

**OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL CARBÓN Y DEL BAGAZO DE CAÑA EN
LAS CALDERAS DE INCAUCA SA.**



HEIDY LORENA CALAMBÁS PULGARÍN

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE INGENIERIA FISICA
POPAYÁN
2009**

**OPTIMIZACIÓN DEL USO DEL CARBÓN Y DEL BAGAZO DE CAÑA EN
LAS CALDERAS DE INCAUCA SA.**

HEIDY LORENA CALAMBÁS PULGARÍN

**Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de:
INGENIERA FÍSICA**

**Director:
Dr. René Zuñiga
Ing. Químico**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA FÍSICA
POPAYÁN
2009**

Nota de aceptación

Director

Ing. René Zúñiga

Jurado

Ing. Julio César Gil

Jurado

Msc. Giraldo Jiménez Chappotin

Fecha de sustentación: Popayán, 9 de febrero de 2009

A Dios, por darme
la capacidad de aprender,
a mi familia por todo el amor,
la comprensión y el apoyo
que me han brindado
toda la vida.

AGRADECIMIENTOS

Al culminar este trabajo de grado quiero expresar especialmente mis agradecimientos A mi familia a mis padres **OLIVIA PULGARIN y MIGUEL CALAMBAS** por ser las personas forjadoras en mi educación y que con su constante esfuerzo, paciencia, dedicación y confianza hacen posible hoy un triunfo más en vida. A mi hermana **YULIANA** quien siempre estuvo motivándome y colaborándome, en esta etapa que hoy termina.

A **Dios**, por darme fuerzas y permitirme finalizar este logro.

A **mis amigos**, que en medio de sonrisas y dificultades, siempre con su compañía, paciencia y apoyo, estuvieron presentes de una forma incondicional apoyándome sin dejarme desfallecer, no solo en la Universidad sino también fuera de ella.

Ing. René Zuñiga, Director de mi trabajo de grado, quien con su paciencia y tolerancia me dedicó parte de su tiempo e intelecto, ofreciéndome sus valiosas orientaciones y apoyo.

A los jurados. **Ing. Julio Cesar Gil y Msc. Giraldo Jiménez Chappottin**, por dedicar su tiempo, sus conocimientos y puntos de vista, en el mejoramiento y adecuación de este trabajo.

A **INCAUCA**, por permitirme realizar mi trabajo en sus instalaciones, por el apoyo económico y técnico, además de los conocimientos adquiridos.

A los Ingenieros **Milton Sanchez, Cesar Galviz** y al Tecnologo **Rafael Jiménez** por la colaboración y conocimientos brindados durante el tiempo del desarrollo de este trabajo.

A todos los **profesores** del Departamento de Física que contribuyeron en mi desarrollo científico y profesional durante la carrera.

INDICE GENERAL

RESUMEN.....	19
1. JUSTIFICACIÓN.....	20
2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	21
3. OBJETIVOS.....	23
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	23
3.2. OBEJTIVOS ESPSCÍFICOS.....	23
4. MARCO TEÓRICO.....	24
4.1. COMBUSTIBLES.....	25
4.1.1. CAÑA DE AZUCAR.....	25
4.1.1.1. Biomasa.....	26
4.1.2. EL CARBÓN.....	26
4.1.2.1. Antracita.....	27
4.1.2.2. Hulla.....	27
4.1.2.3. Turba.....	27
4.1.2.4. Lignito.....	28
4.2. ANALSIS QUE SE RALIZAN A LOS COMBUSTIBLES.....	28
4.2.1. ANÁLISIS PRÓXIMO.....	28
4.2.1.1. Humedad.....	28
4.2.1.2. Cenizas.....	29
4.2.1.3. Materia Volátil.....	29
4.2.1.4. Carbono Fijo.....	30
4.2.1.5. Contenido de Azufre.....	30
4.2.1.6. Poder Calorífico.....	30
4.2.2. ANÁLISIS ELEMENTAL.....	31
4.3. COMBUSTIÓN.....	32
4.3.1. DEFICNIÓN DE LA REACCIÓN DE COMBUSTIÓN.....	32
4.3.2. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA COMBUSTIÓN.....	32

4.3.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE COMBUSTIÓN.....	33
4.3.4. PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN.....	34
4.3.4.1. Humo y Gases de Combustión.....	34
4.3.5. TIPOS DE COMBUSTIÓN.....	37
4.3.5.1. Combustión Completa.....	37
4.3.5.2. Combustión Incompleta.....	37
4.3.5.3. Combustión Teórica o Estequiométrica.....	37
4.3.5.4. Combustión con defecto de aire.....	38
4.3.5.5. Combustión con exceso de aire.....	38
4.3.6. COMBUSTIÓN EN EQUIPOS REALES.....	38
4.3.6.1. Exceso de aire vs. Monóxido de Carbono.....	39
4.3.6.2. Exceso de aire vs. Óxidos de Nitrógeno.....	39
4.3.7. REACCIONES DE COMBUSTIÓN.....	39
4.3.8. COMBUSTIÓN DEL CARBÓN.....	40
4.4. CALOR ESPECÍFICO.....	40
4.4.1. ENTALPÍA.....	42
4.5. CALDERAS.....	43
4.5.1. VARIABLES OPERACIONALES DE LAS CALDERAS.....	44
4.5.1.1. Flujo Másico.....	44
4.5.1.2. Presión.....	45
4.5.1.3. Temperatura.....	45
4.5.2. TIPOS DE CALDERAS.....	46
4.5.2.1. Humotubulares.....	46
4.5.2.2. Acuotubulares.....	47
4.5.3. PARTES DE UNA CALDERA ACUOTUBULARES.....	48
4.5.3.1. Hogar.....	48
4.5.3.2. Domo superior.....	49
4.5.3.3. Domo Inferior.....	49
4.5.3.4. Tubos.....	49

4.5.3.5. Calentador.....	50
4.5.3.6. Sobrecalentador.....	50
4.5.4. ALIMENTACIÓN DEL COMBUSTIBLE.....	51
4.5.4.1. Parrillas.....	51
4.5.5. RELACIÓN AIRE – GASES DE COMBUSTIÓN.....	52
4.5.5.1. Tiro Natural.....	52
4.5.5.2. Tiro Inducido.....	52
4.5.5.3. Tiro Forzado.....	52
4.5.6. CALOR DISPONIBLE Y EFICIENCIA DEL PROCESO.....	53
4.6. EFICIENCIA EN LAS CALDERAS.....	54
4.6.1. ECUACIÓN DE BALANCE TÉRMICO.....	54
4.6.2. MÉTODO DIRECTO.....	56
4.6.3. MÉTODO INDIRECTO.....	57
4.6.4. CÁLCULO DE LOS CALORES DISPONIBLES Y ÚTIL.....	57
4.6.4.1. Calor Disponible, Q_d	57
4.6.4.2. Calor Útil, Q_1	58
4.6.5. CALCULO DE LAS PÉRDIDAS TÉRMICAS.....	59
4.6.5.1. Perdidas de Calor Sensible con los Gases de Salida, q_2	59
4.6.5.2. Pérdidas de Calor Por Combustión Incompleta, q_3	60
4.6.5.3. Pérdida por Combustible no Quemado, q_4	61
4.6.5.4. Pérdidas de Calor por Radiación y Convección, q_5	62
4.6.5.5. Pérdidas con el Calor Físico de los Residuos del Horno, q_6	62
4.6.5.6. Perdidas por Purgas, q_7	63
4.6.6. METODOS ACEPTADOS PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE LOS GENERADORES DE VAPOR.....	64
4.6.6.1. Método de Entrada – Salidas.....	64
4.6.6.2. Método de Pérdidas.....	65
4.6.7. PRUEBA ABREVIADA DE EFICIENCIA.....	65

4.6.7.1.	Método de Pérdidas.....	65
4.6.7.1.1.	Pérdidas en Gases Secos. L_g	65
4.6.7.1.2.	Pérdidas por Humedad en el Combustible, L_{wf} ...	66
4.6.7.1.3.	Pérdidas por Vapor de Agua Formado por Combustión de Hidrógeno, L_H	67
4.6.7.1.4.	Pérdidas de Calor por Combustible en los Residuos, L_{CR}	67
4.6.7.1.5.	Pérdidas por Radiación, L_R	68
4.6.7.1.6.	Pérdidas Indeterminadas, L_i	68
4.6.7.2.	Eficiencia por el Método de Entradas – Salidas.....	68
4.7.	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	70
5.	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	73
5.1.	USO DE LOS COMBUSTIBLES.....	74
5.1.1.	ASPECTOS FISICOQUÍMICOS.....	76
5.1.2.	PARÁMETRO DE PRODUCCIÓN DE VAPOR.....	76
5.1.3.	ASPECTO ECONÓMICO.....	77
5.2.	EFICIENCIA DEL PROCESO.....	78
5.2.1.	VARIABLES OPERACIONALES.....	78
5.2.1.1.	Flujo de Carbón.....	79
5.2.1.1.1.	Caldera Distral 3.....	81
5.2.1.1.2.	Caldera Distral 4.....	82
5.2.1.2.	Flujo de Bagazo.....	84
5.2.1.2.1.	Alimentadores de Bagazo.....	85
5.2.1.3.	Flujo de Bagacillo.....	86
5.2.1.3.1.	Alimentadores de Bagacillo.....	87
5.2.2.	EFICIENCIA DEL QUEMADO DEL COMBUSTIBLE.....	88
5.2.2.1.	Producción de Residuos.....	89
5.2.3.	EFICIENCIA DE LAS CALDERAS.....	90
5.3.	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.....	94
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	95

