

**OPTIMIZACION DE LA COMBUSTION CON MEZCLA DE COMBUSTIBLES EN
CALDERA 5 DEL INGENIO LA CABANA S.A.**

EDGAR ANDRES GIRALDO CORREA

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA Y MECANICA
INGENIERIA MECANICA
SANTIAGO DE CALI
2006**

**OPTIMIZACION DE LA COMBUSTION CON MEZCLA DE COMBUSTIBLES EN
CALDERA 5 DEL INGENIO LA CABANA S.A.**

EDGAR ANDRES GIRALDO CORREA

Pasantia para optar el titulo de Ingeniero Mecánico

Director:

JORNEY JARAMILLO

Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA Y MECANICA
INGENIERIA MECANICA
SANTIAGO DE CALI
2006**

Nota de aceptación:

Aprobado por el comité del grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar el título de Ingeniero Mecánico.

JORNEY JARAMILLO
Director

Santiago de Cali, Febrero 10 del 2006

El proyecto desarrollado con todo mi esfuerzo será dedicado a Dios en primera instancia, padres por su esmero, familiares, amigos que me apoyaron y personas que con su conocimiento y tiempo disponible para mis inquietudes hicieron posible la finalización de este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

En este proyecto, quiero dar primeramente gracias a Dios por darme el privilegio de desarrollarme como profesional y permitirme realizar un trabajo tan exigente que aporto mucho a mi vida tanto profesional como personal; para ello conté con el apoyo y colaboración de muchas personas a cargo como mis padres por su entrega, preocupación y esfuerzo por continuar con mis estudios, a familiares por su aporte, al Ingeniero Panesso en el área de generación de vapor y permitirme formar parte de su propósito y proyección en el Ingenio la Cabaña y colaboradores incondicionales; Ingeniero Gerardo Palencia, Orlando Osorio, José Maria Moreno; de Propal S.A. respectivamente y el Ingeniero Néstor Pincay y Journey Jaramillo Asesor de practica; quienes lograron que esto fuera posible a mi novia por su fiel apoyo y creer en mi y finalmente amigos con quienes compartí mi carrera universitaria que me prestaron su colaboración y conocimiento.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	11
INTRODUCCION	13
1. DESCRIPDION DEL PROYECTO.	14
1.1. OBJETIVOS.	14
1.1.1. Objetivo general.	14
1.1.2. Objetivos específicos.	14
2. CONDICIONES ACTUALES DE OPERACIÓN DE LA CALDERA 5.	15
2.1. COMPORTAMIENTO DE LA CALDERA.	16
2.1.1. Comportamiento a carga normal de operación.	16
2.2. ANALISIS DEL COMBUSTIBLE.	17
2.2.1. Análisis próximo	19
2.2.2. Análisis ultimo.	20
2.2.2.1. Calculo análisis ultimo del combustible. Método Diederichs.	21
2.3. VOLUMEN DE OXIGENO Y AIRE NECESARIO EN LA COMBUSTION.	24
2.4. VOLUMEN DE AIRE REAL PARA LA COMBUSTION. EXCESO DE AIRE. COMPOSISCION VOLUMETRICA DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTION.	26
2.5. REGISTRO Y ANALISIS DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTION Y EMISIONES ATMOSFERICAS CALDERA 5.	30
2.5.1. Muestreo Isocinetico.	30
2.5.2. Sistemas óptimos por corrección de medida de los productos de Combustión.	34
2.5.2.1. Corrección por medida de CO y del O ₂ .	34

2.6. ANALISIS DE LOS REACTIVOS Y PRODUCTOS DEL COMBUSTIBLE DURANTE EL PROCESO DE COMBUSTION EN CALDERA 5.	35
2.7. ENTALPIA DE FORMACION Y ENTALPIA DE COMBUSTION.	38
2.8. CALCULOS PARA CUANTIFICAR EL CONSUMO DE COMBUSTIBLES EN CALDERA 5.	39
2.9. EVALUACION DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA OPERACIÓN DE LA CALDERA DE COMBUSTION No. 5.	40
2.9.1. Que es una estrategia de control?.	40
2.9.2. Controles de operación en caldera 5.	41
2.9.3. Razones para el control de caldera 5.	43
2.9.4. Métodos para el control de caldera 5.	43
2.9.5. Lazos de control en la caldera de combustión No. 5.	44
2.9.5.1. Lazos de control de combustión.	44
2.9.5.2. Lazo de control de flujo de agua de alimentación y nivel en el Tambor de vapor.	45
2.9.5.3. lazo de control para la presión de hogar.	47
2.9.6. Control de la temperatura de vapor.	48
3. CONCLUSIONES.	50
4. RECOMENDACIONES.	52
BIBLIOGRAFIA.	54
ANEXOS	56

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Condiciones actuales de la caldera.	15
Tabla 2. Resumen operación normal de la caldera 5. Eficiencia actual.	17
Tabla 3. Análisis próximo de los combustibles caldera 5.	19
Tabla 4. Resumen calculo análisis ultimo de los combustibles caldera 5.	22
Tabla 5. Volumen teórico de oxígeno caldera 5.	25
Tabla 6. Aire teórico para una combustión completa caldera 5.	25
Tabla 7. Análisis productos de combustión caldera 5.	28
Tabla 8. Volumen de aire real caldera 5.	29
Tabla 9. Monitoreo isocinetico. Caldera de combustión 5 – Carbón. Ingenio la Cabaña S.A.	30
Tabla 10. Análisis del efecto de emisión de partículas, emisión de dióxido de Azufre y de emisión de dióxido de nitrógeno.	32

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Molinos y transporte del bagazo de alimentación a las Calderas. Iniciación del proceso.	12
Figura 2. Carbonera. Almacenamiento combustible carbón de Alimentación para caldera 5.	18
Figura 3. Bagacera. Almacenamiento de combustibles bagazo y polvillo para alimentación a las calderas.	18
Figura 4. Laboratorio. Análisis del combustible y residuos de la combustión.	19
Figura 5. Banda transportadora. Dosificación del carbón de Alimentación.	23
Figura 6. Banda transportadora. Polvillo de alimentación caldera 5.	23
Figura 7. Dosificadores de polvillo. Alimentadores de polvillo.	24
Figura 8. Ventilador tiro forzado VTF. Aire de combustión caldera 5.	26
Figura 9. Chimenea caldera5 Ingenio la Cabaña S.A.	33
Figura 10. Panel de control. Cuarto control calderas.	42

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Paper	56

RESUMEN

El propósito es el planteamiento de alternativas confiables para mejoras de la combustión de la caldera 5 con la mezcla de Carbón y Polvillo, mediante un estudio técnico de operación actual de la caldera que conlleva posteriormente a cuantificar económicamente la reducción de costos de consumo del combustible, así como determinar el impacto ambiental de los gases productos de la combustión; que se deben a múltiples problemas de operación, lazos de control de la caldera y propiedades de los combustibles consumidos.

En primera instancia para abordar el desarrollo del proyecto mediante el planteamiento de alternativas para mejorar la combustión en caldera 5, se realizó una investigación bibliográfica para abarcar todo el contenido que implica el desarrollo del proyecto, como consultas en textos y recopilación de información.

Después, una descripción técnica del equipo con un estudio actual de operación y parámetros de control de generación de vapor para determinar las falencias en que se encuentra funcionando la caldera, mediante de un análisis de variables operativas que afectan la combustión y por ende la eficiencia; seguido por la toma de mediciones de dichas variables, equipos y calibración de las señales enviadas por instrumentos de operación para determinar los parámetros mas importantes a controlar; en busca de cuantificar un ahorro económico bajo la diferencia del factor actual y la propuesta, en cuanto al consumo de combustibles y energía aportada durante la oxidación del combustible determinando un volumen real de aire para una combustión completa; realizándose después un análisis detallado de los resultados obtenidos de la combustión para determinar los factores ambientales y mejorar las emisiones contaminantes.

Figura 1. Molinos y transporte del bagazo de alimentación a las calderas. Iniciación del proceso.



INTRODUCCION

La generación de energía que se consume en el sector industrial, se debe a la producción de vapor empleado para múltiples usos y aplicaciones. Es de entender que la demanda de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos es enorme, dando como resultado unas inversiones cuantiosas que tienen una gran incidencia en el costo final de los productos acabados o servicios de los equipos de proceso.

Mediante la aplicación de buenas técnicas de operación control y mantenimiento de las calderas es posible reducir considerablemente los consumos de energía, mejorar la combustión y generación energética, con los respectivos ahorros económicos, vida útil de los equipos, mejor control de los efectos ambientales y desde luego conservar por mas tiempo, nuestras ya limitadas reservas de combustibles.

En el sector industrial como los ingenios es de vital importancia el uso de combustibles desde el gas natural hasta la biomasa cuyo fin es producir energía calórica al combinarse químicamente con sus compuestos que lo conforman.

El propósito del proyecto es el planteamiento de alternativas para mejorar la combustión con mezcla de combustibles: Carbón y Polvillo; en la caldera No.5 del Ingenio La Cabaña S.A., mediante un enfoque técnico, económico y ambiental con propuestas seguras, factibles y confiables que permitirán una mejora en la combustión.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo general

- Presentar alternativas para mejorar la combustión con la mezcla de combustibles: Carbón y polvillo, de la caldera 5 del Ingenio La cabaña S.A.

1.1.2. Objetivos específicos

- Definir los parámetros necesarios para mejorar la combustión.
- Definir las proporciones del consumo de los combustibles en la mezcla: Carbón y Polvillo para la combustión y elevar la eficiencia de la caldera.
- Establecer los cambios que se necesiten en la estrategia de control.
- Obtener un balance de combustión y cuantificar el efecto de la mejora.

2. CONDICIONES ACTUALES DE OPERACIÓN DE LA CALDERA 5.

Tabla 1. Condiciones Actuales de la caldera 5

Marca	Distral
Tipo	Acuotubular
Capacidad	6000 BHP
Año de Fabricación	1996
Combustibles	Carbon y Polvillo
Tiempo de operación	24 horas/dia
PARAMETRO	
Vapor sobrecalentado	150000 lb/h (4350 BHP)
Presion salida sobrec.	650 psig (45 bar)
Temp. Sal. Sobrec.	750 °F (400°C)
Presion Domo caldera	732 psig (389°C)
TEMPERATURAS	
Agua de alim. Entrando	239°F (115°C)
Agua salida economizador	291°F (144°C)
Aire entrada	80°F (27°C)
Aire sal. Cal. Aire primario	410°F (210°C)
Aire sal. Cal. Aire secundario	431°F (222°C)
Gases salida hogar	1956°F (1070°C)
Gases salida banco	773°F (412°C)
Gases sal. Prec. Aire primario	573°F (300°C)
Gases sal. Prec. Aire secund.	502°F (262°C)
Gases salida economizador	280°F (138°C)
Exceso de aire saliendo	30%
Caudal de aire ent. Caldera	178570 lb/h
Caudal de gases sal. Caldera	196950 lb/h
CAIDA DE PRESION GASES, in H2O	
Hogar	-0,15
Banco y sobrecalentador	-0,78
Precalentador de aire primario	-0,34
Prec. de aire secundario	-0,29
Ductos	-0,2
Multiciclon	-1,65
Economizador	-1,71
CAIDA DE PRESION DE AIRE, in H2O	
Ductos	-0,63
Percal. Aire primario	-0,34
Percal. Aire secundario	-1,83
Parrilla	-3,79
CONSUMO DE COMBUSTIBLES, Ton/h	
Consumo 100% Carbon	8,23
Consumo 100% Polvillo	35,93
Consumo especifico Carbon	8,28 lbv/lb Carbon
Consumo especifico Polvillo	1,9 lbv/lb Polvillo
Consumo agua de alim.	1700 kg/hr

Fuente: Especificaciones técnicas caldera 5. Manual de control caldera 5. Caloto (cauca) 1996, p. 2

2.1. COMPORTAMIENTO DE LA CALDERA

2.1.1. Comportamiento a carga normal de operación .La tabla a continuación muestra el calculo de eficiencia actual de la caldera con el consumo de la mezcla de combustibles: Carbón y Polvillo bajo una generación de 150.000 lb de vapor por hora a condiciones normales operativas de:

Presión de vapor sobrecalentado: 650 psig

Temperatura de vapor sobrecalentado: 750°F

Presión del agua de alimentación: 640 psig

Temperatura del agua de alimentación: 280°F

- **Cálculos de eficiencia actual de la caldera:**

Vapor generado (dato caldera): 150000 lb/h

Entalpía Vapor @650Psig, 750°F: 1319.1 Btu/lb

Entalpía agua alimentación @640Psig, 280°F : 272.2 Btu/lb

Calor requerido/lb de vapor = 1319.1-272.2 = 1046.9 Btu/lb

Calor teórico requerido = 150000 lb/h * 1046.9 = 156960000 Btu/h

Consumo Carbón base húmeda 7% (dato caldera): 9020 kg/h

Poder calórico del Carbón base húmeda (dato laboratorio): 10983 Btu/lb

Consumo polvillo base húmeda 50% (dato caldera): 7600 kg/h

Poder calórico del polvillo base húmeda (dato laboratorio): 3566 Btu/lb

Eficiencia (η)=Calor teórico requerido/consumo Carbon*PC+consumo Polvillo*PC

$$\eta = 156960000 \text{ Btu} / h / ((9020 * 2.204) \text{ lb} / h * 10983 \text{ Btu} / \text{lb} + (7600 * 2.204) \text{ lb} / h * 3566 \text{ Btu} / \text{lb}) * 100$$
$$\eta = 56.44\%$$

Tabla 2. Resumen operación normal de la caldera 5. Eficiencia actual.

