa.

La caldera entro en operación en noviembre del 2010 con personal capacitado de China y de Perú, desde que iniciaron las operaciones se trabaja con parámetros determinados para el proceso de combustión por un estudio elaborado por el fabricante y ejecutor de dicho proyecto.

Los parámetros de operación son: t° hogar(escoria), P.hogar, flujo de aire 1°, flujo de aire 2°, flujo de aire 3°, %exceso de aire, flujo de carbón, flujo de medula de bagazo, calidad de carbón, calidad de medula.

Hasta la fecha no se logra mantener una estabilidad en el proceso de combustión ya que los valores establecidos de las variables de operación no se adecuan a la realidad del proceso, es por ello que actualmente la caldera trabaja con mucha variabilidad en su proceso de combustión provocando así problemas graves como: rotura de toberas de fluidez, fundiciones de escoria, desprendimiento de refractario, choques térmicos bruscos en la tuberías que provocan fisuras y fuga de agua, todos estos problemas conllevan a una parada forzosa de la caldera y de la planta de producción en general significando pérdidas económicas importantes para la empresa que merman su rentabilidad y elevan sus costos de mantenimiento y producción.

La complejidad en la operación del proceso de combustión en la caldera y el desconocimiento de sus variables de operación óptimos ha traído las consecuencias adversas siguientes:



1.- Incapacidad de mantener la estabilidad de la caldera debido a la variabilidad del proceso y al desconocimiento de los parámetros óptimos de operación.

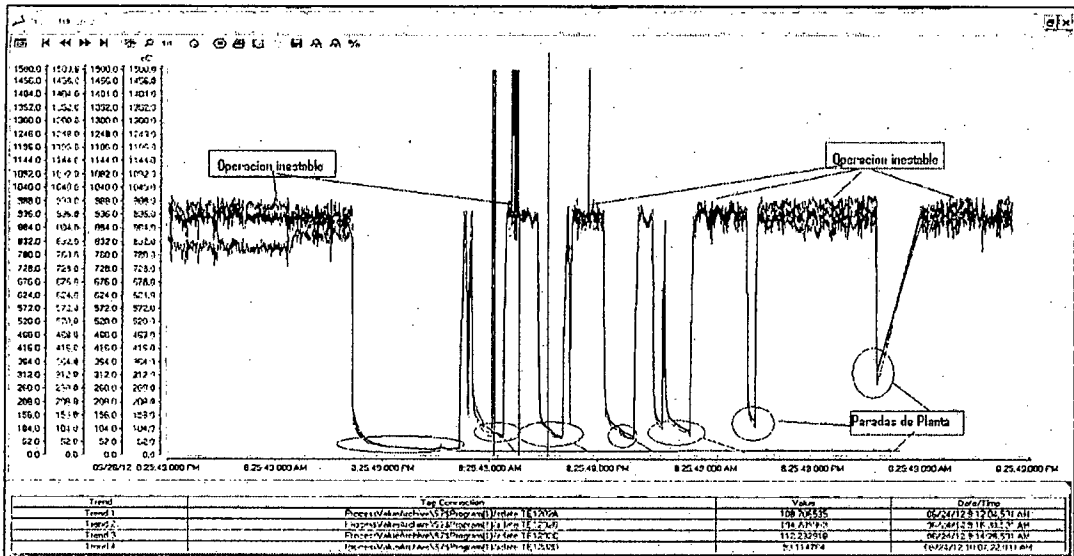


Fig. N°1.1: Temperaturas del hogar en la caldera.

2.- Incremento de costos de producción de papel debido a fallas en la caldera por la inestabilidad de la combustión que ocasionaban paradas continuas no programadas y elevados costos de mantenimiento correctivo.

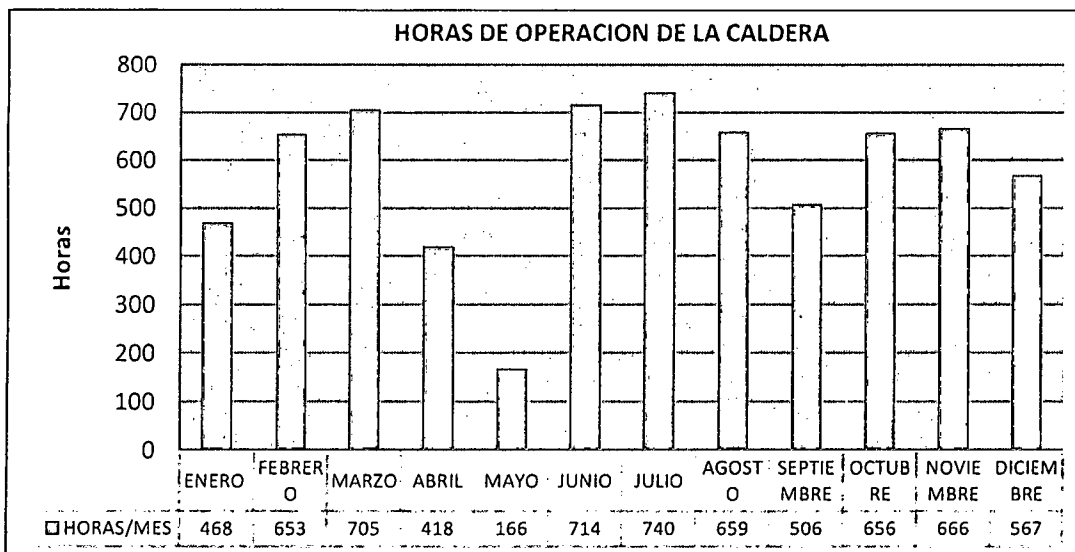


Fig. N°1.2: Horas de operación efectiva de la empresa TRUPAL SA.

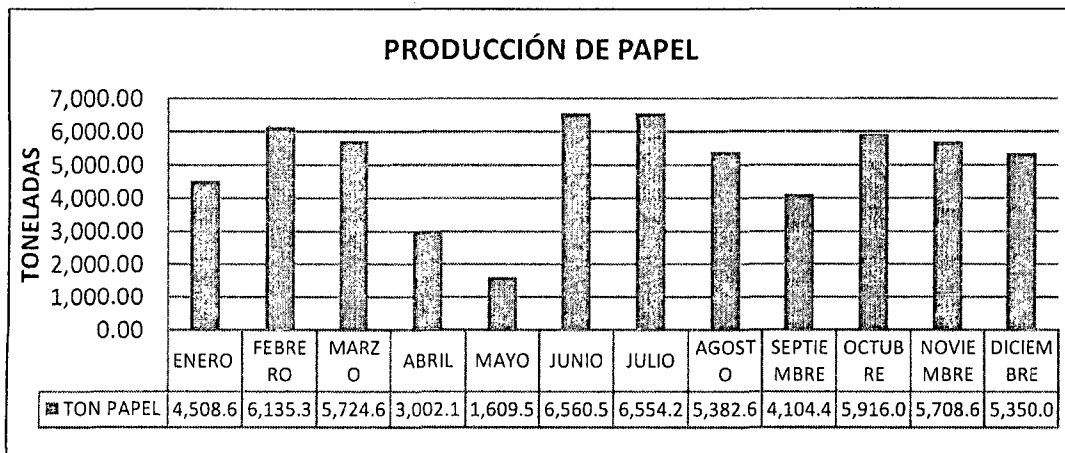


Fig. N°1.3: Producción de papel de la empresa TRUPAL SA.

3.-Método de trabajo inadecuado para operar una caldera de la magnitud y tecnología con la que se cuenta (actualmente se opera de forma 100% manual)

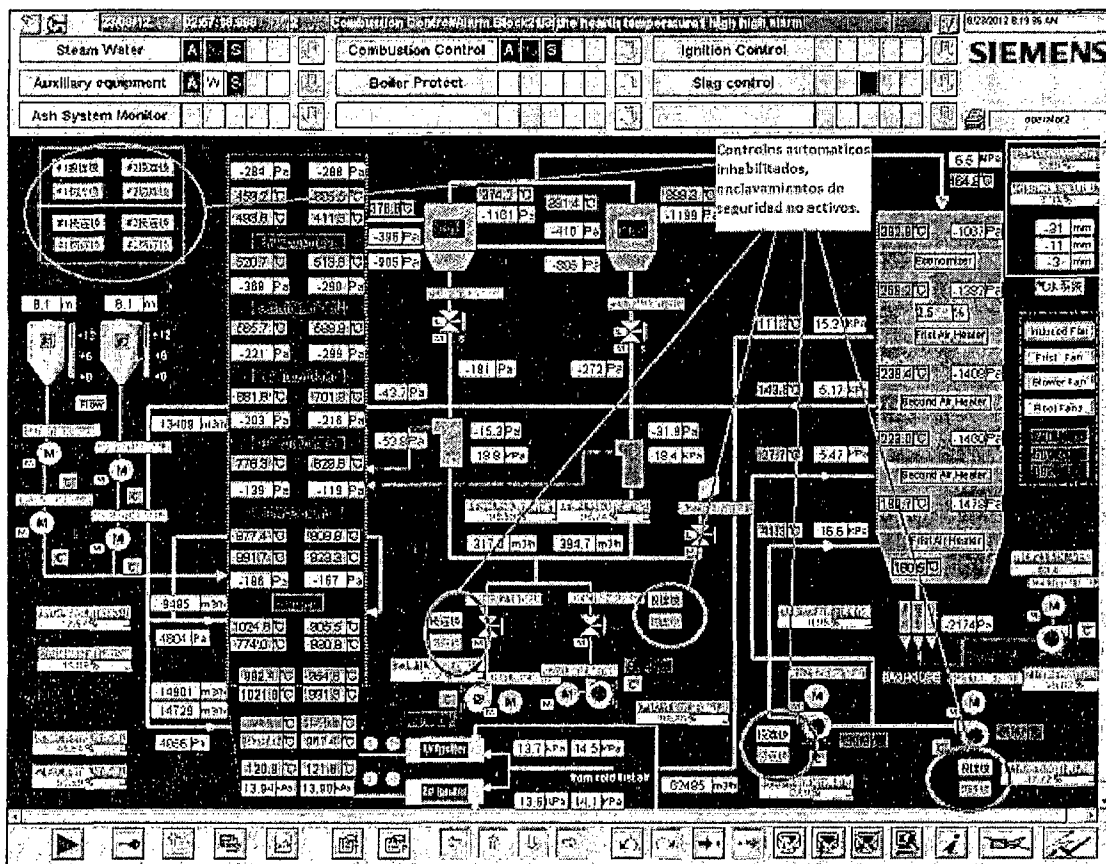


Fig. N°1.4: Pantalla de operación de caldera CFB de la empresa TRUPAL SA.

4.-Desperdicios de recursos económicos traducidos como pérdidas de energía debido a una combustión deficiente y no controlada.

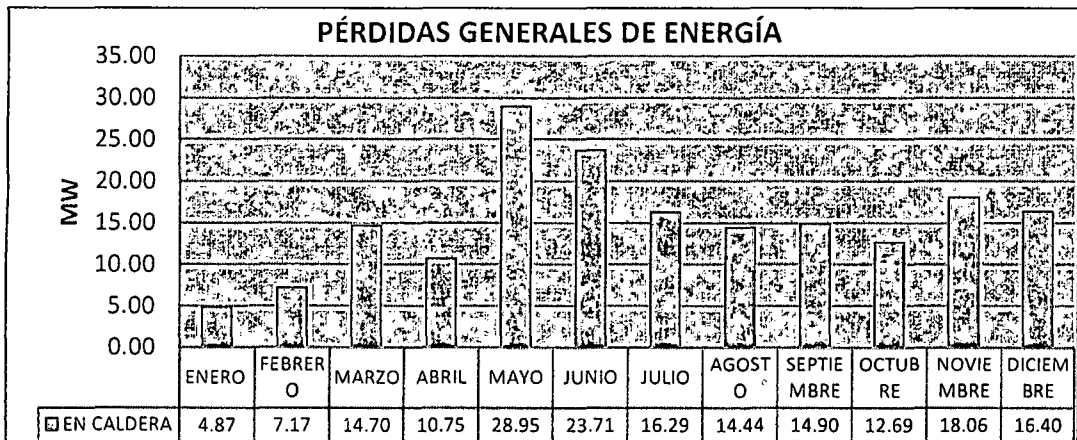


Fig. N°1.5: Perdidas de energía en la caldera CFB de la empresa TRUPAL SA.

5.- Contaminación ambiental debido a una combustión deficiente.

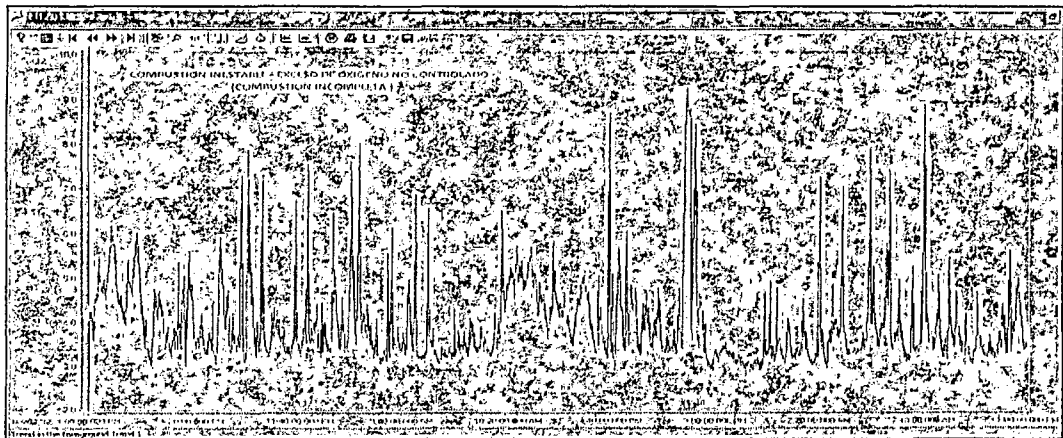


Fig. n°1.6: Inestabilidad del % de O en la caldera CFB de la empresa TRUPAL SA.

Es por ello que se plantea el siguiente problema:

¿De qué forma la optimización del proceso de Combustión y la mejora de la eficiencia de la caldera permitirá un ahorro de energía y la estabilización del proceso?

## **1.2. JUSTIFICACIÓN**

### **1.2.1. Justificación Económica:**

Debido a que se tiene actualmente muchas pérdidas por tiempos muertos y elevados costos de mantenimiento por fallas en la operación de la caldera.

La optimización de la Combustión mejorara la eficiencia de la caldera y se obtendrá un ahorro importante en el consumo de combustibles.

### **1.2.2. Justificación Social:**

Debido a que se pretende minorizar el impacto ambiental de los gases de combustión cumpliendo los estándares medioambientales tomando mayor responsabilidad con la salud poblacional del distrito aledaño de Santiago de Cao.

### **1.2.3. Justificación Científica:**

Debido a que no existen investigaciones similares, en lo concerniente a optimización en procesos de combustión de calderas de lecho fluidizado circulante.

## **1.3. HIPÓTESIS**

Se plantea la siguiente hipótesis: “La optimización del control de combustión y mejora de la eficiencia en la caldera de lecho fluidizado circulante de la empresa Trupal, le permitirá un ahorro de energía del orden del 20% en consumo de combustible”

## **1.4. OBJETIVOS:**

### **1.4.1. Objetivo General:**

- Generar un ahorro importante de energía mediante la Optimización del control de la Combustión y mejora de la eficiencia en la Caldera de Lecho Fluidizado Circulante de la empresa TRUPAL S.A.

### **1.4.2. Objetivos Específicos:**

- Identificar las variables de operación más significativas (críticas) en el proceso de combustión de la caldera.
- Parametrizar las variables significativas analizando su sensibilidad e impacto en la eficiencia de la caldera y la combustión.
- Utilizar un programa computacional para evaluar la combustión de carbón antracita + medula de bagazo en una caldera de lecho fluidizado.
- Lograr un ahorro económico importante con la optimización del proceso y la mejora de la eficiencia térmica global.
- Minimizar los daños al medio ambiente generado por los gases de la combustión ineficiente.

## **1.5. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA TRUPAL S.A.**

Empresa dedicada a la fabricación de papeles y cartones a partir de bagazo desmedulado de caña de azúcar. Inició sus operaciones el 27 de noviembre del año 1968. Forma parte del Grupo Gloria desde el 17 de febrero del 2006, año en el que el Grupo toma la administración de la empresa.

Trupal tiene una importante participación en el mercado nacional, con la fabricación de pulpa de bagazo como con la de papel-cartón, abasteciendo a las convertidoras de cajas tanto del Grupo como de terceros y destinando

el 50% de su producción al mercado de exportación, principalmente con el producto papel onda para corrugar (MSFE). Con esta adquisición, el Grupo Gloria integra procesos para maximizar y potenciar la productividad.

### **1.5.1. Actividades y Productos**

Los tipos de papel que produce son: Papel Trupak Extensible entre 80 - 100 g/m<sup>2</sup>, Papel Medium Super Flute entre 90 - 250 g/m<sup>2</sup>, Papel Kraft entre 75 - 90 g/m<sup>2</sup> y Cartón Liner entre 140 - 250 g/ m<sup>2</sup>.

### **1.5.2. Visión, Misión y Valores**

#### **Visión**

Somos una corporación de capitales peruanos con un portafolio diversificado de negocios, con presencia y proyección internacional.

Aspiramos a satisfacer las necesidades de nuestros clientes y consumidores con servicios y productos de la más alta calidad, para ser siempre su primera opción.

#### **Misión**

Mantener el liderazgo en cada uno de los mercados en que participamos a través de la producción y comercialización de bienes con marcas que garanticen un valor agregado para nuestros clientes y consumidores.

Los procesos y acciones de todas las empresas de la corporación se desarrollaran en un entorno que motive y desarrolle a sus colaboradores, mantenga el respeto y la armonía en las comunidades en las que opera y asegure el máximo retorno de la inversión para sus accionistas.

## **Valores**

- Pasión por el trabajo.
- Austeridad.
- Lealtad.
- Productividad.
- Honradez
- Amor a la patria

### **1.5.3 Ubicación Geográfica (Colindancias)**

**Al Norte:** Con sembríos de caña particulares.

**Al Sur:** Con el distrito de Santiago de Cao

**Al Este:** Con el mar del Océano Pacífico.

**Al Oeste:** Con sembríos de caña y la población de Nepen.

#### **Localización.**

La empresa TRUPAL S.A. está ubicada en el Distrito de Santiago de Cao, Provincia de Ascope, en el Departamento de La Libertad.

#### **Vías de acceso.**

Sobre la carretera a Sgo de Cao, a 4.5 kilómetros de la ciudad de Cartavio.

Está ubicado a 170 kilómetros de la ciudad de Trujillo.

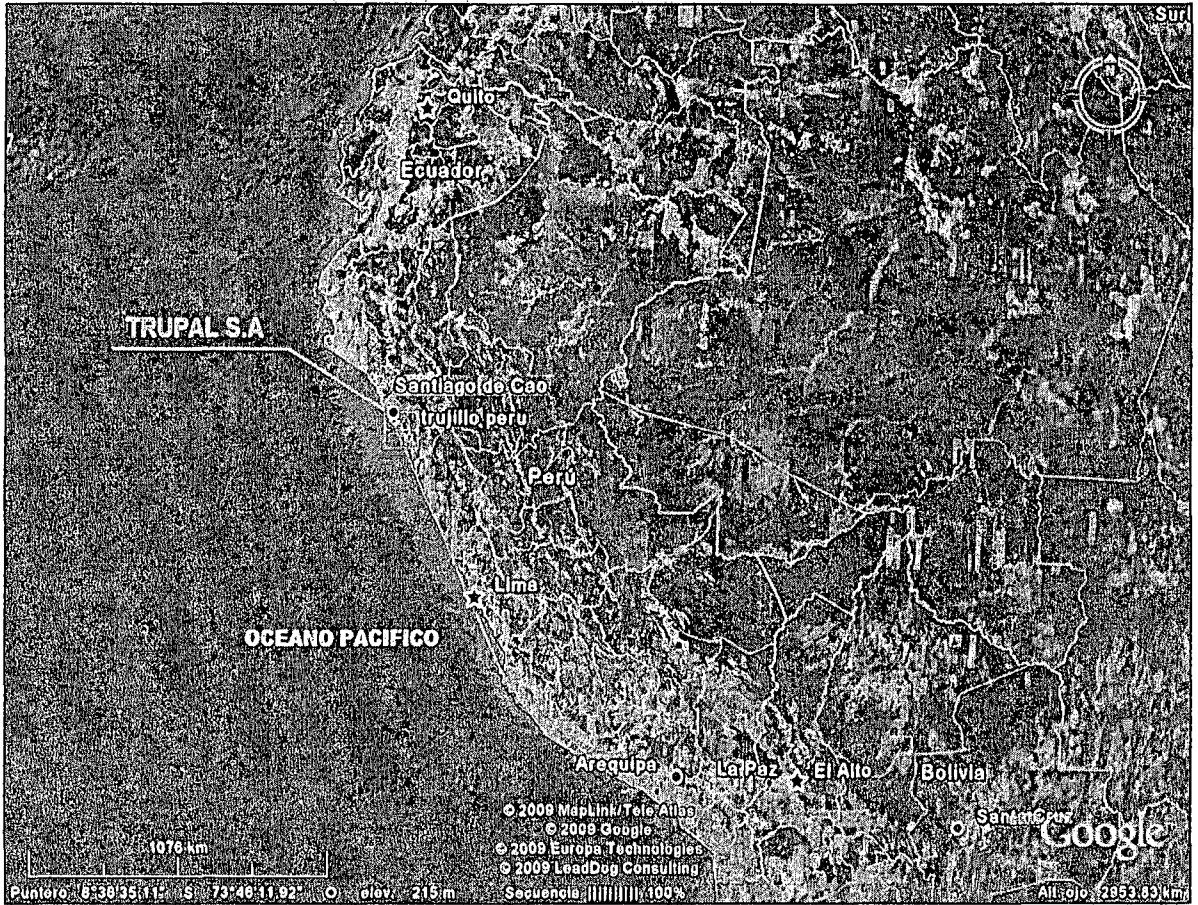


Fig. N°1.7: Ubicación geográfica de empresa TRUPAL SA.



## **CAPÍTULO II: GENERALIDADES**

El objetivo principal de este capítulo es hacer una breve descripción de la caldera CFB donde es que se desarrolló el presente trabajo de investigación.

### **2.1. VISIÓN GENERAL DE LA CALDERA CFB.**

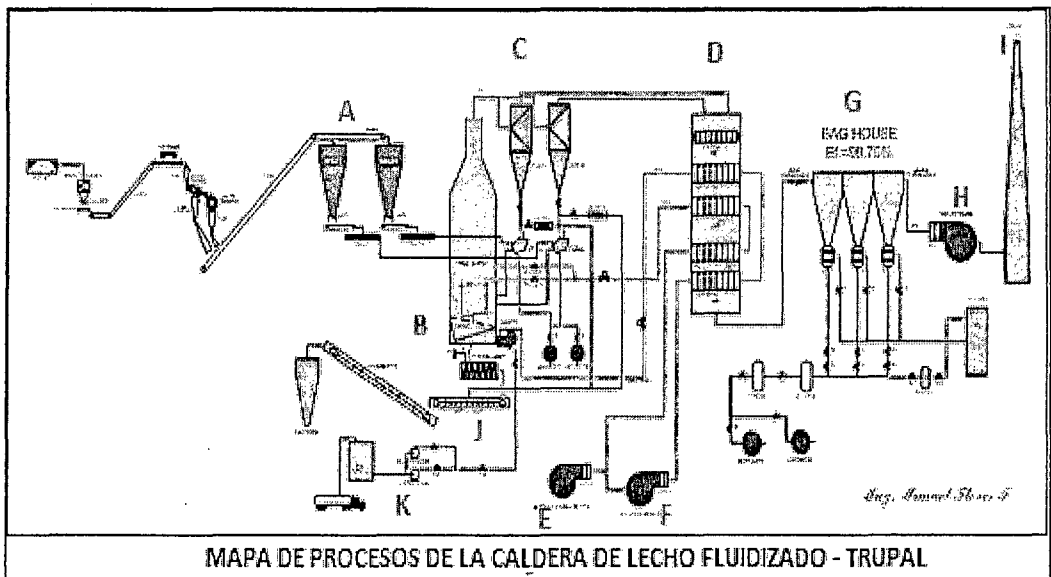
La caldera en estudio, es una caldera de lecho fluidizado circulante con un solo domo. Diseñada para generar 130 ton/hora de vapor sobrecalentado a 70 kg/cm<sup>2</sup> y 490 °C en su rango continuo máximo (MCR: Maximun Continuous Rating). El MCR está calculado sobre la base de tener una entrada de agua de alimentación al economizador a 104 °C y con una purga de fondo de la caldera a razón del 1% del MCR.

Para el manejo de las operaciones de la caldera se cuenta con un 1 supervisor de procesos, 6 operadores, y 2 técnicos para trabajos de mantenimiento.

La caldera está formada por un Hogar enfriado por agua, con paredes de división parcial (raiser), un ciclón para la recuperación de inquemados y un área de recuperación de calor (HRA) convectiva enfriada por agua y aire ( ver figura 2.1). El calor para generar vapor proviene de la combustión del carbón antracita en el Hogar. El carbón antracita forma un lecho de sólidos calientes que son forzados a subir con los productos de la combustión a través del Hogar, liberando su energía calórica al agua y al vapor de los tubos de la caldera.

La mezcla de sólidos en suspensión y el gas salen por la parte superior del hogar a través de una única salida hacia el separador ciclónico. Los materiales gruesos (inquemados) que son impulsados hacia arriba del hogar son separados del flujo de gases en el ciclón y vuelven al hogar a través de la válvula J. La válvula J conecta la parte inferior del ciclón con la parte posterior del hogar justo sobre cama o lecho, en donde se encuentran las toberas fluidizantes.

El flujo de gases calientes es liberado en la parte superior del hogar, pasa por el ciclón y fluyen por el recuperador de calor (HRA) en donde el calor de los gases de combustión lo aprovecha un economizador de baja temperatura y los pre calentadores de aire primario y secundario que están dispuestos en forma serial para calentar el aire de combustión, el aire de inyección y el de entrada del transporte del combustible. Posteriormente, el flujo de gases es dirigido a través de los filtros de manga (baghouse) para capturar la mayor cantidad de particulado (cenizas). Desde el baghouse, el ventilador de tiro inducido (ID) extrae el flujo de gases limpio por la chimenea.



**Figura 2.1: Esquema de la caldera de lecho fluidizado circulante.**

Dónde: **A:** Alimentador de combustible; **B:** Hogar de la caldera; **C:** Ciclones; **D:** Recuperador de Calor; **E:** Ventilador de Aire Primario; **F:** Ventilador de aire Forzado; **G:** Baghouse (Filtro de mangas); **H:** Ventilador de tiro inducido; **I:** Chimenea; **J:** Descarga de escoria; **K:** Inyección de petróleo (solo en arranque).

## 2.2. CICLO DE AGUA Y VAPOR

Los componentes principales del ciclo de agua y vapor son los siguientes: economizador, Circuito de Pared de Agua y Domo de vapor, Área de Recuperación de calor (HRA), sobrecalentador primario (baja  $T^{\circ}$ ), sobrecalentador secundario (alta  $T^{\circ}$ ).

### 2.2.1. Economizador:

El economizador se encuentra en la parte superior del área de recuperación de calor (HRA) cerca del escape de los gases de

combustión. Desde el cabezal de entrada del economizador, el agua de alimentación fluye hacia arriba a través de sus tres bancos de tubos horizontales, absorbiendo el calor del gas caliente que pasa a través de los tubos. El agua de alimentación pasa por el cabezal de salida del economizador por medio de una tubería de transferencia hacia un extremo del domo de vapor.

Durante la partida y en condición de baja carga, cuando no existe o bien hay un flujo de agua de alimentación mínimo hacia el domo de vapor, se usa el sistema de recirculación del economizador (Downcomer) para evitar que se genere vapor en el economizador haciendo recircular el agua desde el cabezal de entrada del economizador al domo de vapor.

### **2.2.2. Domo de vapor y circuito de tubos de agua.**

El domo de vapor proporciona una reserva de agua de alimentación que debe ser mantenida durante la operación de la caldera. El nivel normal de operación del domo es de +- 50 mm de la línea central del domo.

El nivel del domo está controlado por una válvula de control de flujo, esta válvula controla al flujo de alimentación desde las bombas de alimentación de agua de la caldera hacia el economizador y, por lo tanto hacia el domo de vapor.

El agua en el domo de vapor entra a la caldera a través de dos tubos de bajada al fondo de la caldera, donde es dividida en cuatro cabezales de pared del hogar y dos cabezales de pared de división del hogar. A medida

que el agua es calentada, se forman burbujas de vapor que se elevan por los tubos (debido a que la densidad del vapor es menor a la del agua que lo rodea) hacia los cabezales de salida superiores de la pared lateral, frontal, trasera y de división y re-ingresa al domo a través de los tubos de subida.

El domo de vapor usa separadores ciclónicos para dividir el agua del vapor de la mezcla que retorna al domo a través de los elevadores de la caldera. Los separadores ciclónicos son de forma cilíndrica y usan topes fijos para impartir un movimiento de remolino rápido a la mezcla de vapor y agua. El agua es forzada a salir por la acción de la fuerza centrífuga y es dirigida de vuelta al reservorio de agua del domo para volver al ciclo de agua. El vapor se eleva hasta llegar a la parte superior del domo en donde más humedad es removida por una serie de deflectores ajustados, uno cerca del otro, en un patrón de zigzag. Los deflectores hacen que la mezcla de agua y vapor cambie constantemente de dirección con el objeto de interceptar la mayor cantidad de partículas de agua. El agua recogida mediante los deflectores es enviada de vuelta al domo. El vapor es dirigido hacia el exterior por la parte superior del domo hacia los sobrecalentadores.

### **2.2.3. Sobrecalentadores y Atemperación.**

Desde el domo, el vapor fluye hacia fuera por medio de un cabezal de salida posterior que sirve como cabezal de entrada del sobrecalentador primario, el vapor fluye a través de los tubos del sobrecalentador primario

y sale a través del cabezal de salida por un solo extremo.

Desde el cabezal de salida del sobrecalentador primario, el vapor pasa a través de un tubo de transferencia que va a un cabezal de atemperación intermedia dentro de la caldera, luego el vapor va directamente al sobrecalentador final. El atemperador (desobrecalentador) se usa para controlar la temperatura del vapor sobrecalentado que se genera en la caldera y para el vapor que se envía a la turbina. Al atemperador de la caldera se le proporciona agua de alimentación desde el cabezal de descarga de las bombas de alimentación de agua de la caldera e inyecta una pequeña cantidad de agua de alimentación (como fino spray) al vapor de paso. El calor aportado por el vapor se usa para evaporar el agua, bajando, en consecuencia, la temperatura del vapor. Cuando la temperatura del vapor que entra al atemperador es superior al punto de ajuste, se inyecta más agua. A medida que la temperatura del vapor baja, el flujo de agua disminuye o cesa completamente. Desde el cabezal de entrada del sobrecalentador final, el vapor fluye hacia al cabezal de vapor principal que alimenta al turbogenerador.

### **2.3. AIRE PRIMARIO Y FORZADO.**

El aire necesario para la combustión es suministrado a la caldera mediante los ventiladores de aire primario (VP) y forzado (VF) los cuales en esta caldera en particular son enseriadas y complementado por el soplador de la válvula-J (Roots blower)

El aire a temperatura ambiente es conducido hacia los ductos de entrada

de aire primario, secundario y terciario por los ventiladores respectivos. El aire primario y secundario es precalentado en calentadores tubulares de aire, separados entre si. El aire primario pasa al hogar a través del calentador de aire primario. Desde el calentador de aire primario, el aire es dirigido hacia la parte inferior de la cámara del hogar pasando a través del lecho fluidizante de toberas hacia la cámara de combustión. El aire primario calentado fluidiza el lecho a través de las toberas que están en el suelo del lecho y establece una circulación ascendente de sólidos a través del hogar.

Durante el arranque, se añade calor adicional al aire primario por medio de un quemador auxiliar ubicado en la parte posterior del hogar. El quemador auxiliar precalienta al aire primario a aproximadamente +/- 800 °C, antes que los calentadores de aire estén lo suficientemente calientes como para suministrar el calor necesario para precalentar el aire. El aire precalentado producido por el quemador auxiliar ayuda a elevar la temperatura del material del lecho y a lograr la auto-combustión del carbón antracita cuando se inicia su alimentación ( $T^{\circ} = \pm 600^{\circ}\text{C}$ )

Una derivación une el ducto de aire primario antes que el aire pase a través del calentador con la línea de inyección de medula. La derivación proporciona aire primario frío a presión que ayudara en la inyección de medula hacia la caldera.

La fluidización del lecho también ayuda en la extracción de partículas gruesas hacia el drenaje de ceniza de lecho en cada stripper/cooler.

El aire primario calentado es también suministrado al quemador auxiliar. El aire primario dirigido a la boquilla del quemador, es usado para la combustión del combustible diésel.

El aire secundario y terciario pasa a través del calentador de aire antes de entrar en el hogar sobre el lecho principal. Este aire secundario calentado es usado como aire caliente y entra al hogar en un punto sobre el lecho principal. Este aire secundario es usado para controlar la formación de  $\text{NO}_x$  (Óxidos nitrosos) en el gas de salida mientras mantiene la temperatura de escape, de los gases del hogar a una temperatura similar a la del lecho circulatorio. El monóxido de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) son derivados del proceso de combustión en la caldera de lecho fluidizado circulante. Sobre el 50% de carga, se usa aire secundario para regular los niveles de exceso de aire, según sea el caso y carga de la caldera. (Control de  $\text{O}_2$ )

#### **2.4. SALIDA DE GASES Y EXTRACCIÓN DE ESCORIA.**

Este sistema está formado por los siguientes componentes principales:

- Cyclón (lado de gas)
- Área recuperadora de calor
- Válvula-J y sopladores
- Enfriadores de escoria
- Baghouse
- Ventilador ID
- Chimenea



#### **2.4.1. Vía de flujo de salida de gas**

En el hogar, el aire primario, secundario y terciario se mezclan con el carbón antracita para facilitar la combustión, los gases generados en este proceso arrastran consigo un porcentaje de combustible y finos de ceniza, dicha mezcla fluye hacia arriba, a través de la cámara de combustión hacia el ciclón, donde la mayoría de los sólidos en suspensión de mayor tamaño son separados de la corriente y devueltos a la cámara de combustión a través de la válvula J. El flujo de gases y los finos restantes, son impulsados a través del área de recuperación de calor (HRA), a los calentadores de aire y al filtro de mangas por el ventilador de tiro inducido (VI).

Después de pasar a través de la unidad recuperadora de calor, el flujo de gases y la ceniza fina son llevados al sistema de baghouse. Éste es un filtro de mangas o bolsas de tela, en que las partículas de ceniza son extraídas de la corriente de gases para que no sean liberadas a la atmósfera. Las cenizas son depositadas en buzones individuales bajo de cada sección o cámara del baghouse y son retiradas del equipo mediante un sistema de manejo de cenizas.

Desde el baghouse, los gases enfriados y libres de polvo son llevados hacia el ventilador Inducido y expulsados a la chimenea para su posterior liberación a la atmósfera.

#### **2.4.2. Ciclón y válvula-J**

El hogar, el ciclón y la válvula -J forman el lazo de circulación caliente. Los sólidos son barridos hacia la sección superior del hogar por el aire

fluidizante y el aire de sobre fuego, saliendo a través de una abertura en la pared trasera superior del hogar hacia el ciclón. Los sólidos más gruesos son separados en el ciclón y caen en la válvula –J para ser reenviados al hogar.

La mitad superior del ciclón es cilíndrica y la mitad inferior es de forma cónica. Todo el ciclón se encuentra sobre una construcción de tubos MONO-WALL que consisten en fijar una pieza de metal de relleno o membrana entre los tubos del ciclón a ambos lados de los tubos adyacentes. Esto forma una cubierta hermética para el gas que favorece la transferencia de calor.

#### **2.4.3. Enfriadores de escoria**

Los slag coolers (dos), remueven el material agotado del lecho del fondo del hogar a través de dos conexiones de drenaje para sólidos y líneas de transporte asociadas. Las conexiones de drenaje se encuentran una a cada extremo del hogar (izquierdo y derecho), estos equipos se dividen en tres celdas con paredes parciales que permiten que el material agotado del lecho de cenizas fluya libremente alrededor de la pared, ingresando a la siguiente celda.

Para fluidizar las partículas finas de ceniza y evacuarlas se tiene una línea de succión en la pared del slag cooler conectado al ducto de salida de gases ante del Bag House y así apartar las partículas finas de ceniza del material más pesado del lecho.

## 2.5. ALIMENTACIÓN DE COMBUSTIBLE

El carbón antracita es inyectado al hogar a través de la pared frontal del hogar por medio de 2 alimentadores idénticos. Cada conducto de alimentación de combustible está formado por los siguientes componentes:

- Silo de carbón (común para los dos alimentadores de combustible)
- Válvula manual de cierre, tipo lápices.
- Faja balanza alimentadora combustible, de velocidad variable.
- Transportador de cadenas, de velocidad fija.
- Boca para descarga de combustible (montada a aproximadamente 1.8m sobre el suelo del hogar).

El combustible es almacenado en el silo para su uso diario, de las siguientes medidas: 11.5 m de largo x 10.2 m de ancho x 25.5 m de alto.

El carbón llega al alimentador gravimétrico mediante gravedad a través de una válvula manual de lápices que normalmente está abierta. El alimentador gravimétrico funciona por medio de corriente eléctrica y controla la razón de alimentación al hogar en respuesta a la demanda de combustible de la caldera que está determinada por el operador de la caldera.