6.1. PROPUESTA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL USO DE LOS COMBUSTIBLES.....	96
6.2. SITUACION ACTUAL.....	96
6.2.1. DESCRIPCIÓN CALDERAS INCAUCA.....	96
6.2.2. CONSUMOS DE LOS COMBUSTIBLES.....	98
6.2.3. CALDERAS DE INCAUCA.....	100
6.3. CARACTERÍSTICAS FISICOQUIMICAS DE LOS COMBUSTIBLES EMPLEADOS.....	100
6.3.1. BAGAZO.....	100
6.3.2. CARBÓN.....	101
6.3.2.1. Carbón de Alimentación.....	101
6.3.2.2. Costos.....	102
6.3.2.2.1. Costo Actual por Libra de Vapor.....	103
6.3.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS CARBONES.....	104
6.4. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS EN LAS MEZCLAS DE CARBONES.....	106
6.4.1. PODER CALÓRICO.....	106
6.4.2. PORCENTAJE DE AZUFRE.....	107
6.4.3. OPERABILIDAD Y PRODUCCIÓN DE VAPOR.....	107
6.4.4. MANIOBRABILIDAD.....	107
6.4.5. RENTABILIDAD ECONÓMICA.....	108
6.5. ANÁLISIS DE LAS MEZCLAS PROPUESTAS PARA LOS CARBONES.....	108
6.5.1. ANALISIS FISICOQUÍMICO DE LAS MEZCLAS.....	108
6.5.2. ANALISIS ECONÓMICO DE LAS MEZCLAS.....	109
6.5.2.1. Costo por Libra de Vapor de las Propuestas.....	116
6.5.2.1.1. Costo “Propuesta 1”.....	116
6.5.2.1.2. Costo “Propuesta 2”.....	117
6.5.3. CONSUMO DE LOS COMBUSTIBLES.....	119
6.5.4. ANALISIS MEDIO AMBIENTAL.....	120

6.6. EFICIENCIA DEL PROCESO.....	121
6.6.1. VARIABLES OPERACIONALES.....	121
6.6.1.1. Variables Operacionales Calderas Distral 1 Y 2.....	121
6.6.1.2. Variables Operacionales Calderas Distral 3 Y 4.....	123
6.6.2. EFICIENCIA DEL QUEMADO DEL COMBUSTIBLE.....	125
6.6.2.1. Caldera Distral 1.....	125
6.6.2.2. Caldera Distral 2.....	126
6.6.2.3. Caldera Distral 3.....	127
6.6.2.4. Caldera Distral 4.....	129
6.6.3. EFICIENCIA DE LAS CALDERAS.....	131
6.6.3.1. Composición Estequiométrica.....	133
6.6.3.2. Eficiencia de la Caldera Distral 1.....	133
6.6.3.2.1. Eficiencia con los Valores Promedio.....	133
6.6.3.2.2. Eficiencia con Algunos Datos Diarios.....	135
6.6.3.3. Eficiencia de la Caldera Distral 2.....	136
6.6.3.3.1. Eficiencia con los Valores Promedio.....	136
6.6.3.3.2. Eficiencia con Algunos Datos Diarios.....	137
6.6.3.4. Eficiencia de la Caldera Distral 3.....	138
6.6.3.4.1. Eficiencia con los Valores Promedio.....	138
6.6.3.4.2. Eficiencia con Algunos Datos Diarios.....	138
6.6.3.5. Eficiencia de la Caldera Distral 4.....	141
6.6.3.5.1. Eficiencia con los Valores Promedio.....	141
6.6.3.5.2. Eficiencia con Algunos Datos Diarios.....	142
6.7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	146
7. CONCLUSIONES.....	147
8. FUTUROS TRABAJOS.....	150
ANEXOS.....	151

INDICE DE TABLAS

	Pág.	
Tabla 4.1	Sustancias más comunes que se pueden encontrar en los humos	36
Tabla 4.2	Valor del coeficiente K para combustibles sólidos	60
Tabla 5.1	Requerimientos para la mezcla de combustibles a usar en las calderas	77
Tabla 5.2	Constantes de los gases para la ecuación de calor específico a presión contante de diferentes gases	92
Tabla 5.3	Cálculos de combustión	93
Tabla 6.1.	Características principales de calderas de Incacuca	100
Tabla 6.2.	Características fisicoquímicas del bagazo y el bagacillo	101
Tabla 6.3.	Promedio de las características fisicoquímicas del carbón de alimentación.	102
Tabla 6.4.	Costos por libra de vapor producida actualmente en las calderas de Incauca	104
Tabla 6.5.	Características fisicoquímicas promedio de las minas actuales	105
Tabla 6.6.	Diferencias entre las características fisicoquímicas de la mina Vitonas “El Descanso” y las otras minas de Valle	105
Tabla 6.7.	Principales características a buscar en las mezclas de carbones.	108
Tabla 6.8.	Promedios de los análisis fisicoquímicos de las primeras mezclas realizadas	109
Tabla 6.9.	Análisis fisicoquímicos de las mezclas entre Vitonas y carretera	110

Tabla 6.10.	Análisis fisicoquímicos de las mezclas entre Valle (Propal) y carretera	112
Tabla 6.11.	Análisis fisicoquímicos de las mezclas entre Valle (Total) y carretera	113
Tabla 6.12.	Tabla resumen de las propuestas planteadas para la mezcla de carbones	115
Tabla 6.13.	Tabla comparativa de los costos actuales y las propuestas planteadas	118
Tabla 6.14.	Tabla resumen de los consumos de las calderas Distral 3 y 4.	120
Tabla 6.15.	Variables operacionales de las calderas Distral 1 y 2.	122
Tabla 6.16.	Variables operacionales de las calderas Distral 3 y 4.	123
Tabla 6.17.	Datos de la eficiencia en el quemado del combustible para la caldera Distral 1	126
Tabla 6.18.	Datos de la eficiencia en el quemado del combustible para la caldera Distral 2.	127
Tabla 6.19.	Datos de la eficiencia en el quemado del combustible para la caldera Distral 3.	128
Tabla 6.20.	Datos de la eficiencia en el quemado del combustible para la caldera Distral 3 usando los consumos planteados en la propuesta	128
Tabla 6.21.	Datos de la eficiencia en el quemado del combustible para la caldera Distral 4	129
Tabla 6.22.	Datos de la eficiencia en el quemado del combustible para la caldera Distral 4 usando los consumos planteados en la propuesta.	130
Tabla 6.23.	Análisis próximo y elemental de los combustibles.	133
Tabla 6.24.	Ineficiencia promedio de la caldera Distral 1.	134
Tabla 6.25.	Ineficiencias puntuales de la caldera Distral 1.	135
Tabla 6.26.	Ineficiencia promedio de la caldera Distral 2	136

Tabla 6.27.	Ineficiencias puntuales de la caldera Distral 2	137
Tabla 6.28.	Ineficiencia promedio de la caldera Distral 3	138
Tabla 6.29.	Ineficiencias puntuales de la caldera Distral 3 tomando porcentajes aleatorios de carbón presente en el combustible.	139
Tabla 6.30.	Ineficiencias puntuales de la caldera Distral 3 con el 22% de carbón presente en el combustible	140
Tabla 6.31.	Ineficiencia promedio de la caldera Distral 4 trabajando solo con carbón	141
Tabla 6.32.	Ineficiencia promedio de la caldera Distral 4 trabajando con carbón y bagazo.	142
Tabla 6.33.	Ineficiencias puntuales de la caldera Distral 4 tomando porcentajes aleatorios de carbón presente en el combustible	143
Tabla 6.34.	Ineficiencias puntuales de la caldera Distral 4 con el 22% de carbón presente en el combustible	144

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 4.1	54
Eficiencia de la combustión vs Temperatura de productos y exceso de aire	
Figura 4.2	56
Esquema simplificado del balance térmico de un generador de vapor	
Figura 5.1.	76
Combustibles usados en las calderas	
Figura 5.2.	80
Salida del carbón desde la bodega hacia las calderas.	
Figura 5.3.	82
Caída del carbón en la caldera Distral 3	
Figura 5.4.	88
Caída del carbón en la caldera Distral 4	
Figura 5.5.	85
Alimentación del bagazo en las calderas.	
Figura 5.6.	87
Alimentación del bagacillo en las calderas	
Figura 5.7.	89
Residuos generados por las calderas	
Figura 5.7.	92
Carta psicométrica	
Figura 6.1.	97
Caldera de Incauca (Distral 3).	
Figura 6.2.	98
Consumo de bagazo en las calderas de Incauca	
Figura 6.3.	99
Consumo de carbón en las calderas de Incauca	
Figura 6.4.	100
Porcentaje de carbón usado en las calderas de Incauca	
Figura 6.5.	102
Porcentaje de los carbones de Valle y carretera consumidos por Incauca mensualmente	
Figura 6.6.	103
Costo del carbón consumido por Incauca mensualmente	
Figura 6.7.	106
Características fisicoquímicas de los diferentes grupos de minas	

Figura 6.8.	Promedios de los análisis fisicoquímicos de las primeras mezclas realizadas	109
Figura 6.9.	Análisis fisicoquímicos de las mezclas entre Vitonas y carretera	111
Figura 6.10.	Análisis fisicoquímicos de las mezclas entre Valle (Propal) y carretera.	112
Figura 6.11.	Análisis fisicoquímicos de las mezclas entre Valle (Total) y carretera	113
Figura 6.12.	Costos de 1.000 lbs de vapor	119
Figura 6.13.	Eficiencias en el quemado del combustible.	130
Figura 6.14.	Programa usado para el balance de calor de las caderas de Incauca.	131
Figura 6.15.	Programa usado para el balance de materia en las caderas de Incauca	132
Figura 6.16.	Ineficiencias promedio de las calderas.	145

LISTA DE ANEXOS

		Pág.
Anexo 1	BODEGA DE CARBÓN	152
Anexo 2	COMPRA ACTUAL DE CARBÓN	153
Anexo 3	PROPUESTA: COMPRANDO SOLO CARBÓN DE VITONAS	156
Anexo 4	PROPUESTA: REDUCCIÓN EN LA COMPRA DE CARBÓN DE CARRETERA A CARGO DE INCAUCA	160

RESUMEN

Con la realización de este trabajo de grado se logro tener un contacto directo con el entorno industrial y sus procesos, realizando una investigación cuyo propósito era obtener mayores rendimientos energéticos con el uso adecuado del carbón y del bagazo como combustibles en las calderas de la planta de Incauca S.A

Con este fin se estudiaron las propiedades fisicoquímicas, los costos y consumos actuales de los combustibles de alimentación para poder evaluar las propuestas a plantear. Sin embargo, debido a que en las calderas de Incauca no se tenía ningún control real sobre el consumo de combustible, fue necesario evaluar las mediciones correspondientes para tener un valor más aproximado de estas variables.

Conociendo las condiciones actuales de los combustibles en las calderas se plantearon propuestas para la mezcla de carbones basados en las propiedades fisicoquímicas, la maniobrabilidad y la rentabilidad económica. A partir de esta mezcla se genero una propuesta global para la combinación carbón y bagazo, determinado por los consumos más adecuados para las calderas.