Vapor generado	150000 lb/h
Entalpía vapor	1319,1 Btu/lb
Entalpía agua alimentación	272,2 Btu/lb
Calor requerido/lb de vapor	1046,9 Btu/lb
Calor teórico requerido	156960000 Btu/lb
Consumo Carbón base húmeda 7%	9020 kg/h
Poder calórico del Carbón base húmeda	10983 Btu/lb
Consumo polvillo base húmeda 50%	7600 kg/h
Poder calórico del Polvillo base húmeda	3566 Btu/lb
Eficiencia Calculada (actual)	56,44%

2.2. ANÁLISIS DEL COMBUSTIBLE

Con el análisis se evalúan las características físicas, químicas y petrográficas del combustible. Es necesario, para evitar problemas en su manejo y tratamiento, reducir los posibles daños de equipos, disminuir el impacto ambiental, planear y controlar la explotación y en el caso del carbón determinar los tipos de carbones que se adapten mejor a las necesidades de usos industriales y tecnológicos.

Generalmente se utilizan dos tipos de análisis: el análisis próximo y el análisis último, ambos expresados en porcentaje en peso. Para el manejo, interpretación y utilización del combustible es necesario relacionar el análisis a un estado o base determinada, libre de sustancias incombustibles, tales como el agua.

Las sustancias combustibles en la masa orgánica de los combustibles, y que liberan calor reaccionando en la combustión mediante su oxidación son:

Carbono, **C**

Hidrógeno, **H**

Azufre, S

Figura. 2. Carbonera. Almacenamiento Combustible Carbón de alimentación para Caldera 5



Figura 3. Bagacera. Almacenamiento de combustibles Bagazo y Polvillo para alimentación a las calderas.



2.2.1. Análisis próximo. El análisis próximo identifica el grado del contenido de carbón. Da información del comportamiento durante el calentamiento, es decir, cuanto del combustible permanece fijo y cuanto se transforma en materia volátil. Además se reportan datos de humedad, contenido de cenizas y poder calórico. Se realizó una investigación y recopilación de información mediante la verificación de datos y propiedades de los combustibles que son consumidos en la caldera 5 en el Ingenio la Cabaña S.A. con mezcla de carbón y polvillo para la generación de vapor; se obtuvo en las pruebas de laboratorio los siguientes resultados que se esperan óptimos para la combustión:

Tabla 3. Análisis próximo de los combustibles caldera 5

ANALISIS PROXIMO DE LOS COMBUSTIBLES C5		
	Carbón, %	Polvillo, %
Humedad	5.4	50,24
Materia volátil	21,17	25
Cenizas	23,62	10,74
Carbón Fijo	49,81	14,26
Poder Calorífico, Btu/lb	10500	3400

Fuente: Laboratorio análisis de suelos del Ingenio la Cabaña S.A. Caloto (cauca), 2004. p.10

Figura 4. Laboratorio. Análisis del combustible y residuos de la combustión.



2.2.2. Análisis último. El análisis último proporciona información acerca del contenido de cada elemento que compone el combustible, tales como, carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre y nitrógeno; los cuales se utilizan para calcular los requerimientos de aire para la combustión.

Una vez obtenido los anteriores resultados del análisis próximo de los combustibles (carbón y polvillo) mediante la recopilación de datos, se pretende encontrar la composición elemental del combustible para los cálculos estequiométricos, para la cantidad de aire necesaria para la combustión y cálculos de un exceso de aire requerido en mejoras de la oxidación total del combustible. Este análisis último de los combustibles se determina experimentalmente en un CHN o por correlaciones (método Diederichs):

- El Análisis último es costoso, no es fácil de hacer y requiere de un equipo especial CHN.
- El Análisis último es necesario para los cálculos de combustión.

Por obvias razones de costos y facilidad, se selecciono determinar el análisis último de los combustibles por correlaciones (método Diederichs) para los cálculos de las propiedades elementales del combustible, ya que este Método de Diederichs requiere solo conocer el análisis próximo que entrega el laboratorio, además solo se toman como combustibles la materia volátil MV y el carbono fijo CF. Se definen los siguientes parámetros referido a lb de combustible:

- Hc: % en peso del hidrógeno en el carbón.
- Vc: % en peso de la materia volátil en el carbón.
- Fc: % en peso del carbono fijo.
- Cc: % en peso de carbono en el carbón.
- Nc: % en peso de nitrógeno en el carbón.

2.2.2.1. Calculo análisis último de los combustibles. Método Diederichs. Este método permite encontrar un análisis elemental de los combustibles a partir del análisis próximo. El análisis elemental o ultimo es indispensable para los cálculos teóricos de la cantidad estequiometrica de aire y exceso de aire para la combustión.

-Análisis próximo del carbón:

- Humedad = 5.4%
- Cenizas = 23.62%
- Material volátil, MV = 21.17%
- Carbón fijo, CF = 49.81%

—————> según las propiedades anteriores del análisis próximo se considera el combustible dentro del rango de **Carbón bituminoso**.

-Combustible: $CF + MV = 70.98\%$

-Calculo del porcentaje en peso del carbono fijo

$$F_c = 100 * CF / (CF + MV) = 70.17\%$$

-Calculo del porcentaje en peso de material volátil en el carbón

-Calculo del porcentaje en peso del hidrógeno en el carbón

$$H_c = V_c(7.35 / (V_c + 10) - 0.013) = 5.11 \text{ lbH} / \text{lbCombustible}$$

$$\% H = 5.11 \text{ lbH} / \text{lbcombustible} * 0.917 \text{ lbCombustible} / \text{lbCarbon}$$

$$\% H = 4.69 \text{ lbH} / \text{lbCarbon}$$

-Calculo del porcentaje en peso del carbono en el carbón

Para carbones bituminosos: $C_c = F_c + 0.9(V_c - 14) = 84.41$

$$\% C = 84.41 \text{ lbC} / \text{lbCombustible} * 0.917 \text{ lbCombustible} / \text{lbCarbon}$$

$$\% C = 77.40 \text{ lbC} / \text{lbCarbon}$$

-Para el contenido de azufre se solicitó los datos en el laboratorio. Octubre 24 del 2004.

$$\% S = 1.1 \text{ lbS} / \text{lbCombustible} * 0.917 \text{ lbCombustible} / \text{lbCarbon}$$

$$\% S = 1.01 \text{ lbS} / \text{lbCarbon}$$

-Calculo del porcentaje de nitrógeno en el carbón

Para carbones bituminosos: $N_c = 2.10 - 0.012V_c = 1.74$

$$\% N = 1.74 \text{ lbN} / \text{lbCombustible} * 0.917 \text{ lbCombustible} / \text{lbCarbon}$$

$$\% N = 1.6 \text{ lbN} / \text{lbCarbon}$$

-Calculo del porcentaje de oxígeno en el carbón

$$\% O = 100 - (\% N + \% H + \% S + \% C) = 15.3 \text{ lbO} / \text{lbCarbon}$$

Aplicando el **método Diederichs** donde solo se requiere el análisis próximo se obtiene el análisis ultimo de los combustibles (Carbón y Polvillo) de consumo por la caldera 5 del Ingenio la Cabaña S.A.:

Tabla 4. Resumen calculo análisis ultimo de los combustibles caldera 5.

ANALISIS ULTIMO DE LOS COMBUSTIBLES C5		
	Carbón	Polvillo
% H	4,69	5,06
% C	77,4	74,3
% S	1,01	1,22
% N	1,6	0,25
% O	15,3	19,17

Figura 5. banda transportadora. Dosificación del carbón de alimentación.



Figura 6. Banda transportadora. Polvillo de alimentación caldera 5.



Figura. 7. Dosificadores de polvillo. Alimentadores de polvillo.



2.3. VOLUMEN DE OXIGENO Y AIRE NECESARIO PARA LA COMBUSTIÓN.

El oxígeno necesario para la combustión es tomado del aire suministrado al horno. El aire es una mezcla de gases, compuesta fundamentalmente por nitrógeno y oxígeno:

21% de O_2 , 79% de N_2 .

$79/21 = 3.76$ moles N_2 / moles O_2 ; es decir, que por cada mol de oxígeno hay 3.76 moles de nitrógeno.

El volumen teórico de oxígeno calculado, necesario para la combustión completa

Para 1 Kg de combustible en caldera 5 , se determina por la ecuación:

$$Vo_2 = 1.866(C/100) + 5.59(H/100) + 0.7(S/100) - (O/100 * 1.429), [m^3 N/kg]$$

Una vez calculado el análisis ultimo de los combustibles, se determina el volumen teórico de oxígeno para la combustión de cada combustible de acuerdo a la formula anterior.

Para el Carbón:

$$Vo_2 = 1.866(77.4/100) + 5.59(4.69/100) + 0.7(1.01/100) - (15.3/100 * 1.429) = 1.5 m^3 N/kg$$

$$Vo_2 = 1.866(74.3/100) + 5.59(5.06/100) + 0.7(1.22/100) - (19.2/100 * 1.429) = 1.4 m^3 N/kg$$

Tabla 5. Volumen Teórico de oxígeno Vo₂, m³N/kg	
Carbón	Polvillo
1,5	1,4

Pero en la caldera no se suministra oxígeno puro, es aire, compuesto por nitrógeno y oxígeno para la combustión de los elementos combustibles. Entonces la cantidad teórica de aire necesario para la combustión completa se determina conociendo que el aire atmosférico contiene 21% en volumen de oxígeno y en 1 kg de combustible, es decir, $Vo_2 / 0.21$; de una composición determinada será:

$$Carbon = Vo_2 / 0.21 = 1.5 / 0.21 = 7.14 m^3 N/kg$$

$$Polvillo = Vo_2 / 0.21 = 1.39 / 0.21 = 6.62 m^3 N/kg$$

Tabla 6. Aire Teórico para una combustión completa, m³N/kg	
Carbón	Polvillo
7,14	6,62

Figura 8. Ventilador tiro forzado VTF. Aire de combustión caldera 5.



2.4. VOLUMEN DE AIRE REAL PARA LA COMBUSTIÓN. EXCESO DE AIRE. COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN.

En las condiciones reales del proceso de combustión, no es posible lograr una combustión completa del combustible suministrando la cantidad teórica necesaria

Va. Esto se debe a la imposibilidad de lograr en condiciones reales un mezclado perfecto del combustible con el aire. Por ello, para asegurar una combustión suficientemente completa, el volumen real de aire suministrado es siempre mayor que el teórico. La relación entre estos volúmenes se denomina coeficiente de exceso de aire.

$\alpha = V_{airreal} / V_a$, el coeficiente de exceso de aire es la relación entre la cantidad (volumen) del aire real y la cantidad (volumen del aire teórico), por tal razón el coeficiente de exceso de aire será mayor que 1, lo que indica que el volumen de aire real suministrado a la caldera será mayor al volumen de aire teórico encontrado. El coeficiente de exceso de aire caracteriza el grado de perfección de la organización del proceso de combustión en las condiciones reales con respecto a las ideales. El coeficiente de exceso de aire a suministrar en la caldera depende de:

- Tipo de combustible: Carbón y polvillo.
- Modo de combustión.
- Diseño del horno y sistema de combustión.

Durante la explotación y pruebas en las calderas, el coeficiente de exceso de aire se determina experimentalmente (análisis de productos de combustión), y durante cálculos de diseño o de comprobaciones se asume por recomendaciones por documentos normativos.

El Ingenio la cabaña S.A., se acogió a realizar un análisis de gases de combustión en septiembre del 2004, arrojando los siguientes resultados de productos de combustión en caldera 5 en porcentaje de volumen:

Tabla 7. Análisis productos de la combustión caldera 5

Caldera 5. Ingenio la Cabaña	
CO	= 0.0452 %en volumen
CO₂	= 8.1 %en volumen
O₂	= 12.8 %en volumen
N₂	= 79.1 %en volumen
SO₂	= 0.346 kg/E6 kCal
Temp. Chimenea	279.2°F

Fuente: Laboratorio del Ingenio. Caloto (cauca), Septiembre 20 del 2004. p. 24

Esta composición volumétrica de los productos de combustión se determina mediante instrumentos específicos, analizadores de gases.