Desde el alimentador gravimétrico, el carbón es alimentado en la boquilla de combustible por acción de la gravedad y el sistema de aire proveniente de los root blowers proporciona aire de transporte. La razón de flujo de aire de transporte para los alimentadores de combustible individuales es controlada por sus respectivas válvulas de flujo. Cada

boca de combustible distribuye el carbón antracita en el lecho fluidizado de manera uniforme.

## **2.6 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DE LA CALDERA**

En términos muy simples, la caldera produce vapor sobrecalentado al recuperar el calor generado por la quema de carbón antracita en un lecho fluidizado circulante. La energía térmica del vapor sobrecalentado es utilizada para accionar un turbogenerador y producir energía eléctrica.

### **2.6.1 Combustión del hogar**

El calor para generar vapor proviene de un lecho fluidizado de sólidos calientes que circulan en forma continua en un lazo cerrado desde el hogar a través del ciclón y retornando al hogar vía Válvula-J. El material del lecho en una caldera de lecho fluidizado está formado por carbón y ceniza. El material del lecho debe ser fluidizado por aire precalentado para garantizar una combustión adecuada del material combustible. En una caldera CFB las velocidades de gas son tales que una parte del combustible y ceniza del lecho son transportadas a través del hogar. Esta velocidad de arrastre mínima es producida principalmente por los ventiladores de aire primario y forzado para levantar el material y producir el flujo adecuado de los sólidos en suspensión dentro del lecho en el hogar, logrando una buena transferencia de calor. Los sólidos (combustible, cenizas) se mueven a través del hogar a una velocidad menor que la mezcla de aire y flujo de

gases. Este proceso, junto con el hecho de que el hogar es alargado, permite un tiempo de combustión suficiente, es decir, que el tiempo de estadía de las partículas en el hogar es el suficiente para garantizar la mayor tasa de transferencia de calor. Además a medida que el combustible sube por la corriente de gases, su tamaño se reduce gracias al proceso de combustión. Esta acción produce partículas pequeñas de material del lecho que circulan en un lazo. Este lazo involucra al hogar, el ciclón y la válvula J. El ciclón, como anteriormente se mencionó, separa los materiales finos de las partículas más gruesas permitiendo que estas últimas caigan en la válvula J para ser reinyectadas en el hogar.

Un largo tiempo de residencia en el hogar junto con el pequeño tamaño de las partículas y la acción fluidizante del aire primario, produce una mejor razón de extracción de gases y un menor consumo de combustible. No existe una profundidad o altura fija definida para el lecho de una caldera de lecho fluidizado.

Existen distintas densidades de materiales circulantes de lecho dependiendo del tamaño y el peso de las partículas de combustible. Las partículas más pesadas permanecen en la región más baja del hogar mientras que las partículas más pequeñas y menos densas se elevan. Cuando el tamaño de las partículas es lo suficientemente pequeño, son extraídas del lazo circulante con el flujo de gases, como ceniza muy fina. El dióxido de azufre formado durante el proceso de combustión debe

ser extraído para cumplir con los límites permisibles de emisiones al medio ambiente. El agente que ayuda a extraer los compuestos de azufre es la caliza. En el caso nuestro donde el combustible es carbón antracita no se necesita la dosificación de caliza debido a que el % de azufre es  $> 2.5\%$ , mínimo y no nos da resultados fuera de los límites permisibles.

El rango ideal de temperaturas de reacción para generar el proceso de combustión en las calderas de lecho fluidizado circulante es de  $84 - 954$  °C. Cuando la temperatura del lecho es mayor que  $954$  °C el proceso genera gases contaminantes, SO y NOx.

## **CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO**

### **3.1. LECHOS FLUIDIZADOS**

#### **3.1.1. Introducción.**

La combustión en lechos fluidizados (FBC) incluye la combustión de un combustible formado por partículas sólidas, en un lecho fluidizado (en suspensión), mediante la inyección de aire en el fondo del lecho. Cuando se quema carbón de esta manera, el lecho puede consistir en sólidos inertes, cenizas de carbón, o un material absorbente como piedra caliza o dolomita. La piedra caliza o la dolomita en el lecho reaccionan con el bióxido de azufre formado durante la combustión del carbón y forma un sulfato sólido que puede ser desechado en forma de sólido seco.

A principios de la década de 1960, la Great Britain's National Coal Board, la British Coal Utilization Research Association y la Central Electricity Generating Board iniciaron las investigaciones sobre el FBC. Después de la crisis energética de 1973 se desarrollaron muy rápidamente los procesos FBC de carbón, principalmente en Estados Unidos, Gran Bretaña y la República Federal Alemana, donde se destinaron a empresas de servicio, industrias de proceso y dentro de los Sectores institucionales. El FBC tiene gran potencial para quemar eficiente y limpiamente una gran variedad de combustibles, desde los que tienen un alto contenido de azufre, carbones con alto contenido de cenizas en todas sus categorías y grados, hasta los desechos de las

industrias de proceso y sedimentos municipales.

Algunas de las ventajas potenciales del FBC, comparadas con la quema de carbón pulverizado son las siguientes:

- Menor emisión de dióxido de azufre, ya que la mayor parte del azufre es capturado por los aditivos del lecho de combustible, como la piedra caliza y la dolomita.
- Bajas temperaturas en el lecho de combustible, hasta casi 954°C (1750 °F) lo que significa que:
  - Se tiene menor emisión térmica de óxido de nitrógeno
  - Existen menos problemas por la emisión de cenizas
  - Hay una cantidad más reducida de sodio y potasio en el carbón y, a consecuencia de esto, la acumulación de partículas y la corrosión son menores en componentes como las calderas sobrecalentadoras y recalentadores y en las aspas de las turbinas en los ciclos gas-turbina PFBC.
- Hay velocidades mayores de transferencia de calor a las superficies de absorción del mismo, con valores hasta de 3.154 kW/m<sup>2</sup>, y los coeficientes de transferencia de calor entre el lecho y los tubos inmersos en él son altos, con valores hasta de 398 W/(m<sup>2</sup> °C).
- Las velocidades de liberación de energía por volumen son altas. 5.2 MW/m<sup>3</sup> comparadas con las que se tienen en una caldera convencional que quema carbón pulverizado, 0.2 MW / m<sup>3</sup>



En este sistema, el aire entra a través de una placa distribuidora y el carbón triturado, de 0.6 a 1.2 cm (1/4 a 1/2 in) Y el absorbente de SO<sub>2</sub>, ya sea piedra caliza o dolomita, se inyectan directamente al lecho o por medio de alimentadores especiales. En cualquier instante, el lecho contiene cenizas de carbón, una pequeña cantidad de carbón (0.5 a 2% del material alimentado), más partículas del absorbente calcinado y sulfatado en varios grados. El material alimentado se agita y pone en movimiento debido al aire que circula de abajo hacia arriba a través del distribuidor con una velocidad superficial de 0.6 a 4.6 m/s. los movimientos de turbulencia y recirculación del lecho proporcionan un buen mezclado de los componentes.

El calor liberado en el lecho se absorbe por medio de unos tubos de enfriamiento colocados en las paredes y en el lecho, y el calor generado por los productos de combustión se absorbe mediante tubos de convección, colocados en un espacio libre encima del lecho. La magnitud de la superficie de transferencia de calor depende del poder calorífico del combustible; cuando el poder calorífico del combustible es bajo, no hay superficie de transferencia en el lecho y es factible utilizar agua, vapor o aire como medio de enfriamiento, dependiendo de la aplicación, pero las mayores aplicaciones las constituyen el calentamiento del agua y la generación o sobrecalentamiento del vapor.

Una planta CFB consiste en varios subsistemas, que incluyen;

- 1) Recepción, almacenamiento y preparación de combustibles.
- 2) Alimentación de combustibles.
- 3) Combustión, que incluye eliminación del lecho gastado
- 4) Evacuación de partículas de los gases de combustión.

Hay dos consideraciones importantes en un sistema FBC: la utilización de carbón y el comportamiento del absorbente (eliminación de  $\text{SO}_2$ ), que dependen de muchas variables interrelacionadas y hacen que el entendimiento del funcionamiento del sistema FBC sea más complicado, por el hecho de que tanto el carbón como los absorbentes son materiales heterogéneos. Es de esperarse que el funcionamiento del combustor varíe al cambiar las condiciones de operación y al tener diferentes combinaciones de carbón y absorbente, y debido también a las características específicas del mismo combustor (p. Ej. su distribuidor, configuración del intercambiador de calor y altura del espacio libre arriba del lecho). A pesar de esto, el diseño de un combustor para FBC debe cumplir con varias condiciones para alcanzar el funcionamiento deseado. Estas consideraciones de diseño determinan la extensión hasta la cual el combustor cumplirá con sus requisitos de control de generación y emisión de calor. Entre las características adicionales del combustor, se pueden contar la liberación de calor, velocidades de transferencia de calor y emisiones del  $\text{NO}_x$ . Aunque las propiedades del combustible y

el absorbente tienen efectos directos en el comportamiento del sistema, un quemador FBC acepta gran variedad de combustibles.

### **3.1.2. Eficiencia de la combustión del carbono.**

Alcanzar una alta eficiencia en la combustión del carbono es un factor importante para la eficiencia global de la planta y, por consecuencia, para la economía de la planta misma.

Las pérdidas de carbono ocurren por el traslado de partículas de carbón no quemadas y en menor escala de la combustión incompleta de carbono a monóxido de carbono y carbono no quemado que se retira con el material del lecho gastado.

Las variables de operación que pueden afectar la eficiencia de la combustión incluyen la temperatura del lecho, el aire en exceso y la velocidad de fluidificación. En la figura (3.1) se muestran los datos comunes para las temperaturas del lecho y el incremento del aire en exceso.

El incremento en la eficiencia de la combustión del carbón se logra gracias al incremento de la temperatura del lecho y del aire en exceso. A pesar de esto, los límites para estas variables se establecen por consideraciones de la captura de  $\text{SO}_2$ , formación de  $\text{NO}_x$  y características de fusión de las cenizas.

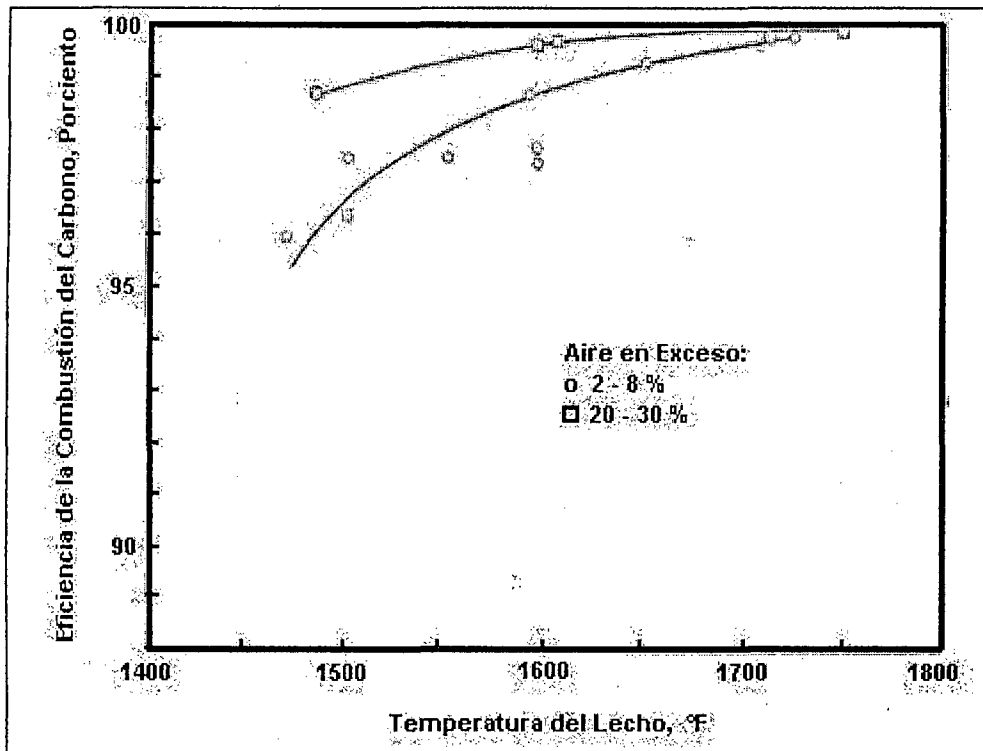


Figura 3.1: Eficiencia de la combustión del Carbono en función de la temperatura del lecho.

El efecto de la velocidad de fluidización en la eficiencia de la combustión del carbón se muestra en la figura (3.2). El incremento en la velocidad aumenta el traslado de partículas finas de carbón no quemadas, lo que disminuye la eficiencia de la combustión, que puede aumentarse con un diseño adecuado para operar a velocidades más bajas, pero esta disminución en la velocidad requiere un lecho muy grande. En la figura (3.3) se muestra la relación que existe entre la velocidad y el área del lecho. Al disminuir la velocidad rápidamente, se incrementa el área requerida (en ft cuadrados) de la malla o del área del lecho necesaria por unidad de salida.

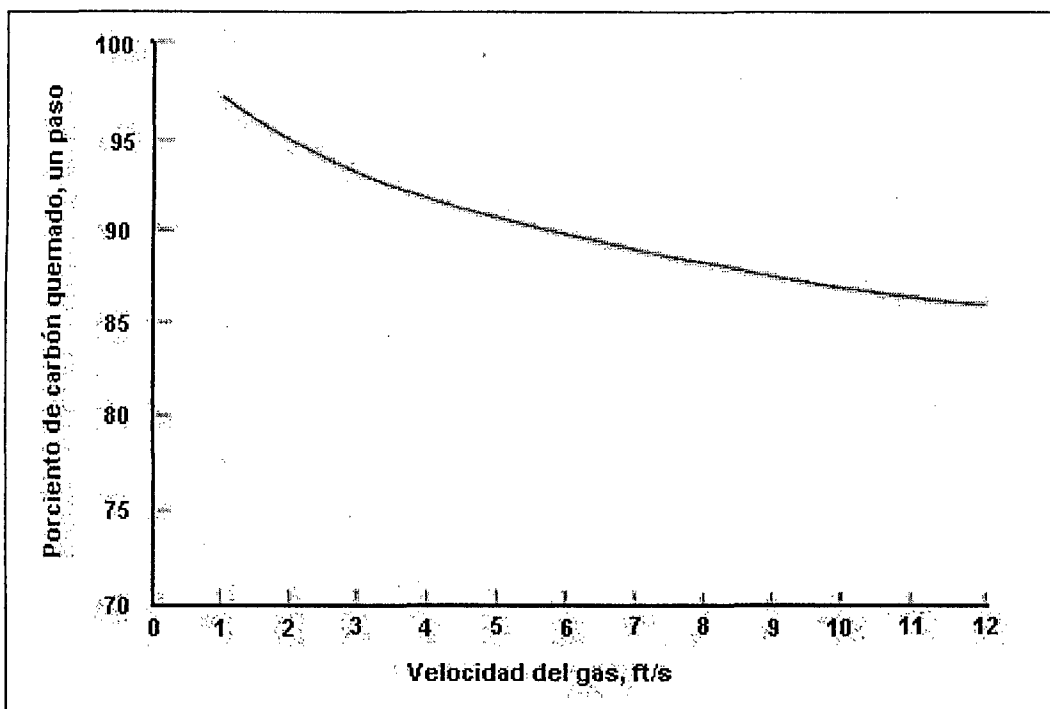


Figura 3.2: Eficiencia de la combustión del carbono en función de la velocidad del gas.

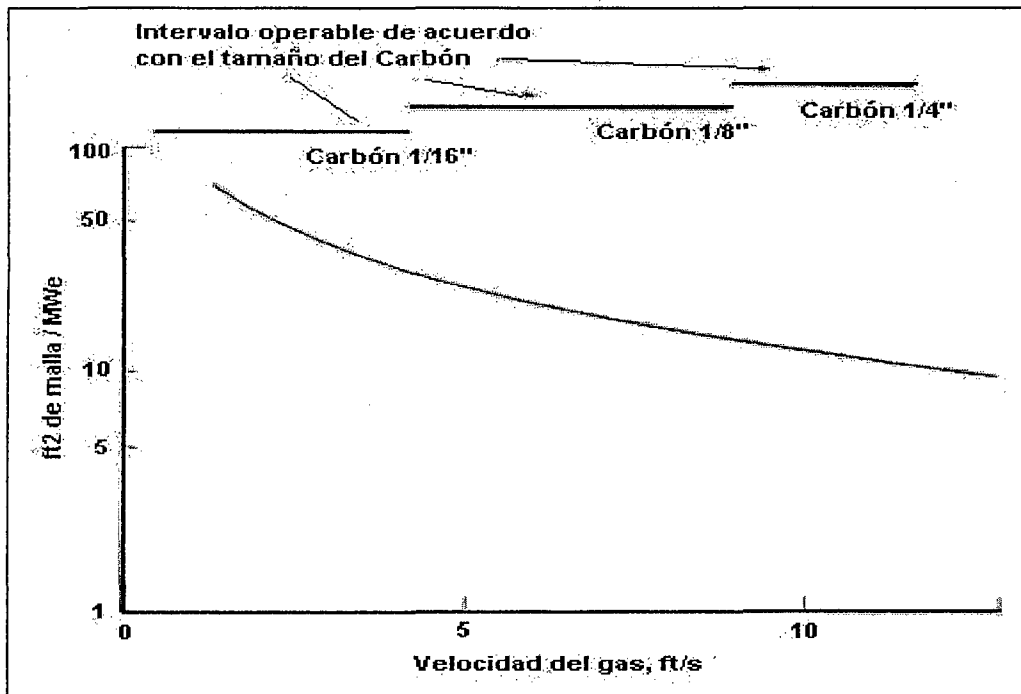


Figura 3.3: Dependencia del área de la malla (cama) del lecho sobre la velocidad del gas.

### 3.1.3 Eliminación de SO<sub>2</sub>

La eliminación de SO<sub>2</sub> o la retención de S in situ, es una característica única del proceso de lecho fluidizado. El azufre contenido en el combustible se oxida a SO<sub>2</sub> durante el proceso de combustión. Este SO<sub>2</sub> reacciona químicamente en presencia del oxígeno con el absorbente, y forma un sulfato sólido estable, en el lecho. De esta manera se controlan las emisiones de SO<sub>2</sub> en el mismo recipiente de combustión, eliminando la necesidad de limpiar de SO<sub>2</sub> las corrientes de los gases de combustión.

La captura del azufre depende de cierto número de variables de operación y diseño, además del absorbente empleado. Una variable primaria que puede ser controlada fácilmente es la razón molar calcio-azufre. También es importante la temperatura del lecho, ya que la reacción SO<sub>2</sub>-absorbente depende de la temperatura. Estos dos efectos se muestran en la figura (3.4), donde se aprecia la tendencia experimental típica para la captura de SO<sub>2</sub>, graficado contra la razón Ca/S para varias temperaturas del lecho. Es común una temperatura óptima de captura alrededor de 843°C (1550 °F) para muchos absorbentes. Al aumentar la razón Ca/S se incrementa la captura de azufre, pero es deseable minimizar la adición de calcio, ya que esto representa un costo mayor del absorbente, calor perdido a través de la calcinación y problemas con el aumento de los desechos.

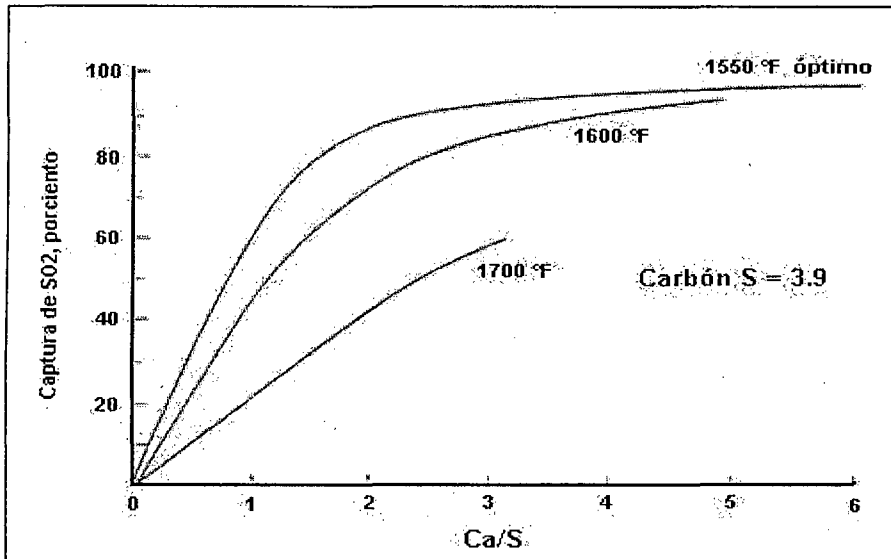


Figura 3.4: Efecto de la relación calcio-azufre sobre la captura del SO<sub>2</sub>.

Otras variables que pueden afectar la captura de azufre incluyen la profundidad del lecho y la velocidad del gas. Un lecho más profundo permite mayor tiempo de residencia del gas, lo que proporciona mayor tiempo de contacto con el absorbente y ayuda al incremento en la captura de azufre. Estas variables, además de la razón Ca/S, pueden ser equilibradas para alcanzar la eficiencia en la captura del azufre. En la figura (3.5) se presentan curvas calculadas que ilustran esta eficiencia. En esa figura se muestran dos curvas que resultan de la graficación de la eficiencia de eliminación de azufre contra la razón Ca/S. En la curva A, el comportamiento de una baja velocidad a través del lecho (4 ft/s), muestra la alta captura de azufre a una velocidad relativamente baja. La curva B indica que son necesarias altas razones Ca/S para capturar cantidades importantes de azufre con velocidades grandes en el lecho.

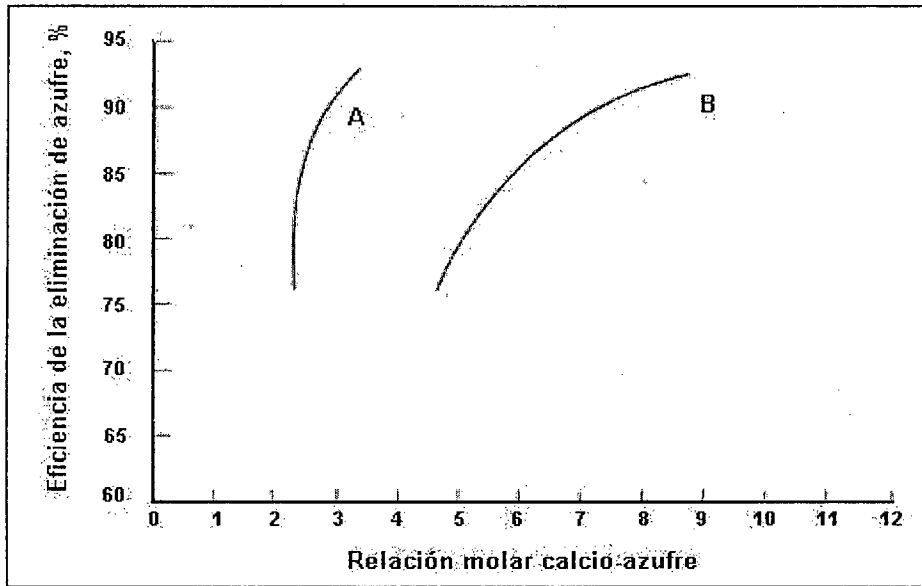


Figura 3.5: Eficiencia en la captura de azufre versus relación Ca/S.

### 3.1.4 Transferencia de calor.

Las velocidades de transferencia de calor hacia tubos inmersos en los sistemas FBC son mayores que los correspondientes a los quemadores de carbón pulverizado convencionales. Esta característica de los FBC permite una liberación de calor volumétrica relativamente alta, al igual que las velocidades de absorción, lo que da como resultado quemadores pequeños. La velocidad de transferencia de calor depende del tamaño de partícula del lecho como se muestra en la figura (3.6). Sin embargo, el tamaño de partícula es una variable dependiente en un diseño dado y no se cambia o se controla con prontitud. La distribución del tamaño de partículas en el lecho depende del tamaño del absorbente, del combustible alimentado, la velocidad de roce del absorbente, las velocidades de traslado de partículas y las propiedades de las



cenizas del combustible. La velocidad de transferencia de calor es casi independiente de la velocidad del gas en los sistemas FBC cuando la velocidad se encuentra por encima del punto de fluidificación mínima.

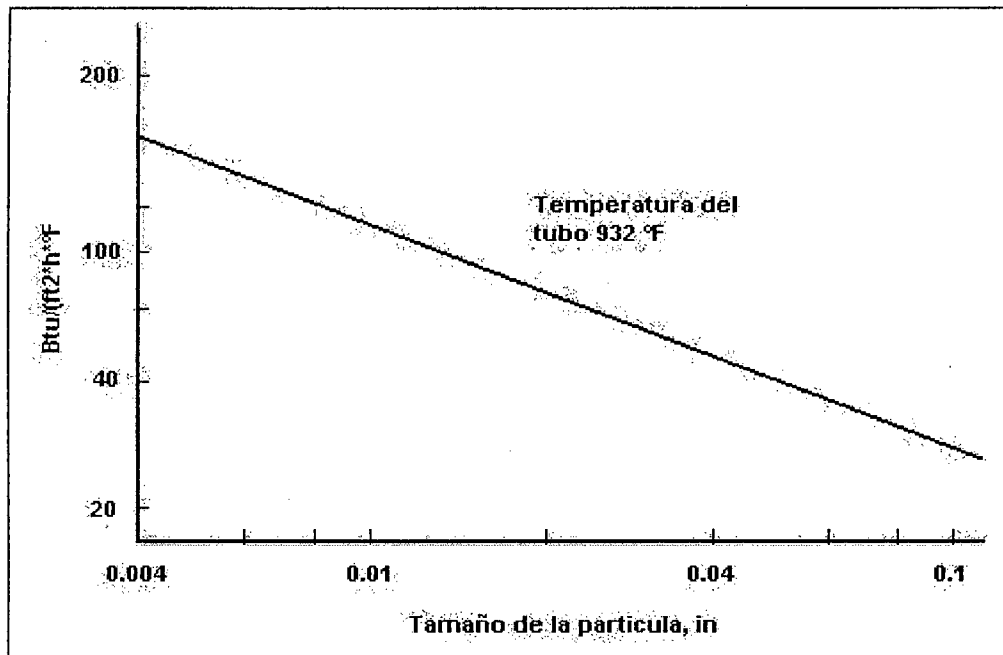


Figura 3.6: Efecto del tamaño de la partícula en la transferencia de calor del lecho al tubo.

### 3.1.5 Emisiones de óxido de nitrógeno

En el lecho de las calderas de lecho fluidizado circulante (FBC), la combustión ocurre a temperaturas relativamente bajas [760 a 930 °C (1400 a 1700 °F)], comparadas con las temperaturas más altas requeridas para las calderas que queman carbón pulverizado. Estas temperaturas bajas no permiten una oxidación significativa del nitrógeno atmosférico, de manera que el proceso AFBC se caracteriza por su baja emisión de  $\text{NO}_x$ . La formación de óxidos de nitrógeno en las AFBC se debe principalmente a la oxidación del

nitrógeno ligado al combustible. La reacción del monóxido de carbono y  $\text{NO}_x$  en la zona donde aparentemente no hay combustión reduce la emisión de  $\text{NO}_x$ . El contenido de nitrógeno en el combustible y el porcentaje de oxígeno en exceso son las dos variables principales que afectan la emisión de  $\text{NO}_x$ .

En la figura (3.7) se muestra que, cuando los sistemas AFBC se hacen mayores, el intervalo de emisiones de  $\text{NO}_x$  decrece. Cuando las capacidades se aproximan a las esperadas para su uso comercial (p. ej., mayor de 5 a 10 MW) el intervalo de emisiones de  $\text{NO}_x$  cae por abajo, incluso, de los niveles más estrictos establecidos para posibles emisiones estándar, al respecto, es importante indicar que la norma ambiental para el  $\text{NO}_2$  impone un límite de  $100 \text{ ug/m}^3$ , como promedio anual.

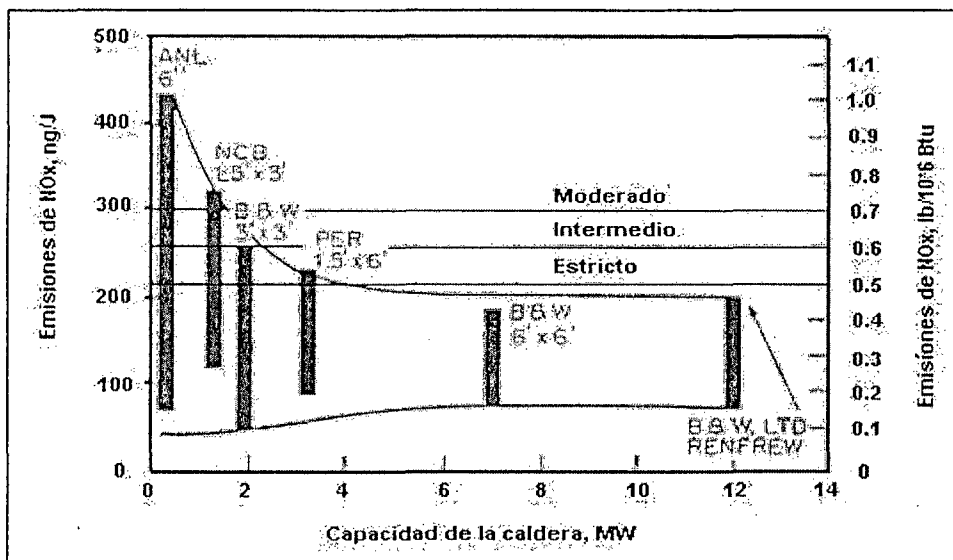


Figura 3.7: Emisiones de  $\text{NO}_x$ , en instalaciones FBC.

## 3.2 PROCESO DE COMBUSTIÓN

### 3.2.1 Introducción

Se entiende por combustión a toda reacción química que va acompañada de gran desprendimiento de calor; puede ser sumamente lenta, de tal manera que el fenómeno no vaya acompañado de una elevación de temperatura sensible a nuestros sentidos, como sucede en la oxidación del hierro en el aire húmedo, fenómeno conocido como **combustión lenta**, o con desprendimiento de calor muy rápido, como la oxidación de combustibles fósiles.

En toda combustión, el elemento que arde se denomina combustible y el que produce la combustión, comburente. Una combustión es la reacción del oxígeno con diversas sustancias, en general el carbono y el hidrógeno. En la mayoría de los casos el portador del oxígeno es el aire; el nitrógeno (salvo en la generación de los  $\text{NO}_x$ ) y los demás componentes del aire no reaccionan con el combustible, por lo que en muchos cálculos no se tienen en cuenta. Los productos reaccionantes son; el combustible, el aire, los productos de la combustión gaseosos denominados humos o gases de escape y las cenizas que pueden originarse formadas por componentes no combustibles o no quemados del combustible

La combustión se denomina completa o perfecta, cuando toda la parte combustible se ha oxidado al máximo. Si la combustión es incompleta o imperfecta, los productos de la combustión poseen sustancias todavía

capaces de ser oxidadas, por ejemplo el CO que puede pasar a CO<sub>2</sub>. La combustión incompleta aparece cuando el aire es insuficiente, o en aquellas zonas de las cámaras de combustión en las que el aire no llega en cantidad suficiente. En general se tiende a evitar las combustiones incompletas, ya que no sólo van ligadas a pérdidas de energía, sino también a procesos altamente contaminantes; el combustible que no ha reaccionado y los componentes combustibles de los humos, contienen una energía química que no se aprovecha, al tiempo que se generan elementos inquemados, y elementos contaminantes como: CO, NO<sub>x</sub>.

### **3.2.2 Balances de materia en combustión completa**

Los balances de materia a considerar en una combustión tienen como misión determinar la cantidad de oxígeno o aire necesario para efectuar dicha combustión. También tiene interés conocer la cantidad y composición de los productos de la combustión, ya que de la composición de los humos se puede deducir la marcha de la combustión y, con su análisis, se puede controlar la combustión, y si es perfecta o no.

Como es el aire que provee de oxígeno para la mayoría de las reacciones de combustión, y para calcular los balances de masas del proceso debemos conocer la composición química del aire. Así, en términos prácticos la composición volumétrica del aire seco es la siguiente:

**79% de N<sub>2</sub> y 21% de O<sub>2</sub>**

Lo que es equivalente a decir: **Moles de N<sub>2</sub> = 3.76 moles de O<sub>2</sub>**

### **3.2.3 Aire estequiométrico**

El aire estequiométrico corresponde al aire mínimo o teórico necesario para la combustión, es decir, el aire teóricamente indispensable para que todo el carbono, todo el hidrógeno y todo el azufre de un combustible se combinen con el oxígeno del aire.

### **3.2.4 Exceso de aire**

En todo proceso de combustión se debe proveer una cierta cantidad de aire adicional al necesario (estequiométrico) para la combustión completa. Lo anterior es en razón a que la reacción de todos los elementos combustibles es demasiado lenta o está atenuada por la presencia de una gran cantidad de gases inertes en el ambiente. La cantidad de aire de exceso a suministrar dependerá del tipo de combustible, su forma de combustión, tipo de hogar, tipo de quemador, turbulencia y temperatura del hogar. Para el caso de la caldera de lecho fluidizado circulante, los valores de exceso de aire utilizados son del orden de 15%, el cual se encuentra dentro de lo recomendado.

Un elevado exceso de aire es desfavorable porque disminuye la temperatura de combustión, arrastrando, además, un elevado número de calorías que se pierden por los humos, al tiempo que se provoca la aparición de los NO<sub>x</sub>.

**Tabla 3.1: Exceso de aire para diferentes tipos de combustibles**

Recomendaciones	
Sistema de Combustión	Exceso de Aire (%)
Carbón, Parrilla fija, manual	45 - 50
Carbón, Parrilla móvil, esparcimiento	30 - 45
Carbón Pulverizado	15 - 20
Madera en Pila c/40% humedad	35 - 40
Petróleo	15 - 18
Gas	10 - 12%

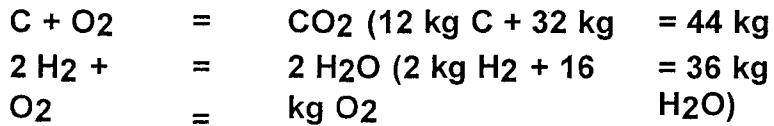
**Fuente: Empresa B & W**

### 3.2.3 Reacciones químicas de combustión

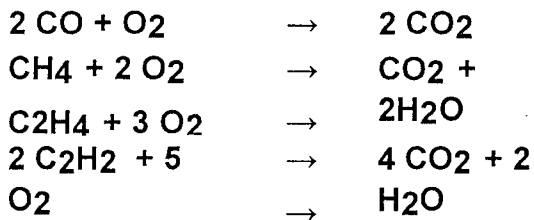
Los elementos combustibles de la mayoría de las sustancias combustibles son, el carbono, el hidrógeno y una pequeña cantidad de azufre. Los cálculos se realizan mediante algunas reacciones químicas de estas sustancias con el oxígeno, teniendo en cuenta que:

- a) El combustible es un único compuesto químico, (sustancia pura), o bien una mezcla de sustancias puras, (mezcla de gases combustibles).
- b) El combustible, si es un líquido o un sólido, (fuel, carbón, etc), es una mezcla de diversos compuestos cuya composición química se puede determinar.

En cualquier caso, los elementos combustibles son sólo el C, H y S y las reacciones de combustión se pueden reducir, cuando se trata de combustibles sólidos o líquidos, a las tres siguientes:



Los gases que se desprenden del combustible sólido son hidrocarburos ligeros CH<sub>4</sub> pesados C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> y en algunos casos el CO y el SO<sub>2</sub>, de forma que:



Si la combustión es incompleta algunos gases combustibles escapan sin arder, encontrándose en los humos gases como el CO y algunos hidrocarburos.

En general, el oxígeno debe ser abundante para que la combustión sea lo más completa posible, por lo que es necesario exista aire en exceso.

### 3.2.4 Características de los combustibles

Las principales características o propiedades de los combustibles son:

**La humedad:** Que es la cantidad de agua contenida en el combustible, expresada en % en peso; tiene especial importancia en los combustibles sólidos, ya que a mayor humedad menor Poder calorífico, y puede ser de dos tipos:

**Humedad Libre:** Representa el agua unida mecánicamente al combustible durante el proceso de lavado.

**Humedad Intrínseca;** Representa el agua contenida en el combustible, en equilibrio con la humedad ambiente.

**Las Cenizas:** Materias inertes, son el residuo sólido resultante de la combustión completa de un combustible. Conviene que su % sea bajo.

**Las Materias Volátiles:** Propias de un combustible sólido, está constituida por gases combustibles e incombustibles, a mayor contenido, mayor es el volumen de hogar requerido. En este porcentaje no se incluye la humedad del combustible.

**El Carbono Fijo:** Representa la materia combustible realmente contenida en el combustible, o porcentaje de residuo sólido una vez descontadas las cenizas.

**Temperatura de Inflamación:** La combustión es la reacción exotérmica de un combustible con el oxígeno del aire; para que tenga lugar no es suficiente que exista contacto entre el combustible y el comburente, sino que además se requiere una cierta temperatura mínima, que depende del tipo de combustible, y que recibe el nombre de temperatura de inflamación.



**Temperatura de Ignición:** La temperatura de ignición se distingue de la anterior en que la llama originada por la combustión de los vapores es duradera y persistente, mientras quede combustible.

### 3.2.5 Análisis de combustibles

Existen dos formas de efectuar un análisis, principalmente para combustibles sólidos

#### a. Análisis Inmediato:

La función primordial de este análisis es entregar en forma precisa la composición porcentual de ciertas propiedades características del combustible; para efectuar este análisis se toma una muestra de 1 gramo de combustible previamente tamizado y se somete a la siguiente secuencia de ensayo:

**% de Humedad:** Se determina mediante el secado de la muestra en un horno a una temperatura de 105 °C por un periodo de una hora. A través de la pérdida de peso se determina el contenido de humedad.