La mezcla final mostró buena eficiencia en la producción de vapor y un excelente beneficio económico.

1. JUSTIFICACIÓN

Existe gran interés por parte de la empresa INCAUCA en disponer de personal que pueda ayudarlos en la aplicación de nuevas opciones para mejorar los procesos de producción existentes, que impliquen menores costos, mayor rendimiento, igual o superior calidad y menor contaminación. Debido a los requerimientos de la industria azucarera para la producción de energía se usan las calderas a presiones y temperaturas de vapor relativamente altas, con el fin de generar el vapor suficiente para el proceso y la producción de energía (turbogeneración).

Es importante buscar métodos para mejorar la eficiencia de producción de energía, a partir del conocimiento de los parámetros y variables que influyen en la combustión del carbón y bagazo de caña, con el fin de generar excedentes importantes de vapor que fácilmente se traducen en energía a bajo costo, teniendo en cuenta que se dispone de una fuente permanente de combustible orgánico.

La relativa abundancia del bagazo, unida a la necesidad de eliminar ese desecho hace necesario el diseño de un proceso operativo que utilice la mayor parte del bagazo disponible sin afectar la operación de las calderas y por consiguiente todo el proceso operativo de la planta.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Teniendo en cuenta que la base del intercambio de calor en las calderas es la combustión eficiente de los combustibles, es de suma importancia conocer muy bien las características físicoquímicas de los materiales que se están utilizando para ser aprovechados de la mejor forma y obtener como resultado altos rendimientos energéticos y económicos, controlando además el impacto ambiental que estos generan.

En las calderas de INCAUCA SA se deben tener en cuenta dos elementos que influyen en su comportamiento y que están relacionados entre sí: el primero hace referencia a la tecnología aplicada para la generación de vapor y en segundo lugar están el bagazo y el carbón que son las fuentes energéticas o combustibles empleados para la producción de calor y posterior vaporización del agua. Sin embargo el desempeño del combustible en cuanto al poder calórico no es realmente aplicado, porque no hay conocimiento de los flujos de bagazo y carbón, por lo tanto es una variable con altos niveles de incertidumbre.

El bagazo es una biomasa residual que se genera en la obtención de azúcar cristalizada, que en su proceso necesita ser caracterizada en términos de humedad, de contenido de cenizas, volátiles y azufre, poder calórico y otras variables que es necesario conocer para optimizar la mezcla de este con el carbón.

El carbón presenta variaciones en su composición química que afectan el desempeño de las calderas porque este depende de las concentraciones de

azufre, carbón, hidrógeno, nitrógeno, y otras sustancias minerales que se hacen presentes en la conformación de la roca sedimentaria, por lo que se deben efectuar las caracterizaciones en términos de contenido en materia volátil, humedad, poder calórico, etc.

Otro problema asociado a la combustión de estos materiales se presenta porque las fuentes de suministro son muy diferentes. En el caso del carbón, INCAUCA cuenta con carbón extraído de los departamentos del Valle, Cundinamarca y Antioquia y cada uno presenta características fisicoquímicas muy diferentes.

En cuanto al bagazo, una parte se alimenta directamente de los molinos y otra, físicamente más fina y con composición ligeramente diferente es retornada desde la planta de PROPAL en forma de bagacillo (material similar al aserrín).

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar una práctica laboral en el Ingenio del Cauca (INCAUCAS.A). Práctica en la cual se pretende presentar una propuesta para optimizar el uso del carbón y bagazo como fuentes de energía en el proceso de generación de vapor de las calderas de INCAUCA S.A, con base en las propiedades fisicoquímicas de los combustibles y en las variables operativas que intervienen en el proceso de intercambio de calor.

3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Cumplir con los parámetros de tiempo y conocimientos requeridos por el Ingenio para llevar a feliz término la práctica.
- Analizar las variables y parámetros que afectan la combustión del bagazo y el carbón.
- Conocer las condiciones bajo las cuales se obtiene un quemado de los combustibles que satisfagan las necesidades de las calderas y que sea rentable económicamente.
- Ajustar los parámetros y las variables de los combustibles para formular y plantear un modelo de operación fácilmente aplicable.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. COMBUSTIBLES

Son las sustancias ricas en carbono y en hidrogeno que al quemarse en presencia de oxígeno se transforman exotérmicamente (liberan energía).

Existen varios tipos de combustibles. Entre los combustibles sólidos se incluyen el carbón, la madera y la caña. Entre los combustibles fluidos, se encuentran los líquidos como el queroseno o la gasolina (o nafta) y los gaseosos, como el gas natural o los gases licuados de petróleo (GLP), representados por el propano y el butano.

Los combustibles más usados para generar vapor en las calderas son el carbón y la caña de azúcar. [1]

4.1.1. CAÑA DE AZUCAR

La caña es una planta de características excepcionales, capaz de sintetizar carbohidratos solubles y material fibroso a un ritmo muy superior al de otros cultivos comerciales. Esta propiedad le abre una posibilidad prácticamente infinita de aprovechamiento para la producción de cientos de derivados, en muchos casos de mayor valor agregado e importancia económica que la misma azúcar.

La caña debe ser aprovechada integralmente como fuente de biomasa, por eso es necesario tener en cuenta que el bagazo de caña puede ser también empleado como combustible en los propios centrales azucareros u otras industrias. [2]

4.1.1.1. Biomasa

La biomasa es el nombre dado a cualquier materia orgánica de origen reciente que haya derivado de animales y vegetales como resultado del proceso de conversión fotosintética.

El valor energético de la biomasa de materia vegetal proviene originalmente de la energía solar a través del proceso conocido como fotosíntesis. La energía química que se almacena en las plantas y los animales (que se alimentan de plantas u otros animales), o en los desechos que producen, se llama *bioenergía*. Durante procesos de conversión tales como la combustión, la biomasa libera su energía en forma de calor, y el carbono se oxida dando origen al dióxido de carbono.

Toda la biomasa se descompone a sus moléculas elementales acompañada por la liberación de calor. Por lo tanto, la energía obtenida de la biomasa es una forma de energía renovable. De todas las fuentes renovables de energía, la biomasa se diferencia en que almacena energía solar con eficiencia. Además, es la única fuente renovable de carbón, y puede ser procesada convenientemente para producir combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. [3]

4.1.2. EL CARBÓN

El carbón es uno de los combustibles más utilizados porque es un material que arde con facilidad. Es un mineral compacto, cuyo color va del pardo oscuro al negro, está compuesto principalmente por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.

Es una roca sedimentaria, no homogénea, cuyo origen proviene de la acumulación y alteración físico-química de materia vegetal. Las acumulaciones originales de la vegetación (primordialmente plantas leñosas) dan por resultado la formación de turba, sustancia precursora del carbón. La turba se convierte en carbón después

de quedar sepultada y con un incremento de presión y temperatura, de forma progresiva se comprimen y endurecen hasta alterar la materia y convertirse en grafito.

El carbón mineral se clasifica según su contenido de carbono; por el grado de transformación que han experimentado en su proceso y por el uso al que se adaptan. Normalmente se clasifica en cuatro clases: antracita, hulla, turba y lignito. [4]

4.1.2.1. Antracita

Carbón duro que tiene el mayor contenido de carbono fijo y el menor en materia volátil. Contiene aproximadamente un 93.5 % de carbono, un 9,3 % de cenizas y un 3,6 % de material volátil. Tiene un color negro brillante de estructura cristalina. Se utiliza sobre todo como combustible y como fuente de carbono industrial. Libera una gran cantidad de energía al quemarse y desprende poco humo y hollín. [5]

4.1.2.2. Hulla

Combustible fósil con entre 75 y 90 % de carbono fijo y un contenido en volátiles que oscila entre 20 y 35 %. Es negra, mate y arde con una llama amarillenta. Se diferencia del lignito, por su mayor poder calorífico (entre 30 y 36 MJ/Kg). [5]

4.1.2.3. Turba

Material orgánico compacto, de color pardo amarillento a negro. El contenido en carbono va desde el 60% al 75%. Tiene un poder calorífico inferior a 8.4 MJ/Kg. [5]

4.1.2.4. Lignito

Suele tener color negro pardo y estructura fibrosa o leñosa. Tiene capacidad calorífica inferior a la del carbón común debido a su humedad (43,4%) y bajo contenido de carbono (55.4%). El alto porcentaje en peso de la materia volátil (18,8%) provoca la desintegración del lignito expuesto al aire. [5]

4.2. ANALISIS QUE SE REALIZAN A LOS COMBUSTIBLES

Básicamente, la caracterización de los combustibles se puede realizar por dos tipos diferentes de análisis químicos; el análisis próximo y el análisis elemental.

4.2.1. ANALISIS PROXIMO

El análisis próximo o inmediato, es de vital importancia para la caracterización de los combustibles. Este procedimiento incluye la determinación de los principales componentes de un carbón mineral y sus proporciones en peso. Se evalúan características tales como humedad, cenizas, materia volátil, carbono fijo y poder calórico. [6]

4.2.1.1. Humedad

La cantidad total de agua presente en una muestra es resultante de la combinación entre la humedad superficial y la inherente al producto.

El concepto de humedad total se da como la suma de la humedad superficial y residual o inherente.

Para evaluar el desempeño del combustible como fuente de energía, es necesario considerar la cantidad total de agua contenida, debido a que se debe evaporar al

producirse la combustión, acarreado, una pérdida de calor y una disminución del rendimiento térmico. [6]

4.2.1.2. Cenizas

Durante la formación geológica de los yacimientos de carbón, diversas impurezas minerales se unen a la matriz carbonosa inicial. Las procedencias de estos materiales se deben a las litologías adyacentes, a la combinación entre materiales orgánicos e/o inorgánicos de los restos vegetales que dieron origen al yacimiento, y al propio carbón mineral y su génesis de formación.

La presencia de cenizas en el combustible trae consigo la reducción de su poder calorífico. Por lo tanto, el contenido de cenizas, poder calorífico y costo del producto poseen relación directa.

Las cenizas acarrean una reducción en los niveles de intercambio térmico, reduciendo así la cantidad de calor que podría obtenerse por el combustible. [6]

4.2.1.3. Materia Volátil

La materia volátil existente en los combustibles es el resultado de las combinaciones del carbono, hidrógeno y otros gases.