Conociendo ahora la composición volumétrica de los productos de la combustión se puede determinar el coeficiente de exceso de aire por la formula del Nitrógeno:

$$\alpha = 1 / (1 - 3.62 * ((O_2 - 0.5CO) / N_2)) = 2.41$$

bajo estas condiciones conociendo que exceso de aire es 2.41, se podrá calcular el volumen de aire real para la combustión con el 100% de cada combustible y con la mezcla de combustibles para operación de la caldera 5 a condiciones normales para la combustión:

$$\alpha = V_{airereal} / V_a \longrightarrow V_{airereal} = \alpha * V_a$$

donde:

α : exceso de aire

V_a : Volumen aire teórico para la combustión

$V_{airereal}$: volumen aire real de la combustión completa

Carbón: $V_{airereal} = 2.41 * 7.14 = 17.21 \text{ m}^3 \text{ N/kg}$

Polvillo: $V_{airereal} = 2.41 * 6.62 = 15.95 \text{ m}^3 \text{ N/kg}$

Tabla 8. Volumen de Aire Real, m³N/kg	
Carbón	Polvillo
17,21	15,95

Cuantificar el consumo de polvillo para la caldera no es confiable, por tal razón solo se conoce de un consumo de carbón como combustible primario que equivale a un 80% de la generación de vapor y un consumo de polvillo que equivale al 20% restante.

Ahora, se determina la cantidad de volumen real de aire, calculado una vez el aire teórico necesario para la combustión completa y el exceso de aire con mezcla de combustibles carbón y polvillo:

$$V_{airereal} = 17.21(0.80) + 15.95(0.20) = 16.96 \text{ m}^3 \text{ N/kg}$$

Esto significa que para una combustión completa donde todo el combustible se oxida y todo el comburente se reduce generando calor con mezcla de carbón y polvillo se necesitan un volumen de aire real para la combustión **16.96 m³ N de aire / por kg de combustible.**

2.5. REGISTRO Y ANÁLISIS DE PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN Y EMISIONES ATMOSFERICAS EN CALDERA 5.

Para cuantificar los niveles de emisión real de material particulado generado por el proceso de combustión y descargado a la atmósfera se llevaron a cabo estudios isocineticos realizados en la chimenea de la caldera 5; dichos análisis se han convertido en un parámetro de gran importancia puesto que con esta información es posible determinar eventuales deficiencias en el proceso de quema del combustible y de combustión, que repercuten en la capacidad de la generación de la caldera y además producen daños irreparables al ecosistema.

2.5.1. Muestreo isocinético. El estudio isocinético es un análisis completo de la información referida a las emisiones por la chimenea: material particulado, granulometría y gases de Combustión.

TABLA 9. MONITOREO ISOCINETICO. CALDERA DE COMBUSTIÓN 5 – CARBON. INGENIO LA CABAÑA S.A.			
Pbar	26.429 Pulg Hg	θ	60 minutos
Ds	2.450 m	%CO	0.0452 %en volumen
As	50.74 Pies²	%CO₂	8.1 %en volumen
Ht	30 m	%O₂	12.8 %en volumen
Cp	0.850	%N₂	7.1 %en volumen
Y	0.970	Ts	279.2 °F
$\Delta H_{@}$	1.991	Ts	739.2 °R

Hf	10.40 m	$(\Delta P)^{0.5}$	0.47 (pulg H₂ O)^{0.5}
Dn	5/16 Pulg	ΔP	0.22 pulg H₂ O
An	5.32E-04 pies²	Pg	0.12 pulg H₂ O
Nt	12 puntos	ΔH	1.72 pulg H₂ O

Fuente: Monitoreo isocinético caldera 5. Laboratorio del Ingenio. Caloto (cauca), 2004. p.21

Conversión de variables:

Pbar: Presión barométrica en el sitio de muestreo.

Ds: Diámetro interno de la chimenea.

As: Área de la sección transversal del flujo.

Ht: Altura real de la chimenea.

Cp: Coeficiente de calibración del tubo pitot tipo S

Y: Factor de calibración del medidor de gas seco.

$\Delta H_{\text{orificio}}$: Factor de calibración del diferencial de presión en el orificio.

Hf: Altura de la fuente de emisión sobre el nivel del mar.

Dn: Diámetro interno de las boquillas de muestreo.

An: Área transversal de flujo de la boquilla de muestreo.

Nt: Numero total de puntos de muestreo.

θ : Tiempo total de muestreo.

%CO: Porcentaje de monóxido de carbono en los gases de emisión.

%CO₂: Porcentaje de dióxido de carbono en los gases de emisión.

%O₂: Porcentaje de oxígeno en los gases de emisión.

%N₂: Porcentaje de nitrógeno en los gases de emisión.

ts: Temperatura de los gases en la chimenea.

Ts: Temperatura absoluta de los gases en la chimenea.

$(\Delta P)^{0.5}$: Cabeza de velocidad del gas en la chimenea en potencia.

ΔP : Cabeza de velocidad del gas absoluta en la chimenea.

Pg: Presión estática de la chimenea.

ΔH : Presión diferencial a través de la placa orificio.

Así se obtuvo el siguiente análisis en la caldera de combustión No. 5, una vez realizado la prueba isocinetica y de productos de combustión:

Tabla 10. Análisis del efecto de emisión de partículas, emisión de dióxido de azufre y de emisión de dióxido de nitrógeno.

Chimenea	Emisión			Producción Tn/h	Calor generado 10E6 kcal/h	Norma Permisible		
	Partículas Kg/h	SO2 kg/E6 Kcal	NO2 kg/E6 Kcal			Partículas Kg/h	SO2 kg/E6 Kcal	NO2 kg/E6 Kcal
Caldera No.5	26,1	0,346	0,635	25,3	54,31	102,1	2,16	1,26
Chimenea	DESCRIPCION							
	Altura real (m)				Norma altura liberado (m)	Norma altura Contenido de S (m)		
Caldera No. 5	30				20	31,2		

Fuente: Laboratorio análisis de suelos del Ingenio la Cabaña S.A. Caloto (Cauca), 2004. p.6

De lo anterior se concluye que en la caldera de combustión No. 5 del Ingenio la cabaña cumple con los limites permisibles de la emisión de material particulado, emisión de dióxido de azufre por fuentes fijas y dióxido de nitrógeno, definidas en función de la cantidad de producto terminado y en función de la cantidad de calor generado respectivamente.

La altura mínima de la chimenea para caldera 5, debe ser de 31.2 m debido al contenido de azufre del carbón, y la altura real es de 30 m; por tal razón no cumple con los estándares de altura mínima.

Figura 9. Chimenea caldera 5 ingenio la cabaña s.a.



2.5.2. Sistemas óptimos por corrección de medida de los productos de combustión. Se trata de incorporar adicionalmente un sistema que mejore el control por medio de la corrección aire / combustible. Esta corrección se basa en la medida de algún parámetro importante de la combustión o varios, y hacer actuar la señal obtenida sobre el sistema general de control de la relación aire / combustible.

2.5.2.1. Corrección por medida del CO y del O₂. Este sistema de corrección para el control de la medida del CO y O₂, como propuesta de implementación en la caldera y método de mejoramiento, es cuando ambos parámetros a medir se realizan conjuntamente, esto es más recomendable, ya que independientemente el control por oxígeno obtiene resultados inferiores que por CO, dado que el control por O₂ es estático, o sea, no sigue la evolución de las curvas de rendimiento de la caldera, existen otras razones como:

- Seguridad. Dado que la medida se refiere directamente a la cantidad de combustible no quemado en la caldera, se puede utilizar mejor CO que el O₂ para aproximarse a la combustión completa sin tener grandes excesos de aire.
- Sencillez. El punto de control es independiente del tipo de combustible; dentro de un rango de 100 a 150 ppm de CO, que es la zona donde se obtiene el máximo rendimiento. (Ref. Borroto, Nordelo. Ahorro de energía en la generación y distribución del vapor).

- **Fiabilidad.** La señal de **CO** no se ve afectada por la infiltración del aire a la zona donde está situado el sensor; en cambio la señal de **O₂** se ve afectada notablemente.

Con ello se obtiene una respuesta rápida cuando se alcanza el límite de **O₂**, y una respuesta lenta para variaciones del **CO**.

2.6. ANÁLISIS DE REACTIVOS Y PRODUCTOS DEL COMBUSTIBLE DURANTE PROCESO DE COMBUSTIÓN EN LA CALDERA 5

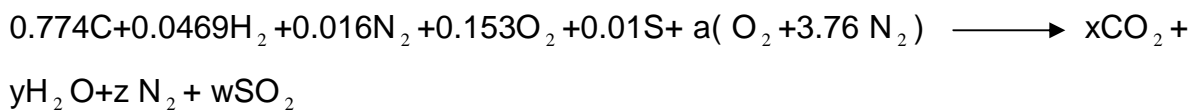
Se determinará mediante este análisis un balance de la ecuación de combustión de reactivos y productos del combustible: Carbón (combustible principal), la relación aire/combustible, el porcentaje de aire teórico y la temperatura de rocío de los gases de combustión.

El Carbón tiene el siguiente análisis volumétrico (análisis último): 77.4% de C, 4.69% de H₂, 1.6% de N₂, 15.3% de O₂ y 1.01% de S.

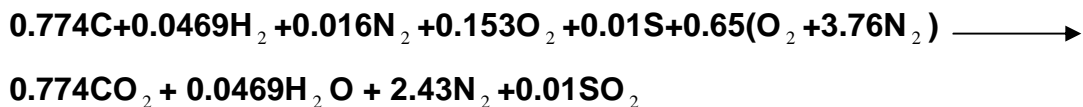
ANÁLISIS ULTIMO DE LOS COMBUSTIBLES C5		
	Carbón	Polvillo
% H	4,69	5,06
% C	77,4	74,3
% S	1,01	1,22
% N	1,6	0,25
% O	15,3	19,17

Se desea una quema del combustible con la cantidad estequiométrica de aire que entra a la cámara de combustión a 223°C (431°F) y 80% de humedad relativa.

Se supone una combustión completa; en consecuencia todo el carbono en el combustible se convertirá en CO_2 , todo el hidrógeno en H_2O y todo el azufre en SO_2 . Si el carbón se quema con la cantidad estequiométrica de aire; quiere decir, que no habrá O_2 libre en los productos. La humedad de 80% de aire no reacciona con nada; esta aparece como H_2O adicional en los productos. De modo, que se balanceara la ecuación con aire seco y después se agrega la humedad en ambos lados de la ecuación. La ecuación de combustión será:



Donde a es el coeficiente estequiométrico para el aire. Los coeficientes desconocidos de los productos de combustión se encuentran a partir de un balance de masa; por tanto se obtiene la siguiente ecuación balanceada:



Obsérvese que el coeficiente 0.65 de la ecuación balanceada representa el número de moles del oxígeno, no el número de moles del aire, este se obtiene sumando el producto $0.65 * 3.76 = 2.46$ moles de nitrógeno con los 0.65 moles de oxígeno, lo que da un total de 3.11 moles de aire.

La relación aire/combustible (AC) se determina tomando la proporción entre la masa de aire y la masa de combustible:

$$\text{AC} = m_{\text{aire}} / m_{\text{combustible}} = (\text{Nm})_{\text{aire}} / ((\text{Nm})_{\text{C}} + (\text{Nm})_{\text{H}_2})$$

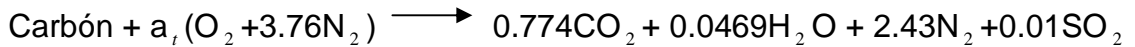
Donde N: es el numero de moles.

m: es la masa molar.

$$AC = ((0.65 \cdot 4.76 \text{ kmol}) \cdot 29 \text{ kg/kmol}) / ((0.774 \text{ kmol} \cdot 12 \text{ kg/kmol}) + (0.0469 \text{ kmol} \cdot 2 \text{ kg/kmol}))$$

AC = 9.63 kg de aire/kg de combustible.