**% de Materia Volátil:** Se introduce el combustible en un horno a una temperatura de 950 °C por un periodo de 7 minutos, sin presencia de oxígeno. La pérdida de peso permite evaluar el contenido de humedad. Algunos de los elementos que componen esta materia son: H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O estructural, Hidrocarburos livianos (aceites) y pesados (alquitranes), etc. El contenido de volátiles es un indicador de la categoría del combustible, es decir, a menor % de materia volátil mayor es la calidad del combustible,

**% Carbón Fijo:** Se quema el combustible restante y descontando el contenido de cenizas en los residuos, por diferencia se obtiene el % de carbono fijo. Esto se realiza a una temperatura de 750°C durante 2 horas.

**% Ceniza:** Corresponde a los residuos de la combustión. Materias inertes incombustibles.

### **b. Análisis elemental**

Este análisis permite obtener en forma individual el contenido de cada elemento presente en el combustible. Entre estos elementos se tiene:

- % Carbono : % C Aporta calor.
- % Hidrógeno : % H<sub>2</sub> Aporta calor.
- % Azufre : % S Produce contaminación y
- % Oxígeno : % O<sub>2</sub> Favorece la
- % Nitrógeno : % N<sub>2</sub> combustión. Inerte.
- % Humedad : % H<sub>2</sub>O Reduce el poder calorífico.
- % Cenizas : % - Reduce el poder calorífico.

Para efectuar este análisis, el procedimiento es más complejo y se requiere un Cromatógrafo de gases. El resultado de estos análisis pueden ser presentados en tres formas distintas; esto es:

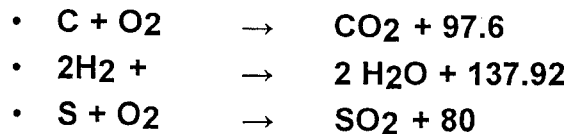
- Base seca : b.s.
- Base seca y sin ceniza : b.s.s.c
- Tal como viene o como se quema : b.s.q.

Además pueden expresarse como análisis volumétrico (en volumen) o gravimétrico (en peso), este último para los combustibles sólidos.

### 3.2.6 Poder calorífico

El poder calorífico se puede expresar como la cantidad de calor desprendida en la combustión completa de la unidad de combustible, 1 mol o 1 kg si es sólido o líquido, y 1 m<sup>3</sup> a 0° y 760 mm de Hg si es un combustible gaseoso. Mide la energía química presente en un combustible a través de su transformación en energía cinética molecular la que se manifiesta como un aumento de temperatura de los gases de reacción.

En la combustión completa se generan:



La potencia calorífica de un combustible se determina en un calorímetro; durante el experimento se observa que en las paredes del calorímetro se deposita agua que proviene de la condensación del vapor de agua producido en la combustión, que al condensar cede aproximadamente 600 kcal/kg; éste calor sumado al generado en la combustión recibe el nombre de **potencia calorífica superior**, que es el resultado proporcionado por el calorímetro. Si ese mismo combustible se quema en un hogar industrial, el vapor de agua existente en los humos no condensa debido a que la temperatura de éstos es siempre superior a 100°C; en estas circunstancias los combustibles no proporcionan las calorías que corresponden al valor obtenido en el calorímetro, sino

un valor inferior que recibe el nombre de **potencia calorífica inferior**, que no se aprovecha íntegramente, por cuanto los humos calientes se llevan parte del calor generado. De lo anterior podemos distinguir dos poderes caloríficos:

- Poder calorífico superior PCS: Es la energía que libera un combustible cuando se quema completamente y el vapor de agua presente en los gases de combustión alcanzan el punto de rocío o la condensación.
- Poder calorífico inferior PCI: Idem anterior, pero el vapor de agua presente en los gases sale en forma de vapor.

$$PCI = PCS - 600(x + 9H) \text{ (kcal/kg comb húmedo) } \dots\dots\dots (N^{\circ}1)$$

Con:

600: Calor latente de vaporización vapor de H<sub>2</sub>O kcal/kg

x : Contenido de humedad base húmeda del combustible  
(kg H<sub>2</sub>O/kg comb húmedo)

9H: kg de agua por kg de combustible húmedo que se forma de la combustión del hidrógeno del combustible.

### 3.2.7 Balance de combustión de un combustible sólido

El balance de la combustión busca determinar de forma teórica la cantidad de gases que se formaran al quemar 1 kg de combustible para un exceso de aire conocido, esta información es importante, ya que nos permite calcular la relación aire-combustible ( $R_{a/c}$ ), la cual indica de

forma directa la cantidad de aire necesario que se debe aportar para lograr una combustión completa dentro del hogar, y además nos permite controlar la temperatura que alcanzan los gases de combustión bajo condiciones reales de operación.

Para lo anterior, se describe un procedimiento práctico, en base a tablas de cálculo, para determinar el balance de combustión de un combustible sólido a partir del análisis gravimétrico:

**Tabla 3.2: Balance de combustión para combustible sólido, a partir del análisis gravimétrico.**

Combustible			Volumen	Oxígeno	Productos de la Combustión				Exceso
Elemento	%	PM	kmol / kg comb	O2 kmol / kg comb	CO2	SO2	H2O	N2	Aire
Carbono	C	12	$a1 = C/12*100$	a1	a1				
Hidrogeno	H2	2	$a2 = H2/2*100$	$a2 / 2$			a2		
Azufre	S	32	$a3 = S/32*100$	a3		a3			
Oxígeno	O2	32	$a4 = O2/32*100$	0					
Humedad	H2O	18	$a5 = H2O/18*100$				a5		
Nitrógeno	N2	28	$a6 = N2/28*100$					a6	
Aire									
O2				$\sum = a7$				a9	
N2				$a8 = 3.76 * a7$			a9		
H2O				a9					a10
Exceso (A)	%	15%		a10	$\sum = a11$	$\sum = a12$	$\sum = a13$	$\sum = a14$	$\sum = a15$
Total de Aire									

Fuente: Empresa B & W

La nomenclatura para cada término será descrita a continuación:

**C'** : % de carbono efectivamente quemado.

$$C' = C \left(1 - \frac{X}{100}\right) \dots\dots\dots (N^{\circ}2)$$

**X** : % de carbono no quemado.

**a7** : Cantidad de oxígeno necesaria para la combustión estequiométrica. (kmol/kg comb)

$$a_7 = a_1 + a_3 - a_4 \dots\dots\dots (N^{\circ}3)$$

**a8** : Cantidad de nitrógeno presente en el aire estequiométrico. (kmol/kg comb)

$$a_8 = 3.76 * a_7 \dots\dots\dots (N^{\circ}4)$$

**a9** : Vapor de agua presente en el aire para la combustión (kmol/kgcomb.)

$$a_{9} = (\Phi P_{s}) / (P_{atm} - \Phi P_{s}) (a_{7} + a_{8}) (1 + \lambda / 100) \dots\dots\dots (N^{\circ}5)$$

$\Phi$  = Humedad relativa del aire.

$P_s$  = Presión de saturación del vapor de agua a la temperatura del aire de combustión.

$\lambda$  = Porcentaje de exceso de aire.

**a10** : Cantidad de exceso de aire.

$$a_{10} = (a_8 + a_7) \cdot (\lambda) / 100 \dots\dots\dots (n^\circ 6)$$

Productos de la combustión Húmedos:  $a_{11} + a_{12} + a_{13} + a_{14} + a_{15}$   
(kmoles/kg comb)

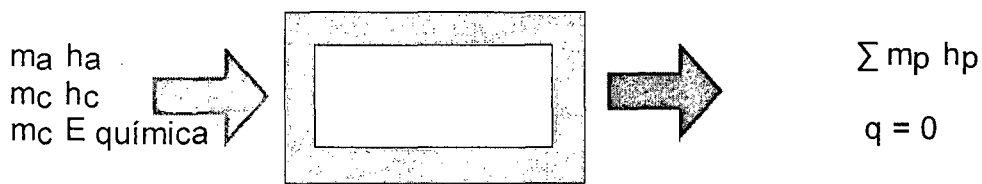
Productos de la combustión secos:  $a_{11} + a_{12} + a_{14} + a_{15}$  (kmoles/kg  
comb)

### **3.2.8 Energía disponible en los gases de combustión**

La energía disponible de los gases de la combustión, depende directamente de la composición elemental del combustible a utilizar, de la temperatura de combustión, de las características propias del proceso de combustión y de las condiciones atmosféricas reinantes en la zona. Para calcular dicha energía primero se debe conocer la temperatura adiabática de combustión y la real; lo anterior será descrito a continuación.

#### **a. Temperatura adiabática de la llama**

Temperatura adiabática de llama es la máxima temperatura que alcanzarían los productos de la combustión cuando un determinado combustible se quema completamente, en forma estequiométrica, en el interior de un sistema aislado térmicamente.



Donde:

$m_a h_a$  Energía total del aire a la entrada (kJ/s)

$m_c h_c$  Energía sensible total del combustible a la entrada (kJ/s)

$m_c E_{química}$  Energía química del combustible (kJ/s)...

$\sum m_p h_p$  Energía total de los productos de la combustión (kJ/s).

El balance de energía resultante será:

$$m_a h_s|_{tz} + m_c h_c|_{tc} + m_c E_q = \sum m_p h_p|_{tp} \dots\dots(N^{\circ}7)$$

Reactivos

Productos

Donde los productos de la combustión son:

$$\sum m_p h_p|_{tp} = m_{CO_2} h_{CO_2} + m_{H_2O} h_{H_2O} + m_{N_2} h_{N_2} + m_{SO_2} h_{SO_2} \dots\dots(N^{\circ}8)$$

**b. Temperatura real de los productos de la combustión**

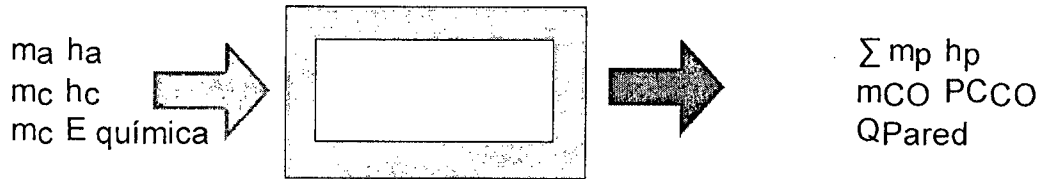
Representa la temperatura que alcanzan los productos de la combustión cuando un determinado combustible se quema bajo condiciones reales.

Las condiciones reales de combustión se explican a continuación:

- Exceso de aire.
- Posible formación de CO, combustión incompleta.
- % de combustible efectivamente quemado.



- Flujo de calor que pasa a o a través de las paredes de la cámara de combustión.



$$m_a h_a|_{ta} + m_c h_c|_{tc} + m_c PCI * \mu_c = \sum m_p h_p|_{tp} + m_{CO} P_{CCO} + Q_{Pared} \dots (N^{\circ}10)$$

Ahora se procede a dividir la ecuación de balance por la masa del combustible (mc):

$$R_{a/c} h_a|_{ta} + h_c|_{tc} + PCI * \mu_c = Q_{Pared} + a_{CO} P_{CCO} + a_{CO} h_{CO}|_{tp} + a_{O_2} h_{O_2}|_{tp} + a_{aire} h_{aire}|_{tp} + \sum a_p h_p|_{tp} \dots (N^{\circ}11)$$

Con:

$$\mu_c PCI = (PCI - x P_{CC}) \dots (N^{\circ}12)$$

La nomenclatura de la ecuación se presenta a continuación.

P<sub>CC</sub> = Poder calorífico del elemento carbono cuando pasa a CO<sub>2</sub>

P<sub>CC</sub> = 34,053 kJ/kg u 8,135 kcal/kg.

X = Porcentaje de carbón no quemado aCO

P<sub>CCO</sub> = Energía química del CO presente en los gases de combustión.

P<sub>CCO</sub> = 10,640 (kJ/kg CO) o 2542 (kcal/kg CO)

Q Pared / mc = Calor que pasa a través de las paredes de la cámara de combustión.

La temperatura “tp” se obtiene por iteración, ya que se conoce el primer miembro de la ecuación anterior, además de Q Pared/mc, a CO, a H2O, a CO2, a O2, a N2, a SO2, a aire, desde el balance de combustión.

Para obtener la entalpía de los gases resultantes de la combustión se utiliza la siguiente ecuación:

$$Entalpia = h(tp) = a + b \times t_p + c \times t_p^2 + d \times t_p^3 + e \times t_p^4 \left[ \frac{kcal}{kmol} \right]$$

.....(N°13)

Esta ecuación nos entrega una buena aproximación del valor real de entalpía para la temperatura de escape (tp) de los gases de combustión, donde: a, b, c, d y e son constantes para cada gas en particular, dichos valores serán entregados en la siguiente tabla:

**Tabla 3.3: Constantes para el polinomio de orden 4, representativo de la ecuación de entalpía.**

Calculo de entalpías a partir de un polinomio de orden 4					
Componente	a	b	c	d	E
co2	-46.01647	93.5854	0.003541	-1.10E-06	1.39E-10
h2o	19.58082	76.2083	0.001666	-1.06E-07	-1.62E-11
n2	32.08686	65.0829	0.001281	-3.55E-07	4.07E-11
so2	-21.25308	97.0249	0.003494	-1.38E-06	1.99E-10
Aire	11.9178	66.9155	0.001105	-2.79E-07	2.92E-11

Fuente: Empresa B & W

### 3.2.9 Función de Gibbs

Las tablas de propiedades termodinámicas tales como las tablas de vapor entregan valores para la entalpía y entropía de algunos datos de estado arbitrario donde la entalpía (o alternativamente la energía interna) y entropía se fijan desde cero. Cuando ocurre una reacción química, sin embargo, desaparecen los reactantes y se forman productos, y generalmente ya no es posible evaluar  $\Delta h$  ni  $\Delta s$  con lo que estos datos arbitrarios se cancelan.

#### a. Entalpía de formación

Un dato de entalpía para proceso de reactivos se puede establecer asignando arbitrariamente un valor de cero a la entalpía de los elementos estables como un estado de referencia estándar donde la temperatura será  $T_{ref} = 298,15K$  ( $25^{\circ}C$ ) y la presión  $P_{ref}$ , la cual podría ser 1 atm o 1 bar dependiendo de la fuente de datos. El término estable simplemente significa que el elemento particular es químicamente estable. Por ejemplo, en el estado estándar, las formas estables de Hidrógeno, oxígeno y nitrógeno son  $H_2$ ,  $O_2$  y  $N_2$ , y no las formas monoatómicas H, O y N, respectivamente.

La entalpía molar de un compuesto en el estado estándar equivale a su entalpía de formación, simbolizada aquí como  $h^{\circ}f$ . La entalpía de formación es la energía liberada o absorbida cuando se forma el compuesto a partir de estos elementos, estando el compuesto y los elementos a  $T_{ref}$  y  $P_{ref}$ . La entalpía de formación se podría determinar

por la aplicación de procedimientos de termodinámica estadística usando datos espectroscópicos, o también midiendo la transferencia de calor en una reacción en la cual el compuesto se forme desde los elementos estables a una temperatura y presión de referencia. El anexo D entrega los valores de entalpía de formación de varias sustancias a 298K y 1atm. La entalpía molar de una sustancia en un estado que no sea el estándar se logra agregando el cambio de entalpía molar  $\Delta h$  entre el estado estándar y el estado de interés a la entalpía de formación:

$$h(T, P) = h_f^o + [h(T, P) - h(T_{ref}, P_{ref})] = h_f^o + \Delta h \dots\dots (N^{\circ}14)$$

La entalpía de una sustancia está compuesta por  $h^o_f$ , asociada con la formación de la sustancia desde los elementos estables, y  $\Delta h$ , asociada con un cambio de estado a composición constante. Un dato escogido arbitrariamente puede usarse para determinar  $\Delta h$ , dado que es una diferencia a composición constante. De acuerdo a esto,  $\Delta h$  puede ser evaluada desde fuentes tales como las tablas de vapor o las tablas de gas ideal.

La entalpía de la combustión, es la diferencia entre la entalpía de los productos y la entalpía de los reactantes, cuando ocurre la combustión completa y ambos compuestos y reactantes están a la misma presión y temperatura. Para los combustibles hidrocarburos la entalpía de la combustión es de un valor negativo dado que la energía química interna es liberada en la reacción. El poder calorífico más alto se obtiene cuando toda el agua formada por la combustión está como líquido: el valor más

bajo se obtiene cuando la totalidad del agua formada por la combustión está como vapor. El valor calorífico más alto supera o excede al valor más bajo por la energía que se requeriría para vaporizar el agua líquida formada a una temperatura específica.

En ausencia de trabajo  $W$  y efectos de energía potencial y cinética apreciables, la energía liberada de la combustión se transfiere en dos formas: la energía acompañando la salida de los productos de la combustión y la transferencia de calor. La temperatura que se lograría por los productos en el límite de la operación adiabática es la llama adiabática o temperatura de combustión adiabática.

Para un combustible, temperatura y presión de los reactantes específica. La llama adiabática máxima es lograda por la combustión completa con la cantidad teórica de aire. El valor medido de la temperatura de los productos de la combustión podría ser varios cientos de grados por debajo de la temperatura máxima calculada para la llama adiabática, esto ocurre por varias razones, entre las cuales podemos destacar las siguientes: (1) la pérdida de calor se puede reducir pero no eliminar; (2) una vez que se ha entregado la cantidad adecuada de oxígeno para permitir la combustión completa, hacer entrar más aire diluye los productos de la combustión, bajando la temperatura; (3) la combustión incompleta tiende a reducir la temperatura de los productos; (4) como resultado de las altas temperaturas alcanzadas, algunos de los productos de la combustión se podrían disociar. Las reacciones endotérmicas de disociación también bajan la temperatura de los

productos.

## b. Entropía absoluta

Un dato común para asignar valores de entropía a sustancias involucradas en reacciones químicas se logra a través de la tercera ley de la termodinámica, la cual se basa en observaciones experimentales obtenidas primariamente de estudios de reacciones químicas a bajas temperaturas y mediciones específicas de calor a temperaturas cercanas al cero absoluto. La tercera ley establece que la entropía de una sustancia pura cristalina es cero a la temperatura de cero absoluto, 0 K. Las sustancias que no tengan una estructura pura y cristalina tienen un valor de entropía distinto al cero a temperatura de cero absoluto.

La tercera ley entrega datos relativos a los cuales la entropía de cada sustancia que participe de la reacción puede ser evaluada. La entropía relativa a este dato se llama la entropía absoluta. El cambio en la entropía de una sustancia entre el cero absoluto y cualquier otro estado dado se puede determinar de las mediciones de transferencia de energía y datos específicos de calor o de procedimientos basados en datos estadísticos termodinámicos y datos moleculares observados.

Cuando la entropía absoluta es conocida a presión  $P_{ref}$  y temperatura  $T$ , la entropía absoluta a la misma temperatura y a cualquier presión  $P$  se puede encontrar a partir de la siguiente expresión:

$$s(T, P) = s(T, P_{ref}) + [s(T, P) - s(T, P_{ref})] \dots\dots\dots (N^{\circ}15)$$

### c. Función de formación de Gibbs

Paralelamente siguiendo el acercamiento usado para la entalpía, se asigna un valor cero a la función de Gibbs de cada elemento estable a su estado estándar. La función de formación de Gibbs de un compuesto equivale al cambio en la función de Gibbs para la reacción en la cual el compuesto se forma de sus elementos estables. El anexo D entrega los datos de la función de formación de Gibbs para varias sustancias a 298K y 1atm.

La función de Gibbs en un estado distinto que el standard se encuentra agregando a la función de formación el cambio en la función de Gibbs específica  $\Delta g$  entre el estado estándar y el estado de interés.

$$g(T, P) = g_f^0 + [g(T, P) - g(T_{ref}, P_{ref})] = g_f^0 + \Delta g \dots\dots(n^{\circ}16)$$

Dónde:

$$\Delta g = [h(T, P) - h(T_{ref}, P_{ref})] - [T \cdot s(T, P) - T_{ref} \cdot s(T_{ref}, P_{ref})] \dots\dots$$

(N°17)

Mediante esta función es posible determinar las energías involucradas en el proceso de disociación que ocurre durante la combustión del carbón, la cual depende netamente de la temperatura y presión de la reacción química.

### 3.3. CONCEPTOS DE LA METODOLOGÍA

#### 3.3.1 Metodología Lean Six Sigma

Utiliza una metodología para disminuir el desperdicio a través de la reducción de la variación en los procesos.

La metodología de seis sigma "DMAIC", se apoya de herramientas estadísticas y administrativas para mejorar de una manera tangible los resultados de desempeño de los procesos y productos de una empresa.

#### 3.3.2 Ciclo Shewhard Demig

El programa Seis-Sigma (SS) está basado en el Ciclo Deming.

El Ciclo Deming es un procedimiento para el mejoramiento.

Es una guía lógica y racional de actuar, en una gran variedad de situaciones, con el único objetivo de resolver problemas.

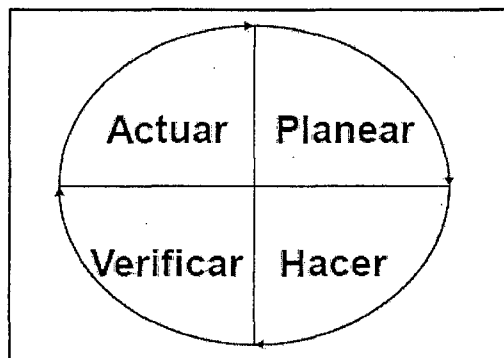


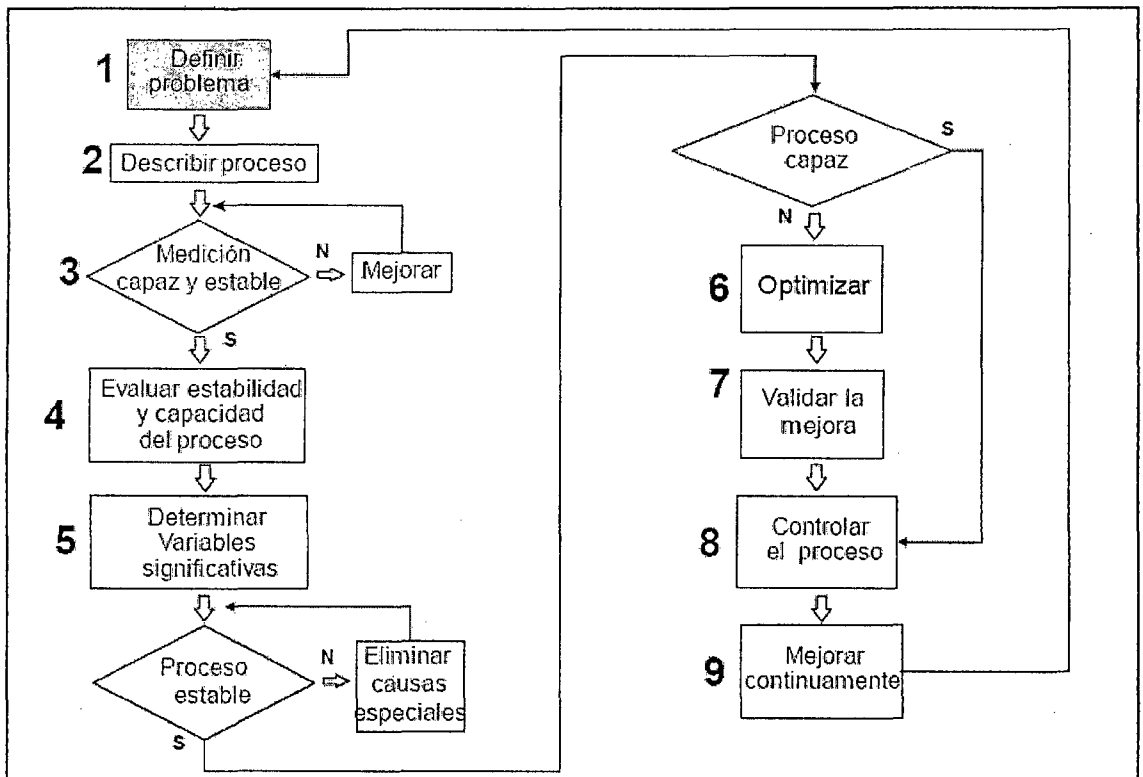
Figura 3.8: Ciclo Deming.

#### 3.3.3. Desarrollo de la metodología Six Sigma

El desarrollo de la metodología tiene que arrancar necesariamente con la formación de un equipo de trabajo clave involucrado en el proceso, el cual tiene que sustentar técnicamente y con índices económicos para lograr la



aprobación del proyecto de cualquier índole.



**Figura 3.9: Ciclo Deming – Enfoque lean Six Sigma.**

#### a. Definir

En esta primera etapa es donde se define con claridad el problema, para esto el equipo deberá contar con toda la información preliminar del proceso.

Las herramientas que se utilizan son las siguientes:

- Diagrama de Pareto,
- Histograma
- Grafica de tendencias

El entregable de este primer paso es identificar lo siguiente:

- Áreas de oportunidad.
- Situación actual del proceso.

- Objetivos.
- Alcance.
- Plan preliminar.

## **b. Medir**

Los objetivos de esta fase son:

**Describir un proceso.-** A un nivel detallado para comprender los puntos de decisión y la funcionalidad detallada en el proceso.

Las herramientas que se utilizan en esta fase son:

- Diagrama de flujo
- Diagrama SIPOC
- Diagrama cross functional
- Value stream map

**Definición de métricas.-** Para verificar el desempeño del proceso y estimar la línea base.

Herramientas recomendadas:

- OEE: Efectividad total de los equipos
- DPMO: Defectos por millón de oportunidades
- NIVEL SIGMA: Cuántas desviaciones del proceso caben dentro de los límites de especificación
- YIELD: Nivel de calidad

**Obtener datos.-** Del proceso para procesarlos en la fase de análisis

Las herramientas recomendadas son:

- Muestreo
- Hojas de recolección

**Evaluar el sistema de medición.-** Para cuantificar los errores asociados con la métrica.

Las herramientas que se utilizan en esta fase son:

- Estudios de R&R.
- Análisis de Linealidad y Análisis de Regresión.
- ANOVA.

### c. **Analizar**

El análisis en la metodología DMAIC representa la etapa contundente ya que es aquí en donde se reconocen las causas de los problemas, las principales fuentes de variación y se determina fundamentalmente, el camino a seguir en la fase de mejora.

Actividades principales:

**Analizar la capacidad del proceso:** Se llevan a cabo estudios de los datos generado en la etapa de medición, estableciendo las hipótesis iniciales.

**Establecer las variables significativas:** En esta etapa se confirman o desechan las hipótesis planteadas y nos permite afirmar cuáles son las variables que atacaremos en la fase de mejora.

#### **Análisis de fuentes de variación**

Los procesos arrojan datos para entender causas comunes de variación y causas especiales. En la fase de análisis utilizaremos herramientas

estadísticas para determinar las fuentes de variación que afectan las variables de salida de cualquier proceso.

Herramientas recomendadas:

- Estadística Básica
- Diagrama de pescado
- Arboles de realidad actual

### **Preguntas Clave**

¿Cuáles son las entradas significativas (X's) que afectan la salida (nuestra Y o CTQC)?

¿Cuáles son los niveles en los que estas entradas hacen que la salida se desempeñe mejor?

¿Cuáles son las fuentes esenciales de variación del proceso?

¿Los métodos alternos para mejorar el estado actual han sido validados estadísticamente para demostrar su efectividad?

¿Se han identificado y entendido las interacciones entre las X's identificadas?

### **d. Mejorar**

En esta fase se implementa y se concreta la mejora de la siguiente manera:

- Establecer nuevas condiciones en el proceso de operación
- Establecer los beneficios asociados con la solución propuesta son estimadas por el equipo y aprobado por el director.

- Se investigan y resuelven los modos de falla para el nuevo proceso.
- Mejoras son implementadas y verificadas.

### **Definiendo el Nuevo Proceso**

Las mejoras en el proceso deben concentrarse en el control de los factores que predicen resultados futuros.

Esto ayuda a prevenir problemas antes de que ocurran.

Tradicionalmente, la optimización implica encontrar la mejor combinación del nivel de los factores, para maximizar o minimizar la respuesta.

### **Evaluación de Beneficios de la Mejora**

No es raro en un equipo que para llegar a la etapa de Mejora pruebe con varios métodos de mejora de procesos. Estas técnicas de gran potencial deben ser evaluadas usando un objetivo, impulsado por los datos para aprovechar al máximo los métodos de “compra” de la solución y asegurar a las partes interesadas que recibirán lo más óptimo de su inversión sobre el proyecto.

La matriz de priorización puede ser utilizada para comparar las soluciones propuestas en contra de los criterios definidos como esenciales en la etapa de definición del proyecto.

Herramientas de análisis financiero son utilizadas para estimar el ahorro de costos asociados con las soluciones propuestas. Para cuantificar los valores financieros (y riesgo) asociados con una propuesta de solución, los costos variables deben ser diferenciados de los costos fijos. Los costos

variables y los beneficios dependerán del volumen, e incluyen elementos tales como materiales, mano de obra directa, y transporte.

Si los gastos fijos y variables y los beneficios son conocidos, la utilidad antes del cálculo de los intereses e impuestos (EBIT) provee potencialmente la rentabilidad de cada solución en particular. El beneficio de una solución es calculado como la diferencia entre EBIT actual y el EBIT futuro.

**EBIT = Volumen \* (precio por cada unidad - costo variable por cada unidad) - costo conversión.**

#### **e. Optimizar**

Para poder optimizar necesitamos venir de la etapa de análisis con las causas de variación y con las fuentes de variación.

Con esta información, podremos aportar soluciones utilizando herramientas de optimización.

Herramientas recomendadas

- Teoría de restricciones
- Eventos kaizen.
- Diseño de experimentos
- Regresión lineal

#### **f. Validar la mejora**

Los procesos arrojan datos para entender causas comunes de variación y causas especiales. En la fase de análisis utilizaremos herramientas

estadísticas para determinar las fuentes de variación que afectan las variables de salida de cualquier proceso. Herramientas recomendadas:

- OEE:
- Desempeño del proceso.

El desempeño del proceso puede ser evaluado con el nivel sigma alcanzado en la mejora, first pass yield, entregas a tiempo, etc.

#### **g. Controlar**

Los nuevos métodos deben ser estandarizados en la práctica. El impacto previsto de las mejoras, el proyecto debe ser verificado continuamente, y sobre todo el rendimiento financiero. Las lecciones aprendidas deben ser documentadas.

Las variaciones en el proceso deben de haber sido reducidas por medio del control de la variabilidad en una o más de las principales variables de entrada, o mediante la redefinición de los niveles más adecuados para estos parámetros.

Existen varias prácticas útiles para la estandarización de nuevos métodos en el proceso:

**El Control de procesos** se utiliza para vigilar las variaciones de la producción. Algunos métodos le asegurarán de que la variación se mantendrá estable por un control preciso de los parámetros de entrada.

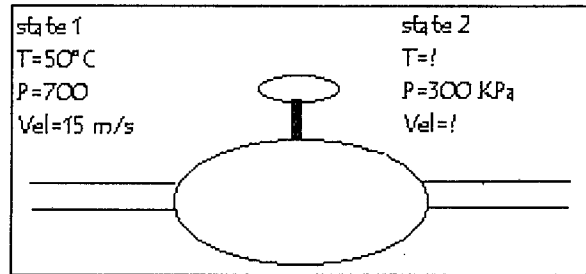
**Instrucciones de trabajo y diagramas de flujo** son importantes en el proceso para que el personal pueda comprender sus nuevas responsabilidades por lo cual deben integrarse en un programa de capacitación para el personal de producción.

#### **3.3.4. Programa computacional EES**

EES pronunciado 'ease' son las siglas de Resolutor de Ecuaciones de Ingeniería (Engineering Equations Solver). La función principal suministrada por EES es la solución de un grupo de ecuaciones algebraicas. EES también puede resolver la estructuración inicial de ecuaciones diferenciales, hace la optimización, suministra regresiones lineales y no lineales y genera la publicación de calidad de argumentos.

La finalidad de EES surgió de la experiencia en la enseñanza de termodinámica en ingeniería mecánica y de la transferencia de calor. Para aprender la materia de estos cursos, es necesario para el estudiante, el trabajar los problemas. De cualquier modo, la mayor parte del tiempo y el esfuerzo requeridos para la resolución de los problemas son debidos a la búsqueda de información sobre las propiedades y la resolución de las ecuaciones adecuadas.



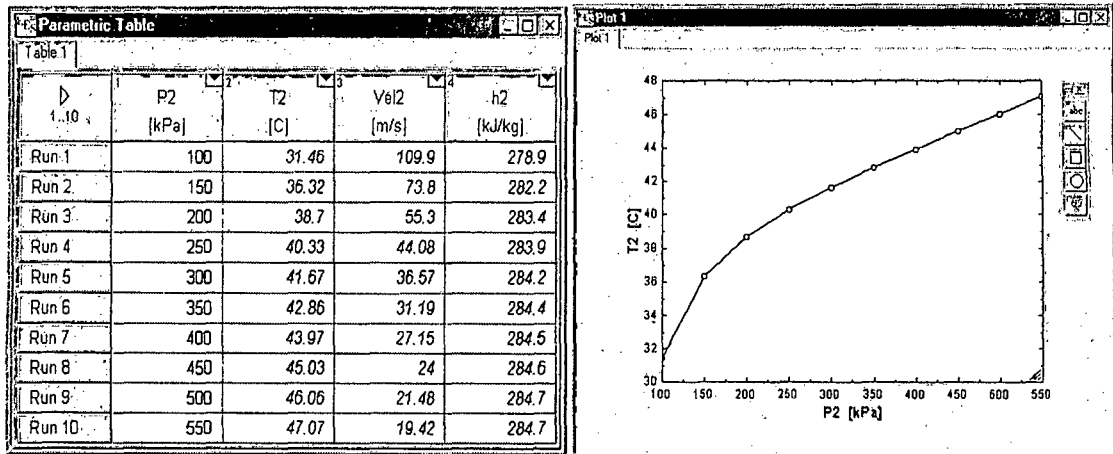


**Figura 3.10: Diagrama de control EES.**

Una vez que el estudiante se familiariza con el uso de las tablas de propiedades, el uso más adelantado de las tablas, no contribuye al dominio de la materia por el estudiante, tampoco lo hace el álgebra. El tiempo y el esfuerzo requeridos para resolver los problemas de la forma convencional disminuyen realmente el aprendizaje de la materia, porque el alumno se ve forzado a preocuparse por el orden en el que deben resolverse las ecuaciones (que realmente no importa) y hace los parámetros de estudio demasiado complicados. Interesantes problemas prácticos que pueden llevar las soluciones implícitas, como estas que abarcan las consideraciones de termodinámica y transferencia de calor, a menudo no son asignados debido a su complejidad matemática. EES permite al usuario concentrarse más en el diseño para librarte de los quehaceres mundanos.

EES es particularmente útil para diseñar problemas en los cuales los resultados de uno o más parámetros necesiten ser determinados. El programa proporciona esta capacidad con su tabla paramétrica, que es similar a una hoja de cálculo. El usuario identifica las variables independientes entrando con sus valores en las celdas de la tabla. EES

calculará los valores de las variables dependientes en la tabla. La relación de variables en la tabla puede ser desplegada en parcelas.



**Figura 3.11: Corrida en tabla y grafico del comportamiento de una variable en EES.**

Con EES, no es más difícil realizar el diseño de problemas que resolver un problema fijando un grupo de variables independientes.

EES ofrece las ventajas de un simple juego de órdenes que un principiante puede aprender a utilizar rápidamente para resolver cualquier problema algebraico. De cualquier modo, las posibilidades de este programa son muchas y más útiles también para cualquier experto. La gran cantidad de datos sobre propiedades termodinámicas y de transferencia que contiene EES son de gran ayuda en la resolución de problemas de Termodinámica, mecánica de fluidos y transferencia de calor. EES puede utilizarse para muchas aplicaciones ingenieriles; es muy conveniente para la formación, cursos de ingeniería mecánica y para el ingeniero con la necesidad de resolver problemas prácticos.

## CAPÍTULO IV: MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. MATERIALES Y HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS

#### 4.1.1. Sustancias

Para el estudio de este proyecto se evaluaron las siguientes sustancias:

- a. **Carbón antracita**, combustible primario para la caldera.
- b. **Medula de bagazo de caña**, combustible secundario para la caldera.
- c. **Petróleo**, combustible auxiliar que se utiliza solo en arranques de la caldera.
- d. **Aire**, proporcionado por los ventiladores en cantidades necesarias para lograr una combustión eficiente.
- e. **Materiales Inquemados**, material que no se logra quemar en el proceso de combustión y que se hace recircular para el control de la temperatura en el hogar.
- f. **Gases de combustión**, producto del proceso de combustión que aun contiene energía recuperable.

#### 4.1.2. Instrumentos

Los instrumentos utilizados para el análisis del proceso de combustión fueron los siguientes:

- a. Transmisores de presión.
- b. Transmisores de temperatura.
- c. Sensor de Oxígeno.
- d. Flujómetros.

- e. Analizador de gases.
- f. Balanzas dinámicas.

### 4.1.3. Software

El software utilizado para el estudio y simulación del proceso de combustión fue el EES ((Engineering Equations Solver) cuya descripción se encuentra en el capítulo 3.

## 4.2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

### 4.2.1. Definición del Problema

Se trabajó con el equipo multidisciplinario de la empresa y con toda la información preliminar del proceso para elaborar el siguiente diagrama de Pareto donde se muestran claramente todos los problemas más relevantes que se tienen hasta la actualidad.