Entre las variables de proceso afectadas directamente por el contenido de materia volátil, se encuentra el tamaño de la llama y la estabilidad de la combustión. Normalmente la llama resulta de la incandescencia del carbono elemental, que se produce por *cracking* de las materias volátiles. Por lo tanto, cuantas más materias volátiles haya, más llama se producirá.

Se espera un aumento en el poder calorífico por un contenido mayor de volátiles hasta del 20%. Por encima de este valor, se produce una disminución en el poder calorífico, y esto se debe al hecho de que parte de los volátiles son formados por combinaciones de oxígeno y nitrógeno no combustibles. [6]

4.2.1.4. Carbono Fijo

El carbono fijo es la fracción residual del carbón mineral, se obtiene descontando los contenidos de cenizas, humedad y materia volátil. [6]

$$\% \text{ Carbono Fijo} = 100 - \% \text{ Cenizas} - \% \text{ Humedad} - \% \text{ Materia Volatil}$$

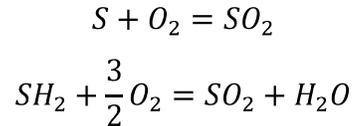
4.2.1.5. Contenido de azufre.

Es importante conocer el contenido de Azufre (S) de los combustibles ya que esto determina la cantidad de SO_2 que aparecerá en los humos, como resultado de la combustión.

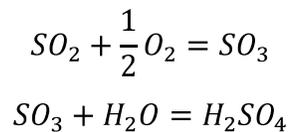
El SO_2 se oxida lentamente a SO_3 (tríóxido de azufre) que es el responsable de las llamadas lluvias ácidas. [7]

Las reacciones de oxidación del S y SH_2 son las siguientes:

En la combustión:



En la Atmósfera:



Siendo el H_2SO_4 , el ácido sulfúrico.

4.2.1.6. Poder Calorífico

El poder calorífico de un combustible es la cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión, referida a la unidad de masa de combustible.

El poder calorífico de un combustible se expresa por la cantidad de calor producido en la combustión por unidad de masa. Posee una gran importancia para la correcta utilización de los materiales como combustible.

Dentro del concepto de poder calorífico existen dos variaciones:

- a) Poder calorífico superior (PCS): Como resultantes del proceso de combustión se tiene la producción de cenizas, gases de dióxido de carbono, dióxido de azufre, nitrógeno y para este caso se considera también la formación de vapor de agua condensado.
- b) Poder calorífico inferior (PCI): Considera la producción de cenizas, gases de dióxido de carbono, dióxido de azufre y nitrógeno, aunque toda el agua producida se encuentra en estado vaporoso. [8]

4.2.2. ANALISIS ELEMENTAL

Se determina la composición de un combustible, dato que es fundamental para poder determinar los parámetros estequiométricos característicos de la reacción de combustión. Además, establece si el mismo es apto o no para el uso que se requiere, en función de la presencia de componentes que puedan ser nocivos o contaminantes.

En el análisis elemental se determinan de los elementos individuales de un material. En este análisis se engloba la determinación de las proporciones de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre, cenizas y la estimación del oxígeno por diferencia.

Los elementos evaluados en el análisis elemental son aquellos que pueden sufrir gasificación y liberar o absorber calor durante las etapas de las reacciones de combustión. [6]

4.3. COMBUSTION

4.3.1. DEFINICION DE REACCION DE COMBUSTIÓN

Se define como el proceso de quemado de una sustancia o mezcla de ellas, a las que se les denomina combustible, en presencia de un comburente que contenga oxígeno. Desde el punto de vista químico se refiere a las reacciones químicas rápidas, exotérmicas y auto sostenidas de oxidación de un combustible. Por lo tanto, como resultado de estas reacciones se tiene una fuerte liberación de calor y en la gran mayoría de los casos radiación luminosa. Esta reacción se auto-sustenta a partir de cierta temperatura. [8]

4.3.2. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA COMBUSTIÓN

Para combustionar un material determinado, es necesario llegar a una cierta temperatura para provocar su inflamación, por lo que se requiere aportar calor hasta superar un rango llamado *temperatura de inflamación*, además la velocidad de oxidación del debe ser lo bastante alta para que el calor desprendido en la reacción sea elevado.

La combustión puede realizarse directamente con el oxígeno como comburente o con una mezcla de sustancias que lo contengan. El ejemplo más usado como comburente es el aire, donde la reacción química que se debe plantear es la del proceso por el cual el combustible reacciona con el aire para formar los productos correspondientes, es decir:

Combustible + Aire = Productos

Una vez iniciado el proceso de combustión, éste se propagará de una molécula a otra, generando por sí solo (en condiciones normales), sin la necesidad de aportes energéticos externos, la energía necesaria para elevar el resto de su masa a la temperatura de inflamación. Mientras el calor proveniente de la reacción sea mayor que el cedido al medio que lo rodea, este proceso seguirá desarrollándose.

La variación de entalpía generada por la combustión de un compuesto se denomina calor de combustión, el cual puede determinarse tanto en forma experimental como por medio de cálculos (teniendo en cuenta las entalpías de los reactivos y productos). [7]

4.3.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE COMBUSTIÓN

Durante la reacción de combustión se hace necesario regular los siguientes aspectos:

- Temperatura
- Suministro de aire
- Tiempo de combustión
- Enfriamiento de gases de horno
- Granulometría

Es necesario tener en cuenta la *velocidad de suministro*, la *cantidad*, *calidad distribución* y *exceso* del aire.

Obtener una combustión completa no es posible en la práctica si solo se aporta el aire primario requerido teóricamente para quemar el carbono fijo. Motivo por el cual se necesita el aporte del aire secundario. Este *aire secundario* se aporta normalmente por encima de la parrilla. [9]

4.3.4. PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN

Los combustibles están compuestos fundamentalmente por carbón, hidrógeno y pequeñas cantidades de azufre. Estos tres elementos básicos reaccionan al generarse la combustión, produciendo las siguientes reacciones: [8]

Carbono (C) + Oxígeno (O₂) → Dióxido de Carbono (CO₂) + Calor

Hidrógeno (H) + Oxígeno (O₂) → Vapor de Agua (H₂O) + Calor

Azufre (S) + Oxígeno (O₂) → Dióxido de Azufre (SO₂) + Calor

4.3.4.1. Humos y Gases de Combustión

La reacción química entre el combustible y el oxígeno origina sustancias gaseosas. Los productos más comunes son CO₂ y H₂O.

Es importante hacer notar que el combustible sólo reacciona con el oxígeno del aire. La composición del aire seco es 20.99% de O₂, 78.03% de N₂, 0.94% de Ar (argón), 0.03% de CO₂ y 0.01% de H₂. Debido a que ni el N₂ ni el Ar reaccionan durante la combustión, se los suele agrupar considerando que el aire está formado por 21% de O₂ y 79% de N₂. Por lo tanto, el N₂ pasará íntegramente a los humos.

El nitrógeno no interviene en la reacción de combustión, pero es de gran influencia sobre la eficiencia de la caldera, debido a que parte del calor generado en la combustión es utilizado para calentar al nitrógeno, que saldrá por la chimenea a la misma temperatura que el resto de los gases de combustión sin generar ningún aporte energético. Por lo tanto, se tienen temperaturas de llama menores de las que se tendrían utilizando oxígeno puro.

Si se utiliza más oxígeno del requerido para una combustión perfecta, este aparecerá como producto final de la combustión. Si la combustión se realiza con

menor porcentaje de oxígeno de lo necesario, aparecerán como productos de la combustión: monóxido de carbono (CO), hidrógeno gaseoso (H₂), compuestos hidrocarburos (C_xH_y), sulfhídrico (H₂S) y carbón (C). Estos compuestos resultan de una combustión imperfecta e incompleta y producen contaminación ambiental. [8]

Por lo tanto, los gases de combustión suelen tener los siguientes compuestos, cuando la combustión es buena.

CO₂, H₂, SO₂, N₂, O₂

Si la combustión es mala se tienen:

CO₂, CO, H₂O, SO₂, N₂, O₂.

Los peores compuestos desde el punto de vista ambiental son: CO₂, CO, SO₂, siendo éste último, el dióxido de azufre el peor legislativamente hablando, debido a que el SO₂ emitido, en contacto con el agua (en humos o en la propia atmósfera), forma el H₂SO₄, que es el responsable de la lluvia ácida.

También se tiene la generación de C_s (hollín), que produce un gran impacto visual (ennegrecimiento), esto sucede cuando existe una mala combustión.

Estos compuestos se suelen expulsar a la atmósfera, ya que forman parte de los desechos generados. El problema de estos humos, radica en la composición de los gases y sus cantidades. [9]

En la tabla se muestran las sustancias más comunes que se pueden encontrar en los humos y su procedencia.

Tabla 4.1 Sustancias más comunes que se pueden encontrar en los humos [7]

FORMULA QUIMICA	NOMBRE	PROCEDECIA PRINCIPAL	OTRAS PROCEDENCIAS
CO ₂	Dióxido de Carbono	Combustión de sustancias que contiene C	Componente no del combustible
H ₂ O	Vapor de Agua	Combustión de sustancias que contienen H ₂	Combustible húmedo
N ₂	Nitrógeno	Aire	Componente no del combustible
O ₂	Oxígeno	Combustión con aire en exceso	El combustible puede tener O ₂ en su composición
CO	Monóxido de Carbono	Combustión con aire en defecto	El combustible puede tener CO en su composición
H ₂	Hidrógeno	Combustión con aire en defecto	
C	Carbono	Combustión con aire en defecto	
SO ₂	Dióxido de Azufre	Presencia de S en el combustible	

4.3.5. TIPOS DE COMBUSTIÓN

Los procesos de combustión se pueden clasificar en:

- Combustión completa.
- Combustión incompleta.
- Combustión teórica o estequiométrica.
- Combustión con exceso de aire.
- Combustión con defecto de aire.

4.3.5.1. Combustión completa.

Para este tipo de combustión, no habrá sustancias con propiedades combustibles en los humos, porque las sustancias combustibles del combustible son quemadas hasta el máximo grado posible de oxidación. Entre los productos de la combustión se encontraría N_2 , CO_2 , H_2O y SO_2 . [7]

4.3.5.2. Combustión incompleta.

Las sustancias combustibles del combustible no se oxidan completamente, formando compuestos que todavía pueden seguir oxidándose y que son denominados inquemados. La presencia de inquemados indica que la combustión se está realizando en forma incompleta.