Para encontrar el % de aire teórico utilizado, se necesita conocer la cantidad de aire teórico, que se determina con la ecuación de combustión:



Calculamos a_t como cantidad estequiometrica del aire en el proceso de combustión:

$$\text{O}_2: \quad a_t = 0.774 + (0.0469/2) + 0.01 \quad \text{entonces, } a_t = 0.80$$

$$\% \text{ aire teórico} = \text{Maire,real} \cdot \text{Naire,teorico} / \text{Maire,teorico} \cdot \text{Naire,real}$$

$$\% \text{ aire teórico} = 0.65 \cdot 4.76 \text{ kmol} / 0.80 \cdot 4.76 \text{ kmol}$$

% aire teórico = 81%

Después se determina la cantidad de humedad que acompaña $4.76 \cdot a = 4.76 \cdot 0.65 = 3.11 \text{ kmol}$ de aire seco. La presión parcial de la humedad en el aire es:

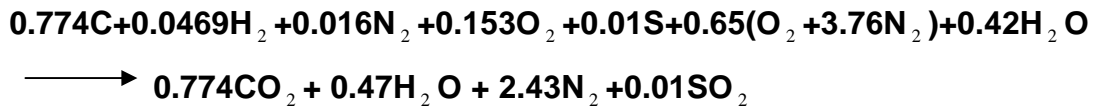
$$P_{\text{aire}} = \text{hum.} \cdot P @ 223^\circ\text{C} = 0.80 \cdot 2.536 \text{ kpa} = 2.03 \text{ kpa}$$

Si se supone un comportamiento de gas ideal, el numero de moles en la humedad en el aire es:

$$N_{\text{aire}} = (P_{\text{aire}}/P_{\text{total}})N_{\text{total}} = (2.03 \text{ kpa}/101.325)(6.97 + N_{\text{aire}})$$

$$N_{\text{aire}} = 0.42 \text{ kmol}$$

La ecuación de combustión balanceada se obtiene al sustituir los coeficientes determinados antes y añadiendo 0.42kmol de H₂O en ambos lados de la ecuación:



Ahora se calcula la temperatura de rocío de los productos, que indica la temperatura a la cual el vapor de agua en los productos de empieza a condensarse cuando los productos se enfrían. También considerando un comportamiento de gas ideal, la presión parcial del vapor de agua en los gases de combustión es:

$$P_{v,prod} = (N_{H_2O, prod} / N_{prod}) P_{prod} = (0.47\text{kmol}/3.684\text{kmol})(101.325\text{kpa})$$

$$P_{v,prod} = 13\text{kpa}$$

Por tanto, **la temperatura de rocío a 13kpa es 50.35°C = 122.63°F**

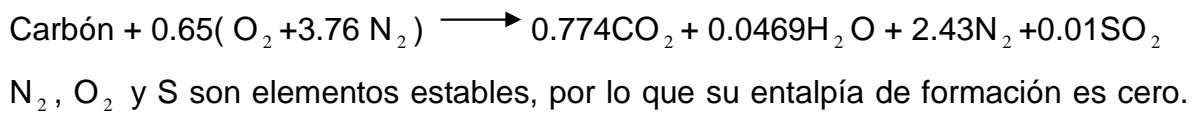
2.7. ENTALPIA DE FORMACIÓN Y ENTALPIA DE COMBUSTION

la **entalpía de combustión** h_c , representa la cantidad de calor liberado durante el proceso de combustión de flujo permanente cuando un 1kg de combustible se quema por completo a una temperatura y presión especificada. Se expresa como:

$$h_c = H_{prod} - H_{react}$$

La **entalpía de formación** h_f , se considera como la entalpía de una sustancia en un estado especificado debida a su composición química.

Para poder determinar la entalpía de combustión en el combustible: Carbón, se dispone de la ecuación estequiometrica balanceada de combustión:



En ese caso la entalpía de combustión del Carbón se transforma en:

$$h_c = H_{\text{prod}} - H_{\text{react}}$$

$$h_c = \sum N_p h_{f_p} - \sum N_r h_{f_r} = (N h_f)_{\text{CO}_2} + (N h_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (N h_f)_{\text{carbon}}$$

$$h_c = (0.774 \text{ kmol})(-393520 \text{ kJ/kmol}) + (0.0469 \text{ kmol})(-241820) - (1 \text{ kmol})(0 \text{ kJ/kmol})$$

$$\mathbf{h_c = -315925.84 \text{ kJ/kmol}}$$

2.8. CALCULOS PARA CUANTIFICAR EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN CALDERA 5

El costo del carbón para el Ingenio es de 110.000 \$/Ton es decir, 50 \$/lb de carbón; información que indispensable para los siguientes cálculos:

Se desea un consumo específico de 8,28 lb de vapor / lb de carbón (data Sheet de la caldera), para generar 150.000 lb de vapor/h. Así que la relación entre la generación y el consumo específico determinara el consumo requerido de combustible (calculó teórico):

Consumo req. = $(150.000 \text{ lbvapor/h}) / (8.28 \text{ lbvapor/lbcarbon})$

Consumo req. = 18115.94 lbcarbon/h

Costo consumo req. = $18115.94 \text{ lbcarbon/h} \times 50\$/\text{lbcarbon}$

Costo consumo req. = 905.797\$/h

Para una generación de 150.000 lbvapor/h, actualmente se tiene (calculo real):

Consumo real = 19880,1lbcarbón/h

Costo consumo real: 994.004\$/h

Diferencia = $994.004\$/h - 905.797\$/h = 88207\$/h$

Exceso de consumo = $88207\$/h / 110.000\$/\text{Tn}$

Exceso de consumo = $0.80\text{Tn/h} * 24 = 19.24\text{Tn/día}$

Costo exceso de consumo = $19.24\text{Tn/día} \times 110.000\$/\text{Tn}$

Costo exceso de consumo = $2.116.968\$/\text{día} = 762.108.480 \text{ \$/año}$

2.9. EVALUACION DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA OPERACIÓN DE LA CALDERA 5

2.9.1. Que es una estrategia de control? Una estrategia de control es el planteamiento sistemático de los componentes y parámetro que hacen parte de un sistema de control.

Para elegir una adecuada estrategia de control, es necesario, en primer lugar caracterizar amplia y correctamente el proceso, posteriormente elegir las variables relevantes las cuales serán objeto de control y finalmente contar con un adecuado equipo de instrumentación el cual garantizará mantener dichas variables en rangos establecidos.

2.9.2. Controles de operación en caldera 5.

Instrumentos en el campo

- **Transmisores diferenciales de presión**
Para determinar: nivel del domo, flujo de vapor, flujo de agua de alimentación, flujo de aire en la combustión.
- **Transmisores de presión**
Determinan: presión del tambor, presión el vapor sobrecalentado, tiro del hogar.
- **Sensores de temperatura**
Para el vapor sobrecalentado, salida de los gases de chimenea, aire de combustión (salida del calentador).
- **Controladores**
- **Actuadores neumáticos, válvulas de control**
- **Analizador de O₂**
- **Medidores diferencial de flujo.**
- **Interruptores.**

Sistema de control

- **Panel de control en el cuarto de control calderas.**
- **Controladores**
Para el nivel del agua, flujo de aire de combustión, tiro del hogar (V.T.I.), maestro de presión (demanda de combustible), control de combustible (carbón o bagazo).
- **Indicadores**
De presión del tambor, presión vapor sobrecalentado, descarga del ventilador tiro forzado, presión bajo parrilla, tiro del hogar, tiro de salida de

la caldera (entrada calentador), succión ventilador tiro inducido, descarga sobrefuego, descarga distribuidor neumático.

- **Registadores**

- **Señales análogas**

Para el flujo de vapor, presión de vapor, nivel de la caldera, flujo de agua, flujo de aire, contenido de CO₂ en humos.

- **Señales de sensor de temperatura**

Para el vapor salida de la caldera, gases de chimenea, aire salida de calentador, gases saliendo de la caldera.

- **Anunciadores de operación.**

Fig. 10. Panel de control. Cuarto control calderas



2.9.3. Razones para el control de caldera 5. Lo principal que buscamos es un aumento del rendimiento económico lo cual exige fiabilidad, eficiencia y seguridad de las instalaciones. Es por ello que es rentable introducir sistemas de control de tecnología avanzada en consumos de combustible, que se justifican para:

- Mantener una presión de vapor constante y un caudal acorde con las variaciones de carga.
- Mantener una forma de funcionamiento con las máximas garantías de seguridad.
- Optimizar el consumo de combustible, a través de un aumento de rendimiento.

2.9.4. Métodos para el control de caldera 5. El primer método de control utilizado para la caldera es el empleo de un medidor controlador de la relación **flujo de combustible-flujo de aire**, el cual constantemente supervisa la cantidad de combustible que se esta consumiendo y la cantidad de aire que se esta suministrando y controla la relación.

El segundo método de control se realiza una vez por año en la caldera y es el empleo de un **analizador de gases**, el cual constantemente supervisa el porcentaje o cantidad de oxígeno en los gases de combustión y ajusta la cantidad de aire que debe suministrarse para obtener la relación correcta.

2.9.5. Lazos de control en caldera de combustión no. 5. El objetivo primordial del control de la caldera 5 es mantener dentro de parámetros preestablecidos el comportamiento de las variables a controlar.

Considerando que se trata de la caldera 5 que debe generar vapor en forma continua a unas especificaciones de presión, temperatura y flujo determinadas, es muy importante tener el control riguroso de las cantidades de masa y energía en busca de aumentar la productividad expresado como la relación entre la cantidad de consumo de combustible por vapor generado, minimizando pérdidas. Para ello todo el sistema de control de la caldera 5 se ha dividido en tres lazos de control, que se estudiarán individualmente pero que operan en forma dependiente:

- **Lazo de control de combustión.**
- **Lazo de control de presión de hogar.**
- **Lazo de control de nivel del Domo.**

2.9.5.1. Lazo de control de la combustión. Cuando se usa el término control de combustión se refiere a algo más específico de la caldera o sea al control completo de la caldera. Este no se refiere solamente al control de combustible y aire que entra a la caldera sino también al sistema de control de agua de alimentación, un control de temperatura de vapor y un control de presión o tiro como sistemas básicos aunque puede involucrar el control de otros parámetros.

El monitoreo y control de la combustión es una de las tareas iniciales al buscar ahorros de combustible. Al mantener la proporción correcta de aire-combustible se evita que arrojemos energía por la chimenea o que enfriemos el hogar con aire de exceso.

Para nuestro objeto de estudio en este lazo de control de combustión para caldera 5 la variable controlada es la presión del vapor sobrecalentado o presión master y las señales de control son: Aire y Combustible. El aire con el actuador servomotor del ventilador de tiro forzado y el combustible con el servomotor alimentador de combustible.

El lazo de control en su forma mas simple funciona de la siguiente manera:

La señal análoga de entrada llega a un controlador PID y la compara con un *set point* ajustado, la salida es manipulada en una estación manual/automatica y posteriormente es modificada y adicionada con el flujo de vapor. Esa misma señal es la entrada a una nueva señal en las que se compara con los valores de presión de cabezal y presión master. La señal de salida de la estación es la que manipula directamente el alimentador del combustible y esta misma mediante una estación en paralelo es la que compara el valor con el flujo de aire de combustión, nivel de agua y presión de aire entrando, generando la señal análoga de salida que manipula el servomotor ventilador de tiro forzado.

2.9.5.2. Lazo de control del flujo de agua de alimentación y nivel en el tambor de vapor. La caldera esta diseñada para trabajar con cierto nivel de agua liquida en el tambor de vapor. Si el nivel del agua es demasiado alto, pueden producirse arrastres y si es demasiado bajo, los tubos pueden quedar parcialmente sin agua, con lo que no se refrigerarían y se queman.

Todo el vapor que abandona el tambor debe ser remplazado por agua, de forma que la estrategia más simple para controlar este balance de materia es utilizar el nivel del agua en el tambor como elemento de control y ajustar el agua de alimentación a dicho nivel.

Se recomienda que el nivel del agua dentro del domo permanezca en un 50% de su capacidad ya que así se puede controlar mas establemente un aumento o disminución del mismo.

En esta estrategia, la variable manipulada es el flujo de agua de alimentación y las señales de control son: nivel del domo y flujo de vapor.

El lazo de control funciona de la siguiente manera:

El transmisor de nivel envía una señal análoga a un controlador PID en donde se compara con el flujo de vapor. Estas dos señales son sumadas y constituyen la variable de entrada un segundo controlador que la compara con el flujo de agua y genera una señal actuante que manipula la válvula de agua de alimentación, pasando primero por una estación manual/automatica que consigna la señal de realimentación para ese segundo controlador. Si la caldera esta funcionando en estado estable y no se producen variaciones entre la cantidad de agua que entra y la que sale del domo, la diferencia entre estos flujos de agua y vapor permanecerá constante y el nivel del domo invariable.

Se propone una selección estratégica de control de nivel de tres elementos, donde se tiene las mediciones de nivel, flujo de agua y vapor, siendo que el control de nivel recibe un SET POINT REMOTO del flujo de vapor, o sea repone la cantidad de agua equivalente a la cantidad de vapor de la salida de la caldera; por tanto el rango para la medición de vapor y de agua, en esta estrategia, tienen que ser iguales.

El flujo de agua de alimentación será regulado por una válvula de control ajustada automáticamente por un algoritmo PID que funcionará siempre recibiendo un SET

POINT REMOTO. Solamente en ocasiones de partida o parada o condiciones anormales de operación, el operador podrá trabajar manual colocando un valor de set point.

El sensor de control de nivel de la caldera actuara enviando un Set Point Remoto para el sensor de flujo de agua, controlando así el nivel de la caldera; por lo tanto este control será efectuado por un algoritmo PID que recibirá la señal del valor de flujo de vapor generado por la caldera con anticipación y hará funcionar la válvula reguladora de nivel según sea el caso.

2.9.5.3. Lazo de control de la presión del hogar. Este control es importante y ha de tenerse en cuenta ya que la caldera cuenta con el tiro del ventilador inducido que evacua los gases de combustión desde el hogar y que por consiguiente afecta el tipo de flujo de los gases. Para este lazo existen dos variables controladas: el flujo de aire primario del ventilador de tiro forzado y la expulsión de gases por medio del ventilador de tiro inducido. La señal de control esta dada por medio del indicador de presión de hogar.