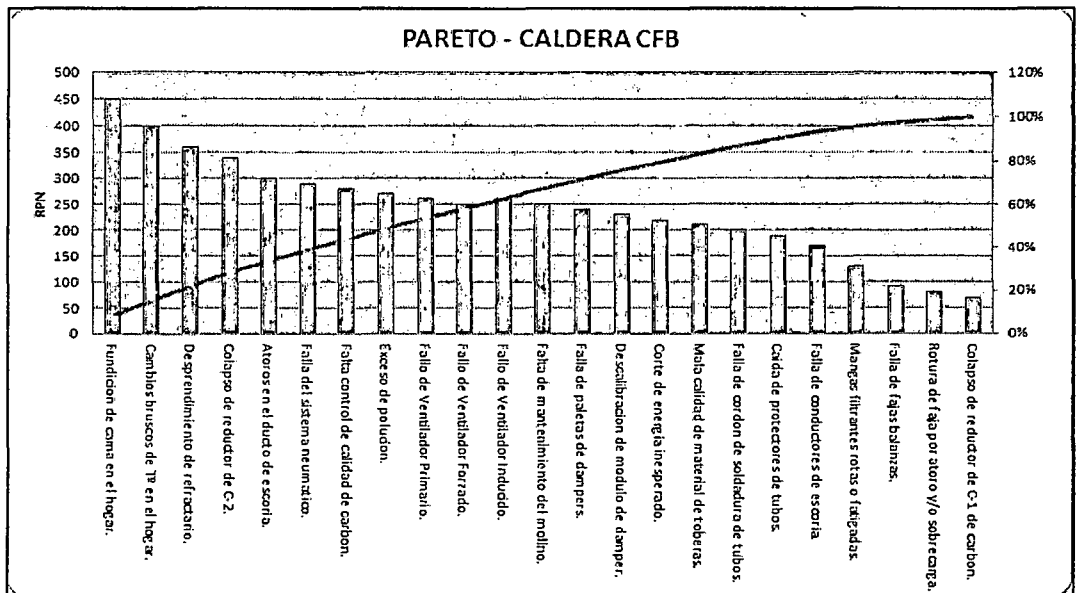


Figura 4.1: Diagrama de Pareto para la caldera cfb de Trupal SA – 2012.

Con esto identificamos claramente el problema enfocándonos básicamente en el 20% de todos los problemas que generan la baja eficiencia de la caldera y las paradas no programadas de la misma.

El 20% de esta lista representa en este caso 3 fallas potenciales con más alto número de probabilidad de riesgo que ocurra y que vienen ocurriendo (RPN)

1. Fundición de cama en el hogar.
2. Cambios bruscos de temperatura en el hogar.
3. Desprendimiento de refractario en el hogar.

Sobre estos problemas detectados se profundiza y se crea un plan de acción para darles solución, dentro de ese plan está el diagnóstico energético de la combustión ya que los problemas con RPN mas alto están relacionados directamente con este proceso y la variabilidad que presenta.

#### 4.2.2. Descripción del proceso

##### a. Diagrama del proceso de combustión:

Donde identificamos todas las variables que intervienen en el proceso de combustión tanto en la entrada y salida.

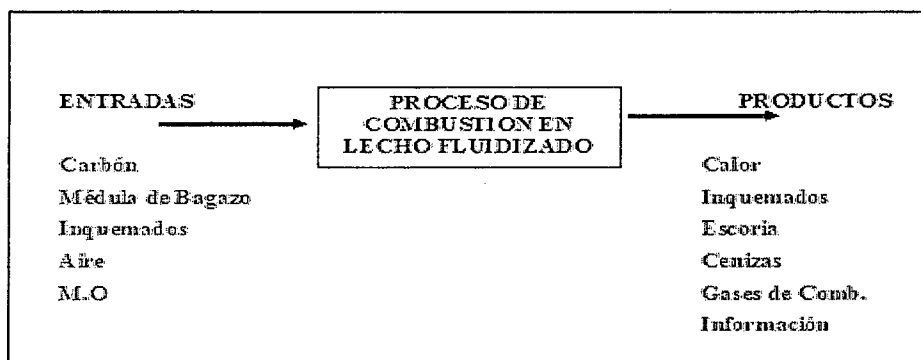


Figura 4.2: Diagrama del proceso de combustión para la caldera CFB.

**b. Definición de las entradas y los productos del proceso de combustión:**

**Variables de entrada:**

**Carbón:** Combustible definido por su composición: C, H, O<sub>2</sub>, S, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> y cenizas, la calidad y el flujo de este material influye en el sistema. (PCI ; ton/h).

**Médula:** Combustible definido por su composición: C, H, O<sub>2</sub>, S, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub> y cenizas, la calidad de este material influye en el sistema. (PCI ; ton/h).

**Inquemados:** Cantidad de carbón no quemado que retorna al proceso para el control de la temperatura en el hogar. ( ton/h).

**Aire:** Aportado por los trabajo de los ventiladores forzado, primario e inducido. (m<sup>3</sup>/h).

**Mano de Obra:** Operador que regula de forma manual la combustión en base a procedimientos o criterio propio.

**Variables de salida:**

**Calor:** Energía generada como producto del proceso de combustión, parte de esta energía es aprovechada como calor útil y la otra parte es parte es perdida en los gases de escape. (T°hogar, Calor útil, T°gases) .

**Escoria:** Residuos de la combustión (cenizas) + Inquemados. (tn/h).

**Cenizas:** Residuos de la combustión (cenizas) + Inquemados. (tn/h).

**Información de los productos:** Es lo que el operador necesita para controlar y regular las entradas.

**c. Definición de métricas para la evaluación del proceso de combustión.**

Las métricas más importantes para evaluar el proceso de combustión y para la investigación son las siguientes:

- Rendimiento de la Caldera.
- Rendimiento de la Combustión.
- Ratio de Generación de Vapor.
- Ahorro Energético.
- Ahorro Económico.

**4.2.3. Análisis del Proceso mediante Diagnostico energético.**

**a. Condiciones de Diseño de la caldera**

La ficha técnica de diseño se muestra en la tabla 4.1.

**Tabla 4.1: Análisis inmediato y elemental del combustible de diseño.**

CARBON ANTRACITA		MEDULA DE BAGAZO		MEDULA + CARBON	
Análisis Inmediato		Análisis Inmediato		Poder Calorico Inferior	
Elemento	%	Elemento	%	18,286 kJ/kg	
Carbono	78.68	Carbono	5.79		
Materia Volatil	7.3	Materia Volatil	41.72	Análisis Elemental	
Humedad	5.76	Humedad	51	Elemento	%
Ceniza	8.26	Ceniza	1.49	Carbono	53.58
Total	100	Total	100	Hidrógeno	2.05
				Azufre	0.28
Poder Calorico Inferior		Poder Calorico Inferior		Nitrogeno	0.34
6,902 Cal/g		1,772 Cal/g		Oxigeno	10.68
				Cloro	0.08
Análisis Elemental		Análisis Elemental		humedad	28.06
Elemento	%	Elemento	%	Ceniza	4.93
Carbono	82.14	Carbono	24.21	Total	100
Hidrógeno	1.22	Hidrógeno	2.90		
Azufre	0.54	Azufre	0.02		
Nitrogeno	0.57	Nitrogeno	0.11		
Oxigeno	1.47	Oxigeno	20.15		
Cloro	0.04	Cloro	0.12		
humedad	5.76	humedad	51.00		
Ceniza	8.26	Ceniza	1.49		
Total	100	Total	100		

**Fuente: Libro de especificaciones técnicas – Caldera CFB TRUPAL**

Los datos nominales de operación se representan en la tabla n° 4.2 en la cual se describen los distintos estados del ciclo y sus correspondientes propiedades termodinámicas. Para comprender las etapas del ciclo de vapor de la planta es necesario ver el diagrama de flujo de procesos, el cual se encuentra detallado en el anexo A.



**Tabla 4.2: Datos de nominales del ciclo térmico de Trupa**

ETAPA	ESTADO	TEMPERATURA °C	PRESION bar	FLUJO Tn/h	ENTALPIA kJ/kg
1	VAPOR SC	490	70	130	3,372
2	VAPOR SC	375	42	130	3,149
3	VAPOR HUMEDO	60	0.064	50	2,101
4	VAPOR SAT.	260	10.54	33	2,384
5	VAPOR SAT..	180	10.54	38	2,235
6	CONDENSADO	63.2	0.064	27	194
7	CONDENSADO	65	2.24	27	199
8	CONDENSADO	114	1.12	50	134
9	CONDENSADO	115.9	1.12	50	136
10	LIQUIDO	40	120	18	62.8
11	LIQUIDO	104	0.06	149	436
12	LIQUIDO	106.2	85	149	438.2
13	LIQUIDO	106.2	24	9	443.3
14	SOLIDO	25	X	12.7	X
15	SOLIDO	25	X	12.7	X
16	LIQUIDO	X	X	3	X
17	VAPOR SAT	279	74	130	2,783
18	VAPOR SAT	279	74	7	2,783
19	VAPOR HUMEDO	170	6.2	5	2,134
20	VAPOR HUMEDO	200	7.6	138	2,278
21	LIQUIDO	29	0.06	X	X
22	LIQUIDO	39	2.1	X	X
23	LIQUIDO	37.6	118.2	20	324

**Fuente: Empresa en estudio.**

También daremos a conocer las especificaciones técnicas de la caldera CFB para cada régimen de carga con la que se puede operar según los requerimientos de la turbina y/o procesos.

**Tabla 4.3: Especificaciones técnicas de la caldera CFB-TRUPAL (Diseño)**

ESPECIFICACIONES TECNICAS	DISEÑO				
	30%	50%	60%	80%	100%
Generacion de vapor (tn/h)	39	65	78	104	130
Temperatura de Vapor Sobrecalentado (°C)	460	470	480	485	490
Presion de Vapor Sobrecalentado (MPa)	6.2	6.5	6.6	6.7	6.86
Consumo de combustible (carbon + medula)(tn/h)	-	12.9	14.5	19.4	23.76
Consumo de combustible (solo carbon)(tn/h)	6	8.44	9.3	12.27	15.84
Ratio de Calcio / Azufre	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
Consumo de piedra caliza (tn/h)	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
Exceso de Aire (%)	26	24	22	21	20
Flujo de Agua a atemperador (tn/h)	2.4	3.6	4.75	5.3	5.96
Temperatura del lecho (°C)	860	860	860	860	860
Temperatura en el area de sobrecalentamiento (°C)	950	950	950	950	950
Temperatura de gases de escape (°C)	130	136	140	144	148
Temperatura de Agua de Alimentacion (°C)	104	104	104	104	104
Flujo de Gases de combustion (Nm3/h)	53,199	88,666	106,399	141,865	177,331
Flujo de Aire Total (Nm3/h)	44,163	73,605	88,326	117,768	147,210
Flujo de Aire Primario (Nm3/h)	22,082	36,803	44,163	58,884	73,605
Flujo de Aire Secundario (Nm3/h)	13,249	22,082	26,498	35,330	44,163
Flujo de Aire Terciario (Nm3/h)	8,833	14,721	17,665	23,554	29,442
Temperatura de aire Primario (°C)	200	200	205	205	210
Poder Calorico (carbon + medula) (kJ/kg)	18,286	18,286	18,286	18,286	18,286
Poder Calorico (solo carbon) (kJ/kg)	28,850	28,850	28,850	28,850	28,850
Eficiencia (carbon + medula) (%)	-	78.44	85.43	86.32	88.35
Eficiencia (carbón) (%)	69.75	78.2	85	86.1	88
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) (mg/Nm <sup>3</sup> )	801.2	801.2	801.2	801.2	801.2
Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> ) (mg/Nm <sup>3</sup> )	250	250	250	250	250
Particulado (mg/Nm <sup>3</sup> )	<50	<50	<50	<50	<50

**Fuente: Libro de especificaciones técnicas – Caldera CFB TRUPAL**

**b. Condiciones reales de la Combustión.**

Actualmente la caldera CFB produce 80 ton/h de vapor SC que representa el 62% de su capacidad utilizando como combustible carbón antracita + medula de bagazo sin el uso de piedra caliza.

Para evaluar el proceso de combustión de la caldera de lecho fluidizado circulante se debe realizar un balance teórico utilizando las condiciones de reales del equipo, por lo que será necesario recurrir a la información definida en el capítulo 4, (tabla 4.1: Análisis inmediato y elemental del combustible actual).

Se debe considerar que dicha tabla se encuentra representada tal como se quema (c.s.q.), por lo cual es necesario efectuar una mínima modificación para que esta quede representada en (c.s.q.) sin cenizas.

**Tabla 4.3: Análisis elemental del combustible mixto sin cenizas.**

Combustible	
Carbon + Medula	
Elemento	%
Carbono	63.58%
Hidrogeno	2.32%
Azufre	0.73%
Oxigeno	9.42%
Humedad	23.78%
Nitrógeno	0.17%

**Fuente: Elaboración propia**

Además se debe señalar que para realizar el balance nominal de combustión se consideraran los siguientes parámetros:

-Temperatura de aire atmosférico: 10°C

- Humedad relativa: 70%
- Porcentaje de carbón no quemado: 5%
- Exceso de aire: 25%

Luego de considerar los parámetros anteriores, se procederá a utilizar la metodología representada en el capítulo 3: Balance de un combustible sólido. De esta manera los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.4

**Tabla 4.4: Balance real del combustible.**

Combustible			Volumen	Oxígeno
Elemento	%	P.M.	kmol / kg comb	O2 kmol / kg comb
Carbono	63.58%	12	0.050645	0.0506
Hidrogeno	2.32%	2	0.011615	0.0058
Azufre	0.73%	32	0.000228	0.0002
Oxígeno	9.42%	32	0.002944	-0.0029
Humedad	23.78%	18	0.013212	
Nitrógeno	0.17%	28	0.000060	
Aire				
O2				0.0537
N2				0.2020
H2O				0.00274
Exceso ( $\lambda$ )		25%		0.0639
Total de Aire				
			0.322	kmol / kg comb
			9.351	kg aire / kg comb

**Fuente: Elaboración propia**

De los cálculos realizados se observa que la cantidad de aire necesario para la combustión de un kilogramo de combustible (según valores reales determinados) es:

$$\text{Total\_aire} = 0.322 \text{ kmol/kg comb} \quad \text{ó} \quad \text{Total\_aire} = 9.351 \text{ kg aire/kg comb}$$

De la misma manera podemos deducir la composición de los gases generados en el proceso de combustión, los cuales se detallan en la tabla:

**Tabla 4.5: Composición de los gases de combustión.**

Productos de la Combustión				
				Exceso
CO2	SO2	H2O	N2	Aire
0.05064				
		0.01162		
	0.00023			
		0.01321		
			0.0001	
			0.202	
		0.0027		
				0.0639
0.05064461	0.00022808	0.02756278	0.202108	0.06394586

**Fuente: Elaboración propia**

Productos húmedos de la combustión : 0.34449 kmol/kg comb.

Productos secos de la combustión : 0.31693 kmol/kg comb.

**Tabla 4.6: Composición total de los gases de combustión.**

Gases de Combustión	PM	kmol / kg comb.	kg / kg comb.
CO <sub>2</sub>	44	0.0506	2.2284
H <sub>2</sub> O	18	0.0276	0.4961
N <sub>2</sub>	28	0.2021	5.6590
SO <sub>2</sub>	64	0.0002	0.0146
Aire	29	0.0639	1.8544

**Fuente: Elaboración propia**

A partir del análisis gravimétrico del combustible sin cenizas (aCarbón, aHidrogeno, aAzufre, aOxigeno, aAgua, aNitrógeno.) obtenemos los valores para las variables a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub>, a<sub>4</sub>, a<sub>5</sub>, a<sub>6</sub> con las siguientes expresiones: (c<sub>2</sub> representa el carbón no quemado)

Carbón real utilizado:  $c_1 = a_{\text{carbón}} * \left(1 - \frac{c_2}{100}\right)$ ,

donde c<sub>2</sub>=carbón no quemado.

Carbón:  $a_1 = \frac{c_1}{100 * PM_{\text{carbón}}} = 0.05033 \text{ [kmol/kg}_{\text{combustible}}]$

Hidrogeno:  $a_2 = \frac{a_{\text{hidrogeno}}}{100 * PM_{\text{hidrogeno}}} = 0.01162 \text{ [kmol/kg}_{\text{combustible}}]$

Azufre:  $a_3 = \frac{a_{\text{azufre}}}{100 * PM_{\text{azufre}}} = 0.00002281 \text{ [kmol/kg}_{\text{combustible}}]$

Oxigeno:  $a_4 = \frac{a_{\text{oxigeno}}}{100 * PM_{\text{oxigeno}}} = 0.002944 \text{ [kmol/kg}_{\text{combustible}}]$

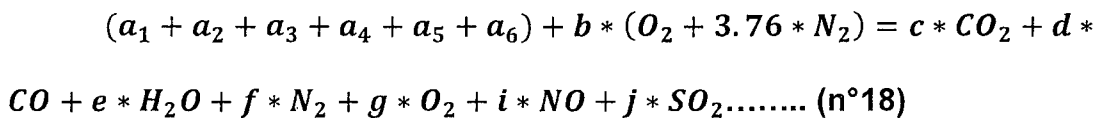
$$\text{Agua: } a_5 = \frac{a_{\text{agua}}}{100 * PM_{\text{agua}}} = 0.01321 \text{ [kmol/kg}_{\text{combustible}}\text{]}$$

$$\text{Hidrogeno: } a_6 = \frac{a_{\text{nitrogeno}}}{100 * PM_{\text{nitrogeno}}} = 0.00006018 \text{ [kmol/kg}_{\text{combustible}}\text{]}$$

Las variables calculadas representan los moles de cada elemento por kg de combustible, conocidos estos datos, se proseguirá con los sistemas de ecuaciones para balancear la ecuación química n°1.

### c. Reacción de combustión

Ecuación química para la reacción de combustión.



Sistema de ecuaciones:

$$\text{Balance de carbono: } a_1 - c - d = 0 \dots \dots \dots \text{ (N°19)}$$

$$\text{Balance de Hidrogeno: } a_2 - e = 0 \dots \dots \dots \text{ (N°20)}$$

$$\text{Balance de Azufre: } a_3 - j = 0 \dots \dots \dots \text{ (N°21)}$$

$$\text{Balance de Oxigeno: } a_4 + b - c - \frac{d}{2} - \frac{e}{2} - g - \frac{i}{2} - j = 0 \dots \dots \dots \text{ (N°22)}$$

$$\text{Balance de Nitrógeno: } a_6 + 3.76 * b - f - \frac{i}{2} = 0 \dots \dots \dots \text{ (N°23)}$$

$$\text{Humedad total: } w_{\text{total}} = a_2 + a_5 + a_7 \dots \dots \dots \text{ (N°24)}$$

$$\text{Oxigeno estequiometrico: } a_{\text{stoic}} = a_1 + \frac{a_2}{2} + a_3 - a_4 \dots \dots \dots \text{ (N°25)}$$

Oxígeno total considerando 25% de exceso de aire:

$$b = a_{stoic} * \left[ 1 + \frac{e_{aire}}{100} \right] \dots \dots \dots (N^{\circ}26)$$

Para completar estos balances químicos se deben fijar las condiciones ambientales necesarias para conocer las propiedades de estado del aire, las cuales se fijan a continuación:

Temperatura del aire ambiente:  $T_1 = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Presión atmosférica:  $P_{atm} = 101 \text{ kPa}$

Humedad relativa:  $\phi = 70 \%$

Fijados los datos concernientes al aire se procede a calcular su presión de saturación, la cual está definida por la siguiente expresión matemática. Y nos permite calcular la cantidad de vapor de agua ( $a_7$ ) que contiene el aire húmedo a la presión, temperatura y humedad relativa del aire fijadas anteriormente:

$$P_{sat} = \frac{1.05738 * 10^8 * e^{\left[ -\left( \frac{3928.5}{T_1 + 231.667} \right) \right]}}{51.699226} * 6.98 = 1.228 [\text{kPa}]$$

$$a_7 = \left[ \left( \frac{\frac{\phi}{100} * P_{sat}}{P_{atm} - \frac{\phi}{100} * P_{sat}} \right) * 4.76 * a_{stoic} \right] * \left[ 1 + \frac{e_{Aire}}{100} \right] = 0.002728 [\text{kmol}]$$

Con todos los datos antes mencionados, se realiza el desarrollo del sistema de ecuaciones para determinar la cantidad de productos de la combustión, tomando en cuenta todos los reactivos involucrados en dicho proceso. Los productos totales considerando sólidos y gases serán



mencionados a continuación:

Cantidades totales de los gases de combustión:

Total de  $CO_2$ :  $T_{CO_2} = c$

$$T_{CO_2} = 0.05033 \text{ kmol/kg}$$

Total de  $CO$ :  $T_{CO} = d$

$$T_{CO} = 0.000003931 \text{ kmol/kg}$$

Total de  $H_2O$ :  $T_{H_2O} = W_{total}$

$$T_{H_2O} = 0.02756 \text{ kmol/kg}$$

Total de  $N_2$ :  $T_{N_2} = f$

$$T_{N_2} = 0.2511 \text{ kmol/kg}$$

Total de  $O_2$ :  $T_{O_2} = b$

$$T_{O_2} = 0.06678 \text{ kmol/kg}$$

Total de  $NO$ :  $T_{NO} = i$

$$T_{NO} = 0.0000249 \text{ kmol/kg}$$

**d. Balance energético de la combustión.**

El balance energético de combustión para este caso en particular queda definido por la siguiente expresión:

Energía reactivos = Energía de los productos + calor útil

Para realizar dicho balance se debe tener en cuenta las siguientes variables que intervienen en el proceso:

Poder calorífico inferior del combustible (carbón + medula):

$$P_{ci} = 19,374 \text{ [kJ/kg]}$$

Poder calorífico del elemento carbono cuando pasa a CO<sub>2</sub>:

$$P_{Cc} = 34,053 \text{ [kJ/kg]}$$

Poder calórico real:

$$PCI = P_{ci} - \frac{c_2}{100} * P_{Cc}$$

$$PCI = 17,672 \text{ [kJ/kg]}$$

Entalpia del aire a T=10°C:

$$h_a = 2919 \text{ [kJ/kmol]}$$

Temperatura del combustible:

$$T_{comb} = 299 \text{ [K]}$$

Calor específico del combustible:

$$C_c = 1.26 \text{ [kJ/kgK]}$$

Entalpia del combustible:

$$h_{comb} = 376.7 \text{ [kJ/kg]}$$

Relación aire/combustible:

$$R_{Aire/comb} = a_{stoic} PM_{O_2} + 3.76 a_{stoic} PM_{N_2} + a_7 PM_{H_2O} + 4.76 a_{stoic} \frac{e_{Aire}}{100} PM_{aire}$$

$$R_{Aire/comb} = 9.3[kg_{aire}/kg_{comb}]$$

Ya definido los datos se procede a calcular los terminos de la ecuacion.

La energia de los reactivos esta dado por la siguiente formula:

$$E_{reactivos} = \frac{R_{aire/comb}}{PM_{Aire}} h_a + h_{comb} + PCI$$

$$E_{reactivos} = 18,978[kJ/kg]$$

Para la energía de los productos, se tienen las cantidades de cada gas en la corriente de gases y además su temperatura de salida de la chimenea ( $t=190^{\circ}C$ ) por ende solo queda calcular las entalpias correspondientes a cada una de ellas. La expresión que define la entalpia de cada uno de los gases de combustión se describe a continuación:

$$E_{Productos} = E_{CO_2} + E_{CO} + E_{N_2} + E_{O_2} + E_{NO} + E_{H_2O} + E_{reacCO}$$

$$E_{CO_2} = T_{CO_2} * h_{CO_2}[t = 190] = 759.1 [kJ/kg]$$

$$E_{CO} = T_{CO} * h_{CO}[t = 190] = 0.0437 [kJ/kg]$$

$$E_{N_2} = T_{N_2} * h_{N_2}[t = 190] = 2,786 [kJ/kg]$$

$$E_{O_2} = T_{O_2} * h_{O_2}[t = 190] = 759 [kJ/kg]$$

$$E_{NO} = T_{NO} * h_{NO}[t = 190] = 0.2831 [kJ/kg]$$

$$E_{H_2O} = T_{H_2O} * h_{H_2O}[t = 190] = 356.3 [kJ/kg]$$

$$E_{reaccO} = T_{CO} * 10640 * PM_{CO} = 2.343 [kJ/kg]$$

Definidos los valores para cada variable calculamos la energía total de los productos de la combustión. Entonces:

$$E_{Productos} = 4,373 [kJ/kg]$$

Conocido este valor se puede afirmar que el calor entregado al sistema para la generación de vapor es el siguiente:

$$E_{reactivos} = Calor + E_{Productos}$$

$$Calor = E_{reactivos} - E_{Productos}$$

$$Calor = 14,310 [kJ/kg]$$

#### e. Determinación de la eficiencia

De igual forma podemos calcular los rendimientos de la caldera y de combustión de este proceso mediante las siguientes expresiones matemáticas:

Rendimiento de la caldera:

$$u_{caldera} = \frac{Calor}{E_{reactivos}} \times 100 = 75.41\%$$

Rendimiento de la combustión:

$$u_{combustion} = \left[ \frac{P_{ci} - c_2 \frac{P_{Cc}}{100}}{P_{ci}} \right] \times 100 = 91.87\%$$

Después de determinar las variables y la eficiencia de la caldera en base de cálculo estequiométrico y balances de energía tenemos el siguiente cuadro resumen de la situación actual de la caldera TSXG:

**Tabla 4.7: Especificaciones técnicas de la caldera CFB-TRUPAL (Actual)**

ESPECIFICACIONES TECNICAS	DISEÑO 60% Carga	SITUACION ACTUAL
Generacion de vapor (tn/h)	78	80
Temperatura de Vapor Sobrecalentado (°C)	480	470
Presion de Vapor Sobrecalentado (MPa)	6.6	6.7
Consumo de combustible (carbon + medula)(tn/h)	14.5	20.30
Consumo de combustible (solo carbon)(tn/h)	9.9	15.71
Ratio de Calcio / Azufre	2.5	-
Consumo de piedra caliza (tn/h)	0.54	-
Exceso de Aire (%)	22	10
Flujo de Agua a atemperador (tn/h)	4.75	2.3
Temperatura del lecho (°C)	860	990
Temperatura en el area de sobrecalentamiento (°C)	950	990
Temperatura de gases de escape (°C)	140	180
Temperatura de Agua de Alimentacion (°C)	104	102
Relacion aire/ combustible	9.11	8.31
Flujo de Gases de combustion (Nm3/h)	106,399	-
Flujo de Aire Total (Nm3/h)	88,326	77,499
Flujo de Aire Primario (Nm3/h)	44,163	41,143
Flujo de Aire Secundario (Nm3/h)	26,498	17,081
Flujo de Aire Terciario (Nm3/h)	17,665	19,275
Temperatura de aire Primario (°C)	205	121
Poder Calorico (carbon + medula) (kj/kg)	18,286	19,374
Poder Calorico (solo carbon) (kj/kg)	28,850	21,541
Eficiencia (carbon + medula) (%)	86.13	73.96
Eficiencia (carbón) (%)	86	73
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) (mg/Nm <sup>3</sup> )	801.2	-
Óxidos de Nitrógeno (NO <sub>x</sub> ) (mg/Nm <sup>3</sup> )	250	-
Particulado (mg/Nm <sup>3</sup> )	< 50	-

**Fuente: Elaboración propia**

**f. Gases producidos en función de la temperatura del lecho.**

Para determinar los gases producidos durante el proceso de combustión en función a la temperatura del lecho, utilizaremos la función de Gibbs, la cual utiliza entalpías de formación para poder proporcionar las

concentraciones de NO y CO en los gases de escape de la caldera. Las cuáles serán determinadas a continuación.

La función de Gibbs está definida por la siguiente expresión:

$$Gibbs = h[gas; T = T] - T * s[gas; T = T; P = P_{ref}]$$

Total de moles en los gases de escape:

$$n_{Total} = c + b_{CO_2} + d + W_{total} + f + b_3 + i = 0.342[kmol]$$

Fracciones molares:

$$CO_2 \quad Y_{CO_2} = \frac{c+b_{CO_2}}{n_{Total}} = 0.1465$$

$$CO \quad Y_{CO} = \frac{d}{n_{Total}} = 0.00001149$$

$$N_2 \quad Y_{N_2} = \frac{f}{n_{Total}} = 0.7342$$

$$NO \quad Y_{NO} = \frac{i}{n_{Total}} = 0.0000728$$

$$O_2 \quad Y_{N_2} = \frac{b_3}{n_{Total}} = 0.03868$$

Energía libre de Gibbs para T=990°C, y presión de 1 Bar, Pref=1 bar.

$$CO_2 \quad g_{CO_2}^o = Gibbs[CO_2; T; P_{ref}]$$

$$g_{CO_2}^o = -624721 \left[ \frac{kJ}{kmol} \right]$$

$$CO \quad g_{CO}^o = Gibbs[CO; T; P_{ref}]$$

$$g_{CO}^0 = -319756 \left[ \frac{kJ}{kmol} \right]$$

N2  $g_{N_2}^0 = Gibbs[N_2; T; P_{ref}]$

$$g_{N_2}^0 = -203175 \left[ \frac{kJ}{kmol} \right]$$

NO  $g_{NO}^0 = Gibbs[NO; T; P_{ref}]$

$$g_{NO}^0 = -132065 \left[ \frac{kJ}{kmol} \right]$$

O2  $g_{O_2}^0 = Gibbs[O_2; T; P_{ref}]$

$$g_{O_2}^0 = -217118 \left[ \frac{kJ}{kmol} \right]$$

Energía libre de Gibbs para la reacción CO-CO2

$$\Delta G_1^0 = 0.5 * g_{O_2}^0 + g_{CO}^0 - g_{CO_2}^0$$

Dónde:  $\Delta G_1^0 = -R * T * LN[K_1]$

$$R = 8.314$$

$$K_1 = Y_{CO} * \sqrt{\frac{Y_{O_2} * P}{P_{ref}}} \frac{1}{Y_{CO_2}}$$

Energía libre de Gibbs para la reacción N2-O2

$$\Delta G_2^0 = 2 * g_{NO}^0 - g_{O_2}^0 - g_{N_2}^0$$

Dónde:  $\Delta G_2^0 = -R * T * LN[K_2]$

$$R = 8.314$$

$$K_2 = \frac{Y_{NO}^2}{Y_{O_2} * Y_{N_2}}$$



Mediante la iteración de este sistema, nos permite calcular las concentraciones de cada gas que compone la corriente de gases de la caldera en función de la temperatura del lecho, esto queda expresado en forma clara en la tabla 5.1.5 y en el grafico 5.1.5.

## **CAPÍTULO 5: RESULTADOS**

### **5.1. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES SIGNIFICATIVAS**

En esta etapa identificamos cuáles son las variables que atacaremos en la fase de mejora debido a que tienen gran influencia en la eficiencia de la caldera y de la combustión.

- %Inquemados.
- T° del lecho.
- T° gases de escape.
- % Exceso de aire.

### **5.2. EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LAS VARIABLES SIGNIFICATIVAS EN LA EFICIENCIA DE LA CALDERA.**

Desarrollando el sistema de ecuación que regula el proceso de combustión de la caldera de lecho fluidizado circulante, se procede a parametrizar las variables de mayor importancia con el fin de ver su efecto sobre el funcionamiento del sistema, esto se realiza mediante el uso del programa computacional EES (Engineering Equation Solver).

Para evaluar la influencia de dichas variables determinadas en el punto anterior, tendremos que elaborar gráficos y tablas paramétricas en las cuales se puedan proyectar los comportamientos de la eficiencia y las pérdidas de energía con la variación de estas variables.

5.2.1. Formación de gases de combustión en función de la temperatura del lecho.

Tabla 5.2.1: Formación de gases de combustión en función de la  $t^\circ$  del lecho:

Temperatura [K]	Aire [kmol/kgc]	CO <sub>2</sub> [kmol/kgc]	CO [kmol/kgc]	H <sub>2</sub> O [kmol/kgc]	N <sub>2</sub> [kmol/kgc]	NO [kmol/kgc]	O <sub>2</sub> [kmol/kgc]	SO <sub>2</sub> [kmol/kgc]
1173	0,08657	0,06884	3,93E-09	0,02266	0,326	0,0000251	0,01075	0,001069
1432	0,08657	0,06884	7,24E-07	0,02266	0,326	0,0001345	0,01069	0,001069
1690	0,08657	0,06882	0,00002668	0,02266	0,3258	0,0004292	0,01056	0,001069
1949	0,08657	0,06847	0,0003716	0,02266	0,3255	0,001006	0,01044	0,001069
2207	0,08657	0,06624	0,002601	0,02266	0,325	0,001994	0,01106	0,001069
2466	0,08657	0,05882	0,01003	0,02266	0,3242	0,003747	0,0139	0,001069
2724	0,08657	0,04524	0,0236	0,02266	0,3227	0,006684	0,01922	0,001069
2983	0,08657	0,02973	0,03911	0,02266	0,3207	0,01073	0,02495	0,001069
3241	0,08657	0,01739	0,05146	0,02266	0,3184	0,01535	0,02881	0,001069
3500	0,08657	0,009709	0,05914	0,02266	0,316	0,02006	0,0303	0,001069

Fuente: EES

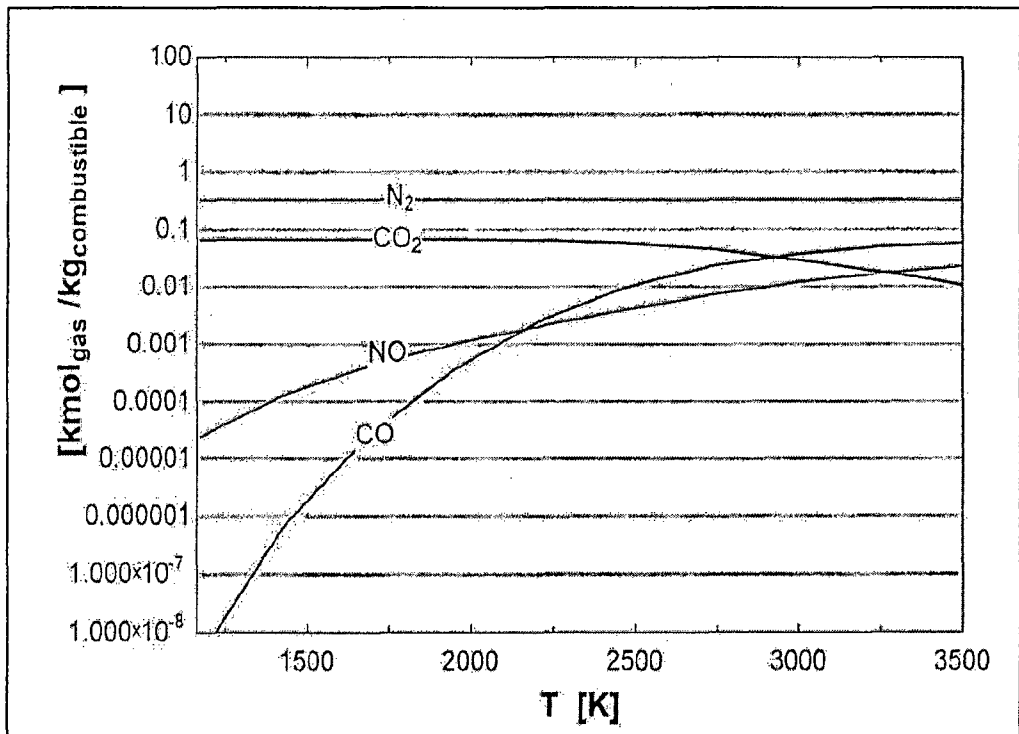


Gráfico 5.1: Gases en función de la temperatura del lecho.

5.2.2. Influencia del % de quemados en la Energía generada y eficiencia del sistema.

Tabla 5.2: Energías de Reactivos y Productos en función del % de quemados.

$c_2$ [%]	$E_{\text{reactivos}}$ [kJ/kg]	Calor Útil [kJ/kmol]	$E_{\text{productos}}$ [kJ/kg]	$E_{\text{productos}2}$ [kJ/kg]	
Rún 1	0	20727	15757	14118	2443
Rún 2	5	18978	14155	13488	2724
Rún 3	10	17229	12594	12859	2964
Rún 4	15	15480	11074	12230	3163
Rún 5	20	13732	9596	11601	3321
Rún 6	25	11983	8158	10972	3438
Rún 7	30	10234	6762	10343	3514
Rún 8	35	8485	5406	9714	3549
Rún 9	40	6737	4092	9084	3543
Rún 10	45	4988	2818	8455	3496

Fuente: EES

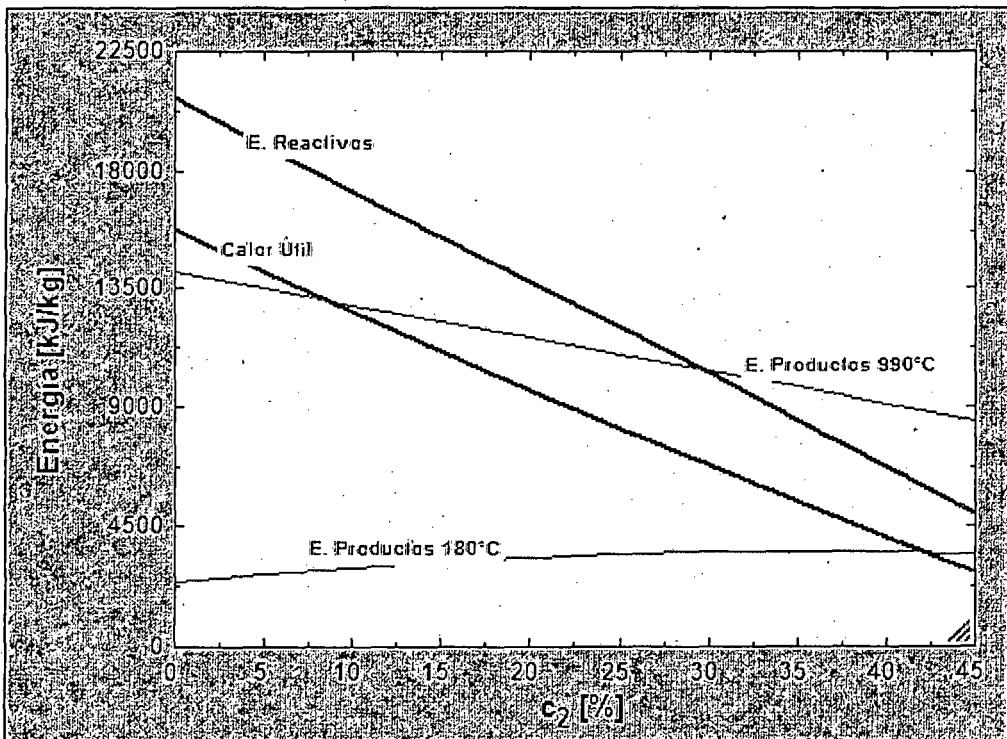


Gráfico 5.2: Energías de Reactivos y Productos en función del % de quemados.