Entre los inquemados se encuentran el CO , H_2 , C_nH_m , H_2S y C , siendo estos los contaminantes más comunes que escapan a la atmósfera en los gases de combustión. [7]

4.3.5.3. Combustión teórica o estequiométrica.

En este tipo de combustión no se encuentra O_2 en los humos, debido a que se realiza con la cantidad teórica de oxígeno estrictamente necesaria para generar la

oxidación total del combustible, consumiendo todo el oxígeno y sin producir inquemados.

Esta combustión se denomina teórica porque en la práctica siempre se producen inquemados, aunque sea en muy pequeña proporción. [7]

4.3.5.4. Combustión con defecto de aire.

En esta combustión se producen muchos inquemados, debido a que el aire disponible es menor que el necesario para que se produzca la oxidación total del combustible.

4.3.5.5. Combustión con exceso de aire.

Para este tipo de combustión es típica la presencia de O_2 en los humos, porque se lleva a cabo con una cantidad de aire superior a la estequiométrica, y a esta cantidad de aire por encima de la teórica se le denomina “exceso de aire”.

Esta combustión tiende a no producir inquemados. Aunque la incorporación de aire puede evitar la combustión incompleta y la formación de inquemados, genera una pérdida de calor en los productos de combustión, reduciendo la temperatura de combustión, la eficiencia y la longitud de llama. [7]

4.3.6. COMBUSTIÓN EN EQUIPOS REALES

Si se pretende que la combustión sea completa (combustión perfecta) en un equipo real, se debe tener en cuenta que cada molécula de combustible debe combinarse con su correspondiente de aire. Sin embargo, esto no puede realizarse fácilmente debido a las limitaciones de tiempo y volumen en un equipo real. Pero si a las moléculas de combustible se le ofrece un excedente en aire, se aumenta la probabilidad de que entren en contacto y puedan combinarse. [8]

4.3.6.1. Exceso de Aire vs. Monóxido de Carbono

Aunque el exceso de aire reduce la eficiencia de la caldera, es necesario para evitar la aparición de monóxido de carbono (CO), el cual es índice de una combustión incompleta. Por lo tanto a menor exceso de aire, mayor producción de CO y viceversa.

La aparición de CO reduce la eficiencia de la combustión, pues el calor liberado por la reacción: $2C + O_2 \rightarrow 2CO$, representa sólo la tercera parte del que se puede obtener si todo el carbono se convierte en CO_2 .

Aunque en la práctica no es posible operar un quemador con 0% de CO en los gases de combustión.

4.3.6.2. Exceso de Aire vs. Óxidos de Nitrógeno

A altas temperaturas, el oxígeno de exceso se combina con el nitrógeno proveniente del aire y/o del combustible dando lugar a la formación de grandes cantidades de monóxido de nitrógeno (NO).

La oxidación del monóxido de nitrógeno (NO) a dióxido de nitrógeno (NO₂), sólo representa al 10% del total de NO_x producido y tiene lugar en la atmósfera debido a la influencia de la radiación solar. Ambos son considerados contaminantes ambientales. Las altas temperaturas de los gases cumplen el papel de catalizador de dicha reacción

4.3.7. REACCIONES DE COMBUSTIÓN

La temperatura que se obtiene si todo el calor desarrollado durante el proceso se utiliza para calentar los productos se denomina temperatura adiabática de llama y es la máxima temperatura que pueden alcanzar los productos. Para la temperatura de llama adiabática se debe cumplir la siguiente expresión:

$$H_{reactantes} = H_{productos}$$

La entalpía del combustible y del aire ($H_{\text{reactantes}}$), presentes en el proceso de combustión, son toda la energía empleada para elevar la temperatura de los humos de combustión, haciendo que los productos alcancen una entalpía $H_{\text{productos}}$ igual a la de los reactantes, y por ende, obtendrán su máxima temperatura. [10]

4.3.8. COMBUSTIÓN DEL CARBÓN

El proceso de combustión del carbón inicia cuando se pone en contacto el carbón con el O_2 a una temperatura tal que el carbono se convierta en carbono fijo y volátil y así se consiga la combustión.

En la mayoría de las aplicaciones se queman fragmentos pequeños de carbón para aumentar el contacto con el aire. Estos pequeños trozos de carbón se arrojan mediante el uso de esparcidores o cintas transportadoras sobre el piso del hogar en el cual se produce la combustión. En estos casos se le inyecta aire primario desde la parte inferior del piso y aire secundario a presión desde los laterales del hogar. [11]

4.4. CALOR ESPECÍFICO

El calor específico (c) de una sustancia es la cantidad de calor necesario para elevar un grado Celsius la temperatura de un gramo de la sustancia, siendo esta una propiedad intensiva, por lo que es representativa de cada sustancia.

El calor específico indica la capacidad de un material para almacenar energía interna en forma de calor. Por lo tanto, se necesita más energía calorífica para

incrementar la temperatura de una sustancia con un alto valor del calor específico que otra con un valor pequeño. [12]

A volumen constante el calor aportado a un sistema incrementa la energía cinética de sus moléculas aumentando su temperatura. A presión constante el fluido se expande realizando un trabajo. Por un lado realiza un trabajo volumétrico $p \cdot dV$ pero además las moléculas al alejarse unas de otras deben vencer las fuerzas cohesivas, lo que genera un incremento de la energía interna, debido al trabajo realizado. La suma de ambos es precisamente la diferencia entre los calores específicos.

Esta diferencia sólo se manifestará en aquellos casos en los gases ya que en el caso de líquidos y sólidos los cambios de volumen en condiciones ordinarias son tan pequeños que la magnitud del trabajo realizado es despreciable, de ahí que en dichos casos no se distinga uno de otro y se hable simplemente de *calor específico*.

- **Calor específico a presión constante C_p** : Representa la cantidad de calor que hay que suministrar a una unidad de masa de una sustancia, a presión constante, para elevar un grado su temperatura.

- **Calor específico a volumen constante C_v** : Representa la cantidad de calor que hay que suministrar a una unidad de masa de una sustancia, a volumen constante, para elevar un grado su temperatura. [13]

En una extensa región de la temperatura a baja presión todos los gases monoatómicos tienen el mismo valor de C_v y C_p y son prácticamente independientes de la presión y la temperatura. Las moléculas más complejas presentan un aumento en C_p al aumentar la temperatura a bajas presiones.

Los datos de calor específico se evalúan a partir de la teoría basada en el modelo molecular de la materia, de donde se obtiene la ecuación para el calor específico de diferentes gases a presión constante (sistema métrico): [14]

$$\frac{C_p}{R_u} = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4$$

4.4.1 ENTALPIA

La entalpía es una magnitud de termodinámica simbolizada con la letra H. La variación de entalpía se refiere a una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que el sistema puede intercambiar con su entorno.

En el caso de una reacción química a presión constante, el cambio de entalpía del sistema es el calor absorbido o desprendido en la reacción.

Y en el caso de la combustión, la entalpía es el calor liberado, a presión constante, cuando se quema una mol de sustancia. [15]

La entalpía sólo depende de la temperatura

$$dh = \left(\frac{\delta h}{\delta T}\right)_p dT$$

y por lo tanto

$$dh = C_p(T)dT$$

Por otro lado, para cambios finitos de la entalpía, se integra por lo tanto se obtiene que:

$$\Delta h_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} C_p(T)dT$$

4.5. CALDERAS

Las Calderas son generadores de vapor, que parten de la inyección de calor a partir de un combustible sólido, líquido o gaseoso, para producir o recuperar calor y ser transferido a un fluido (esencialmente agua) que por lo general se usa para aplicaciones en la planta.

En la caldera se produce el calentamiento y la evaporación del agua y posiblemente el recalentamiento y sobrecalentamiento del vapor.

La producción del vapor de agua depende dos características fundamentales del estado gaseoso, que son la presión y la temperatura. A cualquier temperatura, por baja que esta sea, se puede vaporizar agua, con tal que se disminuya convenientemente la presión a que se encuentre sometido dicho líquido, y también a cualquier presión puede ser vaporizada el agua, con tal que se aumente convenientemente su temperatura. [16]

De acuerdo a las Leyes conocidas de la Física, la transmisión del calor se verifica de tres maneras diferentes, a saber: radiación, conducción y convección.

Entonces, en el caso de las calderas se tiene que al producirse el proceso químico de la combustión, se desprende energía térmica, la cual es transmitida de la siguiente manera: en el hogar, por radiación, se transmite a las paredes metálicas del mismo; por conducción, lo hace a través de esas superficies metálicas, calentando el agua que está en contacto con ellas y por convección, lo hace con el resto de la masa de agua, ya que al calentarse la que está en contacto con las superficies metálicas, baja su densidad, tiende a subir y permite que el agua más fría y más densa, descienda y ocupe el lugar dejado por el ascenso de esa que aumentó su temperatura. [17]

4.5.1. VARIABLES OPERACIONALES DE LAS CALDERAS

Entre las variables más importantes y de más trascendencia para el uso adecuado de las Calderas, son los flujos tanto de entrada como de salida y las presiones y temperaturas de cada una de las secciones de trabajo,

4.5.1.1. Flujo Másico

El Flujo másico es la diferencial de la masa respecto al tiempo. Esto ocurre dentro de un sistema termodinámico, cuando, un fluido atraviesa por un área en un tiempo determinado:

$$\dot{m} = \rho v A$$

Donde:

- \dot{m} - Flujo másico
- ρ - Densidad del fluido
- v - Velocidad del fluido
- A - Área del tubo corriente

Debido a que $m = \rho V$, $v = x/t$ y $V = Ax$

Donde:

- m – masa
- V – Volumen
- x – Distancia
- t – Tiempo

De donde se obtiene que el flujo másico se puede medir de la siguiente forma:

$$\dot{m} = \frac{\text{masa}}{\text{tiempo}}$$

Es decir, es la rapidez con que fluye la masa. [18]

4.5.1.2. Presión

El control de la presión en los procesos industriales da condiciones de operación seguras. Además, la presión puede llegar a tener efectos directos o indirectos en el valor de las variables del proceso.

La presión es una magnitud física que puede definirse como una fuerza por unidad área o superficie.