El lazo de control funciona de la siguiente manera:

Un transmisor registra el valor de presión en el hogar y envía una señal análoga a un controlador PID que tiene un *set point* retroalimentado, posteriormente la señal es comparada en una estación manual/automatica con los valores de flujo de aire primario y una señal digital de nivel de domo. La salida análoga acciona los registros o compuertas del ventilador de tiro inducido produciendo una variación en la presión de hogar.

Cabe notar, que el controlador PID ejerce una acción directa entre la variable de entrada y la de salida. Pues un incremento en la presión de hogar produce un incremento en el tiro inducido, realizando así una mayor extracción de gases que inmediatamente producen un descenso en la presión. De igual forma una caída de presión, que puede obedecer a una sobrecarga o a un aumento en la humedad del combustible se controla mediante la disminución del tiro inducido hasta que se consigna el valor ajustado.

La propuesta para este lazo de control será enfocado a través de la medición de presión (negativa) del hogar actuando directamente en el damper del tiro inducido. Es importante considerar que el control de presión de hogar no debe tener ninguna relación directa con el ventilador de tiro forzado. La presión del hogar es solo consecuencia de la combustión, por tal razón el control de presión en el hogar solo debe actuar sobre el damper de tiro inducido. Se recomienda que el control de tiro inducido debe trabajar aislado y siempre de modo automático, para que el operador solo concentre su atención en la combustión.

2.9.6. Control de la temperatura de vapor. La cantidad de energía en el vapor varía de acuerdo a la temperatura y presión del vapor en la caldera 5, ya que la temperatura para una presión dada aumenta, la energía por unidad de masa también aumenta. Por tanto es conveniente mantener la temperatura óptima del vapor.

El vapor sobrecalentado generado en la caldera gracias al sobrecalentador, aumenta su temperatura de acuerdo a la carga de la caldera. Por ello es importante controlar la temperatura del vapor sobrecalentado por medio de atemperadores, que actúan como un intercambiador y que baja la temperatura final del vapor al parámetro de operación, en nuestro caso por debajo de 770°F

para seguir su ciclo con el único fin de enfriar parcialmente el vapor a través de aportación de agua al vapor.

Se controlará la temperatura del vapor a la salida de la caldera por medio de un atemperador (cuando sea utilizado). El control será efectuado a través de una válvula de control de inyección de agua en la línea. El algoritmo utilizado será de tipo PID, utilizando la temperatura del vapor medida después del atemperador de la caldera como variable de proceso a ser controlada.

3. CONCLUSIONES

- Para lograr una eficiencia cercana al 84% en la caldera se requiere:

Consumo Carbón: 7661.6 kg/h según una humedad de 7%

Consumo de Polvillo: 146.8 kg/h según una humedad de 50%

Cantidad de aire para la mezcla: 72604 kg/h

Bajo unas condiciones de operación normal de la caldera de :

Generación Vapor: 150.000 lb/h

Presión vapor: 650 psig

Temperatura vapor: 750°F

- Se determino que para las características de los combustibles el exceso de oxígeno suministrado a la caldera de $1.46 \text{ m}^3 \text{ N/kg}$ esta por debajo del calculado de $2.41 \text{ m}^3 \text{ N/kg}$ requerido para una combustión completa del combustible.
- Se concluye que la cantidad liberada de calor durante el proceso de combustión (entalpía de combustión) de $-315925.84 \text{ kJ/kmol}$ (calculada) entregada por el combustible: Carbón que se quema en la caldera, se encuentra por debajo de la entalpía de combustión del carbón, el cual por tablas debe ser cercano a -393520 kJ/kmol ; esta diferencia de 77594.16 kJ/kmol (calor que no se libera durante el proceso de combustión) se refleja en un alto contenido de inquemados hasta del 8% contra un 5% máximo permitido.
- Se encontró un exceso de consumo de carbón de 19.24 Tn/día, que le cuesta al Ingenio 2.116.968 \$/día, para una generación de 7.47 lb de vapor

por lb de carbón, contra una generación de 9.08 lb de vapor por lb de carbón que pueden generarse bajo este exceso de combustible.

- Se concluye que el porcentaje de aire teórico calculado del 81%; esta por debajo del 100% que equivale al aire estequimétrico para la combustión, por tal razón la presencia de inquemados altos en la caldera.
- Se demostró que la temperatura de rocío o temperatura a la cual los gases de combustión se enfrían de 122.63°F se encuentra por debajo de la temperatura de los gases que salen a la chimenea de 290°F, lo que muestra cumplir con las normas de emisiones contaminante y problemas de corrosión.
- Realizado el balance de la ecuación de combustión de reactivos y productos del combustible: Carbón, se determinó que la relación aire/combustible debe ser de 9.63 kg de aire por kg de combustible y no de 7.80 kg de aire por kg de combustibles, como actualmente opera la caldera.
- Se concluyó que las variaciones en el sistema de alimentación de combustible afectan la combustión y fluctúa la generación de vapor entre un 640 psig hasta 680 psig y de 740°F a 780°F, que hace que la caldera se dispare; ya que la adición extra de combustible alterno como el polvillo, que se realiza manualmente, afecta la temperatura final del vapor.

4. RECOMENDACIONES

- De acuerdo con el alto porcentaje de inquemados realizado un estudio que alcanza el 7.52% con un parámetro máximo de 5% para carbón, 61.46% en las cenizas de inyección y 34.47% para cenizas de ciclones, debido al escaso exceso de oxígeno suministrado de 1.71 m³ N/kg de combustible contra un 2.41 m³ N/kg de combustible de exceso de oxígeno calculado; se recomienda la implementación de instrumentos de medición del CO y opacidad de los gases para lograr una eficiencia del 84% que podría lograrse.
- Se recomienda la determinación del exceso de O₂ en diferentes puntos a lo largo del trayecto de los gases, ya que las infiltraciones de aire por registros y paredes de los conductos de gases de la caldera 5 provocan una distorsión en las lecturas de O₂ con valores no confiables en los gases de salida.
- Según lo demuestra el análisis isocinético la altura mínima de la chimenea para caldera 5, debe ser de 31.2 m debido al contenido de azufre del carbón, y la altura real es de 30 m. Por tal razón se recomienda mezclar el carbón con otros carbones de menor contenido de azufre, con el propósito de disminuir el requerimiento de altura mínima y disminuir la velocidad de corrosión o incrementar un anillo en la parte superior de la chimenea para aumentar su altura.
- Se debe replantear el lazo de control de presión de hogar por un control a través de la medición de presión (negativa) del hogar, el cual debe solo

actuar sobre el Damper del ventilador de tiro inducido y no sobre el ventilador de tiro forzado como actualmente se opera en la caldera; para lograr una extracción de los gases que producen un descenso en la presión la cual es afectada por la humedad del combustible.

- Incorporar adicionalmente un sistema que mejore el control de la corrección aire/combustible; la cual se basa en la medida de O_2 de la combustión y hacer actuar la señal obtenida sobre el sistema general de la relación aire/combustible ya establecido o control del damper del aire primario.

BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA, Hernando. Operación de Calderas y Tratamiento del Agua. Santiago de Cali, 1989. 120 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingenierías.

ASPRILLA CORTES, Carlos Alberto Y CASA VARGAS, Jorge. Elaboración de un texto teórico sobre calderas. Santiago de Cali, 1994 165 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingenierías.

BABCOCK & WILCOX. Steam: Its generation and use: Combustion. New York: McGraw-Hill, 1997. 1254 p.

BORROTO NORDELO, Aníbal E. Y BORROTO BERMÚDEZ, Aníbal J. Ahorro de energía en la generación y distribución del vapor: Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Cuba: Universidad de Cienfuegos, 2000. 94 p.

CENGEL, Yunus A. Y BOLES, Michael A. Termodinámica: Reacciones químicas. 2 ed. Mexico: McGraw-Hill, 1997.

CERON, Andrés Fernando. Revisión y Ajustes Generales de los Lazos de Control Automático. Santiago de Cali, 2000. 132 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad del Valle. Facultad de Ingenierías.

I. GLASSMAN. Combustión: Productos de la combustión. Nueva York: Academic Press, 1977. 320 p.

MONTOYA ROJAS, José Omar. Determinación de Niveles de Operación en Fabrica del Ingenio Providencia S.A. para el Control de Perdidas de Energía. Santiago de Cali, 1996. 97 p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad del Valle. Facultad de Ingenierías.

SHIELD, Carl D. Calderas: Tipos, características y sus funciones. México: Cia. editorial continental, s.a. de c.v., 1997. 105 p.

**OPTIMIZACION DE LA COMBUSTION CON MEZCLA DE COMBUSTIBLES EN CALDERA 5
DEL INGENIO LA CABANA S.A.**

Edgar Andrés Giraldo Correa

Ingeniería Mecánica
Universidad Autónoma de Occidente
edangi@hotmail.com

El propósito es el planteamiento de alternativas confiables para mejoras de la combustión de la caldera 5 con la mezcla de Carbón y Polvillo, mediante un estudio técnico de operación actual de la caldera que conlleva posteriormente a cuantificar económicamente la reducción de costos de consumo del combustible, así como determinar el impacto ambiental de los gases productos de la combustión; que se deben a múltiples problemas de operación, lazos de control de la caldera y propiedades de los combustibles consumidos.

Lazos de control – Inquemados – Combustión – Exceso de oxígeno – Entalpía de combustión – Eficiencia –
Reactivos y productos – Aire estequiométrico – Análisis isocinético – Composición Volumétrica.

1. INTRODUCCION

En primera instancia para abordar el desarrollo del proyecto mediante el planteamiento de alternativas para mejorar la combustión en caldera 5, se realizó una investigación bibliográfica para abarcar todo el contenido que implica el desarrollo del proyecto, como consultas en textos y recopilación de información. Después, una descripción técnica del equipo con un estudio actual de operación y parámetros de control de generación de vapor para determinar las falencias en que se encuentra funcionando la caldera, mediante de un análisis de variables operativas que afectan la combustión y por ende la eficiencia; seguido por la toma de mediciones de dichas variables, equipos y calibración de las señales enviadas por instrumentos de operación para determinar los parámetros mas importantes a controlar; en busca de cuantificar un ahorro económico bajo la diferencia del factor actual y la propuesta, en cuanto al consumo de combustibles y energía aportada durante la oxidación del combustible determinando un volumen real de aire para una combustión completa; realizándose después un análisis detallado de los resultados obtenidos de la combustión para determinar los factores ambientales y mejorar las emisiones contaminantes.

2. COMPORTAMIENTO DE LA CALDERA Y EFICIENCIA ACTUAL

La tabla a continuación muestra el calculo de eficiencia actual de la caldera con el consumo de la mezcla de combustibles: Carbón y Polvillo bajo una generación de 150.000 lb de vapor por hora a condiciones normales operativas de:

Presión de vapor sobrecalentado: 650 psig
 Temperatura de vapor sobrecalentado: 750°F
 Presión del agua de alimentación: 640 psig
 Temperatura del agua de alimentación: 280°F

Cálculos de eficiencia actual de la caldera:

Vapor generado (dato caldera): 150000 lb/h
 Entalpía Vapor @650Psig, 750°F: 1319.1 Btu/lb
 Ental agua alim. @640Psig, 280°F : 272.2 Btu/lb
 Calor req./lbvapor=1319.1-272.2=1046.9 Btu/lb
 Calor teó req=150000lb/h*1046.9=156960000
 Consumo Carbón base húmeda 7% (dato caldera): 9020 kg/h

Poder calórico del Carbón base húmeda (dato laboratorio): 10983 Btu/lb

Consumo polvillo base húmeda 50% (dato caldera): 7600 kg/h

Poder calórico del polvillo base húmeda (dato laboratorio): 3566 Btu/lb

Eficiencia(η)=Calorteóricoreq./(consumCarbon*PC+consumo Polvillo*PC)

$$\eta = 56.44\%$$

Tabla I. Resumen operación normal de la caldera 5. Eficiencia actual.

Vapor generado	150000 lb/h
Entalpía vapor	1319,1 Btu/lb
Entalpía agua alimentación	272,2 Btu/lb
Calor requerido/lb de vapor	1046,9 Btu/lb
Calor teórico requerido	156960000
Consumo Carbón base húmeda 7%	9020 kg/h
Poder calórico del Carbón base húmeda	10983 Btu/lb
Consumo polvillo base húmeda 50%	7600 kg/h
Poder calórico del Polvillo base húmeda	3566 Btu/lb
Eficiencia Calculada (actual)	56,44%

3. ANALISIS DEL COMBUSTIBLE

Es necesario, para evitar problemas en su manejo y tratamiento, reducir los posibles daños de equipos, disminuir el impacto ambiental, planear y controlar la combustión de la caldera.

Generalmente se utilizan dos tipos de análisis: el análisis próximo y el análisis ultimo, ambos expresados en porcentaje en peso.