Tabla 5.3: Eficiencia de la caldera y de combustión en función del % de inquemados.

Run	$c_2$ [%]	Re $\eta$ caldera	Re $\eta$ combustión
Run 1	0	76.02	100
Run 2	5	74.59	91.21
Run 3	10	73.1	82.42
Run 4	15	71.54	73.64
Run 5	20	69.88	64.85
Run 6	25	68.08	56.06
Run 7	30	66.07	47.27
Run 8	35	63.71	38.48
Run 9	40	60.73	29.69
Run 10	45	56.5	20.91

Fuente: EES

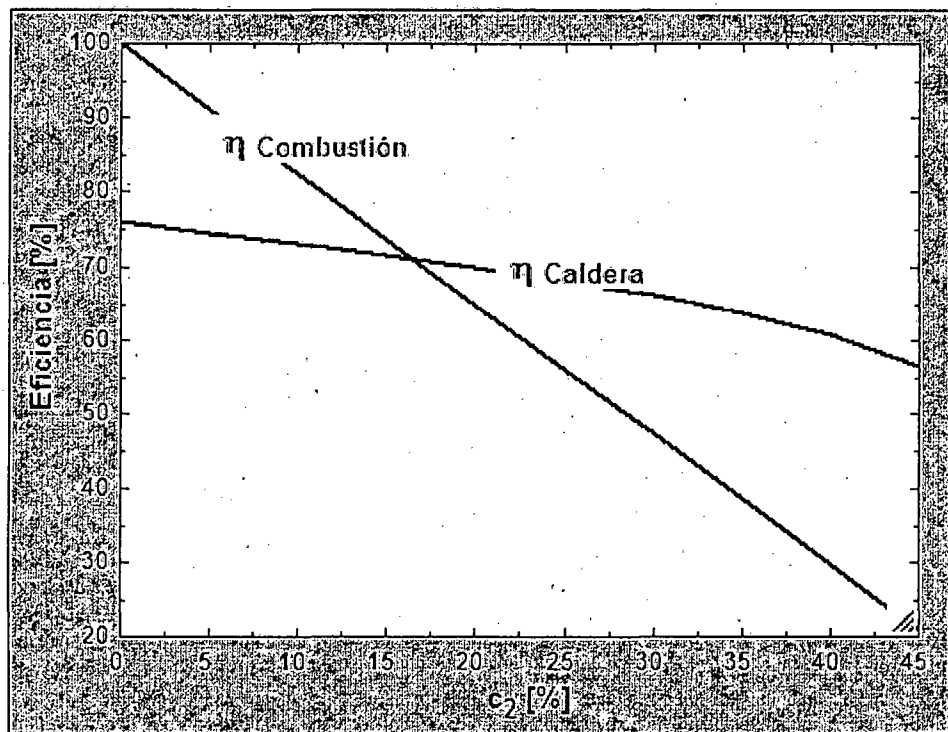


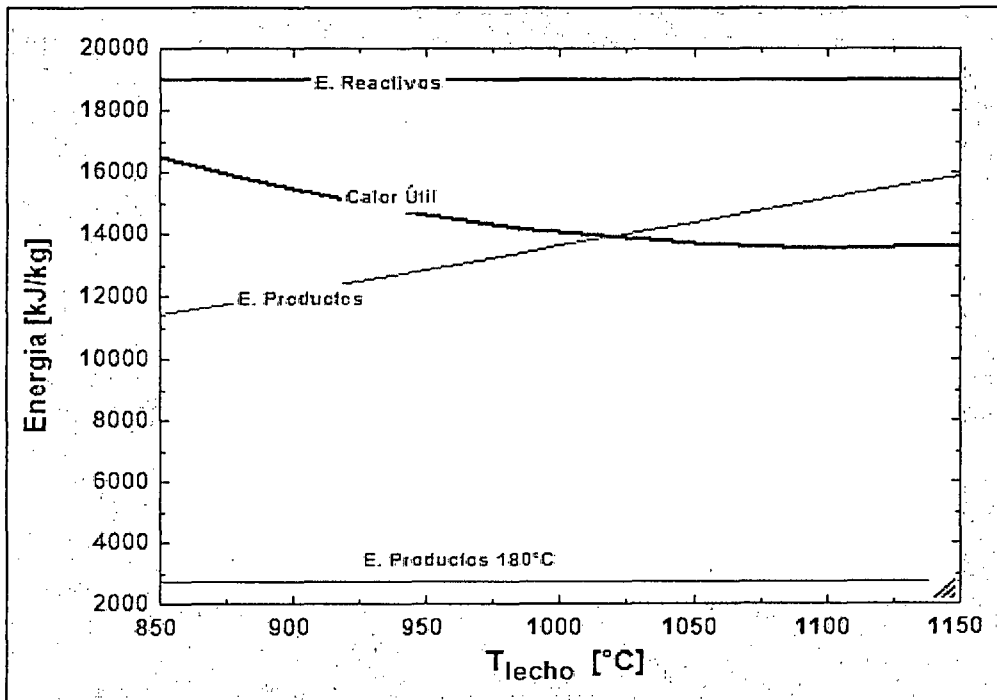
Gráfico 5.3: Eficiencia de la caldera y de combustión en función del % de inquemados.

5.2.3. Influencia de la  $t^\circ$  del lecho en la Energía generada y eficiencia del sistema.

**Tabla 5.4: Energías de Reactivos y Productos en función de la  $t^\circ$  del lecho.**

1..10	1 $T_{comb}$ [C]	2 $E_{reactivos}$ [kJ/kg]	3 $Calor_{util}$ [kJ/kmol]	4 $E_{productos}$ [kJ/kg]	5 $E_{productos2}$ [kJ/kg]
Run 1	850	18978	16477	11408	2724
Run 2	880	18978	15835	11850	2724
Run 3	900	18978	15450	12146	2724
Run 4	920	18978	15101	12443	2724
Run 5	950	18978	14642	12890	2724
Run 6	990	18978	14155	13488	2724
Run 7	1000	18978	14055	13639	2724
Run 8	1050	18978	13691	14392	2724
Run 9	1100	18978	13552	15150	2724
Run 10	1150	18978	13639	15912	2724

Fuente: EES



**Gráfico 5.4: Energías de Reactivos y Productos en función de la  $t^\circ$  del lecho.**

Tabla 5.5: Eficiencia de la caldera y de combustión en función de la  $t^\circ$  del lecho.

$\Delta$ 1.10	$T_{\text{comb}}$ [C]	$\text{Ren}_{\text{caldera}}$	$\text{Ren}_{\text{combustion}}$
Run 1	850	86.82	91.21
Run 2	880	83.44	91.21
Run 3	900	81.41	91.21
Run 4	920	79.57	91.21
Run 5	950	77.15	91.21
Run 6	990	74.59	91.21
Run 7	1000	74.06	91.21
Run 8	1050	72.14	91.21
Run 9	1100	71.41	91.21
Run 10	1150	71.87	91.21

Fuente: EES

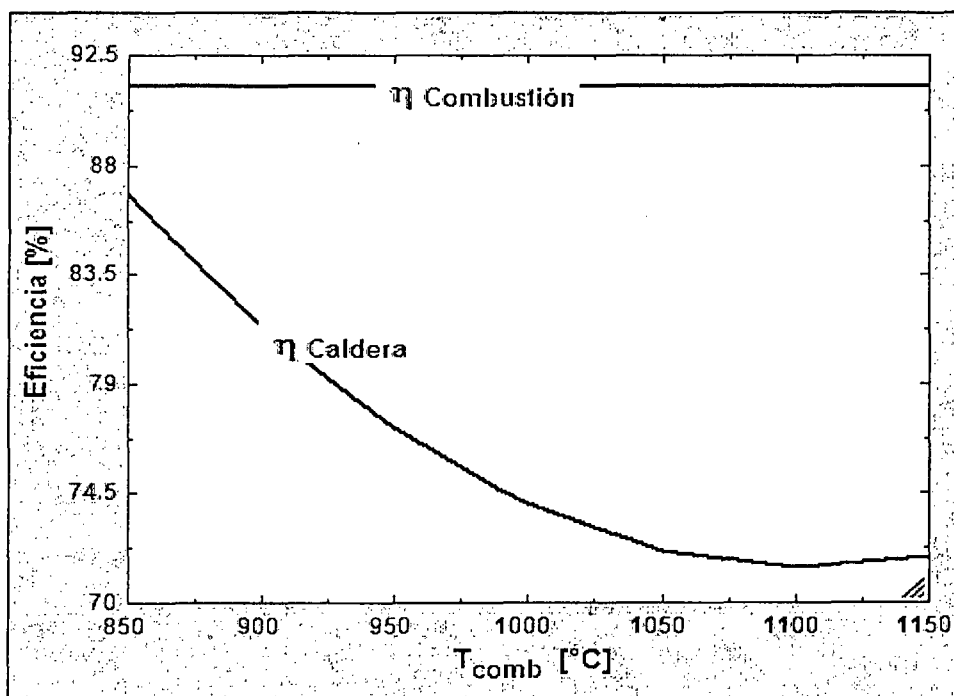


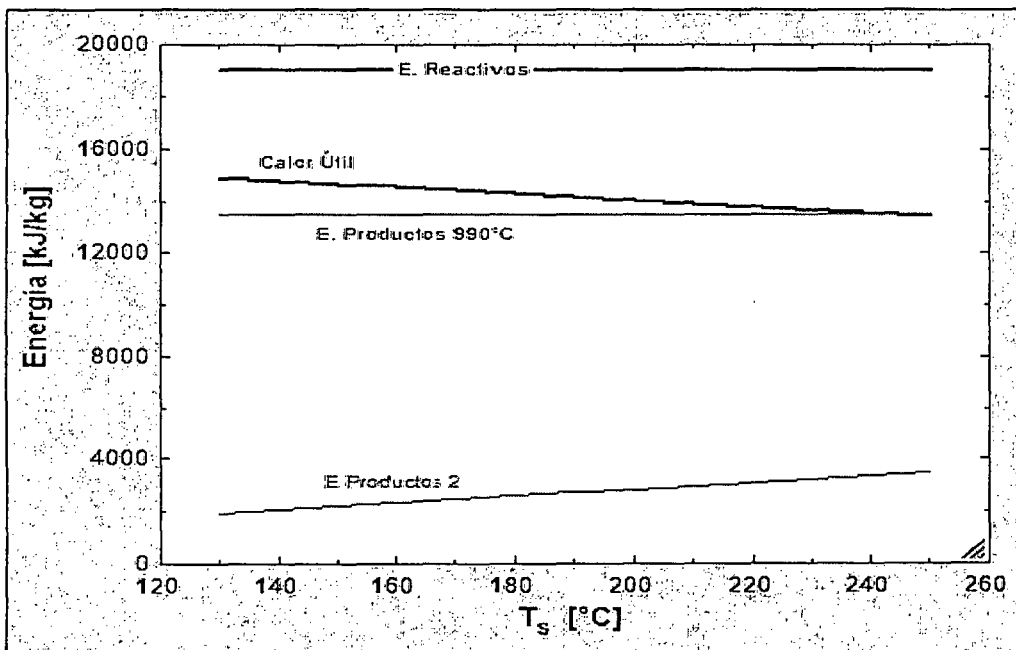
Gráfico 5.5: Eficiencia de la caldera y de combustión en función de la  $t^\circ$  del lecho.

5.2.4. Influencia de la  $t^\circ$  de los gases de escape en la Energía generada y eficiencia del sistema.

**Tabla 5.6: Energías de Reactivos y Productos en función de la  $t^\circ$  de gases de escape.**

Run	$T_s$ [C]	$E_{\text{reactivos}}$ [kJ/kg]	Calor <sub>util.</sub> [kJ/kmol]	$E_{\text{productos}}$ [kJ/kg]	$E_{\text{productos2}}$ [kJ/kg]
Run 1	130	18978	14903	13488	1976
Run 2	140	18978	14779	13488	2100
Run 3	150	18978	14655	13488	2224
Run 4	160	18978	14531	13488	2348
Run 5	170	18978	14406	13488	2473
Run 6	180	18978	14281	13488	2598
Run 7	190	18978	14155	13488	2724
Run 8	200	18978	14029	13488	2850
Run 9	210	18978	13903	13488	2976
Run 10	250	18978	13394	13488	3485

Fuente: EES



**Gráfico 5.6: Energías de Reactivos y Productos en función de la  $t^\circ$  de gases de escape.**

**Tabla 5.7: Eficiencia de la caldera y de combustión en función de la  $t^\circ$**



de los gases de escape.

Run	$T_g$ [°C]	Ren. caldera	Ren. combustion
Run 1	130	78.53	91.21
Run 2	140	77.88	91.21
Run 3	150	77.22	91.21
Run 4	160	76.57	91.21
Run 5	170	75.91	91.21
Run 6	180	75.25	91.21
Run 7	190	74.59	91.21
Run 8	200	73.92	91.21
Run 9	210	73.26	91.21
Run 10	250	70.58	91.21

Fuente: EES

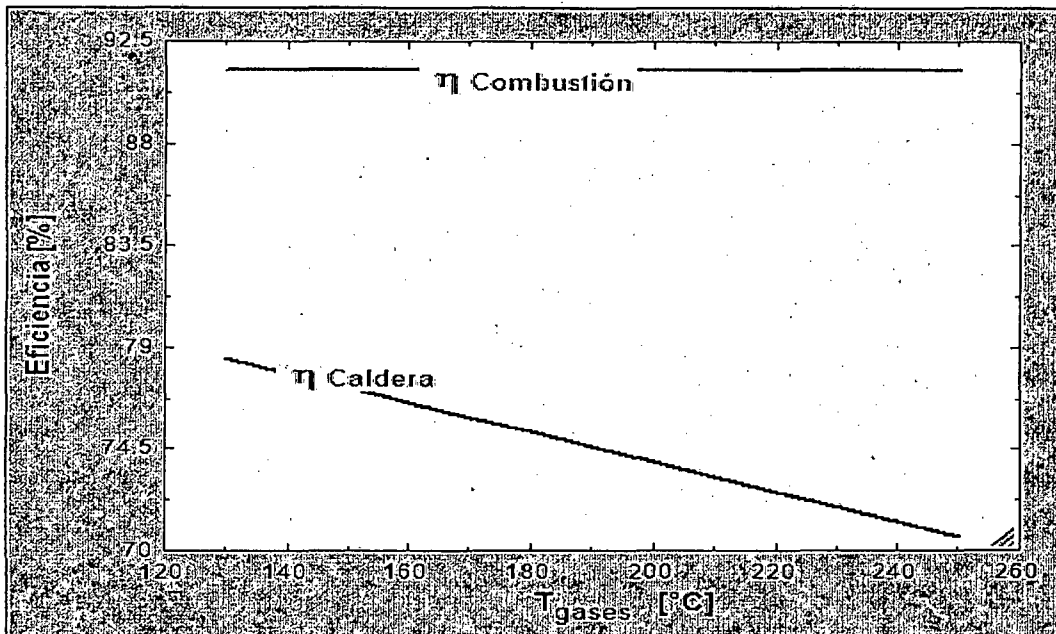


Gráfico 5.7: Eficiencia de la caldera y de combustión en función de la  $t^\circ$  de los gases de escape.

5.2.5. Influencia del % exceso de aire en la Energía generada y eficiencia del sistema.

Tabla 5.10: Energías de Reactivos y Productos en función del exceso de aire.

Run	% Aire	E reactivos [kJ/kg]	Calor útil [kJ/kmol]	E productos [kJ/kg]	E productos2 [kJ/kg]
Run 1	5	18829	13843	11876	2327
Run 2	10	18866	13952	12279	2395
Run 3	15	18903	14062	12682	2463
Run 4	20	18941	14171	13085	2531
Run 5	25	18978	14281	13488	2598
Run 6	30	19015	14390	13892	2666
Run 7	35	19053	14499	14295	2734
Run 8	40	19090	14609	14698	2802
Run 9	45	19127	14718	15101	2870
Run 10	50	19164	14827	15504	2937

Fuente: EES

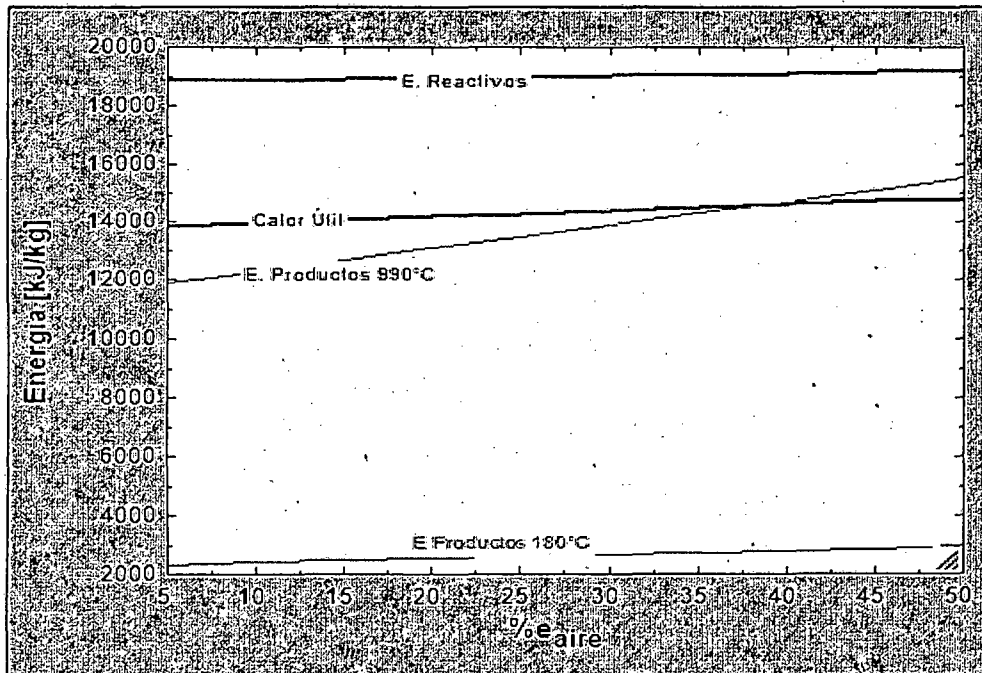


Grafico 5.10: Energías de Reactivos y Productos en función del exceso de aire.

Tabla 5.11: Eficiencia de la caldera y de combustión en función del exceso de aire.

Run	$e_{\text{aire}}$	$\eta_{\text{caldera}}$	$\eta_{\text{combustion}}$
Run 1	5	73.52	91.21
Run 2	10	73.96	91.21
Run 3	15	74.39	91.21
Run 4	20	74.82	91.21
Run 5	25	75.25	91.21
Run 6	30	75.68	91.21
Run 7	35	76.1	91.21
Run 8	40	76.53	91.21
Run 9	45	76.95	91.21
Run 10	50	77.37	91.21

Fuente: EES

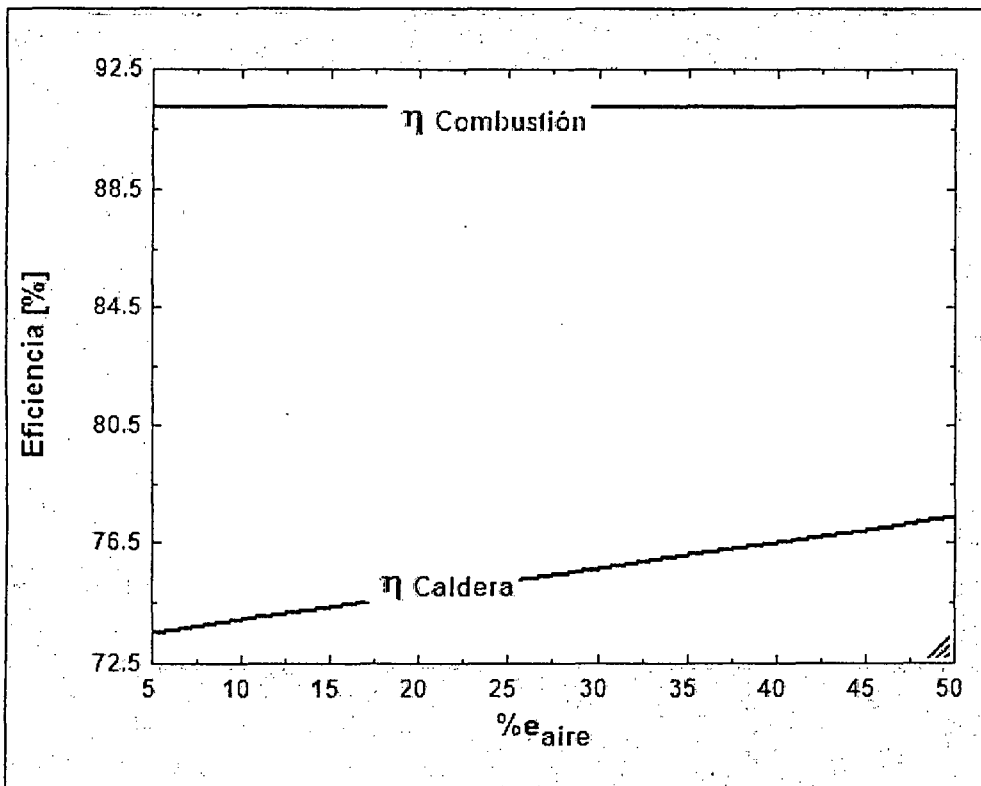


Gráfico 5.11: Eficiencia de la caldera y de combustión en función del exceso de aire.

### 5.3. DETERMINACIÓN DE VARIABLES ÓPTIMAS

#### 5.3.1. Maximización de la Eficiencia de la combustión y de la caldera

Después del estudio de las gráficas se tienen los valores óptimos para cada variable crítica que nos proporcionara los mejores valores de eficiencia tanto para la caldera como para la combustión.

**Tabla 5.12: Variables de operación óptimas para lograr la mayor eficiencia.**

VARIABLE	ACTUAL	ÓPTIMO
%Inquemados	5%	1%
T° del lecho (°C)	990	920
T° gases de escape (°C)	180	140
% Exceso de aire	10	20
% Eficiencia Caldera	73.96	84.36
% Eficiencia Combustión	91.2	98.24

Trabajando con las variables optimas logramos mejorar la eficiencia en un 10.4%.

### 5.4 ESTIMACIÓN DEL AHORRO ECONÓMICO

Determinamos el ahorro económico solo en función de la mejora de la eficiencia de la caldera.

Datos Iniciales:

Horas laborables x día: 24

Días laborables x mes: 28

Precio del carbón x ton: \$.50.00

Generación de vapor: 80 ton/hr

Entalpia del vapor sobrecalentado (T=480°C, P=6.3MPa): 3345.6 kJ/kg

Entalpia del agua de alimentación (T=104°C, P=8.7MPa): 425.1 kJ/kg

Consumo de carbón actual: 13.3 ton/hr

Consumo de médula actual: 7 ton/hr

Poder calórico Inferior del carbón antracita: 21,541.81 kJ/kg

Poder calórico Inferior de la médula: 7,424.01 kJ/kg

Rendimiento Actual: 73.96 %

Rendimiento Mejorado: 84.36 %

**Determinamos el ratio de generación de vapor actual:**

**Calculamos el consumo de carbón real.**

Para esto tenemos que llevar todo el consumo de combustible.

$$C_{\text{carbón}} = (PC_{\text{antr}} * C_{\text{carbón}} + PC_{\text{med}} * C_{\text{medula}}) / PC_{\text{antr}}$$

$$C_{\text{carbón}} = 15.71 \text{ ton/hr}$$

Equivalencia: 2.99 ton medula = 1 ton carbón.

**Ratio de Generación de vapor actual:**

Ratio GV, actual = 5.092 ton vapor/ ton comb.

**Consumo de carbón después de la mejora:**

$$C_{\text{carbon2}} = (G_{\text{Vapor}} * (h_{\text{vsc}} - h_{\text{wa}})) / (Rend_{\text{mejorado}} * PC_{\text{antr}} / 100)$$

$$C\_carbon2 = 12.86 \text{ ton/hr}$$

**Determinamos el ratio de generación de vapor después de la mejora:**

**Ratio nuevo después de la mejora:**

$$\text{Ratio\_gv2} = G\_Vapor / C\_carbon2$$

$$\text{Ratio\_gv2} = 6.22 \text{ ton vapor/ ton comb.}$$

**Determinamos del ahorro de combustible primario:**

**Ahorro de carbón logrado con la mejora:**

$$\text{Ahorro\_carb} = C\_carbon1 - C\_carbon2$$

$$\text{Ahorro\_carb} = 2.856 \text{ ton/hr}$$

**Determinamos el ahorro económico logrado con la mejora:**

**Ahorro económico logrado con la mejora de la eficiencia:**

$$\text{Ahorro\_mes} = \text{Ahorro\_carb} \times \text{Precio\_carbon} \times \text{dias\_lab} \times \text{Hras\_dia}$$

$$\text{Ahorro\_mes} = \$ 95,954.00$$

$$\text{Ahorro\_anual} = \text{Ahorro\_mes} \times 12$$

$$\text{Ahorro\_anual} = \$ 1,155,168.00$$

## CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN

- Después de un largo periodo de estudio del proceso de combustión de la caldera de lecho fluidizado circulante, se logró parametrizar las variables más importantes que están involucradas en este proceso.
- El estudio permitió cumplir tanto con el objetivo general como con los objetivos específicos que se plantearon al comienzo de este trabajo, como lo es la evolución del proceso de combustión de una caldera de lecho fluidizado circulante, analizar la situación actual del proceso, cuantificar la cantidad de carbono no quemado y su influencia en la temperatura del lecho y parametrizar las variables de operación más importantes.
- Es importante mencionar que la empresa carece de una eficiente gestión energética de sus recursos así como el personal que labora en las distintas áreas, lo cual nos da una oportunidad para capacitar y concientizar a todos en lo que respecta al ahorro y uso eficiente de la energía.
- Para que las mejoras del proceso determinadas en el estudio energético elaborado logre los mejores resultados en la aplicación se tiene que garantizar el buen funcionamiento de los equipos principales de la caldera, es decir debemos contar con un correcto programa de mantenimiento productivo total, punto muy importante que también ya esta se viene implementando progresivamente en la empresa TRUPAL SA.

## CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES

- Las variables de entrada que más influyen en el proceso de combustión y en el rendimiento de la caldera CFB de Trupal SA son las siguientes: %Inquemados, T° del lecho, T° gases de escape y % Exceso de aire.
- Se determinó que el porcentaje de carbono no quemado que pasa hacia las cenizas va desde 4.1 a 5.3 % del combustible total inyectado al sistema, esto quiere decir que de las 14- 15 ton/h que consume la caldera en condiciones normales de operación 0.62 – 0.78 ton/h se pierden en el material extraído del fondo del hogar (bed ash) o bien es sacado por el tiro del hogar hacia el baghouse (fly ash).
- Específicamente el rango de variación del carbono no quemado en este caso es de 5%, por esta razón e interpretando la tabla 5.2 podemos decir que la energía de los reactivos se verá disminuida en 1,749 [kJ/kgComb]. Además podemos decir que el rendimiento de la caldera se verá afectado en un 1.6% por cada 5% que varíe el carbono no quemado. Esto puede verse claramente en el gráfico 5.3.
- El rango ideal de temperatura de reacción para generar el proceso de combustión es de 880 – 930 °C, en dicho rango se logra el mejor rendimiento de la caldera (84.39%), a medida que la temperatura del lecho aumenta el rendimiento se ve afectado considerablemente, esto se puede apreciar en el grafico 5.5.
- La temperatura de los gases de combustión debe estar en un rango de 130°C a 140°C para el buen funcionamiento del recuperador de calor y se minimice



así las pérdidas de eficiencia en la caldera asociados al calor arrastrado en la chimenea.

- Se determinó que por cada kilogramo de combustible inyectado al sistema necesariamente se deben agregar 9.21 kg de aire para que la reacción del elemento carbono sea completa.
- El exceso de aire es otra variable importante al momento de evaluar las condiciones de combustión de una caldera, para este caso podemos afirmar que por cada 5% que aumente provocará que la energía útil aumentara aproximadamente en 110 kJ/kgComb. Estas variaciones generan un incremento del rendimiento de la caldera de aproximadamente 0.43 % por cada 5% que aumenta el exceso de aire.
- Se logró analizar y resolver el comportamiento del proceso de combustión haciendo uso del software EES.
- Por cada 1% de eficiencia que se mejore se obtendrá un ahorro de 0.27 ton/h de carbón antracita.
- Se logró mejorar la eficiencia de 73.96% hasta 84.36% consiguiendo así un ahorro estimado en \$ 1'155,168.00 al año solo en reducción del consumo de combustible primario (carbón).
- Trabajando en un rango de temperaturas de 900 - 950, podemos afirmar que se mantendrá un nivel muy bajo de emisiones de NO<sub>x</sub> y CO, para este caso los valores calculados bordean 0.43 – 1 ton/día de NO<sub>x</sub> y  $6.34 \cdot 10^{-5}$  ton/día de CO.

## **CAPÍTULO 8: RECOMENDACIONES**

- Dar a conocer a los operadores y jefes de turno de la importancia y los beneficios de lograr una operación óptima en el proceso de combustión de la caldera CFB.
- Capacitar y concientizar al personal involucrado en el proceso en temas de gestión energética eficiente para identificar áreas de oportunidad en donde podamos lograr más ahorros y una mejor performance de la caldera.
- Mejorar la inspección de los equipos principales de la caldera, crear guías o rutinas de inspección de los equipos, maquinarias y sistemas de seguridad, para monitorear el funcionamiento de la caldera, a fin de reducir paradas innecesarias.
- Implementar el control automático de la combustión en función a los parámetros ya definidos en este informe para optimizar y dar estabilidad a la operación.
- Programar y realizar el mantenimiento anual de todos los equipos críticos de la caldera de manera preventiva para asegurar la confiabilidad de los equipos.
- Este procedimiento de mejora en la optimización del proceso de combustión se puede aplicar en otras empresas con mejores resultados.
- Implementar la forma de trabajo lean – mejora continua para continuar con la eliminación de desperdicios (perdidas) y seguir mejorando orientados hacia los mejores resultados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Tangshan Xinde Group., "Final Project Report" – Trupal 130t/h CFB. Trujillo – Perú, 2007.
2. TECSUP., "Generadores a vapor en calderas industriales, Operación y mantenimiento". Programa de capacitación continua, TECSUP Lima – Perú., 1991.
3. Seijas S., "Escalamiento de una cámara de Combustión de antracita aglomerada y cal a partir de los parámetros de combustión optimizados". Ciencia y Tecnología. 6(2):11-29., 2007.
4. Benitez J., "Process engineering and designed for air pollution control. Prentice Hall. New Yersey – USA, 1993.
5. Castillo P., "Ahorro de energía en la operación de calderos industriales". Edit. COMBINSA, Perú, 1991.
6. Sanchez M., Investigación de las vías para reducir las pérdidas de calor en una caldera. Trujillo-Perú. 1995.
7. BABCOCK y WILCOX COMPANY. "Steam its generation and use". Mc Graw – Hill Publication. 1999.
8. Shield C., "Calderas, tipos, características y funciones ". Edit CECSA. 1996.
9. Coulouris G., Dollimore J., & Kindberg T., "Distributed systems-concepts and desing ISA international Conference", New York, 2da ed., 1994.
10. Revista Electrónica No. 13. "Termodinámica de equipos industriales: eficiencia energética de una caldera", Facultad de Ingeniería - Universidad Rafael Landívar. 1994.
11. <http://libros.redsauce.net/>, libro virtual consultado el día 03.06.13.

# **ANEXOS**

## **Anexo A:**

### **Especificaciones técnicas del sistema de Cogeneración**

**Tabla A.1: Datos de nominales del ciclo térmico de Trupal.**

ETAPA	ESTADO	TEMPERATURA °C	PRESION bar	FLUJO Tn/h	ENTALPIA kJ/kg
1	VAPOR SC	490	70	130	3,372
2	VAPOR SC	375	42	130	3,149
3	VAPOR HUMEDO	60	0.064	50	2,101
4	VAPOR SAT.	260	10.54	33	2,384
5	VAPOR SAT..	180	10.54	38	2,235
6	CONDENSADO	63.2	0.064	27	194
7	CONDENSADO	65	2.24	27	199
8	CONDENSADO	114	1.12	50	134
9	CONDENSADO	115.9	1.12	50	136
10	LIQUIDO	40	120	18	62.8
11	LIQUIDO	104	0.06	149	436
12	LIQUIDO	106.2	85	149	438.2
13	LIQUIDO	106.2	24	9	443.3
14	SOLIDO	25	X	12.7	X
15	SOLIDO	25	X	12.7	X
16	LIQUIDO	X	X	3	X
17	VAPOR SAT	279	74	130	2,783
18	VAPOR SAT	279	74	7	2,783
19	VAPOR HUMEDO	170	6.2	5	2,134
20	VAPOR HUMEDO	200	7.6	138	2,278
21	LIQUIDO	29	0.06	X	X
22	LIQUIDO	39	2.1	X	X
23	LIQUIDO	37.6	118.2	20	324

**Fuente: Empresa en estudio.**

# ESQUEMA DEL PROCESO DE COGENERACION DE LA PLANTA TRUPAL SA

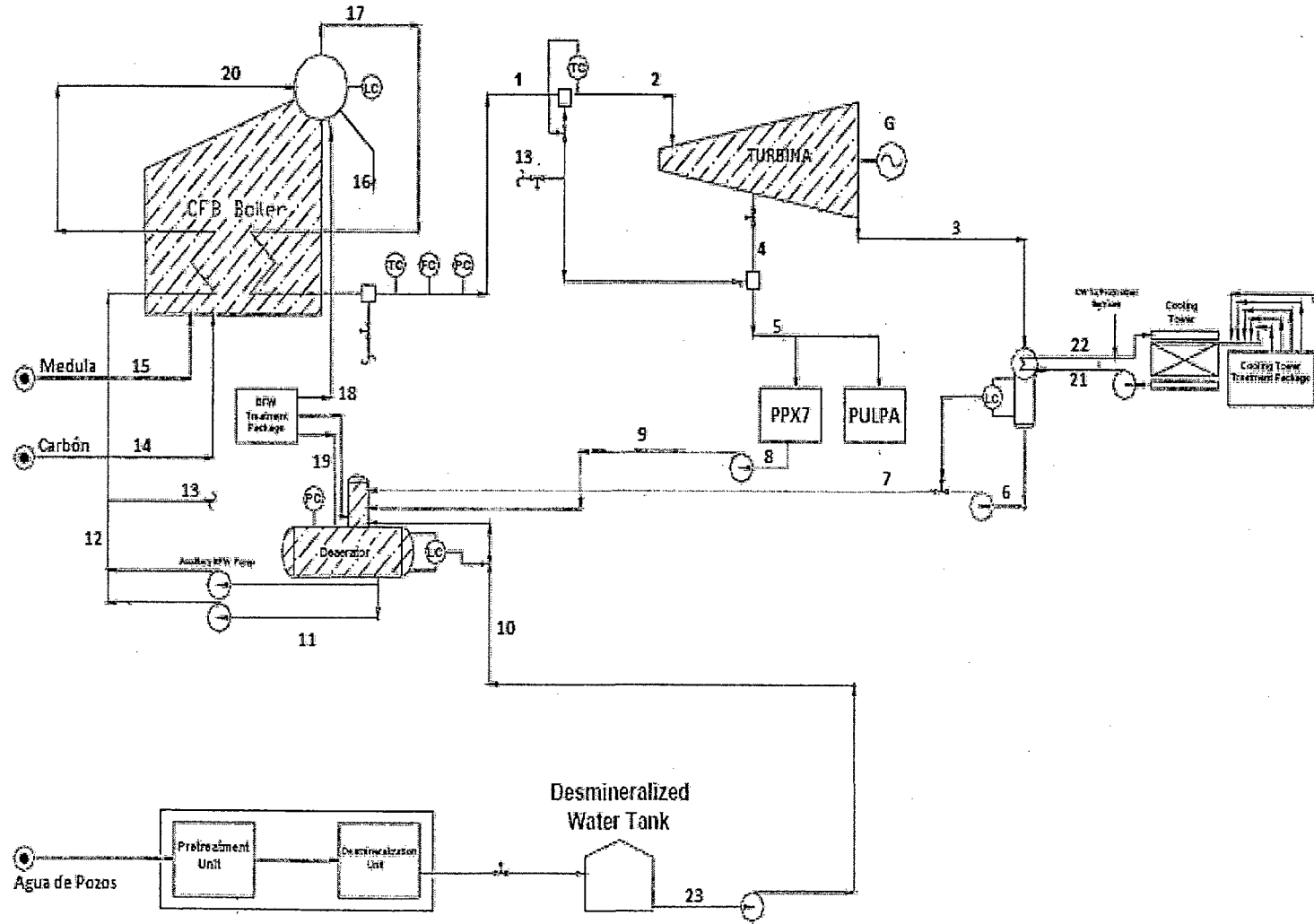
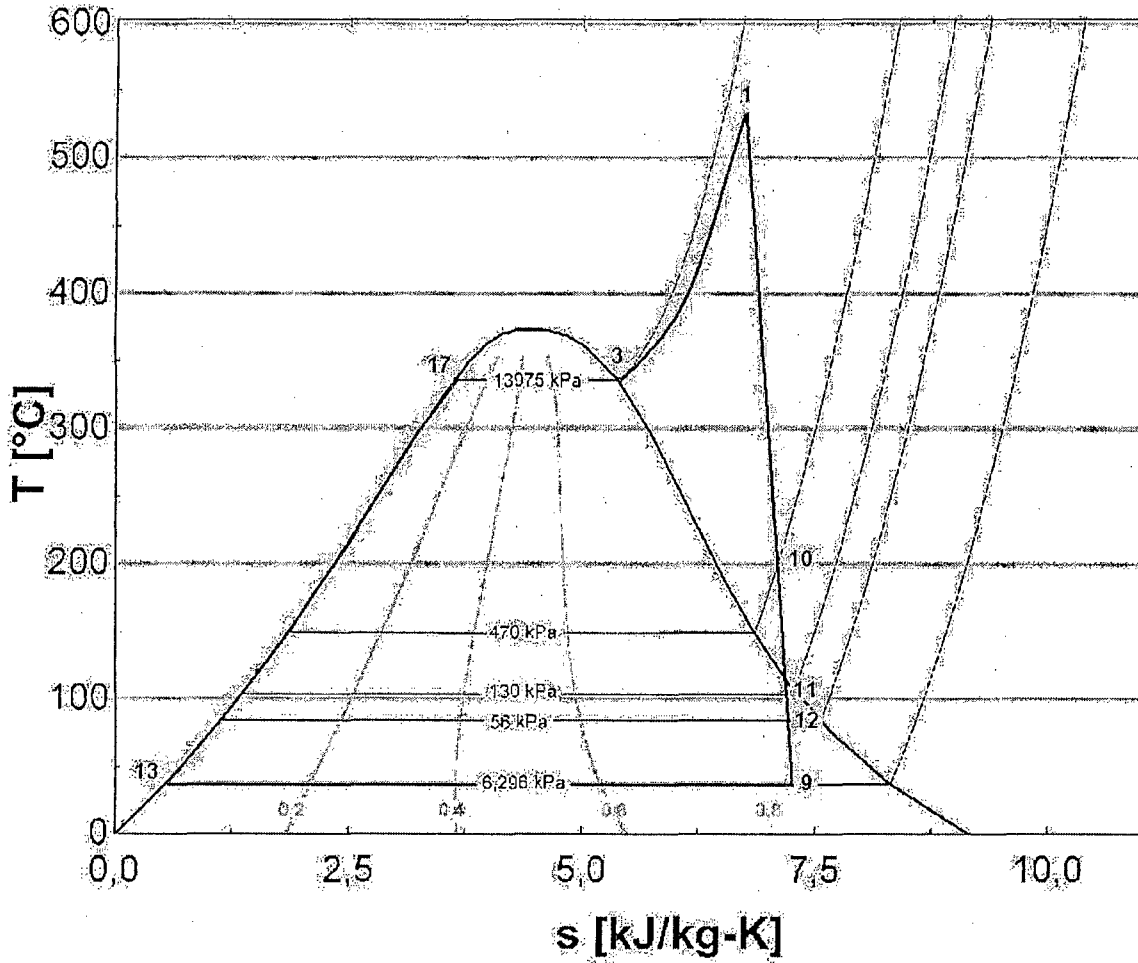


Grafico A.1: Diagrama T vs S del ciclo de vapor.