Cuando sobre una superficie plana de área A se aplica una fuerza normal F de manera uniforme y perpendicularmente a la superficie, la presión P viene dada por:

$$P = \frac{F}{A}$$

En un caso más general donde la fuerza puede tener cualquier dirección y no estar distribuida uniformemente en cada punto la presión se define como:

$$P = \frac{d\vec{F}}{dA} \cdot \vec{n}$$

Donde \vec{n} es un vector unitario y normal a la superficie. [19]

4.5.1.3. Temperatura

La temperatura es una magnitud escalar que depende del grado de agitación de las partículas de los materiales. A mayor agitación, mayor temperatura.

En el caso de un sólido, los movimientos en cuestión resultan ser las vibraciones de las partículas en sus sitios dentro del sólido. En el caso de un gas ideal monoatómico se trata de los movimientos traslacionales de sus partículas y para los gases multiatómicos se debe a una combinación de ambos movimientos. [19]

4.5.2. TIPOS DE CALDERAS

La división más importante en la construcción de calderas, está dada por la posición de los sistemas de circulación del agua y los gases de combustión. Dividiéndolas en dos tipos, calderas humotubulares o de tubos de fuego y calderas acuotubulares o de tubos de agua, indicando la posición relativa de los gases de combustión con respecto al fluido que está siendo calentado.

4.5.2.1. Humotubulares

En las calderas humotubulares o de tubos de fuego, los gases de la combustión circulan por dentro de los tubos, mientras que el agua está contenida un recipiente que contiene los tubos y el hogar. Es decir, los productos calientes de la combustión pasan a través de tubos sumergidos en el agua de la caldera.

En estas calderas, la mayor parte del intercambio de calor se realiza gracias a los gases de combustión que circulan dentro de tubos que están totalmente rodeados por el agua. El resto del intercambio se realiza en el hogar, que también se encuentra totalmente rodeado de agua. [8]

El combustible es quemado en el hogar, donde tiene lugar la transmisión de calor por radiación. A los gases resultantes, se les hace circular a través de los tubos que constituyen el haz tubular de la caldera y donde tiene lugar el intercambio de calor por conducción y convección. Según sea una o varias las veces que los gases pasan a través del haz tubular, se tienen las calderas de uno o de varios pasos. Una vez realizado el intercambio térmico, los humos son expulsados al exterior a través de la chimenea. [20]

4.5.2.2. Acuotubulares

Las calderas acuotubulares hacen circular el agua que entra a la caldera por el interior de tubos y en el exterior de estos circulan los gases producidos por la combustión. La circulación del agua es generalmente alcanzada por la diferencia de densidad entre el agua fría que entra y la mezcla vapor/agua caliente que sale. En estas calderas, los tubos longitudinales interiores se emplean para aumentar la superficie de calefacción, y están inclinados para que el vapor a mayor temperatura salga por la parte más alta y provoque un ingreso natural del agua más fría por la parte más baja. En un recipiente de vidrio se puede visualizar, sin mayor dificultad, lo que sucede en cada uno de los tubos; burbujas de vapor y agua caliente ascienden producto del desplazamiento por agua más pesada libre de vapor proveniente de zonas superiores y de menor temperatura. Este efecto da comienzo al ciclo de corrientes de circulación por convección natural. Estas desplazan las burbujas a la superficie de interfase, en donde se liberan formando vapor. [8]

Las calderas acuotubulares o de tubos de agua, permiten trabajar a presiones mucho más elevadas, por lo cual son utilizadas en la generación de energía eléctrica; propulsión de grandes buques a turbinas de vapor y procesos industriales de gran importancia. Normalmente están diseñadas para quemar combustible sólido y su eficiencia térmica está por arriba de cualquier caldera de tubos de humo, ya que se fabrican de 3, 4 y 6 pasos dependiendo de la capacidad, además el vapor que produce una caldera de tubos de agua es un vapor seco, por lo que en los sistemas de transmisión de calor existe un mayor aprovechamiento. [21]

4.5.3. PARTES DE UNA CALDERA ACUOTUBULAR

Entre las distintas secciones y equipos que posee una caldera acuotubular se encuentran el hogar, domo superior o primario, domo inferior o secundario, tubos, calentador y sobrecalentador.

4.5.3.1. Hogar

Es un recinto delimitado por paredes de agua, que constan de tubos unidos entre sí por una membrana metálica. En estos tubos de agua, al igual que en el haz convectivo, es donde se produce el cambio de estado agua a vapor, o sea que la temperatura de la mezcla que circula dentro de éstos, es la correspondiente a la de saturación a la presión del domo.

El hogar consta de dos zonas bien definidas: la zona de radiación, ubicada en los alrededores de los quemadores, y la de convección, definida por el camino de salida de los gases de combustión.

La superficie relativa del hogar representa sólo el 9% de la superficie total de la unidad, pero en él se absorbe el 48% del calor total. Esta alta efectividad térmica se debe fundamentalmente al efecto de la radiación, que es consecuencia de la exposición directa a las llamas y gases de combustión en la zona de mayor temperatura.

Las tres funciones más importantes que tiene el hogar para la combustión son:

- a) Proveer el espacio necesario para la llama, sin que ésta toque los tubos para evitar la extinción de los extremos de la llama que entran en contacto con los tubos, ya que estos están a menor temperatura que la llama.
- b) Mantener la temperatura de la llama y de los gases lo más alta posible.
- c) Proveer un recinto hermético que evite las fugas de gases (hogar presurizado) ó entrada de aire ajeno a la combustión (hogar subpresurizado). [8]

4.5.3.2. Domo superior

El domo superior o domo primario, es un recipiente ubicado en la parte superior de la caldera, en el que se introduce el agua y ocurre su evaporación (obteniendo vapor saturado). El nivel de líquido debe mantenerse controlado para asegurar que el agua no se evapore en los tubos, lo cual podría causar su destrucción o para evitar que el agua no se separe adecuadamente del vapor y ocurran arrastres de agua y sólidos al resto de los equipos.

El domo superior cumple con las siguientes funciones:

- a) Proveer el espacio físico para producir la separación de fase entre la mezcla agua y vapor.
- b) Proveer el espacio físico para alojar todos los elementos de separación necesarios para garantizar la correcta separación de las partículas de agua y sólidos en suspensión de la corriente de vapor.
- c) Calentamiento del agua de alimentación que ingresa. [8]

4.5.3.3. Domo Inferior

El domo inferior o domo secundario, es también llamado tambor de lodos y consta de un recipiente ubicado en el punto más bajo de la caldera, en el que se recolectan los sólidos en suspensión en la misma, y de donde son purgados periódicamente. [22]

4.5.3.4. Tubos

Son los encargados de interconectar el tambor de lodos con el de vapor permitiendo la circulación del agua entre ellos; la mayoría de ellos (tubos "elevadores") están expuestos al medio portador de la energía (llama o gases calientes), y su gran número y pequeño diámetro contribuyen a una mayor

eficiencia en la transferencia a través de sus paredes de la energía para llevar el agua a su punto de ebullición; el resto de los tubos (tubos "bajantes") están menos expuestos al calor, lo cual hace que su temperatura sea inferior a la de los anteriores, permitiendo así el retorno de cierta cantidad de agua al tambor de lodo para depositar allí los sólidos mencionados. [23]

4.5.3.5. Calentador

Equipo instalado en el que se precalienta el agua a una temperatura cercana a la de ebullición, aprovechando la energía remanente en los gases de combustión. [23]

4.5.3.6. Sobrecalentador

La función del sobrecalentador es la de elevar la temperatura de vapor por encima de la de saturación a la presión de domo debido a se debe asegurar el secado total del vapor antes de ingresar a las turbinas o a los equipos en los cuales se vaya a emplear, además, porque el vapor sobrecalentado posee menor tendencia a condensarse que el vapor saturado.

La superficie relativa del sobrecalentador representa el 9% de la superficie total de la caldera, pero en él se absorbe el 16% del calor total.

Los sobrecalentadores pueden clasificarse en dos grandes grupos que dependen de las ubicaciones de estos dentro de la caldera y de cómo están diseñados.

Estos grupos se pueden clasificar en: convectivos, radiantes o la combinación de ambos. Es importante esta clasificación, pues el comportamiento de la temperatura del vapor en función del estado de carga de la caldera, es sustancialmente diferente. [8]

4.5.4. ALIMENTACIÓN DEL COMBUSTIBLE

Para el caso específico del carbón, hay dos sistemas para quemarlo: pulverizado y con parrilla. El primero requiere cuatro procesos: pulverización, secado, clasificación, y transporte al sistema de quemador. Con este sistema es más eficiente la combustión ya que la cantidad de carbón inquemado en las cenizas disminuye.

Por otra parte el sistema de parrilla se caracteriza por que hay una cama de combustión sobre una rejilla donde se ubica el carbón y a través de ella atraviesa la corriente de aire de combustión. [21]

4.5.4.1. Parrillas

La parrilla es el lugar donde se pone el carbón para su combustión. Es necesario que posea orificios para que el aire comburente atravesase el lecho del combustible y entren en contacto.

Las parrillas se clasifican en fijas y móviles

La masa de parrilla en el carbón va a presentar cuatro zonas bien diferenciadas:

- Zona de cenizas: Perjudicial porque apantalla la cantidad de calor. Sin embargo protege la parrilla
- Zona de oxidación: Aquí se produce la combustión primaria
- Zona de reducción:
- Zona de destilación: La materia volátil se recalienta y se obtiene el residuo de coque [9]

4.5.5. RELACIÓN AIRE - GASES DE COMBUSTIÓN

Las presiones dentro del hogar se encuentran por lo general por debajo de la atmosférica, por lo tanto, deben tener un ventilador de tiro forzado que inyecta aire a los quemadores y otro de tiro forzado, antes de la chimenea, que es el responsable de producir la presión sub-atmosférica dentro del hogar.

4.5.5.1. Tiro Natural

Es el generado por la chimenea y por la expansión térmica (y la correspondiente disminución de densidad) de los gases de combustión.

4.5.5.2. Tiro Inducido

Utilizando un soplador para la extracción de los gases de combustión, se disminuye así la presión del hogar a niveles inferiores que los producidos por tiro natural, lo cual propicia la entrada del aire.

4.5.5.3. Tiro Forzado

Introduciendo el aire por medio de sopladores, cuando se requiere de una capacidad relativamente alta. Naturalmente esto tiende a crear una presión positiva dentro del hogar, facilitando así el desalojo de los gases de combustión.