Las sustancias combustibles en la masa orgánica de los combustibles, y que liberan calor reaccionando en la combustión mediante su oxidación son:

Carbono, **C**
 Hidrógeno, **H**
 Azufre, **S**



Figura 1. CARBONERA. Almacenamiento Combustible Carbón de alimentación para Caldera 5



Figura. 2. BAGACERA. Almacenamiento de combustibles Bagazo y Polvillo para alimentación a las calderas.

3.1. Análisis próximo

Da información del comportamiento durante el calentamiento, es decir, cuanto del combustible permanece fijo y cuanto se transforma en materia volátil. Además se reportan datos de humedad, contenido de cenizas y poder calórico.

Tabla II. Análisis próximo de los combustibles caldera 5

ANÁLISIS PRÓXIMO DE LOS COMBUSTIBLES C5, (%)		
	Carbón,	Polvillo,
Humedad	5,4	50,24
Materia volátil	21,17	25
Cenizas	23,62	10,74
Carbón Fijo	49,81	14,26
Poder Calórico, Btu/lb	10500	3400

Fuente: Laboratorio análisis de suelos del Ingenio la Cabaña S.A. Caloto (cauca), 2004. p. 10.

3.2. Análisis último

El análisis último proporciona información acerca del contenido de cada elemento que compone el combustible, tales como, carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre y nitrógeno; los cuales se utilizan para calcular los requerimientos de aire para la combustión.

Una vez obtenido los anteriores resultados del análisis próximo de los combustibles (carbón y polvillo) mediante la recopilación de datos, se pretende encontrar la composición elemental del combustible para los cálculos estequiométricos, para la cantidad de aire necesaria para la combustión y cálculos de un exceso de aire requerido en mejoras de la oxidación total del combustible.

Por obvias razones de costos y facilidad, se selecciona determinar el análisis último de los combustibles por correlaciones (método Diederichs) para los cálculos de las propiedades elementales del combustible, ya que este Método de Diederichs requiere solo conocer el análisis próximo que entrega el laboratorio, además solo se toman como combustibles la materia volátil MV y el carbono fijo CF. Se definen los siguientes parámetros referido a lb de combustible:

Hc: % en peso del hidrógeno en el carbón.

Vc: % en peso de la materia volátil en el carbón.

Fc: % en peso del carbono fijo.

Cc: % en peso de carbono en el carbón.

Nc: % en peso de nitrógeno en el carbón.

Calculo análisis último de los combustibles. Método Diederichs. Este método permite encontrar un análisis elemental de los combustibles a partir del análisis próximo. El análisis elemental o último es indispensable para los cálculos teóricos de la cantidad estequiométrica de aire y exceso de aire para la combustión.

-Análisis próximo del carbón:

Humedad = 5.4%

Cenizas = 23.62%

Material volátil, MV = 21.17%

Carbón fijo, CF = 49.81%

según las propiedades anteriores del análisis próximo se considera el combustible dentro del rango de **Carbón bituminoso**.

-Combustible: $CF + MV = 70.98\%$ (1)

-Calculo del porcentaje en peso del carbono fijo

$$F_c = 100 * CF / (CF + MV) = 70.17\% \quad (2)$$

-Calculo del porcentaje en peso del hidrógeno en el carbón

$$H_c = V_c(7.35 / (V_c + 10) - 0.013) \quad (3)$$

$$H_c = 5.11 lbH / lbCombustible$$

$$\% H = 5.11 lbH / lbcomb * 0.917 lbComb / lbCarbon$$

$$\% H = 4.69 lbH / lbCarbon$$

-Calculo del porcentaje en peso del carbono en el carbón para carbones bituminosos:

$$C_c = F_c + 0.9(V_c - 14) = 84.41 \quad (4)$$

$$\% C = 84.41 lbC / lbComb * 0.917 lbComb / lbCarbon$$

$$\% C = 77.40 lbC / lbCarbon$$

-Para el contenido de azufre se solicitó los datos en el laboratorio. Octubre 24 del 2004.

$$\% S = 1.1 lbS / lbComb * 0.917 lbComb / lbCarbon$$

$$\% S = 1.01 lbS / lbCarbon \quad (5)$$

-Calculo del porcentaje de nitrógeno en el carbón para carbones bituminosos:

$$N_c = 2.10 - 0.012 V_c = 1.74 \quad (6)$$

$$\% N = 1.74 lbN / lbComb * 0.917 lbComb / lbCarbon$$

$$\% N = 1.6 lbN / lbCarbon$$

-Calculo del porcentaje de oxígeno en el carbón

$$\% O = 100 - (\% N + \% H + \% S + \% C) \quad (7)$$

$$\% O = 15.3 lbO / lbCarbon$$

Aplicando el **método Diederichs** donde solo se requiere el análisis próximo se obtiene el análisis

último de los combustibles (Carbón y Polvillo) de consumo por la caldera 5 del Ingenio la Cabaña S.A. resumida en la siguiente tabla:

Tabla III. Resumen calculo análisis ultimo de los combustibles caldera 5.

ANALISIS ULTIMO DE LOS COMBUSTIBLES C5		
	Carbón	Polvillo
% H	4,69	5,06
% C	77,4	74,3
% S	1,01	1,22
% N	1,6	0,25
% O	15,3	19,17

4. VOLUMEN DE OXIGENO Y AIRE NECESARIO PARA LA COMBUSTION

El oxígeno necesario para la combustión es tomado del aire y suministrado al horno.

El volumen teórico de oxígeno calculado, necesario para la combustión completa para 1 Kg de combustible en caldera 5, se determina por la ecuación:

$$V_{O_2} = 1.866(C/100) + 5.59(H/100) + 0.7(S/100) - (O/100 * 1.429), [m^3 N/kg] \quad (8)$$

Una vez calculado el análisis último de los combustibles, se determina el volumen teórico de oxígeno para la combustión de cada combustible de acuerdo a la fórmula anterior.

Tabla IV. Volumen Teórico de oxígeno

Volumen Teórico de oxígeno Vo2, m3N/kg	
Carbón	Polvillo
1,5	1,4

Pero en la caldera no se suministra oxígeno puro, es aire, compuesto por nitrógeno y oxígeno para la combustión de los elementos combustibles. Entonces la cantidad teórica de aire necesario para la combustión completa se determina conociendo que el aire atmosférico contiene 21% en volumen de oxígeno y en 1 kg de combustible, es decir, $V_{O_2} / 0.21$; de una composición determinada será:

$$\text{Carbón} = V_{O_2} / 0.21 = 1.5 / 0.21 = 7.14$$

$$\text{Polvillo} = V_{O_2} / 0.21 = 1.39 / 0.21 = 6.62$$

Tabla V. Aire Teorico para una combustión completa

Aire Teórico para una combustión completa, m3N/kg	
Carbón	Polvillo
7,14	6,62



Figura 3. Ventilador tiro forzado VTF. Aire de combustión caldera 5.

5. VOLUMEN DE AIRE REAL PARA LA COMBUSTIÓN. EXCESO DE AIRE. COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA DE LOS PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN.

En las condiciones reales del proceso de combustión, no es posible lograr una combustión completa del combustible suministrando la cantidad teórica necesaria V_a . Esto se debe a la imposibilidad de lograr en condiciones reales un mezclado perfecto del combustible con el aire. Por ello, para asegurar una combustión suficientemente completa, el volumen real de aire suministrado es siempre mayor que el teórico. La relación entre estos volúmenes se denomina coeficiente de exceso de aire.

$\alpha = V_{airereal} / V_a$ (9); el coeficiente de exceso de aire es la relación entre la cantidad (volumen) del aire real y la cantidad (volumen del aire teórico); El coeficiente de exceso de aire caracteriza el grado de perfección de la organización del proceso de combustión en las condiciones reales con respecto a las ideales.

El Ingenio la cabaña S.A., se acogió a realizar un análisis de gases de combustión en septiembre del 2004, arrojando los siguientes resultados de productos de combustión en caldera 5 en porcentaje de volumen:

Tabla VI. Análisis productos de la combustión caldera 5

Caldera 5. Ingenio la Cabaña
CO = 0.0452 %en volumen
CO₂ = 8.1 %en volumen
O₂ = 12.8 %en volumen
N₂ = 79.1 %en volumen
SO₂ = 0.346 kg/E6 kCal
Temp. Chimenea 279.2°F

Fuente: Laboratorio del Ingenio. Caloto (cauca), 2004. p. 24

Esta composición volumétrica de los productos de combustión se determina mediante instrumentos específicos, analizadores de gases.

Conociendo ahora la composición volumétrica de los productos de la combustión se puede determinar el coeficiente de exceso de aire por la fórmula del Nitrógeno:

$$\alpha = 1 / (1 - 3.62 * ((O_2 - 0.5CO) / N_2))$$

$$\alpha = 2.41 \quad (10)$$

Bajo estas condiciones, conociendo que exceso de aire es 2.41, se podrá calcular el volumen de aire real para la combustión con el 100% de cada combustible y con la mezcla de combustibles para operación de la caldera 5 a condiciones normales para la combustión:

$\alpha = V_{airereal} / V_a$ Entonces:

$$V_{airereal} = \alpha * V_a \quad (11)$$

donde:

α : exceso de aire

V_a : Volumen aire teórico para la combustión
 $V_{airereal}$: volumen aire real.

Carbón: $V_{airereal} = 2.41 * 7.14 = 17.21$
 Polvillo: $V_{airereal} = 2.41 * 6.62 = 15.95$

Tabla VII. Volumen de Aire real para la combustión

Volumen de Aire Real, m ³ N/kg	
Carbón	Polvillo
17,21	15,95

Cuantificar el consumo de polvillo para la caldera no es confiable, por tal razón solo se conoce de un consumo de carbón como combustible primario que equivale a un 80% de la generación de vapor y un consumo de polvillo que equivale al 20% restante; es decir:

$$V_{airereal} = 17.21(0.80) + 15.95(0.20) \quad V_{airereal} = 16.96 \text{ m}^3 \text{ N/kg}$$

Esto significa que para una combustión completa donde todo el combustible se oxida y todo el comburente se reduce generando calor con mezcla de carbón y polvillo se necesitan un volumen de aire real para la combustión **16.96 m³ N de aire / por kg de combustible.**

6. REGISTRO Y ANALISIS DE PRODUCTOS DE COMBUSTION Y EMISIONES ATMOSFERICAS EN CALDERA 5

El análisis de los productos de combustión es un parámetro de gran importancia puesto que con esta información es posible determinar eventuales deficiencias en el proceso de quema del combustible y de combustión, que repercuten en la capacidad de la generación de la caldera, en el consumo de combustibles y además producen daños irreparables al ecosistema.

Tabla VIII. Análisis del efecto de emisión de partículas, emisión de dióxido de azufre y de emisión de dióxido de nitrógeno.

Chimenea	Emisión			Producción Tn/h	Calor generado 10E6 kcal/h	Norma Permissible		
	Partículas Kg/h	SO2 kg/E6 Kcal	NO2 kg/E6 Kcal			Partículas Kg/h	SO2 kg/E6 Kcal	NO2 kg/E6 Kcal
Caldera No.5	26,1	0,346	0,635	25,3	54,31	102,1	2,16	1,26
Chimenea	DESCRIPCION				Norma altura Calor liberado (m)	Norma altura Contenido de S (m)		
	Altura real (m)							
Caldera No. 5	30				20	31,2		

Fuente: Laboratorio análisis de suelos del Ingenio la Cabaña S.A. Caloto (cauca), 2004.p.6

De lo anterior se concluye que en la caldera de combustión No. 5 del Ingenio la cabaña cumple con los límites permisibles de la emisión de material particulado, emisión de dióxido de azufre por fuentes fijas y dióxido de nitrógeno, definidas en función de la cantidad de producto terminado y en función de la cantidad de calor generado respectivamente.

La altura mínima de la chimenea para caldera 5, debe ser de 31.2 m debido al contenido de azufre del carbón, y la altura real es de 30 m; por tal razón no cumple con los estándares de altura mínima.



Figura 4. Chimenea caldera 5.

7. SISTEMAS OPTIMOS POR CORRECCION DE MEDIDA DE LOS PRODUCTOS DE COMBUSTIÓN.

Se trata de incorporar adicionalmente un sistema que mejore el control por medio de la corrección aire/combustible. Esta corrección se basa en la medida de algún parámetro importante de la combustión o varios, y hacer actuar la señal obtenida sobre el sistema general de control de la relación aire/combustible.

7.1. Corrección por medida del CO y del O₂

Este sistema de corrección para el control de la medida del CO y O₂, como propuesta de implementación en la caldera y método de mejoramiento, es cuando ambos parámetros a medir se realizan conjuntamente, esto es más recomendable, ya que independientemente el control por oxígeno obtiene resultados inferiores que por CO, dado que el control por O₂ es estático, o sea, no sigue la evolución de las curvas de rendimiento de la caldera.

8. ANÁLISIS DE REACTIVOS Y PRODUCTOS DEL COMBUSTIBLE DURANTE PROCESO DE COMBUSTIÓN EN LA CALDERA 5

Se determinará mediante este análisis un balance de la ecuación de combustión de reactivos y productos del combustible: Carbón (combustible principal), la relación aire/combustible, el porcentaje de aire teórico y la temperatura de rocío de los gases de combustión.