## **Anexo B:**

### **Descripción técnica de los equipos principales**

#### **A. TRITURADORA DE CARBON:**

Marca	HUIYING
Velocidad del eje	740 rpm
PESO	6100kG
Potencia de Motor	90 KW
Tamaño de alimentación	≤150 mm
Tamaño de descarga	≤8 mm
Capacidad de producción	120 t/h

#### **MOTOR**

Marca	BEIDE Trifásico Asíncrono
Tipo	Y2-315L1-8 JB/T8680.1-1998
Potencia	90 KW =60HP
Tensión	440 V Δ
Velocidad	882 rpm

#### **B. CONDUCTOR DE CARBON:**

Marca	HUIYING
Ancho de fajar	650mm
Distancia de transporte	139 m
Capacidad	50 t/h
Potencia	30 KW
Velocidad Lineal	1.25 m/s

#### **MOTOR**

Trifásico Asíncrono

Marca	BEIDE
Tipo	Y2-209L-4
Frecuencia	60 Hz
Tensión	440 V $\Delta$
Potencia	30 KW
Velocidad	1754 rpm

### **REDUCTOR**

Marca	TAIXING REDUCER
Modelo	JZQ750-48.57-2
Ratio	48.57

### **C. CONDUCTOR DE BAGAZO:**

Marca	HUIYING
Ancho de faja	650 mm
Distancia de transporte	117 m
Capacidad	50 t/h
Potencia	32 KW
Velocidad Lineal	0.8 m/s

### **MOTOR**

Trifásico Asíncrono

Marca	BEIDE
Tipo	Y2-200L2-6
Frecuencia	60 Hz
Tensión	440 V $\Delta$

Potencia	22 KW
Velocidad	1176 rpm

#### **REDUCTOR**

Marca	TAIXING REDUCER
Modelo	JZQ750-48.57-2
Ratio	48.57

#### **D. ALIMENTADOR DE BAGAZO:**

Marca	JIRAN
Medidas	1800 x 1510 x 1745 mm
Rango de alimentación	0 – 17 t/h

#### **MOTOR**

Trifásico Asíncrono

Marca	SIEMENS
Frecuencia	60 Hz
Tensión	460 V Δ
Potencia	6.3 KW
Velocidad	1755rpm

#### **REDUCTOR**

Marca	GUOMAO
Modelo	XWD5-29-5.5KW
Transmisión	por cadena.

#### **E. CONDUCTOR ALIMENTADOR DE CARBÓN:**

Modelo	PT500
--------	-------

Salida 0.5 – 8.0  
Capacidad 1 – 18 Tn/hr.

**MOTOR**

Marca SIEMENS  
Grado de protección IP 55  
Peso 71 Kg

	50 Hz	60 Hz
Tensión	380/660 V Δ/Y	440 V Δ
Potencia	7.5 KW	8.6 KW
Corriente	15.6/9 A	15.4 A
Velocidad	1440 rpm	1740 rpm
CosØ	0.84	0.84

**REDUCTOR**

Marca GUOMAO  
Peso 140 Kg  
Velocidad 75 rpm

**F. CONDUCTOR TRANSVERSAL DE CARBÓN:**

Marca Hui Ying  
Potencia 4 kw.  
Capacidad 1 – 8 Tn/hr.

**MOTOR**

Trifásico Asíncrono

Marca	BEIDE
Frecuencia	60 Hz
Tensión	440 V $\Delta$
Potencia	4KW
Velocidad	1722 rpm

**REDUCTOR**

Marca	TAIXING REDUCER CO. LTD.
Peso	150 Kg
Velocidad	75 rpm
Transmisión	por cadena

**G. BOMBA DE ALIMENTACIÓN DE AGUA DE ALTA PRESIÓN:**

Marca	SHANDONG SHUANGLUN GROUP CO. LTD
Capacidad	150 m <sup>3</sup> /h
Altura Útil	900 m
Velocidad	3600 rpm
Potencia a la entrada	514 KW
NPSH	6 m
Potencia	710 KW
Eficiencia	70 %
Peso neto	3200 Kg

## **MOTOR TRIFÁSICO DE INDUCCION**

Marca	HUADA
Tipo	YKK450-2
Potencia	710 KW
Tensión	13 800 V
Conexión	Y
Frecuencia	60 Hz
Lw	112 dB (A)
CosØ	0.88
Ins.cl	F
Peso	4400 Kg
Velocidad	3560 rpm
Grado Protección	IP 44

## **H. COMPRESOR DE AIRE**

### **COMPRESOR**

Marca	BEIJING FU SHENG MACHINERY
Capacidad de Entrega	21.1 m <sup>3</sup> /min
Presión Máx. de Trabajo	0.70 / 0.75 MPa
Potencia de Motor	110 KW
Velocidad de Motor	1780 rpm
Peso neto	3480 Kg
Tamaño L x w x H	3000 x 1650 x 1800

### **MOTOR DE COMPRESOR**

Marca	SIEMENS
Voltaje	440 voltios $\Delta$
Intensidad	193 amp.
Potencia	123 Kw.
Eficiencia	94.8%.
Cos $\emptyset$	0.88
Velocidad	1780 rpm.

### **MOTOR DE VENTILADOR**

Marca	FU SHENG (Motor de Inducción de 3 Fases)
Voltaje	440 voltios Y
Intensidad	3.4 amp.
Potencia	1.5 Kw.
Velocidad	1550 rpm.

### **SECADOR DE AIRE COMPRIMIDO DE REFRIGERACIÓN**

Marca	HANZHOU SHANLI PUROFY
Capacidad	25 Nm <sup>3</sup> /min
Presión de Trabajo	0.75 MPa
Temperatura de Entrada	< 45 °C
Tensión	440 V
Frecuencia	60 Hz
Potencia	4.8 KW



## I. ROOTS BLOWER

### MOTOR

Marca	BEIDE Trifásico Asíncrono
Potencia	37 KW
Tensión	440 V $\Delta$
Velocidad	1770 rpm
Frecuencia	60 Hz
Grado de Protección	IP 54
Cos $\phi$	0.87
Eficiencia	92.5 %
Transmisión	por Poleas

### BLOWER

Marca	POLLRICH VENTILATOR
Presión	58.8 KPa
Medio	CLEAN AIR COAL GAS
Capacidad	23.5 m <sup>3</sup> /min
Velocidad	1150 rpm
Potencia de Motor	37 KW

## J. ENFRIADOR DE ESCORIA

Capacidad Trabajo	0.3 – 3.0 Tm/hr.
Tamaño exterior	665 x 150 x 1500
Potencia	4 kw.

Velocidad 0.9 – 9.0 rpm.  
 Entrada Temp. =< 1000 °C.  
 Salida Temp. =< 100 °C.  
 Entrada presión agua =< 0.5 MPa  
 Capacidad de agua 12 tn/hr.  
 Granulación =< 2 mm.

**MOTOR**

Marca SIEMENS  
 Potencia 4.6 KW  
 Tensión 440 - 480V Δ  
 Velocidad 1740 rpm

**K. TRANSPORTADOR DE ESCORIA**

Marca HEBEI CHANG  
 Capacidad 12 m<sup>3</sup>/h  
 Potencia 4 KW  
 Velocidad 0.15 m/min

**MOTOR**

	Marca	SIEMENS
	3 – MOT 1LG0133-6AA71-Z	
	LMH.0802/800002232697/001 Q/321081KY104 – 2006	
IP 55	Peso 68 Kg	132M IM B5

	BRG DE 6208-2RZC3	BRG NDE 6208-2RZ-C3
Frecuencia	50 Hz	60 Hz
Tensión	380 / 660 V $\Delta/Y$	440 V $\Delta$
Potencia	4 KW	4.6 KW
Corriente	9.8 / 5.6 A	9.6 A
Velocidad	960 rpm	1160 rpm
Cos $\phi$	0.76	0.76
Eficiencia	82 %	83 %
	360-440 / 630-690 V $\Delta/Y$	420-460 V $\Delta$
	9.3 – 10.3 / 5.4 – 5.9 A	9.2 – 10 A

## REDUCTOR

Tipo XWJ – 7  
Potencia 4.0 kw.  
Transmisión por cadena

## L. VENTILADOR DE TIRO INDUCIDO

### MOTOR DE INDUCCION TRIFÁSICO

Marca WU XI HUADA MOTORS CO. LTD  
Potencia 1 120 KW  
Tensión 13 800 V

Peso	8700 Kg
Velocidad	1190 rpm

#### **VENTILADOR**

Marca	POLLRICH VENTILATOR
Presión Total	7 659 Pa
Peso Específico	0.837 Kg/m <sup>3</sup>
Capacidad	316 000 m <sup>3</sup> /h
Temperatura Media	148 °C
Velocidad	1180 rpm
Potencia de Motor	1120 KW

### **M. VENTILADOR DE TIRO FORZADO**

#### **MOTOR DE INDUCCION TRIFÁSICO**

Marca	WU XI HUADA MOTORS CO. LTD
Potencia	680 KW
Tensión	13 800 V
Peso	5600 Kg
Velocidad	1780 rpm

#### **VENTILADOR**

Marca	POLLRICH VENTILATOR
Presión Total	7826 Pa
Peso Específico	1.2 Kg/m <sup>3</sup>
Capacidad	182 760 m <sup>3</sup> /h
Temperatura Media	20 °C

Velocidad	1180 rpm
Potencia de Motor	680 KW

#### **N. VENTILADOR PRIMARIO**

##### **MOTOR DE INDUCCION TRIFÁSICO**

Marca	WU XI HUADA MOTORS CO. LTD
Potencia	560 KW
Tensión	13 800 V
Peso	5350 Kg
Velocidad	1780 rpm
Amperaje	29.3 A
Lw	93 dB (A)
CosØ	0.86
Grado de Protección	IP 55

##### **VENTILADOR**

Marca	POLLRICH VENTILATOR
Presión Total	14 336 Pa
Peso Específico	1.2 Kg/m <sup>3</sup>
Capacidad	97 900 m <sup>3</sup> /h
Temperatura Media	20 °C
Velocidad	1780 rpm
Potencia de Motor	560 KW

## **O. BOMBA DE PETRÓLEO**

### **MOTOR**

Trifásico Asíncrono

Marca China Zhejiang Kailida

Potencia 7.5 KW

Tensión 440 V  $\Delta$

Velocidad 2900 rpm

Corriente 12.8 A

Frecuencia 50 Hz

Grado de Protección IP 55

Cos $\phi$  0.88

Peso neto 80 Kg

### **BOMBA**

Marca BOTOU HONGYU PUMPS CO. LTD

Tipo Centrifugo para petróleo

Capacidad 6 m<sup>3</sup>/h

Velocidad 2900 rpm

Presión de salida 0.6MPa

NPSH 4mt

Potencia de Motor 7.5KW

**Anexo C:**

**Programa de combustión desarrollado en EES**

## SISTEMA DE ECUACIONES PARA BALANCE DE COMBUSTIÓN CALDERA TSXG

### "Condiciones ambientales"

R\_aire=70

T\_1=10 [C]

P\_atm=101

$P_{sat} = ((105738400 * \exp(-(3928.5 / (T_1 + 231.667)))) / 51.699226) * 6.89$

$P_{vap} = (R_{aire} / 100) * P_{sat}$

e\_aire=10

### "Aire"

$a_{stoic} = a_1 + a_2 / 2 + a_3 - a_4$

O2\_aire=a\_stoic

N2\_aire=3.76\*O2\_aire

$a_7 = (((R_{aire} / 100) * P_{sat}) / (P_{atm} - ((R_{aire} / 100) * P_{sat}))) * (O2_{aire} + N2_{aire}) * (1 + e_{aire} / 100)$

### "Balance de combustión"

#### "Consumo de combustible:"

C\_carbon=13.3 [ton/hr]

C\_medula=7 [ton/hr]

#### "Generación de vapor"

G\_Vapor=80 [Ton/hr]

### "Análisis gravimétrico del combustible como llega al almacén"

#### "Para el carbón:"

ca\_carbon=65.7

ca\_hidrogeno=1.34

ca\_oxigeno=1.02

ca\_nitrogeno=0.15

ca\_azufre=0.89

ca\_cenizas=28.40

ca\_agua=2.50

#### "Para la Medula:"

md\_carbon=24.21

md\_hidrogeno=2.90

md\_oxigeno=20.15

md\_nitrogeno=0.11



md\_azufre=0.02  
md\_cenizas=1.61  
md\_agua=51

"Para la mezcla de ambos combustibles"

mix\_carbon=((ca\_carbon\*C\_carbon/100)+(md\_carbon\*C\_medula/100))  
/(C\_carbon+C\_medula)  
mix\_hidrogeno=((ca\_hidrogeno\*C\_carbon/100)+(md\_hidrogeno\*C\_medula/100))/(  
C\_carbon+C\_medula)  
mix\_oxigeno=((ca\_oxigeno\*C\_carbon/100)+(md\_oxigeno\*C\_medula/100))/(C\_carb  
on+C\_medula)  
mix\_nitrogeno=((ca\_nitrogeno\*C\_carbon/100)+(md\_nitrogeno\*C\_medula/100))/(C\_  
carbon+C\_medula)  
mix\_azufre=((ca\_azufre\*C\_carbon/100)+(md\_azufre\*C\_medula/100))/(C\_carbon+  
C\_medula)  
mix\_cenizas=((ca\_cenizas\*C\_carbon/100)+(md\_cenizas\*C\_medula/100))/(C\_carb  
on+C\_medula)  
mix\_agua=((ca\_agua\*C\_carbon/100)+(md\_agua\*C\_medula/100))/(C\_carbon+C\_m  
edula)

"Análisis gravimétrico del combustible SIN CENIZAS"

a\_carbon=mix\_carbon\*100/(1-mix\_cenizas)  
a\_hidrogeno=mix\_hidrogeno\*100/(1-mix\_cenizas)  
a\_oxigeno=mix\_oxigeno\*100/(1-mix\_cenizas)  
a\_nitrogeno=mix\_nitrogeno\*100/(1-mix\_cenizas)  
a\_azufre=mix\_azufre\*100/(1-mix\_cenizas)  
a\_agua=mix\_agua\*100/(1-mix\_cenizas)

"% de carbón no quemado"

c\_2=5

"Carbón utilizado"

c\_1=a\_carbon\*(1-(c\_2/100))

"kmol/kg de combustible"

a_1=c_1/(12*100)	"kmol_carbon/kg_combustible"
a_2=a_hidrogeno/(2*100)	"kmol_hidrogeno/kg_combustible"
a_3=a_azufre/(32*100)	"kmol_azufre/kg_combustible"
a_4=a_oxigeno/(32*100)	"kmol_oxigeno/kg_combustible"
a_5=a_agua/(18*100)	"kmol_agua/kg_combustible"
a_6=a_nitrogeno/(28*100)	"kmol_nitrogeno/kg_combustible"

"Sistema de ecuaciones para el balance de la combustion"

"Reacción de combustión"

$$(a_1+a_2+a_3+a_4+a_5+a_6)+b*(O_2+3,76*N_2)=c*CO_2+d*CO+e*H_2O+f*N_2+g*O_2+i*NO+j*SO_2$$

"Balance de carbono:"  $a_1-c-d=0$

"Balance de hidrogeno:"  $a_2-e=0$

"Balance de azufre:"  $a_3-j=0$

"Balance de oxigeno:"  $a_4+b-c-d/2-e/2-g-i/2-j=0$

"Balance de nitrogeno:"  $a_6+b*3.76-f-i/2=0$

"Humedad total:"  $w_{total}=a_2+a_5+a_7$

"Oxigeno necesario para la combustión estequiométrica"

$b=a_{stoic}*(1+(e_{aire}/100))$

"Oxigeno total 15% de exceso de aire"

$n_{total}=c+b_{CO_2}+d+w_{total}+f+b_3+i$

$i=0.0000249$

$d=3.931/1000000$

"Relación aire/combustible"

$R_{AireComb}=a_{stoic}*MOLARMASS(O_2)+3.76*a_{stoic}*MOLARMASS(N_2)+a_7*MOLARMASS(H_2O)+4.76*a_{stoic}*(e_{aire}/100)*MOLARMASS(air)$

"Balance de Caliza  $CaCO_3$ "

" $CaCO_3 + Calor = CaO + CO_2$ "

" $CaO + SO_2 = CaSO_4$ "

"Relación calcio azufre: "

$R_{CaS}=0$

"Reacción química de caliza"

$(R_{CaS}) * j * CaO + j * SO_2 + g * O_2 = b_1 * CaSO_4 + b_2 * CaO + b_3 * O_2$

"Sistema de ecuaciones :"

"Balance de Calcio:"  $b_2=R_{CaS}*j$

"Balance de azufre:"  $b_1=j$

"Balance de oxigeno:"  $((R_{CaS}*j)/2)+j+g-2*b_1-(b_2/2)-b_3=0$

"Cantidad de Ca necesaria. kmol\_Ca/kg\_combustible"  
 $b_{Ca} = R_{CaS} \cdot j$

"Cantidad necesaria de caliza para la reacción de sulfatación  
kmol\_CaCO3/kg\_combustible"  
 $b_{CaCO3} = b_{Ca}$

"Cantidad de CO2 liberado en la reacción de sulfatación  
kmol\_CO2/kg\_combustible"  
 $b_{CO2} = b_{CaO}$

"Cantidad de O2 liberado en la reacción de sulfatación kmol\_O2/kg\_combustible"  
 $b_{O2} = b_3$

"Cantidad de CaO remanente en el sistema kmol\_CaO/kg\_combustible"  
 $b_{CaO} = R_{CaS} \cdot j - j$

"Cantidad de CaSO4 formado en la reacción de sulfatación kmol/kg\_combustible"  
 $b_{CaSO4} = b_1$

"Productos totales de combustión"

"Total de CO2"  $d_{CO2} = c + b_{CO2}$

"Total de CO"  $d_{CO} = d$

"Total de H2O"  $d_{H2O} = w_{total}$

"Total de N2"  $d_{N2} = f$

"Total de O2"  $d_{O2} = b$

"Total de NO"  $d_{NO} = i$

"Total de SO2"  $d_{SO2} = j$

"Total de CaSO4"  $d_{CaSO4} = b_1$

"Total remanente CaO"  $d_{CaO} = b_{CaO}$

"Fracciones molares:"

"Para CO2:"  $y_{CO2} = (c + b_{CO2}) / n_{total}$

"Para CO:"  $y_{CO} = d / n_{total}$

"Para H2O:"  $y_{H2O} = (w_{total}) / n_{total}$

"Para N2:"  $y_{N2} = f / n_{total}$

"Para O2:"  $y_{O2} = b_3 / n_{total}$

"Para NO:"  $y_{NO} = i / n_{total}$

"Para SO2:"  $y_{SO2} = j / n_{total}$

"Temperatura del hogar:"  $T = T_{comb}$

"Presión en el hogar:"  $P = 1$

"Presión de referencia:"  $P_{ref} = 101$

"Constante universal de los gases:"

$R = 8.314$

"Función de Gibbs:"

"Energía libre de Gibbs para T y presión de 1 bar"

"Para CO2:"  $g|o\_CO2=(Enthalpy(CO2,T=T)-T*Entropy(CO2,T=T,P=P\_ref))*MOLARMASS(CO2)$

"Para CO:"  $g|o\_CO=(Enthalpy(CO,T=T)-T*Entropy(CO,T=T,P=P\_ref))*MOLARMASS(CO)$

"Para N2:"  $g|o\_N2=(Enthalpy(N2,T=T)-T*Entropy(N2,T=T,P=P\_ref))*MOLARMASS(N2)$

"Para O2:"  $g|o\_O2=(Enthalpy(O2,T=T)-T*Entropy(O2,T=T,P=P\_ref))*MOLARMASS(O2)$

"Para NO:"  $g|o\_NO=(Enthalpy(NO,T=T)-T*Entropy(NO,T=T,P=P\_ref))*MOLARMASS(NO)$

"Ley de conservación de masa para la reacción CO-CO2"  
 $DELTA G|o\_1=-R*T*\ln(K\_1)$

"Ley de conservación de masa para la reacción N2-O2"  
 $DELTA G|o\_2=-R*T*\ln(K\_2)$

"Constante de equilibrio para la reacción CO-CO2"

$$K\_1=y\_CO*\sqrt{(y\_O2*P/P\_ref)/(y\_CO2)}$$

"Constante de equilibrio para la reacción N2-O2"

$$K\_2=y\_NO*y\_NO/y\_O2*y\_N2$$

"SISTEMA DE ECUACIONES PARA BALANCE DE ENERGIA Y EFICIENCIA - CALDERA TSXG"

"Balance energético de combustión"

"Poder calorífico inferior KJ/Kg"

"Carbón Antracita"  $PC\_antr=21541.81$  [kJ/kg]

"Medula de bagazo"  $PC\_med=7424.01$  [kJ/kg]

"Combustible Mix"

$$P\_ci=PC\_antr*(PC\_antr*C\_carbon/(PC\_antr*C\_carbon+PC\_med*C\_medula))+PC\_med*(PC\_med*C\_medula/(PC\_antr*C\_carbon+PC\_med*C\_medula))$$

"Poder calorífico del elemento carbono cuando pasa a CO2 KJ/Kg"

$$PC\_c=34053$$
 [kJ/kg]

"Temperatura del aire caliente "  
 $T_a=110$  [°C]

"Poder calorífico real considerando la cantidad de combustible no quemado"  
 $PCI=(P_{ci}-(c_2/100)*PC_c)$

"Entalpía del aire a  $T_a$  "  
 $h_a=(Enthalpy(Air,T=T_a)-Enthalpy(Air,T=T_1))*MOLARMASS(Air)$

"Calor específico del carbón kJ/kgK"  
 $T_{coal}=26$   
 $c_c=c('Coal-anthracite', T_{coal})$

"Entalpía del combustible"  
 $h_{comb}=c_c*(T_{coal}+273)$

"Energía de los reactivos:"  
 $E_{reactivos}=(R_{AireComb}/MolarMass(Air))*h_a+h_{comb}+PCI$

"Energía de los productos para 990°C"

"Temperatura real de combustión"  $T_{comb}=990$  [C]  
"Temperatura de fundición de la escoria"  $T_{fund}=1200$  [C]  
"Temperatura de diseño para la combustion"  $T_{nom}=860$  [C]

"Para CO2 "  
 $h_{CO2}=(ENTHALPY(CO2,T=T_{comb})-ENTHALPY(CO2,T=0))*MolarMass(CO2)$   
 $E_{CO2}=d_{CO2}*h_{CO2}$

"Para CO"  
 $h_{CO}=(ENTHALPY(CO,T=T_{comb})-ENTHALPY(CO,T=0))*MolarMass(CO)$   
 $E_{CO}=d_{CO}*h_{CO}$

"Para N2"  
 $h_{N2}=(ENTHALPY(N2,T=T_{comb})-ENTHALPY(N2,T=0))*MolarMass(N2)$   
 $E_{N2}=d_{N2}*h_{N2}$

"Para O2 "  
 $h_{O2}=(ENTHALPY(O2,T=T_{comb})-ENTHALPY(O2,T=0))*MolarMass(O2)$   
 $E_{O2}=d_{O2}*h_{O2}$

"Para NO "

$$h_{NO}=(ENTHALPY(NO,T=T_{comb})-ENTHALPY(NO,T=0))*MolarMass(NO2)$$

$$E_{NO}=d_{NO}*h_{NO}$$

"Para H2O "

$$h_{H2O}=(ENTHALPY(H2O,T=T_{comb})-ENTHALPY(H2O,T=0))*MolarMass(H2O)$$

$$E_{H2O}=d_{H2O}*h_{H2O}$$

"Para SO2 "

$$h_{SO2}=(ENTHALPY(SO2,T=T_{comb})-ENTHALPY(SO2,T=0))*MolarMass(SO2)$$

$$E_{SO2}=d_{SO2}*h_{SO2}$$

"Para la energía latente en CO"

$$E_{reacCO}=d_{CO}*10640*MolarMass(CO)$$

"Energía total de los productos:"

$$E_{productos}=E_{CO2}+E_{CO}+E_{N2}+E_{O2}+E_{NO}+E_{H2O}+E_{SO2}+E_{reacCO}$$

"Energía útil entregada en el hogar"

$$q_{990}=(E_{reactivos}-E_{productos})*(1-(T_{comb}-T_{nom})/(T_{fund}-T_{nom}))$$

"Energía de los productos para Tsalida=180°C (temperatura de salida de la unidad recuperadora de calor HRA)"

"Temperatura de salida de los gases de escape:"

$$T_s=180 [C]$$

"Para CO2 "

$$h2_{CO2}=(ENTHALPY(CO2,T=T_s)-ENTHALPY(CO2,T=0))*MolarMass(CO2)$$

$$E2_{CO2}=d_{CO2}*h2_{CO2}$$

"Para CO "

$$h2_{CO}=(ENTHALPY(CO,T=T_s)-ENTHALPY(CO,T=0))*MolarMass(CO)$$

$$E2_{CO}=d_{CO}*h2_{CO}$$

"Para N2 "

$$h2_{N2}=(ENTHALPY(N2,T=T_s)-ENTHALPY(N2,T=0))*MolarMass(N2)$$

$$E2_{N2}=d_{N2}*h2_{N2}$$

"Para O2 "

$$h2_{O2}=(ENTHALPY(O2,T=T_s)-ENTHALPY(O2,T=0))*MolarMass(O2)$$

$$E2_{O2}=d_{O2}*h2_{O2}$$

"Para NO "

$$h2\_NO=(ENTHALPY(NO,T=T\_s)-ENTHALPY(NO,T=0))*MolarMass(NO)$$
$$E2\_NO=d\_NO*h2\_NO$$

"Para H2O "

$$h2\_H2O=(ENTHALPY(H2O,T=T\_s)-ENTHALPY(H2O,T=0))*MolarMass(H2O)$$
$$E2\_H2O=d\_H2O*h2\_H2O$$

"Para SO2 "

$$h2\_SO2=(ENTHALPY(SO2,T=T\_s)-ENTHALPY(SO2,T=0))*MolarMass(SO2)$$
$$E2\_SO2=d\_SO2*h2\_SO2$$

"Para la energía latente en CO"

$$E2\_reacCO=d\_CO*10640*MolarMass(CO)$$

"Energía útil entregada durante el proceso"

$$E\_productos2=E2\_CO2+E2\_CO+E2\_N2+E2\_O2+E2\_NO+E2\_H2O+E2\_SO2+E2\_reacCO+(c\_2)/100*a\_1*P\_ci*8$$

$$q\_180=E\_productos-E\_productos2$$

$$Calor\_util=q\_180+q\_990$$

"Rendimiento de la caldera:"

$$Ren\_caldera=(Calor\_util/E\_reactivos)*100$$

"Rendimiento de combustión:"

$$Ren\_combustion=((P\_ci-(c\_2*PC\_c/100))/P\_ci)*100$$

"ANALISIS ECONOMICO"

"Si suponemos que solo se consume carbón, entonces:"

"Consumo de carbón:"

$$C\_carbon1=(PC\_antr*C\_carbon+PC\_med*C\_medula)/PC\_antr$$

"Ratio de generación de vapor:"

$$Ratio\_gv=G\_Vapor/C\_carbon1$$

"Ahorro de carbón generado por el consumo de medula"

$$Ahorro\_carb1=C\_carbon1-C\_carbon$$

"Si determinamos el consumo de carbón después de la mejora de la Eficiencia"

"Eficiencia mejorada:" Rend\_mejorado=90  
"Entalpia de vapor sobrecalentado:" h\_vsc=3345.6  
"Entalpia de agua de alimentación:" h\_wa=425.1  
"Consumo de carbón después de la mejora"  
 $C\_carbon2=(G\_Vapor*(h\_vsc-h\_wa))/(Rend\_mejorado*PC\_antr/100)$   
"Ahorro de carbon generado por la mejora de la eficiencia"  
 $Ahorro\_carb2=C\_carbon1-C\_carbon2$

### SOLUCIÓN AL SISTEMA DE ECUACIONES PLANTEADO:

Ahorro_carb1=2.412 [ton/hr]	a_nitrogeno=0.1685	c=0.05033 [kmol/kg]
Ahorro_carb2=3.661 [ton/hr]	a_oxigeno=9.422	Calor_util=13952 [kJ/kmol]
a_1=0.05033 [kmol/kg]	a_stoic=0.05342 [kmol/kg]	ca_agua=2.5
a_2=0.01162 [kmol/kg]	b=0.05876 [kmol/kg]	ca_azufre=0.89
a_3=0.0002281 [kmol/kg]	b_1=0.0002281 [kmol/kg]	ca_carbon=65.7
a_4=0.002944 [kmol/kg]	b_2=-0.0002281 [kmol/kg]	ca_cenizas=28.4
a_5=0.01321 [kmol/kg]	b_3=0.005218 [kmol/kg]	ca_hidrogeno=1.34
a_6=0.00006018 [kmol/kg]	b_Ca=0 [kmol/kg]	ca_nitrogeno=0.15
a_7=0.002401 [kmol/kg]	b_CaCO3=0 [kmol/kg]	ca_oxigeno=1.02
a_agua=23.78	b_CaO=-0.0002281 [kmol/kg]	c_1=60.4
a_azufre=0.7299	b_CaSO4=0.0002281 [kmol/kg]	c_2=5
a_carbon=63.58	b_CO2=-0.0002281 [kmol/kg]	c_c=1.26 [kJ/kg.C]
a_hidrogeno=2.323	b_O2=0.005218 [kmol/kg]	C_carbon=13.3 [Ton/hr]
		C_carbon1=15.71 [ton/hr]
		C_carbon2=12.05 [ton/hr]
		C_medula=7 [Ton/hr]



d=0.000003931 [kmol/kg]	E2_NO=0.1342 [kJ/kg]	g o_CO2=-624731 [kJ/kmol]
DELTA g o_1=120936	E2_O2=315.9 [kJ/kg]	g o_N2=-203175 [kJ/kmol]
DELTA g o_2=124047	E2_reacCO=1.172 [kJ/kg]	g o_NO=-132065 [kJ/kmol]
d_CaO=-0.0002281 [kmol/kg]	E2_SO2=1.73	g o_O2=-217118 [kJ/kmol]
d_CaSO4=0.0002281 [kmol/kg]	e_aire=10	h2_CO=5262 [kJ/kmol]
d_CO=0.000003931 [kmol/kg]	E_CO=0.1232 [kJ/kg]	h2_CO2=7149 [kJ/kmol]
d_CO2=0.0501 [kmol/kg]	E_CO2=2449 [kJ/kg]	h2_H2O=6125 [kJ/kmol]
d_H2O=0.02723 [kmol/kg]	E_H2O=1039 [kJ/kg]	h2_N2=5254 [kJ/kmol]
d_N2=0.221 [kmol/kg]	E_N2=6853 [kJ/kg]	h2_NO=5390 [kJ/kmol]
d_NO=0.0000249 [kmol/kg]	E_NO=1.225 [kJ/kg]	h2_O2=5376 [kJ/kmol]
d_O2=0.05876 [kmol/kg]	E_O2=1924 [kJ/kg]	h2_SO2=7584
d_SO2=0.0002281 [kmol/kg ]	E_productos=12279 [kJ/kg]	h_a=2919 [kJ/kg]
e=0.01162 [kmol/kg]	E_productos2=2395 [kJ/kg]	h_CO=31330 [kJ/kmol]
E2_CO=0.02068 [kJ/kg]	E_reacCO=1.172 [kJ/kg]	h_CO2=48888 [kJ/kmol]
E2_CO2=358.1 [kJ/kg]	E_reactivos=18866 [kJ/kg]	h_comb=376.7 [kJ/kg]
E2_H2O=166.8 [kJ/kg]	E_SO2=11.34	h_H2O=38157 [kJ/kmol]
E2_N2=1161 [kJ/kg]	f=0.221 [kmol/kg]	
	g=0.005332 [kmol/kg]	
	G_Vapor=80 [Ton/hr]	
	g o_CO=-319765 [kJ/kmol]	

h_N2=31010 [kJ/kmol]	mix_hidrogeno=0.018 78	Ratio_gv=5.092
h_NO=49192 [kJ/kmol]	mix_nitrogeno=0.001 362	Rend_mejorado=90
h_O2=32740 [kJ/kmol]	mix_oxigeno=0.0761 7	Ren_caldera=73.96
h_SO2=49710	N2_aire=0.2009 [kmol/kg]	Ren_combustion=91. 21
h_vsc=3346 [kJ/kg]	n_total=0.3036 [kmol/kg]	R_aire=70
h_wa=425.1 [kJ/kg]	O2_aire=0.05342 [kmol/kg]	R_AireComb=8.116
i=0.0000249 [kmol/kg]	P=1 [kPa]	R_CaS=0
j=0.0002281 [kmol/kg]	PCI=17672 [kJ/kg]	T=990 [C]
K_1=4.158E-07	PC_antr=21542 [kJ/kg]	T_1=10 [C]
K_2=2.850E-07	PC_c=34053 [kJ/kg]	T_a=110 [°C]
md_agua=51	PC_med=7424 [kJ/kg]	T_coal=26 [C]
md_azufre=0.02	P_atm=101 [kPa]	T_comb=990 [C]
md_carbon=24.21	P_ci=19374 [kJ/kg]	T_fund=1200 [C]
md_cenizas=1.61	P_ref=101 [kPa]	T_nom=860 [C]
md_hidrogeno=2.9	P_sat=1.228 [kPa]	T_s=180 [C]
md_nitrogeno=0.11	P_vap=0.8595 [kPa]	w_total=0.02723 [kmol/kg]
md_oxigeno=20.15	q_180=9884	y_CO=0.00001295
mix_agua=0.1922	q_990=4068 [kJ/kg]	y_CO2=0.165
mix_azufre=0.0059	R=8.314	y_H2O=0.08969
mix_carbon=0.5139		y_N2=0.728
mix_cenizas=0.1916		y_NO=0.00008202
		y_O2=0.01719
		y_SO2=0.0007513