[24]

4.5.6. CALOR DISPONIBLE Y EFICIENCIA DEL PROCESO

Los productos de combustión poseen una energía térmica de acuerdo a su temperatura. Esta energía o calor disponible Q_{disp} , se refiere a la cantidad de energía que puede ser convertida en energía útil. Entre más fríos salen los gases de combustión del proceso de calentamiento se tiene un mayor aprovechamiento de la energía térmica.

La eficiencia está asociada a la energía química que es posible ser transformada en el calentamiento de los productos de combustión, y es el 100% si toda la energía química almacenada en el combustible es convertida en calor disponible para el proceso. Si se conoce la temperatura de los reactantes, su entalpía H_{react} y la temperatura de los productos de combustión inmediatamente a la salida del quemador y su energía contenida H_{prod} , se puede definir la eficiencia como:

$$\eta_{comb} = \frac{PCS - (H_{prod} - H_{react})}{PCS} * 100\%$$

La figura muestra el comportamiento de la eficiencia de combustión de acuerdo a la temperatura que poseen los gases inmediatamente a la salida del quemador.

[10]

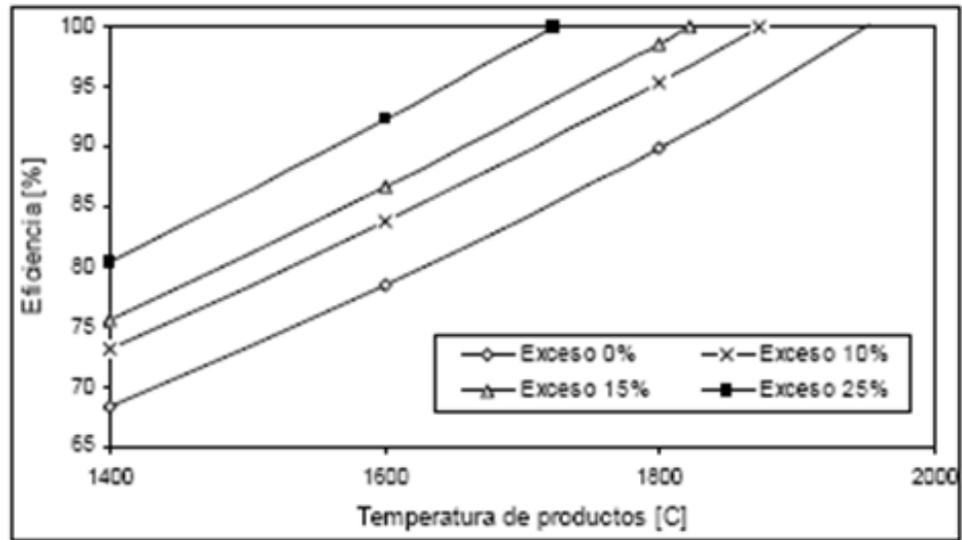


Figura 4.1 Eficiencia de la combustión vs Temperatura de productos y exceso de aire [10]

4.6. EFICIENCIA EN LAS CALDERAS

La *eficiencia térmica* de cualquier motor calórico se define arbitrariamente como:

$$\eta \equiv \frac{|W|}{|Q_c|}$$

Es decir, depende de la relación entre el trabajo neto útil y el calor que se suministra.

La eficiencia térmica caracteriza el grado de aprovechamiento de la energía suministrada, o sea, la parte de esa energía que ha sido transferida al agente de trabajo (generador de vapor). [14]

Los aspectos más importantes que influyen para obtener una mayor eficiencia térmica son:

1. Combustión completa del combustible, lograda con una mínima cantidad de aire en exceso.
2. Alto enfriamiento de los productos de la combustión.
3. Reducción de las pérdidas de calor por radiación y convección al medio circundante. [24]

4.6.1. ECUACIÓN DE BALANCE TÉRMICO

El rendimiento térmico se hace máximo si toda la energía cedida, es suministrada desde una fuente térmica a la máxima temperatura posible.

El balance térmico de una caldera operando a régimen estacionario puede escribirse en la siguiente forma simplificada: [24]

$$Q_D = Q_1 + Q_P$$

Donde:

Q_D – Calor disponible, constituye la energía de entrada al generador por unidad de masa de combustible.

Q_1 – Calor útil, constituye el calor transferido al agente de trabajo.

Q_P - Pérdidas térmicas, representa la suma de todas las pérdidas que ocurren en los procesos de combustión y transferencia de calor en el generador de vapor.

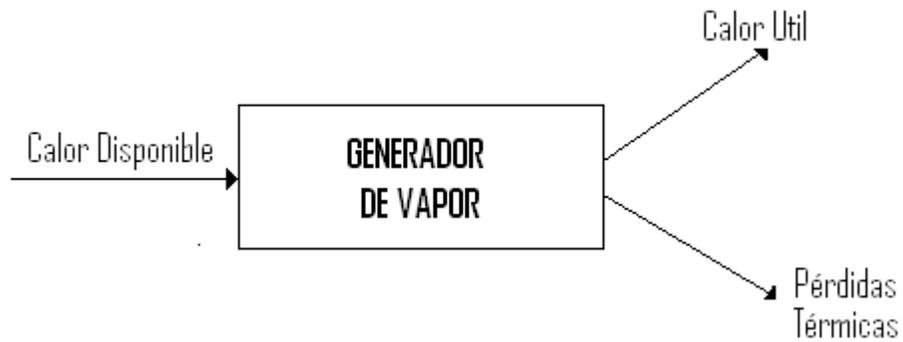


Figura 4.2 Esquema simplificado del balance térmico de un generador de vapor. [24]

Para determinar la eficiencia en un generador de vapor a partir de la ecuación de balance térmico, existen dos métodos, el directo e indirecto

4.6.2. METODO DIRECTO

Relaciona directamente la producción de la caldera con el consumo, y determina la eficiencia como el porcentaje que representa el calor útil (producción) del calor disponible (consumo). [24]

$$\eta = [Q_1/Q_d] * 100, \%$$

4.6.3. METODO INDIRECTO

Este método parte de determinar la suma de las pérdidas térmicas expresadas en porcentaje del calor disponible y luego determinar, indirectamente, la eficiencia como el porcentaje restante. [24]

$$\eta = 100 - \sum q_p, \%$$

Donde:
$$\sum q_p = [\sum Q_p / Q_d] * 100, \%$$

4.6.4. CALCULO DE LOS CALORES DISPONIBLES Y ÚTIL

4.6.4.1. Calor Disponible, Q_d

Constituye la energía suministrada por unidad de masa del combustible [24]

$$Q_d = Q_i + Q_c + Q_{pca} , \text{ KJ/kg (KJ/m}^3\text{)}$$

Donde:

Q_i – Poder calorífico inferior del combustible

Q_c – Calor físico del combustible

Q_{pca} – Calor añadido en el precalentador de aire (proveniente de fuentes externas)

Calor Físico del Combustible

Se toma en consideración para combustibles sólidos de bajo poder calorífico

$$Q_c = C_c T_c , \text{ KJ/kg}$$

Donde:

T_c – Temperatura del combustible suministrado al horno, °C

C_c – Calor específico del combustible

$$C_c = 0.419W_t + C_{cs}(0.99W_t)$$

C_{cs} – Calor específico del combustible seco

Calor añadido en el precalentador de aire

$$Q_{pca} = \beta_{pca} (I_{pca} - I_{af}) , \text{ KJ/kg}$$

Donde:

β_{pca} – Es la relación entre el volumen de aire a la entrada del calentador de aire y el volumen teórico.

I_{pca} – Entalpía del aire a la entrada del calentador de aire KJ/kg (KJ/m³N)

I_{af} - Entalpía del aire a la temperatura ambiente, KJ/kg (KJ/m³N).

4.6.4.1. Calor Útil, Q_1

Representa la energía transferida al agente de trabajo por unidad de masa de combustible. [24]

$$Q_1 = [D_v (h_v - h_{aa})] / B_c , \quad \text{KJ/kg (KJ/m}^3\text{N)}.$$

Donde:

D_v – Flujo de vapor producido por la caldera, kg/h

h_v – Entalpía del vapor producido, KJ/kg

h_{aa} – Entalpía del agua de alimentación, KJ/kg

B_c – Gasto de combustible, kg/h (m³N/h)

4.6.5. CALCULO DE LAS PÉRDIDAS TÉRMICAS, Q_p

4.6.5.1. Pérdidas de Calor Sensible con los Gases de Salida, q_2

Los factores principales que influyen sobre esta pérdida son el volumen la temperatura y la composición de los gases de salida. [24]

Esta asociada al hecho de que la entalpía de los gases de salida es superior a la del aire y el combustible. [24]

$$q_2 = \frac{(I_g - \alpha_{sal} I_{af}) - q_4/100}{Q_d} \cdot 100$$

Donde:

q_2 – Pérdida de calor sensible con los gases de salida expresada en % de calor disponible.

I_g – Entalpía en los gases de salida, KJ/kg (KJ/m³N)

α_{sal} – Coeficiente de exceso de aire a la salida del generador de vapor.

I_{af} – Entalpía del aire a la temperatura ambiente, KJ/kg (KJ/m³N)

q_4 – Pérdida por combustible no quemado, %

La pérdida de calor sensible en % del poder calórico inferior puede calcularse así:

$$q_2 = K \frac{t_g - t_a}{CO_2 + CO}, \quad \%$$

Donde:

T_g – Temperatura de los gases de escape, °C

T_a – Temperatura del aire ambiente, °C

CO_2, CO – Porcentaje en volumen de dióxido de carbono y monóxido de carbono contenido en los gases de escape.

K – Constante que depende del tipo de combustible denominada coeficiente de Hassentein.

Tabla 4.2 Valor del coeficiente K para combustibles sólidos [24]

CO₂ (%)	Bagazo (W=50%)	Carbón (W=25%)
8	0.80	0.692
10	0.83	0.704
12	0.86	0.719
14	0.89	0.734
16	0.92	0.749

4.6.5.2. Pérdidas de Calor Por Combustión Incompleta, q_3

Estas pérdidas dependen directamente de la relación entre el combustible y el aire.

Esta asociada a la presencia de productos de combustión incompleta (CO, H₂, CH₄) en los gases de combustión. [24]

$$q_3 = \frac{V_{gs}(126 CO + 108 H_2)}{Q_d} 100$$

Donde

q_3 – Pérdida por combustión incompleta expresada en % del calor disponible.