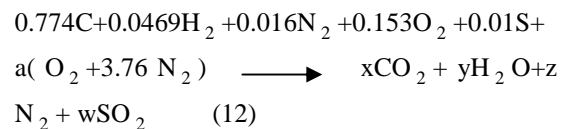
Segun el analisis ultimo teorico calculado tenemos:

ANALISIS ULTIMO DE LOS COMBUSTIBLES C5		
	Carbón	Polvillo
% H	4,69	5,06
% C	77,4	74,3
% S	1,01	1,22
% N	1,6	0,25
% O	15,3	19,17

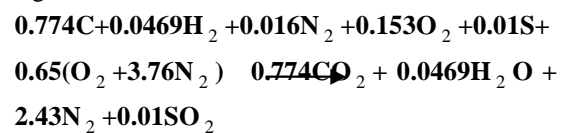
Se desea una quema del combustible con la cantidad estequiometrica de aire que entra a la cámara de combustión a 223°C (431°F) y 80% de humedad relativa.

Se supone una combustión completa; en consecuencia todo el carbono en el combustible se convertirá en CO₂, todo el hidrógeno en H₂O y todo el azufre en SO₂. Si el carbón se quema con la cantidad estequiometrica de aire; quiere decir, que no habrá O₂ libre en los productos. La humedad de 80% de aire no reacciona con nada; esta aparece como H₂O adicional en los productos. De modo, que se balanceara la ecuación con aire seco y después se agrega la humedad en ambos lados de la ecuación.

La ecuación de combustión será:



Donde *a* es el coeficiente estequiométrico para el aire. Los coeficientes desconocidos de los productos de combustión se encuentran a partir de un balance de masa; por tanto se obtiene la siguiente ecuación balanceada:



Obsérvese que el coeficiente 0.65 de la ecuación balanceada representa el número de moles del oxígeno, no el número de moles del aire, este se obtiene sumando el producto $0.65 * 3.76 = 2.46$ moles de nitrógeno con los 0.65 moles de oxígeno, lo que da un total de 3.11 moles de aire.

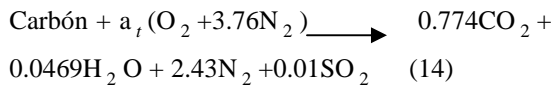
La relación aire/combustible (AC) se determina tomando la proporción entre la masa de aire y la masa de combustible:

$$AC = m_{aire} / m_{combustible} = (Nm)_{aire} / ((Nm)_C + (Nm)_{H_2}) \quad (13)$$

Donde N: es el número de moles.
m: es la masa molar.

$AC = ((0.65 * 4.76 \text{ kmol}) * 29 \text{ kg/kmol}) / ((0.774 \text{ kmol} * 12 \text{ kg/kmol}) + (0.0469 \text{ kmol} * 2 \text{ kg/kmol}))$
 $AC = 9.63 \text{ kg de aire/kg de combustible.}$

Para encontrar el % de aire teórico utilizado, se necesita conocer la cantidad de aire teórico, que se determina con la ecuación de combustión:



Calculamos a_t como cantidad estequiométrica del aire en el proceso de combustión:

$$\text{O}_2 : a_t = 0.774 + (0.0469/2) + 0.01 \quad (15) \quad \text{entonces,}$$

$$a_t = 0.80$$

$$\% \text{ aire teórico} = \frac{\text{Maire,real} * \text{Naire,teorico}}{\text{Maire,teorico} * \text{Naire,real}} \quad (14)$$

$$\% \text{ aire teórico} = 0.65 * 4.76 \text{ kmol} / 0.80 * 4.76 \text{ kmol}$$

$$\% \text{ aire teórico} = 81\%$$

Después se determina la cantidad de humedad que acompaña $4.76 * a = 4.76 * 0.65 = 3.11 \text{ kmol}$ de aire seco. La presión parcial de la humedad en el aire es:

$$\text{Paire} = \text{hum.} * P @ 223^\circ\text{C} = 0.80 * 2.536 \text{ kpa} \quad (16)$$

$$\text{Paire} = 2.03 \text{ kpa}$$

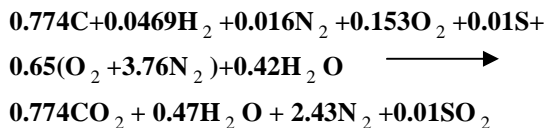
Si se supone un comportamiento de gas ideal, el número de moles en la humedad en el aire es:

$$\text{Naire} = (\text{Paire} / P_{\text{total}}) N_{\text{total}} \quad (17)$$

$$\text{Naire} = (2.03 \text{ kpa} / 101.325) (6.97 + \text{Naire})$$

$$\text{Naire} = 0.42 \text{ kmol}$$

La ecuación de combustión balanceada se obtiene al sustituir los coeficientes determinados antes y añadiendo 0.42 kmol de H_2O en ambos lados de la ecuación:



Ahora se calcula la temperatura de rocío de los productos, que indica la temperatura a la cual el vapor de agua en los productos de empieza a condensarse cuando los productos se enfrían. También considerando un comportamiento de gas

ideal, la presión parcial del vapor de agua en los gases de combustión es:

$$P_{v,\text{prod}} = (N_{\text{H}_2\text{O}, \text{prod}} / N_{\text{prod}}) P_{\text{prod}} \quad (18)$$

$$P_{v,\text{prod}} = (0.47 \text{ kmol} / 3.684 \text{ kmol}) (101.325 \text{ kpa})$$

$$P_{v,\text{prod}} = 13 \text{ kpa}$$

Por tanto, **la temperatura de rocío a 13 kpa es $50.35^\circ\text{C} = 122.63^\circ\text{F}$**

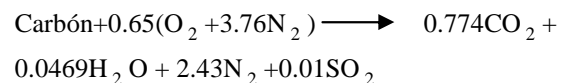
9. ENTALPIA DE FORMACIÓN Y ENTALPIA DE COMBUSTION

la **entalpía de combustión** h_c , representa la cantidad de calor liberado durante el proceso de combustión de flujo permanente cuando un 1 kg de combustible se quema por completo a una temperatura y presión especificada. Se expresa como:

$$h_c = H_{\text{prod}} - H_{\text{react}} \quad (19)$$

La **entalpía de formación** h_f , se considera como la entalpía de una sustancia en un estado especificado debida a su composición química.

Para poder determinar la entalpía de combustión en el combustible: Carbón, se dispone de la ecuación estequiométrica balanceada de combustión:



N_2 , O_2 y S son elementos estables, por lo que su entalpía de formación es cero. En ese caso la entalpía de combustión del Carbón se transforma en:

$$h_c = H_{\text{prod}} - H_{\text{react}}$$

$$\sum N_p h_{f_p} - \sum N_r h_{f_r} = (N h_f)_{\text{CO}_2} + (N h_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (N h_f)_{\text{carbon}}$$

$$h_c = (0.774 \text{ kmol}) (-393520 \text{ kJ/kmol}) + (0.0469 \text{ kmol}) (-241820) - (1 \text{ kmol}) (0 \text{ kJ/kmol})$$

$$h_c = -315925.84 \text{ kJ/kmol}$$

10. CALCULOS PARA CUANTIFICAR EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN CALDERA 5

El costo del carbón para el Ingenio es de $110.000 \text{ \$/Ton}$ es decir, $50 \text{ \$/lb}$ de carbón; información que indispensable para los siguientes cálculos:

Se desea un consumo específico de 8.28 lb de vapor / lb de carbón (data Sheet de la caldera), para generar 150.000 lb de vapor/h. Así que la

relación entre la generación y el consumo específico determinara el consumo requerido de combustible (calculo teórico):

$$\text{Consumoreq} = (150.000 \text{ lbv/h}) / (8.28 \text{ lbv/lbcarbon})$$

$$\text{Consumo req.} = 18115.94 \text{ lbcarbon/h}$$

$$\text{Costo} = 18115.94 \text{ lbcarbon/h} \times 50 \$/\text{lbcarbon}$$

$$\text{Costo consumo req.} = 905.797 \$/\text{h}$$

Para una generación de 150.000 lbvapor/h, actualmente se tiene (calculo real):

$$\text{Consumo real} = 19880,1 \text{ lbcarbón/h}$$

$$\text{Costo consumo real:} 994.004 \$/\text{h}$$

$$\text{Diferencia} = 994.004 \$/\text{h} - 905.797 \$/\text{h} = 88207 \$/\text{h}$$

$$\text{Exceso de consumo} = 88207 \$/\text{h} / 110.000 \$/\text{Tn}$$

$$\text{Exceso de consumo} = 0.80 \text{ Tn/h} \times 24 = 19.24 \text{ Tn/día}$$

$$\text{Costoexcesoconsu} = 19.24 \text{ Tn/día} \times 110.000 \$/\text{Tn}$$

$$\text{Costoexceso} = 2.116.968 \$/\text{día} = 762.108.480 \$/\text{año}$$

11. EVALUACION DE LAS ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA OPERACIÓN DE LA CALDERA 5

11.1. *Que es una estrategia de control?*

Una estrategia de control es el planteamiento sistemático de los componentes y parámetros que hacen parte de un sistema de control.

Para elegir una adecuada estrategia de control, es necesario, en primer lugar caracterizar amplia y correctamente el proceso, posteriormente elegir las variables relevantes las cuales serán objeto de control y finalmente contar con un adecuado equipo de instrumentación el cual garantizará mantener dichas variables en rangos establecidos.

11.2. *Controles de operación en caldera 5.*

INSTRUMENTOS EN EL CAMPO

- **Transmisores diferenciales de presión**

Para determinar: nivel del domo, flujo de vapor, flujo de agua de alimentación, flujo de aire en la combustión.

- **Transmisores de presión**

Determinan: presión del tambor, presión el vapor sobrecalentado, tiro del hogar.

- **Sensores de temperatura**

Para el vapor sobrecalentado, salida de los gases de chimenea, aire de combustión (salida del calentador).

- **Controladores PID**

- **Actuadores neumáticos, válvulas de control y cortatiros de regulación.**

- **Analizador de O₂**
- **Medidores diferencial de flujo.**
- **Interruptores.**

SISTEMA DE CONTROL

- **Panel de control en el cuarto de control calderas.**

- **Controladores**

Para el nivel del agua, flujo de aire de combustión, tiro del hogar (V.T.I.), maestro de presión (demanda de combustible), control de combustible (carbón o bagazo).

- **Indicadores**

De presión del tambor, presión vapor sobrecalentado, descarga del ventilador tiro forzado, presión bajo parrilla, tiro del hogar, tiro de salida de la caldera (entrada calentador), succión ventilador tiro inducido, descarga sobrefuego, descarga distribuidor neumático.

- **Registradores**

- **Señales análogas**

Para el flujo de vapor, presión de vapor, nivel de la caldera, flujo de agua, flujo de aire, contenido de CO₂ en humos.

- **Señales de sensor de temperatura**

Para el vapor salida de la caldera, gases de chimenea, aire salida de calentador, gases saliendo de la caldera.

- **Anunciadores de operación.**

12. RAZONES PARA EL CONTROL DE CALDERA 5

Lo principal que buscamos es un aumento del rendimiento económico lo cual exige fiabilidad, eficiencia y seguridad de las instalaciones. Es por ello que es rentable introducir sistemas de control de tecnología avanzada en consumos de combustible, que se justifican para:

1. Mantener una presión de vapor constante y un caudal acorde con las variaciones de carga.
2. Mantener una forma de funcionamiento con las máximas garantías de seguridad.
3. Optimizar el consumo de combustible, a través de un aumento de rendimiento.

12.2. *Métodos para el control de caldera 5*

- Este método de control utilizado para la caldera es el empleo de un medidor controlador de la relación *flujo de*

combustible-flujo de aire, el cual constantemente supervisa la cantidad de combustible que se está consumiendo y la cantidad de aire que se está suministrando y controla la relación.

- Este método de control se realiza una vez por año en la caldera y es el empleo de un *analizador de gases*, el cual constantemente supervisa el porcentaje o cantidad de oxígeno en los gases de combustión y ajusta la cantidad de aire que debe suministrarse para obtener la relación correcta.

13. LAZOS DE CONTROL EN CALDERA DE COMBUSTIÓN No. 5.

El objetivo primordial del control de la caldera 5 es mantener dentro de parámetros preestablecidos el comportamiento de las variables a controlar.

Considerando que se trata de la caldera 5 que debe generar vapor en forma continua a unas especificaciones de presión, temperatura y flujo determinadas, es muy importante tener el control riguroso de las cantidades de masa y energía en busca de aumentar la productividad expresado como la relación entre la cantidad de consumo de combustible por vapor generado, minimizando pérdidas. Para ello todo el sistema de control de la caldera 5 se ha dividido en tres lazos de control, que se estudiarán individualmente pero que operan en forma dependiente:

- **Lazo de control de combustión.**
- **Lazo de control de presión de hogar.**
- **Lazo de control de nivel del Domo.**

13.1. Lazo de control de la combustión.

Cuando se usa el término control de combustión se refiere a algo más específico de la caldera o sea al control completo de la caldera. Este no se refiere solamente al control de combustible y aire que entra a la caldera sino también al sistema de control de agua de alimentación, un control de temperatura de vapor y un control de presión o tiro como sistemas básicos aunque puede involucrar el control de otros parámetros.