**Anexo D:**

**Informes diarios de operación de la caldera de lecho fluidizado circulante.**

FECHA	HORAS	CONSUMO DE COMBUSTIBLE						PERFORMANCE DE LA CALDERA										ENERGIA TERMICA		ENERGIA ELECTRICA	
		Carbón Antracita		Bagozo y/o Médula		Petróleo Diesel 2		Flujo de agua de ingreso a la caldera (Tn/h)	Presión del agua de alimentación a la caldera (Mpa)	Temperatura del agua en el desecador (°C)	Presión del vapor sobrecalentado (Mpa)	Temperatura del vapor sobrecalentado (°C)	Presión de vapor después de la estación reductora (Mpa)	Temperatura del vapor después de estación reductora (°C)	Temperatura de la carne de lecho fluido (°C)	Presión del hogar de la caldera (Kpa)	Exceso de oxígeno en la combustión (%)	Vapor producido por la caldera (Tn/h)	Vapor consumido por la turbina (Tn/h)	Potencia Generada en los bornes del Generador (Mw)	Potencia consumida por la Caldera TSXG (Mw)
		Tn/h	PCI (Kcal/Kg)	Tn/h	PCI (Kcal/Kg)	Gln	PCI (KJ/Kg)														
1-ene	24	11.6	5462.76				90.63	8.64	99	6.6	467	4.17	379	987	-378	8	74.5	78.90	10.3	2.6	
2-ene	48	12.1	5462.76				93.3	8.77	100.7	5.8	464	4.15	382	957	-518	7.6	77.9	82.40	9.9	2.55	
3-ene	56	12.6	5462.76				100.03	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	976	-500	8.1	81.2	86.50	10.2	2.51	
4-ene	96	10.3	5462.76				84.56	8.77	100	5.8	464	4.15	382	969	-459	8.2	66.56	69.90	8.45	2.56	
5-ene	120	12.3	5462.76				89.16	8.56	101	5.3	464	4.12	374	987	-536	7.6	78.8	83.40	9.5	2.6	
6-ene	144	12.3	5462.76				90	8.64	99	6.6	467	4.17	379	987	-536	7.9	79.31	83.10	9.8	2.6	
7-ene	168	11.1	5462.76				86.75	8.56	101	5.3	464	4.12	374	976	-500	8.9	71.2	76.52	10	2.51	
8-ene	187	12.3	5462.76			734	90.71	8.56	101	5.3	464	4.12	374	976	-500	8.5	79.17	83.20	9.8	2.5	
9-ene	187																				
10-ene	187																				
11-ene	187																				
12-ene	187																				
13-ene	187																				
14-ene	187																				
15-ene	187																				
16-ene	187					1018															
17-ene	202	12.0	5462.76				93.95	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	978	-546	8.3	76.8	79.90	10.6		
18-ene	226	12.3	5462.76				93.71	8.77	100	5.8	464	4.15	382	969	-498	7.6	79.3	83.30	11.4		
19-ene	256					1144															
20-ene	278	11.6	5462.76				85.7	8.64	99	6.6	467	4.17	379	976	-500	7.8	74.4	79.10	9.7		
21-ene	302	12.5	5462.76				93.7	8.64	99	6.6	467	4.17	379	976	-500	7.9	80.4	84.40	10.8	2.5	
22-ene	326	12.7	5462.76				98.08	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	976	-500	7.8	81.4	85.80	11.8	2.6	
23-ene	350	11.5	5462.76				90.66	8.64	101.4	6.28	474	4.13	376	978	-411	8.3	74	78.80	9.81	2.5	
24-ene	353																				
25-ene	353																				
26-ene	353																				
27-ene	372	10.9	5462.76				89.04	8.64	101.4	6.28	474	4.13	376	957	-518	8.3	69.7	74.40	10	2.5	
28-ene	396	11.9	5462.76				91.88	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	978	-411	8.2	76.16	79.90	10.3	2.5	
29-ene	420	13.2	5462.76				92.88	8.64	101.4	6.28	474	4.13	376	987	-536	7.9	84.83	89.80	11.5	2.5	
30-ene	444	10.7	5462.76				83	8.54	101	6.12	468	4.14	377	979	-734	7.8	68.8	73.40	10.5	2.5	
31-ene	468	12.3	5462.76				90.38	8.64	101.4	6.28	474	4.13	376	997	-809	8.3	79.1	84.40	11.3	2.55	

FECHA	HORAS	CONSUMO DE COMBUSTIBLE						PERFORMANCE DE LA CALDERA										ENERGIA TERMICA		ENERGIA ELECTRICA	
		Carbón Antracita		Bagazo y/o Mèdula		Petróleo Diesel 2		Flujo de agua de ingreso a la caldera (Tn/h)	Presión del agua de alimentación a la caldera (Mpa)	Temperatura del agua en el desacaerador (°C)	Presión del vapor sobrecalentad (Mpa)	Temperatura del vapor sobrecalentad (°C)	Presión de vapor después de la estación reductora (kPa)	Temperatura del vapor después estación reductora (°C)	Temperatura de la cama de lecho fluido (°C)	Presión del hogar de la caldera (Kpa)	Exceso de oxígeno en la combustión (%)	Vapor producido por la caldera (Tn/h)	Vapor consumido por la turbina (Tn/h)	Potencia Generada en los bornes del Generador (Mw)	Potencia consumida por la Caldera TSXG (Mw)
		Tn/h	PCI (Kcal/Kg)	Tn/h	PCI (Kcal/Kg)	Gin	PCI (KJ/Kg)														
1-feb	24	13.9	5584.45				89.75	8.77	100.7	5.8	464	4.15	382	987	-378	8.4	80.2	85.34	11.5	2.6	
2-feb	48	14.4	5584.45				92.25	8.77	100.7	5.8	464	4.31	378	957	-518	8.1	83.1	85.50	11	2.55	
3-feb	72	12.9	5584.45				92.1	8.77	100.7	5.8	464	4.31	378	978	-411	8	74.4	79.90	10	2.55	
4-feb	96	12.9	5584.45				89.43	8.77	100	5.8	464	4.23	372	969	-459	8.2	74.5	79.30	9.6	2.56	
5-feb	120	12.7	5584.45				87	8.56	101	5.3	464	4.12	374	987	-536	8.4	73.2	76.90	9.1	2.6	
6-feb	123	12.4	5584.45			790	89.6	8.64	99	6.6	467	4.23	372	957	-518	7.2	71.9	76.30	9.1	2.54	
7-feb	158	14.7	5584.45				90	8.64	99	6.2	472	4.17	372	976	-500	8.2	84.1	88.70	11.3	2.51	
8-feb	166					890															
9-feb	206	12.3	5584.45				86.2	8.77	100.7	5.8	464	4.15	382	978	-411	7.9	71.1	75.40	10.6	2.54	
10-feb	230	11.9	5584.45				84.3	8.77	100	5.8	464	4.15	382	969	-459	8.1	68.9	73.80	10.6	2.6	
11-feb	254	11.9	5584.45				88.3	8.56	101	5.3	464	4.12	374	987	-536	7.7	68.9	73.80	10.6	2.54	
12-feb	278	11.9	5584.45				86.87	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	987	-536	8.4	68.3	73.30	8.8	2.5	
13-feb	302	12.3	5584.45				85.13	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	976	-500	7.8	70.9	75.60	10.2	2.6	
14-feb	326	14.2	5584.45				87	8.64	99	6.6	467	4.17	379	987	-378	7.9	81.9	84.60	10.7	2.54	
15-feb	350	13.4	5584.45				87.9	8.64	99	6.6	467	4.17	379	957	-518	8.1	77.25	82.10	11	2.5	
16-feb	374	12.0	5584.45				86.5	8.77	100	5.8	464	4.15	382	969	-459	8.2	69.4	73.90	10.7	2.6	
17-feb	398	13.4	5584.45				98.9	8.64	99	6.6	467	4.17	379	987	-536	7.9	77.2	80.30	10.1	2.6	
18-feb	422	12.4	5584.45				84.1	8.64	99	6.2	472	4.17	374	973	-450	8.3	71.2	75.20	10	2.5	
19-feb	446	12.1	5584.45				83.2	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	976	-500	8.4	69.9	73.90	10.5	2.55	
20-feb	470	11.8	5584.45				82.8	8.64	99	6.6	467	4.17	379	976	-500	7.9	67.88	73.40	10	2.6	
21-feb	494	13.5	5584.45				83.3	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	976	-500	8.3	77.7	80.40	8.5	2.5	
22-feb	518	11.8	5584.45				83.9	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	976	-500	8.4	67.9	70.20	5.5	2.6	
23-feb	542	12.8	5584.45				90.2	8.64	99	6.6	467	4.17	379	969	-459	7.8	73.9	77.90	11	2.6	
24-feb	565	12.3	5584.45				90.52	8.64	99	6.6	467	4.17	379	987	-536	8.2	70.9	75.40	8.9	2.55	
25-feb	565					447															
26-feb	605	13.5	5584.45				94.9	8.77	100	5.8	464	4.15	382	976	-500	8.3	78.2	82.00	11.1	2.5	
27-feb	629	13.5	5584.45				96.4	8.77	100.7	5.8	464	4.15	382	976	-500	8.4	77.9	82.10	11	2.5	
28-feb	653	13.9	5584.45				90.4	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	978	-411	7.4	79.8	83.80	11.2	2.5	

FECHA	HORAS	CONSUMO DE COMBUSTIBLE						PERFORMANCE DE LA CALDERA									ENERGIA TERMICA		ENERGIA ELECTRICA		
		Carbón Antracita		Bagazo y/o Médula		Petróleo Diesel 2		Flujo de agua de ingreso a la caldera (Tn/h)	Presión del vapor de alimentación a la caldera (Mpa)	Temperatura del agua en el desareador (°C)	Presión del vapor sobrecalentado (Mpa)	Temperatura del vapor sobrecalentado (°C)	Presión de vapor después de la estación reductora (Mpa)	Temperatura del vapor después estación reductora (°C)	Temperatura de la cama de lecho fluido (°C)	Presión del hogar de la caldera (Kpa)	Exceso de oxígeno en la combustión (%)	Vapor producido por la caldera (Tn/h)	Vapor consumido por la turbina (Tn/h)	Potencia Generada en los bornes del Generador (Mw)	Potencia consumida por la Caldera TSXG (Lhw)
		Tn/h	PCI (Kcal/Kg)	Tn/h	PCI (Kcal/Kg)	Gln	PCI (KJ/Kg)														
1-mar	24	13.1	5467.9				97.3	8.77	100.7	5.8	464	4.15	382	987	-378	8.4	76.1	79.28	10.6	2.6	
2-mar	48	13.0	5467.9				97.15	8.77	100.7	5.8	464	4.31	378	957	-518	8.1	75.6	79.80	11	2.55	
3-mar	72	13.1	5467.9				97.4	8.77	100.7	5.8	464	4.31	378	978	-411	8	76	79.28	11.4	2.56	
4-mar	96	12.4	5467.9				90.7	8.77	100	5.8	464	4.23	372	969	-459	8.2	72.2	76.90	9.8	2.56	
5-mar	116	10.6	5467.9				91	8.56	101	5.3	464	4.12	374	987	-536	8.4	61.4	64.20	8.5	2.6	
6-mar	116					1360															
7-mar	144	13.5	5467.9				94.9	8.64	99	6.2	472	4.17	372	976	-500	8.2	77.8	82.50	11.1	2.51	
8-mar	168	13.8	5467.9				94	8.56	101	5.3	464	4.12	374	957	-518	7.8	80	84.90	10.5	2.55	
9-mar	192	13.1	5467.9				90.77	8.77	100.7	5.8	464	4.15	382	978	-411	7.9	76	80.80	10.8	2.54	
10-mar	205	12.7	5467.9				91.2	8.64	99	6.6	467	4.17	379	973	-450	8.5	74	77.90	10.1	2.54	
11-mar	237	13.2	5467.9				83.9	8.56	101	5.3	464	4.12	374	987	-536	7.7	76.4	81.08	10.6	2.54	
12-mar	261	13.4	5467.9				90.64	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	987	-536	8.4	77.7	81.70	10.8	2.5	
13-mar	285	13.5	5467.9				92.5	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	976	-500	7.8	78.4	83.30	10.5	2.6	
14-mar	309	13.6	5467.9	3.33			92.26	8.64	99	6.6	467	4.17	379	987	-378	7.9	79	83.61	11	2.54	
15-mar	333	13.1	5467.9	3.17			86.91	8.64	99	6.6	467	4.17	379	957	-518	8.1	76	79.53	10.5	2.5	
16-mar	357	13.1	5467.9	2.03			89.3	8.77	100	5.8	464	4.15	382	969	-459	8.2	76.1	80.40	10.5	2.6	
17-mar	381	13.5	5467.9	1.82			93.35	8.64	99	6.6	467	4.17	379	987	-536	7.9	78.2	81.91	10.6	2.6	
18-mar	405	13.2	5467.9	0.81			93.75	8.64	99	6.2	472	4.17	374	973	-450	8.3	76.1	80.76	11.2	2.5	
19-mar	429	13.8	5467.9	0.6			92.63	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	976	-500	8.4	80.1	84.13	10.4	2.55	
20-mar	453	12.7	5467.9	1.55			90.53	8.64	99	6.6	467	4.17	379	976	-500	7.9	73.9	78.50	10	2.6	
21-mar	477	12.1	5467.9	0.54			88.36	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	976	-500	8.3	70	74.23	10	2.5	
22-mar	501	13.3	5467.9				92.5	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	976	-500	8.4	77	81.25	10.8	2.6	
23-mar	525	13.2	5467.9	0.56			92.63	8.64	99	6.6	467	4.17	379	969	-459	7.8	77	81.88	10.5	2.6	
24-mar	549	13.3	5467.9				91.88	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	987	-536	8.2	77.2	80.80	10.3	2.55	
25-mar	573	13.3	5467.9	1.85			94	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	973	-450	8.3	77	81.13	11.1	2.5	
26-mar	597	13.7	5467.9				94	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	976	-500	8.4	79.6	83.40	10.8	2.5	
27-mar	621	12.9	5467.9	2.43			91.3	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	987	-378	8.4	74.4	76.57	9.5	2.5	
28-mar	645	12.7	5467.9	2.36			92.5	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	957	-518	7.8	73.5	76.57	10.5	2.5	
29-mar	669	13.7	5467.9				97.43	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	957	-518	7.9	79.3	83.00	9	2.6	
30-mar	693	11.8	5467.9	2.33			90.1	8.63	101.3	5.67	475	4.09	386	969	-602	8.4	68	71.83	9.3	2.3	
31-mar	705																				

FECHA	HORAS	CONSUMO DE COMBUSTIBLE						PERFORMANCE DE LA CALDERA										ENERGIA TERMICA		ENERGIA ELECTRICA	
		Carbón Antracita		Bagazo y/o Médula		Petróleo Diesel 2		Flujo de agua de ingreso a la caldera (Tn/h)	Presión del agua de alimentación a la caldera (Mpa)	Temperatura del agua en el desaireador (°C)	Presión del vapor sobrecalentado (Mpa)	Temperatura del vapor sobrecalentado (°C)	Presión de vapor después de la estación reductora (Mpa)	Temperatura del vapor después estación reductora (°C)	Temperatura de la cama de lecho fluido (°C)	Presión del hogar de la caldera (Kpa)	Exceso de oxígeno en la combustión (%)	Vapor producido por la caldera (Tn/h)	Vapor consumido por la turbina (Tn/h)	Potencia Generada en los bornes del Generador (Mw)	Potencia consumida por la Caldera TSXG (Mw)
		Tn/h	PCI (Kcal/Kg)	Tn/h	PCI (Kcal/Kg)	Gln	PCI (KJ/Kg)														
1-abr	0					1060															
2-abr	4																				
3-abr	4																				
4-abr	4																				
5-abr	4					2464															
6-abr	44	11.3	5123.9	2.77			90.54	8.64	99	6.6	467	4.18	376	987	-536	7.7	68.3	72.10	7.9.9	2.6	
7-abr	68	12.8	5123.9	2.3			89.25	8.64	99	6.2	472	4.17	372	976	-500	7	76.4	78.90	9.2	2.51	
8-abr	89	12.0	5123.9	5.22			94.19	8.56	101	5.3	464	4.12	374	957	-518	7.2	72.3	74.11	8.2	2.55	
9-abr	111	11.2	5123.9	2.71			91.5	8.77	100.7	5.8	464	4.15	382	978	-411	7.9	67.6	70.63	9.3	2.54	
10-abr	135	11.4	5123.9				89.1	8.77	100	5.8	464	4.15	382	969	-459	5.6	68.9	73.10	8.34	2.6	
11-abr	159	12.0	5123.9	1.35			93.6	8.56	101	5.3	464	4.12	374	987	-536	7.7	72.4	76.37	10	2.54	
12-abr	177																				
13-abr	177					1156															
14-abr	200	12.5	5123.9	3.06			89.18	8.64	99	6.6	467	4.17	379	987	-536	6.6	75.5	79.80	10.5	2.6	
15-abr	212																				
16-abr	212																				
17-abr	212					1552															
18-abr	240	12.6	5123.9	2.3			90.41	8.64	99	6.2	472	4.17	374	973	-450	6.7	75.4	78.70	10.3	2.5	
19-abr	264	12.5	5123.9	3.45			89.8	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	976	-500	7	75.1	77.90	10.3	2.55	
20-abr	288	12.6	5123.9	3.59			92.3	8.64	99	6.6	467	4.17	379	976	-500	6.8	76.3	79.90	10.3	2.6	
21-abr	312	12.8	5123.9	3.84			93.2	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	976	-500	6.9	77.4	80.80	10.5	2.5	
22-abr	322					788															
23-abr	354	13.2	5123.9	4.43			94.9	8.64	99	6.6	467	4.17	379	969	-459	6.6	79.7	84.50	10.4	2.6	
24-abr	378	12.5	5123.9	4.1			90.5	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	987	-536	5.9	75.3	77.20	10.3	2.55	
25-abr	402	12.2	5123.9	3.6			95.76	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	957	-518	8.1	73.3	74.50	9.2	2.6	
26-abr	418																				
27-abr	418																				
28-abr	418																				
29-abr	418																				
30-abr	418																				

FECHA	HORAS	CONSUMO DE COMBUSTIBLE						PERFORMANCE DE LA CALDERA								ENERGIA TERMICA		ENERGIA ELECTRICA			
		Carbón Antracita		Bagazo y/o Médula		Petróleo Diesel 2		Flujo de agua de ingreso a la caldera (Tnh)	Presión del agua de alimentación a la caldera (Mpa)	Temperatura del agua en el desecador (°C)	Presión del vapor sobrecalentado (Mpa)	Temperatura del vapor sobrecalentado (°C)	Presión de vapor después de la estación reductora (Mpa)	Temperatura del vapor después estación reductora (°C)	Temperatura de la cama de lecho fluido (°C)	Presión del hogar de la caldera (Kpa)	Exceso de oxígeno en la combustión (%)	Vapor producido por la caldera (Tnh)	Vapor consumido por la turbina (Tnh)	Potencia Generada en los bornes del Generador (Mw)	Potencia consumida por la Caldera TSXG (Mw)
		Tnh	PCI (Kcal/Kg)	Tnh	PCI (Kcal/Kg)	Gln	PCI (KJ/Kg)														
1-may	0																				
2-may	0																				
3-may	0																				
4-may	0																				
5-may	0																				
6-may	0																				
7-may	0																				
8-may	0																				
9-may	0																				
10-may	0																				
11-may	0																				
12-may	0																				
13-may	0																				
14-may	0																				
15-may	0																				
16-may	0																				
17-may	0																				
18-may	0																				
19-may	0																				
20-may	0																				
21-may	0																				
22-may	0																				
23-may	2					3129															
24-may	26	5.5	5346.3	3.1		1000	45.9	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	987	-536	8.2	34.4	36.70		2.55	
25-may	46	6.3	5346.3	4.11		880	56.6	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	973	-450	8.5	39.2	41.50		2.6	
26-may	70	11.3	5346.3	6.23			84.68	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	957	-518	8.2	71.1	74.80	9.28	2.5	
27-may	94	10.9	5346.3	7.9			83.9	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	978	-411	8.2	68.1	70.20	9.4	2.6	
28-may	118	11.2	5346.3	4.1			84.9	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	969	-459	7.6	70.2	74.10	8.9	2.5	
29-may	142	11.9	5346.3	7.57			88	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	987	-536	8.4	74.5	77.03	9.8	2.54	
30-may	166	11.7	5346.3	7.07			89.5	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	976	-500	8.2	73.4	75.80	9.7	2.5	
31-may	166	12.4	5346.3	7.44			93.78	8.63	101.3	5.67	475	4.09	386	987	-536	8.4	77.4	81.70	10.2	2.6	



FECHA	HORAS	CONSUMO DE COMBUSTIBLE						PERFORMANCE DE LA CALDERA										ENERGIA TERMICA		ENERGIA ELECTRICA	
		Carbón Antracita		Bogazo y/o Médula		Petróleo Diesel 2		Flujo de agua de ingreso a la caldera (Tnh)	Presión del agua de alimentación a la caldera (Mpa)	Temperatura del agua en el desareador (°C)	Presión del vapor sobrecalentad (Mpa)	Temperatura del vapor sobrecalentad (°C)	Presión de vapor después de la estación reductora (Mpa)	Temperatura del vapor después estación reductora (°C)	Temperatura de la cama de lecho fluido (°C)	Presión del hogar de la caldera (Kpa)	Exceso de oxígeno en la combustión (%)	Vapor producido por la caldera (Tnh)	Vapor consumido por la turbina (Tnh)	Potencia Generada en los bormes del Generador (MW)	Potencia consumida por la Caldera TSXG (Twh)
		Tnh	PCI (Kcal/Kg)	Tnh	PCI (Kcal/Kg)	Gln	PCI (KJ/Kg)														
1-jun	24	14.8	4987.8	7.6			91.7	8.77	100.7	5.8	464	4.15	382	987	-378	6.2	77.6	80.80	10.2	2.6	
2-jun	46	14.5	4987.8	7.69			91.76	8.77	100.7	5.8	464	4.31	378	957	-518	6.2	76	80.65	10	2.55	
3-jun	70	15.7	4987.8	5.45			92	8.77	100.7	5.8	464	4.31	378	978	-411	5.9	82.4	87.60	11.4	2.56	
4-jun	94	15.1	4987.8	7.86			90	8.77	100	5.8	464	4.23	372	969	-459	7	79	83.40	10.4	2.56	
5-jun	118	15.3	4987.8	9.53			95.6	8.56	101	5.3	464	4.12	374	987	-536	5.9	80.1	83.20	10.2	2.6	
6-jun	142	15.9	4987.8	8.1			91	8.64	99	6.6	467	4.18	376	987	-536	6.3	83.1	88.60	11.5	2.6	
7-jun	166	15.1	4987.8	5.47			92	8.64	99	6.2	472	4.17	372	976	-500	6.7	78.5	83.20	11.4	2.51	
8-jun	190	14.0	4987.8	6.08			87.8	8.56	101	5.3	464	4.12	374	957	-518	5.9	73.3	76.20	10.5	2.55	
9-jun	214	16.1	4987.8	5.4			98.1	8.77	100.7	5.8	464	4.15	382	978	-411	7	84.3	89.80	12.2	2.54	
10-jun	238	16.1	4987.8	7.7			94.8	8.77	100	5.8	464	4.15	382	969	-459	5.9	84.1	88.65	12.1	2.6	
11-jun	262	16.1	4987.8	7.12			96.3	8.56	101	5.3	464	4.12	374	987	-536	6.3	84.3	90.70	12.3	2.54	
12-jun	286	15.3	4987.8	9.38			92.3	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	987	-536	6.4	80	85.60	12.4	2.5	
13-jun	298	14.5	4987.8			577	98	8.77	100.7	5.8	464	4.15	382	957	-518	5.9	76	79.30	6.5	2.54	
14-jun	330	15.0	4987.8	7.18			89.4	8.64	99	6.6	467	4.17	379	987	-378	6.9	78.4	83.10	10.3	2.54	
15-jun	354	15.2	4987.8	7.25			91.9	8.64	99	6.6	467	4.17	379	957	-518	6.2	79.4	84.90	11.6	2.5	
16-jun	378	15.9	4987.8	7.97			95.2	8.77	100	5.8	464	4.15	382	969	-459	6.6	83	88.20	11.5	2.6	
17-jun	402	15.1	4987.8	6.05			89.9	8.64	99	6.6	467	4.17	379	987	-536	6.1	79	83.60	11.7	2.6	
18-jun	426	15.2	4987.8	6.44			90	8.64	99	6.2	472	4.17	374	973	-450	7	78.6	83.20	11.3	2.5	
19-jun	450	15.9	4987.8	7.79			96.5	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	976	-500	5.9	83.2	88.00	11.8	2.55	
20-jun	474	15.1	4987.8	7.55			89.13	8.64	99	6.6	467	4.17	379	976	-500	6.3	79.1	83.50	11.6	2.6	
21-jun	498	15.8	4987.8	8.58			93.79	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	976	-500	6.4	82.3	88.35	11.8	2.5	
22-jun	522	16.2	4987.8	7.1			92.5	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	976	-500	6.1	84.5	89.70	12.3	2.6	
23-jun	546	15.3	4987.8	5.33			89.08	8.64	99	6.6	467	4.17	379	969	-459	7	80.1	83.20	10.6	2.6	
24-jun	570	15.6	4987.8	7.02			96.5	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	987	-536	6.5	81.2	86.50	11.5	2.6	
25-jun	594	15.6	4987.8	7.42			95.4	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	973	-450	7.4	81.3	86.70	11.3	2.5	
26-jun	618	16.2	4987.8	7.49			93.5	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	976	-500	6.2	84.7	91.26	12.4	2.6	
27-jun	642	15.5	4987.8	7.6			93.4	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	957	-518	7.4	80.7	86.70	11.3	2.5	
28-jun	666	15.6	4987.8	7.4			94.2	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	969	-602	6.5	81.1	86.50	11.5	2.54	
29-jun	690	16.1	4987.8	6.89			95.8	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	978	-411	7.4	84.3	89.70	11.9	2.5	
30-jun	714	16.0	4987.8	7.3			94.5	8.63	101.3	5.67	475	4.09	386	969	-602	6.2	83.1	88.80	11.7	2.54	

FECHA	HORAS	CONSUMO DE COMBUSTIBLE						PERFORMANCE DE LA CALDERA										ENERGIA TERMICA		ENERGIA ELECTRICA	
		Carbón Antracita		Bagazo y/o Médula		Petróleo Diesel 2		Flujo de agua de ingreso a la caldera (Tn/h)	Presión del agua de alimentación a la caldera (Mpa)	Temperatura del agua en el desareador (°C)	Presión del vapor sobrecalentado (Mpa)	Temperatura del vapor sobrecalentado (°C)	Presión de vapor después de la estación reductora (Mpa)	Temperatura del vapor después estación reductora (°C)	Temperatura de la cama de lecho fluido (°C)	Presión del hogar de la caldera (Kpa)	Exceso de oxígeno en la combustión (%)	Vapor producido por la caldera (Tn/h)	Vapor consumido por la turbina (Tn/h)	Potencia Generada en los bornes del Generador (Mw)	Potencia consumida por la Caldera TSGG (Mw)
		Tn/h	PCI (Kcal/Kg)	Tn/h	PCI (Kcal/Kg)	Gin	PCI (KJ/Kg)														
1-jul	24	15.2	4995.7	7.42			95.4	8.77	100.7	5.8	464	4.15	382	950	-378	6.5	82.0	86.60	11.22	2.6	
2-jul	48	15.6	4995.7	8.68			96.1	8.77	100.7	5.8	464	4.31	378	957	-345	7.3	84.1	89.80	12.2	2.55	
3-jul	72	14.6	4995.7	7.8			93.2	8.77	100.7	5.8	464	4.31	378	978	-411	7.1	78.7	83.80	11.7	2.56	
4-jul	76	13.2	4995.7	6.7		493	86	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	957	-378	6.3	70.9	74.80	9.9	2.56	
5-jul	116	14.7	4995.7	6.06			90.4	8.56	101	5.3	464	4.12	374	946	-456	6.5	79	83.20	11.5	2.6	
6-jul	140	14.5	4995.7	6.74			90.5	8.64	99	6.6	467	4.18	376	955	-324	6.2	78.2	82.94	11.1	2.6	
7-jul	164	15.0	4995.7	6.71			90.7	8.64	99	6.2	472	4.17	372	976	-500	6.5	80.2	84.10	11.1	2.51	
8-jul	188	15.5	4995.7	7.04			95.9	8.56	101	5.3	464	4.12	374	957	-350	6	83.2	88.70	11.8	2.55	
9-jul	212	15.8	4995.7	7.07			95.9	8.77	100.7	5.8	464	4.15	382	978	-411	6.3	85.4	91.60	12.5	2.54	
10-jul	236	14.7	4995.7	7.07			91.4	8.77	100	5.8	464	4.15	382	969	-459	7	78.9	84.30	11.1	2.6	
11-jul	260	15.6	4995.7	7.22			95	8.56	101	5.3	464	4.12	374	987	-430	6.3	83.8	89.86	12.2	2.54	
12-jul	284	15.2	4995.7	6.46			91.31	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	987	-436	6.6	81.7	86.90	11.9	2.5	
13-jul	308	15.1	4995.7	8.29			95.23	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	976	-500	6.7	81.2	86.10	11.8	2.6	
14-jul	316	14.8	4995.7	8.09			93	8.64	99	6.6	467	4.17	379	987	-326	6.1	79.8	83.50	11.5	2.6	
15-jul	356	15.1	4995.7	5.86			94.3	8.64	99	6.6	467	4.17	379	957	-356	6.6	81.2	87.50	11.8	2.5	
16-jul	380	15.5	4995.7	7.57			95.76	8.77	100	5.8	464	4.15	382	969	-459	6.2	83.5	89.90	12.5	2.6	
17-jul	404	15.1	4995.7	6.61			97.1	8.64	99	6.6	467	4.17	379	987	-536	6.6	81.1	86.70	11.8	2.6	
18-jul	428	15.2	4995.7	7.6			94.1	8.64	99	6.2	472	4.17	374	973	-450	6.7	81.2	86.50	11.9	2.5	
19-jul	452	15.7	4995.7	7.24			97	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	976	-430	6.5	84.1	91.30	12	2.55	
20-jul	476	15.7	4995.7	7.08			96.5	8.64	99	6.6	467	4.17	379	976	-421	6.5	84.5	92.10	12.3	2.6	
21-jul	500	15.9	4995.7	6.9			101.2	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	943	-500	6.4	85.2	94.60	12.4	2.5	
22-jul	524	15.5	4995.7	7.43			95.4	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	976	-365	6.1	83.2	88.70	12	2.6	
23-jul	548	15.1	4995.7	7.8			97.4	8.64	99	6.6	467	4.17	379	969	-459	7.2	81.5	87.60	11.7	2.6	
24-jul	572	14.9	4995.7	7.02			97	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	960	-354	6.3	80.2	85.60	11.6	2.6	
25-jul	596	15.0	4995.7	6.7			96.3	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	973	-450	6.9	80.1	86.43	11.5	2.5	
26-jul	620	14.9	4995.7	7.1			94.3	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	976	-456	6.6	80.3	86.70	12	2.6	
27-jul	644	15.2	4995.7	7.34			96.9	8.64	99	6.6	467	4.17	379	973	-378	6.9	82	87.40	11.8	2.5	
28-jul	668	14.9	4995.7	6.81			90.69	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	956	-378	6.5	80.3	85.40	11.7	2.5	
29-jul	692	14.7	4995.7	6.2			94.3	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	969	-432	6.7	78.6	83.40	11.5	2.54	
30-jul	716	14.8	4995.7	7.23			93.6	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	978	-411	6.6	79.5	84.80	11.4	2.5	
31-jul	740	14.9	4995.7	7.06			91.1	8.63	101.3	5.67	475	4.09	385	969	-345	7.3	79.8	85.25	11.5	2.54	

FECHA	HORAS	CONSUMO DE COMBUSTIBLE						PERFORMANCE DE LA CALDERA										ENERGIA TERMICA		ENERGIA ELECTRICA	
		Carbón Antracita		Bagazo y/o Médula		Petróleo Diesel 2		Flujo de agua de ingreso a la caldera (T/h)	Presión del agua de alimentación a la caldera (Mpa)	Temperatura del agua en el desecador (°C)	Presión del vapor sobrecalentad (Mpa)	Temperatura del vapor sobrecalentad (°C)	Presión de vapor después de la estación reductora (Mpa)	Temperatura del vapor después estación reductora (°C)	Temperatura de la cama de lecho fluido (°C)	Presión del hogar de la caldera (Kpa)	Exceso de oxígeno en la combustión (%)	Vapor producido por la caldera (T/h)	Vapor consumido por la turbina (T/h)	Potencia Generada en los bornes del Generador (Mhw)	Potencia consumida por la Caldera TSXG (Mhw)
		T/h	PCI (Kcal/Kg)	T/h	PCI (Kcal/Kg)	Gln	PCI (KJ/Kg)														
1-ago	24	15.1	5034.6	6.92			91.85	8.77	100.7	5.8	464	4.15	382	950	-378	6.5	79.9	84.80	11.8	2.6	
2-ago	48	15.7	5034.6	7.85			94.7	8.77	100.7	5.8	464	4.31	378	957	-345	7.3	83.1	89.10	11.9	2.55	
3-ago	72	15.5	5034.6	7.73			95.6	8.77	100.7	5.8	464	4.31	378	978	-411	7.1	82.1	87.40	11.6	2.56	
4-ago	96	14.9	5034.6	7.33			91.7	8.77	100	5.8	464	4.23	372	969	-459	6.6	78.9	84.26	11.5	2.56	
5-ago	120	14.9	5034.6	7.26			90.15	8.56	101	5.3	464	4.12	374	946	-456	6.5	78.8	84.30	11.7	2.6	
6-ago	144	15.0	5034.6	6.77			90.35	8.64	99	6.6	467	4.18	376	955	-324	6.2	79.1	83.80	11.6	2.6	
7-ago	168	15.1	5034.6	7.52			88.68	8.64	99	6.2	472	4.17	372	976	-500	6.5	79	83.80	11.5	2.51	
8-ago	192	15.4	5034.6	7.2			92.04	8.56	101	5.3	464	4.12	374	957	-350	6	81.2	85.50	11.8	2.55	
9-ago	216	14.8	5034.6	7.68			91.75	8.77	100.7	5.8	464	4.15	382	978	-411	6.3	78	82.23	11.1	2.54	
10-ago	240	15.0	5034.6	7.13			88.98	8.77	100	5.8	464	4.15	382	969	-459	7	79	82.30	10.9	2.6	
11-ago	264	14.9	5034.6	7.2			92.1	8.56	101	5.3	464	4.12	374	987	-430	6.3	78.8	83.60	11.2	2.54	
12-ago	288	14.6	5034.6	7.72			92	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	987	-436	6.6	77	80.10	10.9	2.5	
13-ago	312	15.8	5034.6	9.73			95.7	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	976	-500	6.7	83.2	89.70	12	2.6	
14-ago	336	14.8	5034.6	7.23			95.2	8.64	99	6.6	467	4.17	379	987	-378	6.3	78	83.10	11.3	2.54	
15-ago	360	15.6	5034.6	8.85			93.2	8.64	99	6.6	467	4.17	379	957	-356	6.6	82.1	87.56	11.9	2.5	
16-ago	384	15.8	5034.6	7.69			92.4	8.77	100	5.8	464	4.15	382	969	-459	6.2	83.2	89.30	12.2	2.6	
17-ago	408	15.8	5034.6	7.88			95	8.56	101	5.3	464	4.12	374	987	-536	6.6	83.1	89.30	11.5	2.6	
18-ago	418					350															
19-ago	441	13.3	5034.6	7.26			85.4	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	976	-430	6.5	70.1	73.60	8.5	2.55	
20-ago	465	15.4	5034.6	7.23			95.3	8.56	101	5.3	464	4.12	374	976	-421	6.5	81	86.30	11.5	2.6	
21-ago	489	15.0	5034.6	7.46			91.7	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	943	-500	6.4	79.2	83.90	10.9	2.5	
22-ago	513	15.7	5034.6	7.71			93.4	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	976	-365	6.1	82.3	86.60	11.7	2.6	
23-ago	537	14.8	5034.6	7.73			81.3	8.56	101	5.3	464	4.12	374	969	-459	7.2	78	81.20	11	2.6	
24-ago	561	15.4	5034.6	8.36			91.3	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	960	-354	6.3	81.1	85.53	11.2	2.6	
25-ago	585	15.0	5034.6	8.3			90.4	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	973	-450	6.9	79	84.60	11.2	2.5	
26-ago	609	15.1	5034.6	8.81			87.4	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	976	-456	6.6	79.5	83.58	11.2	2.6	
27-ago	633	14.2	5034.6	8.97			84.1	8.56	101	5.3	464	4.12	374	973	-378	6.9	75.1	78.90	10.5	2.5	
28-ago	657	13.5	5034.6	8.62			81.3	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	956	-378	6.5	71.2	73.20	9.5	2.5	
29-ago	659	12.6	5034.6	8.51			80.1	8.64	99	6.6	467	4.17	379	976	-450	6.3	66.7	68.90	9.5	2.5	
30-ago	659																				
31-ago	659																				