El monitoreo y control de la combustión es una de las tareas iniciales al buscar ahorros de

combustible. Al mantener la proporción correcta de aire-combustible se evita que arrojemos energía por la chimenea o que enfriemos el hogar con aire de exceso.

Para nuestro objeto de estudio en este lazo de control de combustión para caldera 5 la variable controlada es la presión del vapor sobrecalentado o presión master y las señales de control son: Aire y Combustible. El aire con el actuador servomotor del ventilador de tiro forzado y el combustible con el servomotor alimentador de combustible.

El lazo de control en su forma más simple funciona de la siguiente manera:

La señal análoga de entrada llega a un controlador PID y la compara con un *set point* ajustado, la salida es manipulada en una estación manual/automática y posteriormente es modificada y adicionada con el flujo de vapor. Esa misma señal es la entrada a una nueva señal en la que se compara con los valores de presión de cabezal y presión master. La señal de salida de la estación es la que manipula directamente el alimentador del combustible y esta misma mediante una estación en paralelo es la que compara el valor con el flujo de aire de combustión, nivel de agua y presión de aire entrando, generando la señal análoga de salida que manipula el servomotor ventilador de tiro forzado.

13.2. Lazo de control del flujo de agua de alimentación y nivel en el tambor de vapor.

La caldera está diseñada para trabajar con cierto nivel de agua líquida en el tambor de vapor. Si el nivel del agua es demasiado alto, pueden producirse arrastres y si es demasiado bajo, los tubos pueden quedar parcialmente sin agua, con lo que no se refrigerarían y se quemarían.

Todo el vapor que abandona el tambor debe ser reemplazado por agua, de forma que la estrategia más simple para controlar este balance de materia es utilizar el nivel del agua en el tambor como elemento de control y ajustar el agua de alimentación a dicho nivel.

Se recomienda que el nivel del agua dentro del domo permanezca en un 50% de su capacidad ya

que así se puede controlar mas establemente un aumento o disminución del mismo.

En esta estrategia, la variable manipulada es el flujo de agua de alimentación y las señales de control son: nivel del domo y flujo de vapor.

El lazo de control funciona de la siguiente manera: El transmisor de nivel envía una señal análoga a un controlador PID en donde se compara con el flujo de vapor. Estas dos señales son sumadas y constituyen la variable de entrada un segundo controlador que la compara con el flujo de agua y genera una señal actuante que manipula la válvula de agua de alimentación, pasando primero por una estación manual/automatica que consigna la señal de realimentación para ese segundo controlador. Si la caldera esta funcionando en estado estable y no se producen variaciones entre la cantidad de agua que entra y la que sale del domo, la diferencia entre estos flujos de agua y vapor permanecerá constante y el nivel del domo invariable.

Se propone una selección estratégica de control de nivel de tres elementos, donde se tiene las mediciones de nivel, flujo de agua y vapor, siendo que el control de nivel recibe un SET POINT REMOTO del flujo de vapor, o sea repone la cantidad de agua equivalente a la cantidad de vapor de la salida de la caldera; por tanto el rango para la medición de vapor y de agua, en esta estrategia, tienen que ser iguales.

El flujo de agua de alimentación será regulado por una válvula de control ajustada automáticamente por un algoritmo PID que funcionará siempre recibiendo un SET POINT REMOTO. Solamente en ocasiones de partida o parada o condiciones anormales de operación, el operador podrá trabajar manual colocando un valor de set point.

El sensor de control de nivel de la caldera actuara enviando un Set Point Remoto para el sensor de flujo de agua, controlando así el nivel de la caldera; por lo tanto este control será efectuado por un algoritmo PID que recibirá la señal del valor de flujo de vapor generado por la caldera con anticipación y hará funcionar la válvula reguladora de nivel según sea el caso.

13.3. Lazo de control de la presión del hogar

Este control es importante y ha de tenerse en cuenta ya que la caldera cuenta con el tiro del ventilador inducido que evacua los gases de combustión desde el hogar y que por consiguiente afecta el tipo de flujo de los gases.

Para este lazo existen dos variables controladas: el flujo de aire primario del ventilador de tiro forzado y la expulsión de gases por medio del ventilador de tiro inducido. La señal de control esta dada por medio del indicador de presión de hogar.

El lazo de control funciona de la siguiente manera: Un transmisor registra el valor de presión en el hogar y envía una señal análoga a un controlador PID que tiene un *set point* retroalimentado, posteriormente la señal es comparada en una estación manual/automatica con los valores de flujo de aire primario y una señal digital de nivel de domo. La salida análoga acciona los registros o compuertas del ventilador de tiro inducido produciendo una variación en la presión de hogar.

Cabe notar, que el controlador PID ejerce una acción directa entre la variable de entrada y la de salida. Pues un incremento en la presión de hogar produce un incremento en el tiro inducido, realizando así una mayor extracción de gases que inmediatamente producen un descenso en la presión. De igual forma una caída de presión, que puede obedecer a una sobrecarga o a un aumento en la humedad del combustible se controla mediante la disminución del tiro inducido hasta que se consigna el valor ajustado.

La propuesta para este lazo de control será enfocado a través de la medición de presión (negativa) del hogar actuando directamente en el damper del tiro inducido.

Es importante considerar que el control de presión de hogar no debe tener ninguna relación directa con el ventilador de tiro forzado. La presión del hogar es solo consecuencia de la combustión, por tal razón el control de presión en el hogar solo debe actuar sobre el damper de tiro inducido. Se recomienda que el control de tiro inducido debe trabajar aislado y siempre de modo automático,

para que el operador solo concentre su atención en la combustión.

13.4. control de la temperatura de vapor

La cantidad de energía en el vapor varia de acuerdo a la temperatura y presión del vapor en la caldera 5, ya que la temperatura para una presión dada aumenta, la energía por unidad de masa también aumenta. Por tanto es conveniente mantener la temperatura óptima del vapor.

El vapor sobrecalentado generado en la caldera gracias al sobrecalentador, aumenta su temperatura de acuerdo a la carga de la caldera. Por ello es importante controlar la temperatura del vapor sobrecalentado por medio de atemperadores, que actúan como un intercambiador y que baja la temperatura final del vapor al parámetro de operación, en nuestro caso por debajo de 770°F para seguir su ciclo con el único fin de enfriar parcialmente el vapor a través de aportación de agua al vapor.

Se controlará la temperatura del vapor a la salida de la caldera por medio de un atemperador (cuando sea utilizado). El control será efectuado a través de una válvula de control de inyección de agua en la línea. El algoritmo utilizado será de tipo PID, utilizando la temperatura del vapor medida después del atemperador de la caldera como variable de proceso a ser controlada.

14. CONCLUSIONES

- Para lograr una eficiencia cercana al 84% en la caldera se requiere:
Consumo Carbón: 7661.6 kg/h según una humedad de 7%
Consumo de Polvillo: 146.8 kg/h según una humedad de 50%
Cantidad de aire para la mezcla: 72604 kg/h
Bajo unas condiciones de operación normal de la caldera de :
Generación Vapor: 150.000 lb/h
Presión vapor: 650 psig
Temperatura vapor: 750°F
- Se determino que para las características de los combustibles el exceso de

oxígeno suministrado a la caldera de 1.46 m³ N/kg esta por debajo del calculado de 2.41 m³ N/kg requerido para una combustión completa del combustible.

- Se concluye que la cantidad liberada de calor durante el proceso de combustión (entalpía de combustión) de -315925.84 kJ/kmol (calculada) entregada por el combustible: Carbón que se quema en la caldera, se encuentra por debajo de la entalpía de combustión del carbón, el cual por tablas debe ser cercano a -393520 kJ/kmol; esta diferencia de 77594.16 kJ/kmol (calor que no se libera durante el proceso de combustión) se refleja en un alto contenido de inquemados hasta del 8% contra un 5% máximo permitido.
- Se encontró un exceso de consumo de carbón de 19.24 Tn/día, que le cuesta al Ingenio 2.116.968 \$/día, para una generación de 7.47 lb de vapor por lb de carbón, contra una generación de 9.08 lb de vapor por lb de carbón que pueden generarse bajo este exceso de combustible.
- Se concluye que el porcentaje de aire teórico calculado del 81%; esta por debajo del 100% que equivale al aire estequimétrico para la combustión, por tal razón la presencia de inquemados altos en la caldera.
- Se demostró que la temperatura de rocío o temperatura a la cual los gases de combustión se enfrían de 122.63°F se encuentra por debajo de la temperatura de los gases que salen a la chimenea de 290°F, lo que muestra cumplir con las normas de emisiones contaminante y problemas de corrosión.
- Realizado el balance de la ecuación de combustión de reactivos y productos del combustible: Carbón, se determino que la relación aire/combustible debe ser de

9.63 kg de aire por kg de combustible y no de 7.80 kg de aire por kg de combustibles, como actualmente opera la caldera.

- Se concluyo que las variaciones en el sistema de alimentación de combustible afectan la combustión y fluctúa la generación de vapor entre un 640 psig hasta 680 psig y de 740°F a 780°F, que hace que la caldera se dispare; ya que la adición extra de combustible alterno como el polvillo, que se realiza manualmente, afecta la temperatura final del vapor.

15. RECOMENDACIONES

- De acuerdo con el alto porcentaje de inquemados realizado un estudio que alcanza el 7.52% con un parámetro máximo de 5% para carbón, 61.46% en las cenizas de inyección y 34.47% para cenizas de ciclones, debido al escaso exceso de oxígeno suministrado de 1.71 m³ N/kg de combustible contra un 2.41 m³ N/kg de combustible de exceso de oxígeno calculado; se recomienda la implementación de instrumentos de medición del CO y opacidad de los gases para lograr una eficiencia del 84% que podría lograrse.
- Se recomienda la determinación del exceso de O₂ en diferentes puntos a lo largo del trayecto de los gases, ya que las infiltraciones de aire por registros y paredes de los conductos de gases de la caldera 5 provocan una distorsión en las lecturas de O₂ con valores no confiables en los gases de salida.
- Según lo demuestra el análisis isocinético la altura mínima de la chimenea para caldera 5, debe ser de 31.2 m debido al contenido de azufre del carbón, y la altura real es de 30 m. Por tal razón se recomienda mezclar el carbón con otros carbones de menor contenido de azufre,

con el propósito de disminuir el requerimiento de altura mínima y disminuir la velocidad de corrosión o incrementar un anillo en la parte superior de la chimenea para aumentar su altura.

- Se debe replantear el lazo de control de presión de hogar por un control a través de la medición de presión (negativa) del hogar, el cual debe solo actuar sobre el Damper del ventilador de tiro inducido y no sobre el ventilador de tiro forzado como actualmente se opera en la caldera; para lograr una extracción de los gases que producen un descenso en la presión la cual es afectada por la humedad del combustible.
- Incorporar adicionalmente un sistema que mejore el control de la corrección aire/combustible; la cual se basa en la medida de O₂ de la combustión y hacer actuar la señal obtenida sobre el sistema general de la relación aire/combustible ya establecido o control del damper del aire primario.

REFERENCIAS

- ACOSTA, Hernando. Operación de Calderas y Tratamiento del Agua. Santiago de Cali, 1989. 120 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingenierías.
- ASPRILLA CORTES, Carlos Alberto Y CASA VARGAS, Jorge. Elaboración de un texto teórico sobre calderas. Santiago de Cali, 1994 165 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingenierías.
- BABCOCK & WILCOX. Steam: Its generation and use: Combustion. New York: McGraw-Hill, 1997. 1254 p.
- BORROTO NORDELO, Aníbal E. Y BORROTO BERMÚDEZ, Aníbal J. Ahorro de energía en la generación y distribución del vapor: Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Cuba: Universidad de Cienfuegos, 2000. 94 p.

CENGEL, Yunus A. Y BOLES, Michael A. Termodinámica: Reacciones químicas. 2 ed. Mexico: McGraw-Hill, 1997.

CERON, Andrés Fernando. Revisión y Ajustes Generales de los Lazos de Control Automático. Santiago de Cali, 2000. 132 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad del Valle. Facultad de Ingenierías.

I. GLASSMAN. Combustión: Productos de la combustión. Nueva York: Academic Press, 1977. 320 p.

MONTOYA ROJAS, José Omar. Determinación de Niveles de Operación en Fabrica del Ingenio Providencia S.A. para el Control de Perdidas de Energía. Santiago de Cali, 1996. 97 p. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad del Valle. Facultad de Ingenierías.

SHIELD, Carl D. Calderas: Tipos, características y sus funciones. México: Cia. editorial continental, s.a. de c.v., 1997. 105 p.