FECHA	HORAS	CONSUMO DE COMBUSTIBLE						PERFORMANCE DE LA CALDERA									ENERGIA TERMICA		ENERGIA ELECTRICA		
		Carbón Antracita		Bagazo y/o Médula		Petróleo Diesel 2		Flujo de agua de ingreso a la caldera (Tnh)	Presión del agua de alimentación a la caldera (Mpa)	Temperatura del agua en el desareador (°C)	Presión del vapor sobrecalentad (Mpa)	Temperatura del vapor sobrecalentad (°C)	Presión de vapor después de la estación reductora (Mpa)	Temperatura del vapor después estación reductora (°C)	Temperatura de la cama de lecho fluido (°C)	Presión del hogar de la caldera (Kpa)	Exceso de oxígeno en la combustión (%)	Vapor producido por la caldera (Tnh)	Vapor consumido por la turbina (Tnh)	Potencia Generada en los bornes del Generador (Mw)	Potencia consumida por la Caldera TSXG (Mw)
		Tnh	PCI (Kcal/Kg)	Tnh	PCI (Kcal/Kg)	Gln	PCI (KJ/Kg)														
1-sep	0																				
2-sep	0																				
3-sep	7	8.3	5245.7			1610	63.9	8.64	99	6.2	472	4.17	374	969	-459	7	43.3	47.80	2.1	2.6	
4-sep	14	10.9	5245.7				77.7	8.56	101	5.3	464	4.12	374	957	-518	6.6	57.7	64.79	5.7	2.6	
5-sep	14																				
6-sep	14																				
7-sep	14																				
8-sep	14																				
9-sep	14																				
10-sep	26	9.9	5245.7			1327	64.9	8.77	100	5.8	464	4.15	382	969	-459	7	55.1	56.80	7.8	2.6	
11-sep	50	14.1	5245.7	4.73			91.1	8.56	101	5.3	464	4.12	374	987	-430	6.3	78.8	82.45	11.2	2.54	
12-sep	74	14.4	5245.7	7.5			90.2	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	987	-436	6.6	79.9	84.50	11.2	2.5	
13-sep	98	14.3	5245.7	8.3			91.6	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	976	-500	6.7	79.8	85.10	11.5	2.6	
14-sep	122	14.3	5245.7	9.9			92.3	8.64	99	6.6	467	4.17	379	987	-378	6.3	79.8	84.60	11	2.54	
15-sep	146	13.9	5245.7	8.7			88.9	8.64	99	6.6	467	4.17	379	957	-356	6.6	77.45	81.90	10.8	2.5	
16-sep	170	11.0	5245.7	10.24			74.95	8.77	100	5.8	464	4.15	382	969	-459	6.2	61.2	62.13	7.32	2.6	
17-sep	194	13.4	5245.7	9.3			85	8.64	99	6.6	467	4.12	374	987	-536	6.6	74.8	76.70	9.9	2.6	
18-sep	218	14.3	5245.7	9.56			89.7	8.64	99	6.6	467	4.12	374	960	-345	5.4	79.8	85.40	11.5	2.3	
19-sep	242	13.8	5245.7	8.2			93.5	8.76	100.8	6.1	470	4.18	376	976	-430	6.5	76.8	83.60	10.5	2.55	
20-sep	266	14.7	5245.7	8.2			89.8	8.64	99	6.6	467	4.12	374	976	-421	6.5	82	89.85	12	2.6	
21-sep	290	14.7	5245.7	11			93.4	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	943	-500	6.4	81.9	89.30	11.9	2.5	
22-sep	314	14.9	5245.7	9.1			93.2	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	976	-365	6.1	82.75	91.25	12.1	2.6	
23-sep	338	15.2	5245.7	9.15			90.71	8.64	99	6.6	467	4.12	374	969	-459	7.2	84.5	88.81	11.5	2.6	
24-sep	362	14.9	5245.7	11.2			90.56	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	960	-354	6.3	83.16	89.61	11.9	2.6	
25-sep	386	14.4	5245.7	9.3			91.3	8.62	100.2	5.96	471	4.22	378	973	-450	6.9	80.1	85.43	11.5	2.5	
26-sep	410	13.2	5245.7	8.25			82.36	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	976	-456	6.6	73.4	75.90	10.7	2.6	
27-sep	434	12.9	5245.7	13.1			89	8.64	99	6.6	467	4.12	374	973	-378	6.9	71.9	76.70	10	2.3	
28-sep	458	13.4	5245.7	9.32			82.7	8.7	101.5	5.47	467	4.14	383	956	-378	6.5	74.5	79.05	10.7	2.1	
29-sep	482	14.0	5245.7	11.2			89.6	8.64	99	6.6	467	4.12	374	969	-459	6.3	78.3	82.60	10.6	2.1	
30-sep	506	14.5	5245.7	13.1			89.5	8.64	99	6.6	467	4.12	374	973	-450	6.9	81.1	86.50	11.2	2.6	

FECHA	HORAS	CONSUMO DE COMBUSTIBLE						PERFORMANCE DE LA CALDERA								ENERGIA TERMICA		ENERGIA ELECTRICA			
		Carbón Antracita		Petróleo y/o Madera		Petróleo Diesel 2		Flujo de agua de ingreso a la caldera (T/h)	Presión del agua de alimentación a la caldera (MPa)	Temperatura del agua en el generador (°C)	Presión del vapor subenfriado (MPa)	Temperatura del vapor sobrecalentado (°C)	Presión de vapor de salida de la estación reductora (MPa)	Temperatura del vapor de salida de la estación reductora (°C)	Temperatura de la carne de tecto fluido (°C)	Presión del hogar de la caldera (Kpa)	Exceso de vapor en la combustión (%)	Vapor producido por la caldera (T/h)	Vapor consumido por la turbinas (T/h)	Potencia generada en los motores del Generador (MW)	Potencia consumida por la Caldera (MW)
		T/h	PCI (Kcal/Kg)	T/h	PCI (Kcal/Kg)	Glo	PCI (Kcal/Kg)														
1-oct	24	14.32	6,654.30	11.10			90.05	8.56	101.00	5.30	464.00	4.12	374.00	987.00	-370.00	6.3%	81.39	88.40	10.83	2.56	
2-oct	48	19.39	6,654.30	12.55			87.00	8.77	100.00	5.80	464.00	4.15	382.00	973.00	-450.00	5.6%	76.13	79.17	9.78	2.13	
3-oct	72	12.79	6,654.30	11.88			86.21	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	376.00	969.00	-459.00	6.5%	72.33	79.78	10.24	2.45	
4-oct	86	13.15	6,654.30	12.18			86.05	8.56	101.00	5.30	464.00	4.12	374.00	957.00	-356.00	6.4%	74.74	79.24	9.65	2.60	
5-oct	126	13.56	6,654.30	13.16			86.38	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	378.00	976.00	-432.00	6.3%	76.70	79.76	9.66	2.07	
6-oct	126																				
7-oct	126																				
8-oct	126																				
9-oct	161	8.93	6,654.30	3.94			83.80	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	378.00	976.00	-500.00	5.4%	64.85	68.70	6.81	2.10	
10-oct	175	12.95	6,654.30	12.71			86.60	8.64	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	987.00	-536.00	5.3%	76.25	80.30	8.75	2.20	
11-oct	199	12.55	6,654.30	11.88			88.45	8.64	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	978.00	-411.00	6.1%	77.46	81.61	9.87	2.60	
12-oct	223	12.42	6,654.30	11.89			89.00	8.66	101.00	5.30	464.00	4.12	374.00	970.00	-378.00	6.4%	76.60	82.10	10.40	2.60	
13-oct	247	12.43	6,654.30	5.63			87.70	8.64	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	960.00	-345.00	4.3%	76.75	80.67	9.64	2.64	
14-oct	271	12.22	6,654.30	6.29			89.80	8.64	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	959.00	-459.00	4.5%	75.46	78.71	9.80	2.00	
15-oct	285	12.38	6,654.30	11.63			86.67	8.56	101.00	5.30	464.00	4.12	374.00	957.00	-495.00	5.4%	76.38	81.71	9.62	2.60	
16-oct	319	12.47	6,654.30	12.20			88.50	8.77	100.00	5.80	464.00	4.15	382.00	976.00	-430.00	3.6%	77.00	82.00	10.10	2.64	
17-oct	352	12.05	6,654.30	14.04			89.80	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	378.00	987.00	-350.00	3.8%	74.00	78.98	9.74	2.60	
18-oct	352																				
19-oct	352																				
20-oct	392	11.49	6,654.30	10.10			90.46	8.64	99.00	6.60	467.00	4.17	378.00	987.00	-350.00	4.3%	76.50	84.21	10.05	2.64	
21-oct	416	10.96	6,654.30	12.71			84.40	8.64	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	950.00	-387.00	4.5%	73.00	82.83	10.24	2.50	
22-oct	440	11.18	6,654.30	10.30			84.38	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	378.00	987.00	-365.00	3.6%	74.08	79.92	10.75	2.54	
23-oct	464	11.47	6,654.30	13.46			86.75	8.64	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	955.00	-536.00	3.4%	76.42	81.33	10.00	2.54	
24-oct	488	11.25	6,654.30	10.40			84.96	8.54	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	957.00	-410.00	4.6%	74.96	81.33	9.88	2.50	
25-oct	512	12.44	6,654.30	11.29			86.32	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	378.00	969.00	-347.00	4.8%	82.42	90.98	10.43	2.60	
26-oct	636	12.25	6,654.30	13.21			93.76	8.64	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	969.00	-459.00	4.2%	81.57	87.17	9.80	2.64	
27-oct	660	11.50	6,654.30	13.81			86.04	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	378.00	976.00	-349.00	4.3%	76.21	79.75	9.52	2.50	
28-oct	684	11.10	6,654.30	12.20			85.96	8.64	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	960.00	-536.00	4.0%	73.96	78.08	8.76	2.50	
29-oct	608	11.35	6,654.30	12.71			87.60	8.64	99.00	6.60	467.00	4.17	379.00	976.00	-450.00	5.1%	75.57	81.75	10.46	2.50	
30-oct	632	11.32	6,654.30	11.20			83.71	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	378.00	969.00	-347.00	3.5%	74.96	77.29	9.52	2.50	
31-oct	656	12.06	6,654.30	13.04			91.81	8.64	99.00	6.60	467.00	4.22	378.00	957.00	-436.00	4.4%	80.33	82.21	9.81	2.50	

FECHA	HORAS	CONSUMO DE COMBUSTIBLE						PERFORMANCE DE LA CALDERA									ENERGIA TERMICA		ENERGIA ELECTRICA		
		Carbón Antracita		Bogaso y/o Mácula		Petróleo Diesel 2		Flujo de agua de ingreso a la caldera (T/h)	Presión del agua de alimentación a la caldera (MPa)	Temperatura del agua en el desareador (°C)	Presión del vapor sobrecalentado (MPa)	Temperatura del vapor sobrecalentado (°C)	Presión de vapor después de la estación reductora (MPa)	Temperatura del vapor después estación reductora (°C)	Temperatura de la carne de lecho fluido (°C)	Presión del hogar de la caldera (Kpa)	Exceso de oxígeno en la combustión (%)	Vapor producido por la caldera (T/h)	Vapor consumido por la turbina (T/h)	Potencia Generada en los bornes del Generador (MW)	Potencia consumida por la Caldera TS&G (MW)
		T/h	PCI (Kcal/Kg)	T/h	PCI (Kcal/Kg)	G/h	PCI (KJ/Kg)														
1-nov	24.00	12.93	5,345.00	12.43			86.64	8.56	101.00	5.30	464.00	4.12	374.00	987.00	-378.00	4.1%	73.40	77.60	9.45	2.56	
2-nov	48.00	12.90	5,345.00	12.26			86.54	8.77	100.00	5.80	464.00	4.15	382.00	973.00	-450.00	3.2%	73.30	76.90	9.39	2.13	
3-nov	72.00	13.29	5,345.00	12.72			89.71	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	378.00	959.00	-459.00	3.3%	75.10	78.96	9.80	2.45	
4-nov	96.00	13.46	5,345.00	12.06			87.40	8.56	101.00	5.30	464.00	4.12	374.00	957.00	-356.00	3.8%	76.40	80.36	10.08	2.60	
5-nov	120.00	13.43	5,345.00	8.90		115.00	86.95	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	378.00	976.00	-432.00	4.5%	75.50	80.37	10.30	2.07	
6-nov	144.00	13.44	5,345.00	7.93			89.57	8.77	100.00	5.80	464.00	4.15	382.00	978.00	-411.00	4.3%	76.40	81.98	10.20	2.07	
7-nov	168.00	12.99	5,345.00	10.80			89.17	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	378.00	970.00	-378.00	5.1%	73.40	79.90	9.92	2.07	
8-nov	192.00	14.07	5,345.00	10.20			89.06	8.56	101.00	5.30	464.00	4.12	374.00	978.00	-411.00	3.4%	79.89	83.26	10.40	2.07	
9-nov	205.00	13.64	5,345.00	7.27			88.89	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	378.00	970.00	-378.00	3.4%	78.80	84.50	10.53	2.10	
10-nov	205.00					3,749.00															
11-nov	215.00	12.09	5,345.00	3.21			85.80	8.64	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	978.00	-411.00	4.1%	66.70	71.14	5.80	2.60	
12-nov	239.00	13.75	5,345.00	11.49			90.83	8.56	101.00	5.30	464.00	4.12	374.00	970.00	-378.00	3.9%	78.10	80.45	9.99	2.60	
13-nov	263.00	13.41	5,345.00	12.88			87.50	8.64	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	960.00	-345.00	4.2%	76.20	80.40	10.20	2.54	
14-nov	287.00	13.46	5,345.00	13.20			91.30	8.64	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	969.00	-459.00	3.3%	76.60	81.10	10.00	2.60	
15-nov	311.00	13.75	5,345.00	13.10			90.30	8.56	101.00	5.30	464.00	4.12	374.00	957.00	-495.00	3.9%	78.10	83.20	10.40	2.60	
16-nov	335.00	13.28	5,345.00	12.30			90.68	8.77	100.00	5.80	464.00	4.15	382.00	976.00	-430.00	3.6%	75.50	78.80	9.98	2.54	
17-nov	359.00	13.66	5,345.00	12.98			88.88	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	378.00	987.00	-350.00	3.7%	77.20	81.63	9.90	2.50	
18-nov	383.00	13.90	5,345.00	13.56			90.16	8.64	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	970.00	-378.00	3.9%	79.00	83.45	10.27	2.54	
19-nov	407.00	13.22	5,345.00	12.72			84.23	8.64	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	960.00	-345.00	4.2%	75.10	76.68	10.10	2.60	
20-nov	431.00	12.26	5,345.00	12.10			78.34	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	378.00	969.00	-459.00	3.3%	69.30	72.98	0.63	2.54	
21-nov	451.00	12.51	5,345.00	9.10		605.00	82.35	8.64	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	957.00	-495.00	3.9%	71.10	73.65	9.30	2.50	
22-nov	474.00	13.66	5,345.00	6.70			88.88	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	378.00	987.00	-350.00	3.7%	77.20	81.63	10.21	2.54	
23-nov	498.00	13.59	5,345.00	12.20			87.90	8.64	99.00	6.60	467.00	4.17	379.00	976.00	-450.00	5.1%	77.20	81.19	10.32	2.54	
24-nov	522.00	14.00	5,345.00	13.56			91.38	8.64	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	957.00	-410.00	4.6%	79.56	84.54	10.40	2.50	
25-nov	546.00	14.05	5,345.00	13.96			92.75	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	378.00	969.00	-347.00	4.8%	79.40	83.76	10.12	2.50	
26-nov	570.00	12.73	5,345.00	10.20			90.03	8.64	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	969.00	-459.00	4.2%	72.30	76.60	10.05	2.54	
27-nov	594.00	13.66	5,345.00	12.13			90.56	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	378.00	976.00	-348.00	4.3%	77.20	81.88	10.20	2.50	
28-nov	618.00	13.46	5,345.00	11.20			87.33	8.64	99.00	6.60	467.00	4.12	374.00	960.00	-536.00	4.8%	76.50	83.40	10.43	2.50	
29-nov	642.00	13.59	5,345.00	2.30			87.90	8.64	99.00	6.60	467.00	4.17	379.00	976.00	-450.00	5.1%	77.20	81.19	10.23	2.50	
30-nov	666.00	14.17	5,345.00				89.63	8.62	100.20	5.96	471.00	4.22	378.00	969.00	-347.00	3.5%	80.10	83.32	10.43	2.50	

FECHA	HORAS	CONSUMO DE COMBUSTIBLE						PERFORMANCE DE LA CALDERA										ENERGIA TERMICA		ENERGIA ELECTRICA	
		Carbón Antracita		Bagaço y/o Madera		Nitrógeno Dióxido ?		Flujo de agua de ingreso a la caldera (T/h)	Presión del agua de alimentación a la caldera (MPa)	Temperatura del agua en el dosificador (°C)	Presión del vapor sobrecalentado (MPa)	Temperatura del vapor sobrecalentado (°C)	Presión de vapor después de la oxidación reductora (MPa)	Temperatura del vapor de hule a estación reductora (°C)	Temperatura de la ceta de lecho fuido (°C)	Presión del hogar de la caldera (MPa)	Exceso de oxígeno en la combustión (%)	Vapor producido por la caldera (T/h)	Vapor consumido por la turbina (T/h)	Potencia Generada en los Bornos del Generador (MW)	Potencia consumida por la Caldera (MW)
		T/h	PCI (Kcal/Kg)	T/h	PCI (Kcal/Kg)	Cin	PCI (KJ/Kg)														
1-dic	24	14 17	5.345 00	11 58			89 70	8 56	101,00	5 30	464 00	4 12	374 00	987 00	-378 00	4 1%	78 80	81 32	10 35	2 56	
2-dic	48	13 68	5.345 00	12 50			87 20	8 77	100 00	5 60	464 00	4 16	302 00	973 00	-450 00	3 2%	77 09	80 23	9 60	2 13	
3-dic	72	13 00	5.345 00	13 06			86 54	8 62	100 20	5 06	471 00	4 22	378 00	969 00	-459 00	3 3%	75 40	79 75	9 83	2 45	
4-dic	96	12 30	5.345 00	8 00			89 00	8 58	101 00	5 30	464 00	4 12	374 00	957 00	-356 00	3 0%	77 89	80 45	9 34	2 60	
5-dic	120	13 30	5.345 00	7 60			88 65	8 62	100 20	5 96	471 00	4 22	376 00	976 00	-432 00	4 5%	76 60	83 40	10 70	2 07	
6-dic	144	13 60	5.345 00	12 00			86 90	8 77	100 00	5 80	464 00	4 15	382 00	978 00	-411 00	4 3%	76 30	84 65	10 43	2 07	
7-dic	168	13 10	5.345 00	11 00			88 80	8 62	100 20	5 96	471 00	4 22	370 00	970 00	-378 00	6 1%	78 30	86 50	10 60	2 07	
8-dic	192	14 20	5.345 00	10 00			89 05	8 56	101 00	5 30	464 00	4 12	374 00	978 00	-411 00	3 4%	77 45	84 66	8 98	2 07	
9-dic	205	12 60	5.345 00	8 00			82 10	8 62	100 20	5 88	471 00	4 22	378 00	970 00	-378 00	3 4%	73 45	79 80	7 90	2 10	
10-dic	208																				
11-dic	216	13 20	5.345 00				84 66	8 64	99 00	6 60	467 00	4 12	374 00	978 00	-411 00	4 1%	77 20	81 63	8 78	2 60	
12-dic	239	12 70	5.345 00				85 54	8 56	101 00	5 30	464 00	4 12	374 00	970 00	-378 00	3 9%	77 20	81 19	9 12	2 60	
13-dic	263	12 60	5.345 00				89 00	8 64	99 00	6 60	467 00	4 12	374 00	960 00	-345 00	4 2%	79 50	84 54	9 45	2 64	
14-dic	287	12 98	5.345 00				88 65	8 64	99 00	6 60	467 00	4 12	374 00	969 00	-450 00	3 3%	79 40	83 76	9 22	2 60	
15-dic	311	15 11	5.345 00				89 90	8 56	101 00	5 30	464 00	4 12	374 00	957 00	-495 00	3 9%	72 30	78 53	8 22	2 60	
16-dic	335	14 23	5.345 00				88 80	8 77	100 00	6 80	464 00	4 15	382 00	976 00	-430 00	3 6%	77 20	81 88	9 92	2 54	
17-dic	368	13 30	5.345 00				89 90	8 62	100 20	5 96	471 00	4 22	378 00	987 00	-350 00	3 7%	76 60	83 40	9 76	2 50	
18-dic	383	14 34	5.345 00				89 23	8 64	99 00	6 60	467 00	4 12	374 00	970 00	-378 00	3 9%	77 20	81 19	8 89	2 54	
19-dic	407	16 10	5.345 00				88 56	8 64	99 00	6 60	467 00	4 12	374 00	960 00	-345 00	4 2%	78 90	86 70	10 34	2 60	
20-dic	431	14 30	5.345 00				87 80	8 62	100 20	5 86	471 00	4 22	378 00	969 00	-459 00	3 3%	78 12	83 20	9 58	2 54	
21-dic	451	12 20	5.345 00					8 64	99 00	6 60	467 00	4 12	374 00	957 00	-495 00	3 9%				2 50	
22-dic	474	13 54	5.345 00				86 54	8 62	100 20	5 96	471 00	4 22	378 00	987 00	-350 00	3 7%	77 20	81 63	8 98	2 54	
23-dic	498	14 33	5.345 00				89 00	8 64	99 00	6 60	467 00	4 17	375 00	976 00	-450 00	5 1%	77 20	81 19	9 00	2 54	
24-dic	522	14 23	5.345 00				88 65	8 64	99 00	6 60	467 00	4 12	374 00	957 00	-410 00	4 6%	79 56	84 54	9 65	2 50	
25-dic	546	14 56	5.345 00				86 90	8 62	100 20	5 96	471 00	4 22	378 00	969 00	-347 00	4 6%	79 40	83 76	9 49	2 60	
26-dic	570	14 21	5.345 00				88 80	8 64	99 00	6 60	467 00	4 12	374 00	969 00	-459 00	4 2%	72 30	76 50	8 46	2 54	
27-dic	594	13 40	5.345 00				89 46	8 62	100 20	5 96	471 00	4 22	370 00	976 00	-349 00	4 3%	77 20	81 88	9 12	2 60	
28-dic	618	12 76	5.345 00				88 45	8 64	99 00	6 60	467 00	4 12	374 00	960 00	-536 00	4 8%	76 50	83 40	9 77	2 50	
29-dic	642	13 65	5.345 00				89 34	8 64	99 00	6 60	467 00	4 17	379 00	976 00	-450 00	5 1%	77 20	81 19	8 96	2 50	
30-dic																					
31-dic	666	23 00	5.345 00				87 99	8 62	100 20	5 96	471 00	4 22	376 00	969 00	-347 00	3 5%	76 50	80 70	9 43	2 50	

## **Anexo E:**

**Tabla de entalpía de formación, función de Gibbs y entropía absoluta.**



TABLE 1.9 Enthalpy of Formation, Gibbs Function of Formation, and Absolute Entropy of Various Substances at 298 K and 1 atm

Substance	Formula	$\bar{h}_f^*$	$\bar{g}_f^*$	$\bar{s}$
Carbon	C(s)	0	0	5.74
Hydrogen	H <sub>2</sub> (g)	0	0	130.57
Nitrogen	N <sub>2</sub> (g)	0	0	191.50
Oxygen	O <sub>2</sub> (g)	0	0	205.03
Carbon monoxide	CO(g)	-110,530	-137,150	197.54
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub> (g)	-393,520	-394,380	213.69
Water	H <sub>2</sub> O(g)	-241,820	-228,590	188.72
	H <sub>2</sub> O(l)	-285,830	-237,180	69.95
Hydrogen peroxide	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g)	-136,310	-105,600	232.63
Ammonia	NH <sub>3</sub> (g)	-46,190	-16,590	192.33
Oxygen	O(g)	249,170	231,770	160.95
Hydrogen	H(g)	218,000	203,290	114.61
Nitrogen	N(g)	472,680	455,510	153.19
Hydroxyl	OH(g)	39,460	34,280	183.75
Methane	CH <sub>4</sub> (g)	-74,850	-50,790	186.16
Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (g)	226,730	209,170	200.85
Ethylene	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (g)	52,280	68,120	219.83
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)	-84,680	-32,890	229.49
Propylene	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (g)	20,410	62,720	266.94
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (g)	-103,850	-23,490	269.91
Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (g)	-126,150	-15,710	310.03
Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (g)	-146,440	-8,200	348.40
Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (g)	-208,450	17,320	463.67
	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (l)	-249,910	6,610	360.79
Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (g)	82,930	129,660	269.20
Methyl alcohol	CH <sub>3</sub> OH(g)	-200,890	-162,140	239.70
	CH <sub>3</sub> OH(l)	-238,810	-166,290	126.80
Ethyl alcohol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH(g)	-235,310	-168,570	282.59
	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH(l)	-277,690	174,890	160.70

Source: Adapted from Wark, K. 1983. *Thermodynamics*, 4th ed. McGraw-Hill, New York, as based on JANAF Thermochemical Tables, NSRDS-NBS-37, 1971; *Selected Values of Chemical Thermodynamic Properties*, NBS Tech. Note 270-3, 1968; and *API Research Project 44*, Carnegie Press, 1953.

**Anexo F:**

**Planos generales de la Caldera CFB TRUPAL S.A.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA**  
**OFICINA CENTRAL DE INVESTIGACIÓN**

**“CATÁLOGO DE TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN – TIPRO”**

**Resolución N° 1562 – 2006 - ANR**

**REGISTRO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

**I. DATOS GENERALES:**

**UNIVERSIDAD:** UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA

**ESCUELA O CARRERA PROFESIONAL:** INGENIERÍA EN ENERGIA

**TITULO DEL TRABAJO:** AHORRO DE ENERGÍA MEDIANTE LA  
OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DE LA  
COMBUSTIÓN Y MEJORA DE LA EFICIENCIA  
EN LA CALDERA DE LECHO FLUIDIZADO  
CIRCULANTE DE LA EMPRESA TRUPAL S.A”

**ÁREA DE INVESTIGACIÓN:** PROCESOS

**AUTOR(ES):**

- DNI: 41291883 FLORES FLORES, ISMAEL JACOBO

**TITULO PROFESIONAL A QUE CONDUCE:** TITULO PROFESIONAL  
DE INGENIERO EN  
ENERGIA

**AÑO DE APROBACIÓN DE LA SUSTENTACIÓN:** 2014

## II. CONTENIDO DEL RESUMEN

- **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:**

TRUPAL S.A. cuenta dentro de sus instalaciones con una caldera de lecho Fluidizado Circulante con una capacidad de 130 ton/h de vapor instalada con tecnología china la cual se adquirió en el año 2009 con la finalidad de innovar sus procesos de generación de vapor y energía con un menor costo de producción ya que las calderas anteriores a esta consumían petróleo bunker lo cual no resultaba rentable para la empresa.

La caldera entro en operación en noviembre del 2010 con personal capacitado de China y de Perú, desde que iniciaron las operaciones se trabaja con parámetros determinados para el proceso de combustión por un estudio elaborado por el fabricante y ejecutor de dicho proyecto.

Los parámetros de operación son: t° hogar(escoria), P.hogar, flujo de aire 1°, flujo de aire 2°, flujo de aire 3°, %exceso de aire, flujo de carbón, flujo de medula de bagazo, calidad de carbón, calidad de medula.

Hasta la fecha no se logra mantener una estabilidad en el proceso de combustión ya que los valores establecidos de las variables de operación no se adecuan a la realidad del proceso, es por ello que actualmente la caldera trabaja con mucha variabilidad en su proceso de combustión provocando así problemas graves como: rotura de toberas de fluidez, fundiciones de escoria, desprendimiento de refractario, choques térmicos bruscos en la tuberías que provocan fisuras y fuga de agua, todos estos problemas conllevan a una parada forzosa de la caldera y de la planta de producción en general significando perdidas económicas importantes para la empresa que merman su rentabilidad y elevan sus costos de mantenimiento y producción.

La complejidad en la operación del proceso de combustión en la caldera y el desconocimiento de sus variables de operación óptimos ha traído las consecuencias adversas siguientes:

- 1.- Incapacidad de mantener la estabilidad de la caldera debido a la variabilidad del proceso y al desconocimiento de los parámetros óptimos de operación.
- 2.- Incremento de costos de producción de papel debido a fallas en la caldera por la inestabilidad de la combustión que ocasionaban paradas continuas no programadas y elevados costos de mantenimiento correctivo.
- 3.- Método de trabajo inadecuado para operar una caldera de la magnitud y tecnología con la que se cuenta (actualmente se opera de forma 100% manual)
- 4.- Desperdicios de recursos económicos traducidos como pérdidas de energía debido a una combustión deficiente y no controlada.
- 5.- Contaminación ambiental debido a una combustión deficiente.

Es por ello que se plantea el siguiente problema:

**¿De qué forma la optimización del proceso de Combustión y la mejora de la eficiencia de la caldera permitirá un ahorro de energía y la estabilización del proceso?**

- **OBJETIVOS**

**OBJETIVO GENERAL:**

Generar un ahorro importante de energía mediante la Optimización del control de la Combustión y mejora de la eficiencia en la Caldera de Lecho Fluidizado Circulante de la empresa TRUPAL S.A.

**OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

- Identificar las variables de operación más significativas (críticas) en el proceso de combustión de la caldera.

- Parametrizar las variables significativas analizando su sensibilidad e impacto en la eficiencia de la caldera y la combustión.
- Elaborar un programa computacional para evaluar la combustión de carbón antracita + medula de bagazo en una caldera de lecho fluidizado.
- Lograr un ahorro económico importante con la optimización del proceso y la mejora de la eficiencia térmica global.
- Minimizar los daños al medio ambiente generado por los gases de la combustión ineficiente.

- **HIPÓTESIS:**

Se plantea la siguiente hipótesis: “La optimización del control de combustión y mejora de la eficiencia en la caldera de lecho fluidizado circulante de la empresa Trupal, le permitirá un ahorro de energía del orden del 20% en consumo de combustible”

- **MARCO TEORICO:**

La combustión en lechos fluidizados (FBC) incluye la combustión de un combustible formado por partículas sólidas, en un lecho fluidizado (en suspensión), mediante la inyección de aire en el fondo del lecho.

Cuando se quema carbón de esta manera, el lecho puede consistir en sólidos inertes, cenizas de carbón, o un material absorbente como piedra caliza o dolomita. La piedra caliza o la dolomita en el lecho reaccionan con el bióxido de azufre formado durante la combustión del carbón y forma un sulfato sólido que puede ser desechado en forma de sólido seco.

### **Ventajas de las calderas de Lecho Fluidizado:**

- Menor emisión de dióxido de azufre, uso de aditivos como la piedra caliza y la dolomita.
- Bajas temperaturas en el lecho de combustible, 880 - 954°C por lo que se tiene menor emisión térmica de óxido de nitrógeno (irritaciones y problemas respiratorios), existen menos problemas por la emisión de cenizas.
- Hay velocidades mayores de transferencia de calor a las superficies de absorción del mismo y los coeficientes de transferencia de calor entre el lecho y los tubos inmersos en él son altos.
- Las velocidades de liberación de energía por volumen son altas comparadas con las que se tienen en una caldera convencional que quema carbón pulverizado.

### **Proceso de combustión en lecho fluidizado circulante:**

Se entiende por combustión a toda reacción química que va acompañada de gran desprendimiento de calor.

La combustión se denomina **completa** o perfecta, cuando toda la parte combustible se ha oxidado al máximo.

Si la combustión es **incompleta** o imperfecta, los productos de la combustión poseen sustancias todavía capaces de ser oxidadas, por ejemplo el CO que puede pasar a CO<sub>2</sub>.

La combustión incompleta aparece cuando el aire es insuficiente, o en aquellas zonas de las cámaras de combustión en las que el aire no llega en cantidad suficiente.

En general se tiende a evitar las combustiones incompletas, ya que no sólo van ligadas a pérdidas de energía, sino también a procesos altamente contaminantes; el combustible que no ha reaccionado y los componentes combustibles de los humos, contienen una energía química que no se aprovecha, al tiempo que se generan elementos inquemados, y elementos contaminantes como: CO, NOx.

Se utiliza para disminuir el desperdicio a través de la reducción de la variación en los procesos.

La metodología seis sigma "DMAIC", se apoya de herramientas estadísticas y administrativas para mejorar de una manera tangible los resultados de desempeño de los procesos y productos de una empresa

EES son las siglas de Resolutor de Ecuaciones de Ingeniería (Engineering Equations Solver). La función principal suministrada por EES es la solución de un grupo de ecuaciones algebraicas. EES también puede resolver la estructuración inicial de ecuaciones diferenciales, hace la optimización, suministra regresiones lineales y no lineales y genera la publicación de calidad de argumentos.



- **CONCLUSIONES Y/O RECOMENDACIONES:**

- **CONCLUSIONES**

- Las variables de entrada que más influyen en el proceso de combustión y en el rendimiento de la caldera CFB de Trupal SA son las siguientes: %Inquemados, T° del lecho, T° gases de escape y % Exceso de aire.
- Se determinó que el porcentaje de carbono no quemado que pasa hacia las cenizas va desde 4.1 a 5.3 % del combustible total inyectado al sistema, esto quiere decir que de las 14- 15 ton/h que consume la caldera en condiciones normales de operación 0.62 – 0.78 ton/h se pierden en el material extraído del fondo del hogar (bed ash) o bien es sacado por el tiro del hogar hacia el baghouse (fly ash).
- Específicamente el rango de variación del carbono no quemado en este caso es de 5%, por esta razón e interpretando la tabla 5.2 podemos decir que la energía de los reactivos se verá disminuida en 1,749 [kJ/kgComb]. Además podemos decir que el rendimiento de la caldera se verá afectado en un 1.6% por cada 5% que varíe el carbono no quemado. Esto puede verse claramente en el gráfico 5.3.
- El rango ideal de temperatura de reacción para generar el proceso de combustión es de 880 – 930 °C, en dicho rango se logra el mejor rendimiento de la caldera (84.39%), a medida que la temperatura del lecho aumenta el rendimiento se ve afectado considerablemente, esto se puede apreciar en el grafico 5.5.
- La temperatura de los gases de combustión debe estar en un rango de 130°C a 140°C para el buen funcionamiento del recuperador de calor y se minimice así las pérdidas de eficiencia en la caldera asociados al calor arrastrado en la chimenea.

- Se determinó que por cada kilogramo de combustible inyectado al sistema necesariamente se deben agregar 9.21 kg de aire para que la reacción del elemento carbono sea completa.
- El exceso de aire es otra variable importante al momento de evaluar las condiciones de combustión de una caldera, para este caso podemos afirmar que por cada 5% que aumente provocará que la energía útil aumentara aproximadamente en 110 kJ/kgComb. Estas variaciones generan un incremento del rendimiento de la caldera de aproximadamente 0.43 % por cada 5% que aumenta el exceso de aire.
- Se logró analizar y resolver el comportamiento del proceso de combustión haciendo uso del software EES.
- Por cada 1% de eficiencia que se mejore se obtendrá un ahorro de 0.27 ton/h de carbón antracita.
- Se logró mejorar la eficiencia de 73.96% hasta 84.36% consiguiendo así un ahorro estimado en \$ 1'155,168.00 al año solo en reducción del consumo de combustible primario (carbón).
- Trabajando en un rango de temperaturas de 900 - 950, podemos afirmar que se mantendrá un nivel muy bajo de emisiones de NO<sub>x</sub> y CO, para este caso los valores calculados bordean 0.43 – 1 ton/día de NO<sub>x</sub> y  $6.34 \cdot 10^{-5}$  ton/día de CO.

## RECOMENDACIONES

- Dar a conocer a los operadores y jefes de turno de la importancia y los beneficios de lograr una operación óptima en el proceso de combustión de la caldera CFB.
- Capacitar y concientizar al personal involucrado en el proceso en temas de gestión energética eficiente para identificar áreas de oportunidad en donde podamos lograr más ahorros y una mejor performance de la caldera.
- Mejorar la inspección de los equipos principales de la caldera, crear guías o rutinas de inspección de los equipos, maquinarias y sistemas de seguridad, para monitorear el funcionamiento de la caldera, a fin de reducir paradas innecesarias.
- Implementar el control automático de la combustión en función a los parámetros ya definidos en este informe para optimizar y dar estabilidad a la operación.
- Programar y realizar el mantenimiento anual de todos los equipos críticos de la caldera de manera preventiva para asegurar la confiabilidad de los equipos.
- Implementar la forma de trabajo lean – mejora continua para continuar con la eliminación de desperdicios (perdidas) y seguir mejorando orientados hacia los mejores resultados.

- **BIBLIOGRAFÍA:**

- Tangshan Xinde Group., “Final Project Report” – Trupal 130t/h CFB. Trujillo – Perú, 2007.
- TECSUP., “Generadores a vapor en calderas industriales, Operación y mantenimiento”. Programa de capacitación continua, TECSUP Lima – Perú., 1991.
- Seijas S., “Escalamiento de una cámara de Combustión de antracita aglomerada y cal a partir de los parámetros de combustión optimizados”. Ciencia y Tecnología. 6(2):11-29., 2007.
- Benitez J., "Process engineering and designed for air pollution control. Prentice Hall. New Yersey – USA, 1993.
- Castillo P., “Ahorro de energía en la operación de calderos industriales”. Edit. COMBINSA, Perú, 1991.
- Sanchez M., Investigación de las vías para reducir las pérdidas de calor en una caldera. Trujillo-Perú. 1995.
- BABCOCK y WILCOX COMPANY. “Steam its generation and use”. Mc Graw – Hill Publication. 1999.
- Shield C., “Calderas, tipos, características y funciones “. Edit CECSA. 1996.

- Coulouris G., Dollimore J., & Kindberg T., "Distributed systems-concepts and desing ISA international Conference", New York, 2da ed., 1994.
- Revista Electrónica No. 13. "Termodinámica de equipos industriales: eficiencia energética de una caldera", Facultad de Ingeniería - Universidad Rafael Landívar. 1994.
- <http://libros.redsauce.net/>, libro virtual consultado el dia 03.09.13.