V_{gs} – Volumen de gases secos, m³N/kg

CO, H₂ - % en volumen de monóxido de carbono e Hidrógeno contenido en los gases de escape.

Aunque en la mayor parte de los casos de combustión en calderas solo aparece CO como producto de la combustión incompleta.

Una evaluación aproximada de la pérdida por combustión incompleta se puede realizar usando la siguiente expresión recomendada por la norma DIN¹ cuando solo aparece CO como producto de combustión incompleta en los gases

$$q_3 = \left(\frac{60 CO}{CO_2 + CO} \right) * 100 \quad , \quad \%$$

Si se conoce el contenido de carbono en el combustible se puede emplear la ecuación más exacta:

$$q_3 = \frac{3020 CO C_t}{0.536 Q_d (CO_2 + CO)} \quad , \quad \%$$

Donde:

C_t – Contenido de carbono en el combustible, %

4.6.5.3. Pérdida por Combustible no Quemado, q₄

Es de gran importancia en el caso de combustibles sólidos y que se queman en hornos de parrilla.

Los principales factores que influyen sobre esta pérdida son: El exceso de aire y las características del combustible, tales como granulometría, contenido de ceniza y de volátiles,

El combustible sin quemar aparece en los residuos de combustión del horno (escoria) y en los residuos volantes que son arrastrados con los gases de salida.

[24]

$$q_4 = \frac{32650 A}{Q_d} \left[a_e \left(\frac{C_e}{100 - C_e} \right) + a_v \left(\frac{C_v}{100 - C_v} \right) \right]$$

¹ DIN - Deutsches Institut für Normung - Instituto Alemán de Normalización.

Donde:

q_4 – Pérdida por combustible no quemado expresada en % del calor disponible.

32650 – Poder calorífico del carbono, KJ/kg

a_e, a_v – Fracciones de la ceniza del combustible que queda en los residuos del horno (escoria) y con los residuos volátiles respectivamente.

C_e, C_v – Contenido de combustible en los residuos del horno y volátiles expresado en %.

Los valores normales de esta pérdida para combustibles sólidos oscilan entre 0.3 y 4 %, dependiendo del tipo de combustible y modo de combustión.

4.6.5.4. Pérdidas de Calor por Radiación y Convección, q_5

Durante el funcionamiento de los generadores de vapor las superficies exteriores del horno, el domo, los conductos de los gases, tuberías, etc., alcanzan una temperatura superior a la ambiental. Este gradiente de temperatura genera una transferencia de calor al medio exterior que se efectúa por dos mecanismos fundamentales: convección y radiación, lo que representa una pérdida de calor, que afecta la eficiencia del generador de vapor. [24]

4.6.5.5. Pérdidas con el Calor Físico de los Residuos del Horno, q_6

Esta pérdida esta dada por la extracción de residuos de combustible del horno (escoria y cenizas) con una temperatura superior a la del medio ambiente. [24]

$$q_6 = \frac{A a_e C_{pe} T_e}{Q_d}$$

Donde:

q_6 – Pérdidas con el calor físico de los residuos del horno expresada en % del calor disponible

A – Contenido de ceniza en el combustible, %

a_e – Fracción de la ceniza del combustible que permanece con los residuos del horno

C_{pe} – Calor específico de la ceniza a la temperatura T_e , KJ/kg - °C

T_e – Temperatura de extracción de los residuos de combustible del horno °C.

4.6.5.6. Perdidas por Purgas, q_7

Esta pérdida esta asociada a la diferencia de temperatura entre el agua extraída de la caldera para mantener la concentración de sustancias perjudiciales dentro del rango recomendado y el agua de alimentación. [24]

$$q_7 = D_p \frac{(h_{ls} - h_{aa})}{B_c}$$

q_7 – Calor perdido con las purgas por unidad de combustible, KJ/kg (KJ/m³N)

D_p – Gasto de agua extraída, Kg/h. Este gasto oscila entre 1 y 4% del gasto de vapor.

H_{ls} – Entalpía del agua de caldera (líquido saturado a la presión del domo) KJ/kg

H_{aa} – Entalpía del agua de alimentación, KJ/kg

B_c = Gasto de combustible, kg/h

4.6.6. METODOS ACEPTADOS PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA DE LOS GENERADORES DE VAPOR

El código ASME contempla dos métodos aceptados para determinar la eficiencia de los generadores de vapor:

4.6.6.1. Método Entradas – Salidas

El método de medición directa de las entradas y salidas, denominado *método de entrada salida (“input- output method”)*. Se refiere a la eficiencia bruta (“gross efficiency”) la cual se define como la relación entre el calor absorbido por el fluido de trabajo y el calor de entrada.

$$Efic = \left[\frac{\text{Calor absorbido}}{(\text{calor en el combustible} + \text{créditos térmicos})} \right] * 100$$

Requiere mediciones precisas del flujo y poder calórico del combustible, de los créditos térmicos (otras energías de entrada a la caldera, tales como el calor sensible del aire de entrada) y del calor absorbido por el fluido o fluidos de trabajo.

La entrada se define como el calor aportado por la combustión del combustible y la salida como el calor absorbido por el fluido de trabajo. [24]

4.6.6.2. Método de Pérdidas

El método de medición directa de las pérdidas de calor, denominado como *método de las pérdidas* (“*heat losses method*”)

$$Efic(\%) = \frac{Entrada - Pérdidas}{Entrada} 100 = \left[1 - \frac{Pérdidas}{Entrada} \right] 100$$

Requiere determinar las pérdidas de calor, el análisis elemental y el poder calórico del combustible, así como los créditos térmicos.

El balance se realiza a partir de las energías que cruzan las fronteras del sistema, considerando como tal toda la caldera. [24]

4.6.7. PRUEBA ABREVIADA DE EFICIENCIA (CODIGO ASME)²

El código ASME expone la forma más simplificada para determinar la eficiencia

4.6.7.1. Método de Pérdidas

La prueba abreviada según ASME considera solo las principales pérdidas térmicas y el poder calórico del combustible.

4.6.7.1.1. Pérdidas en Gases Secos. L_g

Esta pérdida es considerada como una de las más importantes y depende de la composición del combustible, el exceso de aire empleado y de la temperatura de salida de los gases. [24]

² Código para la Construcción de Calderas de la American Society of mechanical engineers

Primero se calculan las libras de gases secos por libra de combustible. W_g .

$$W_g = \frac{11 CO_2 + 8 O_2 + 7(N_2 + CO)}{3(CO_2 + CO)} \left[\left(\frac{C}{100} - \frac{Hr}{14500} \right) + \frac{S}{267} \right], \text{ lb/lb}$$

Donde:

CO_2, O_2, CO, N_2 – contenido volumétrico en los gases de combustión, %

C, S – Contenido de Carbono y Azufre en el combustible, %

Hr – Poder calorífico de los residuos (promedio ponderado), BTU/lb

Wr – Lb de residuos secos por lb de combustible lb/lb

Ahora la pérdida en gases secos es:

$$L_g = W_g C_{pg} (T_g - T_a), \text{ Btu/h}$$

Donde

C_{pg} – Calor específico de los gases secos.

T_g – Temperatura de gases a la salida del generador de vapor, °F

T_a – Temperatura del aire tomada como referencia, °F

4.6.7.1.2. Pérdidas por Humedad en el Combustible, L_{wf}

Esta pérdida es muy influyente en la eficiencia de la caldera y depende esencialmente del contenido de humedad en el combustible y de la temperatura de salida de los gases en la chimenea. [24]

$$L_{wf} = \frac{W}{100} (h_{pv} - h_{wsat}), \text{ Btu/lb}$$

Donde:

W – Humedad del combustible, %

h_{pv} – Entalpía del vapor a 1 psia y temperatura de gases de salida, Btu/lb

h_{wsat} – Entalpía de líquido saturado a la temperatura de referencia (aire) Btu/lb

4.6.7.1.3. Pérdidas por Vapor de Agua Formado por Combustión de Hidrógeno, L_H [24]

$$L_H = 9 \frac{H}{100} (h_{pv} - h_{wsat}), \text{ Btu/lb}$$

Donde:

H – Hidrógeno en el combustible, %

h_{pv} – Entalpía de vapor a 1 psia y temperatura de gases de salida, Btu/lb

h_{wsat} – Entalpía de líquido saturado a la temperatura de referencia (aire) Btu/lb

4.6.7.1.4. Pérdidas de Calor por Combustible en los Residuos, L_{CR} [24]

$$L_{CR} = Hr Wr, \text{ Btu/lb}$$

Donde:

Hr – Poder calórico de los residuos (promedio ponderado), Btu

Wr – Peso de residuos secos por lb de combustibles, lb/lb

$$Wr = \frac{A}{100 - C_R}$$

Donde:

A – Contenido de ceniza en el combustible, %

C_R – Contenido de combustible en la muestra de residuos, %

Si los residuos volantes y los del horno difieren en el contenido de combustible, las pérdidas deben ser estimadas por separado. Y la pérdida total de calor por combustible en los residuos será la suma de todas las pérdidas estimadas.

4.6.7.1.5. Pérdidas por Radiación, L_R

Estas pérdidas dependen de las características de las calderas como aparatos de transmisión de calor. Bajo las condiciones usuales de operación no pasan de 4% sobre el poder calorífico del combustible, siendo normalmente del orden de 2%.

La pérdida se obtiene en %, para expresarla en Btu/lb se multiplica por el poder calorífico superior del combustible y se divide entre 100. [24]

4.6.7.1.6. Pérdidas Indeterminadas, L_i

Debido a que las pérdidas indeterminadas no son calculables de forma directa, los fabricantes de calderas dan como dato práctico un calor perdido de 1.5 % del poder calorífico del combustible.

Para combustibles sólidos normalmente se maneja $L_i = 1.5\%$. Para expresarla en Btu/lb se multiplican por el poder calorífico superior del combustible. [24]

La suma total de las pérdidas será:

$$L = L_g + L_{wf} + L_H + L_{CR} + L_R + L_i$$

Y la eficiencia por el método de las pérdidas:

$$\eta_g = 100 - \frac{L}{H_j} \cdot 100, \%$$

4.6.7.2. Eficiencia por el Método de Entradas – Salidas

Para este caso el código ASME tiene en cuenta todo el calor necesario para la producción del vapor. [24]

$$\eta_{gv} = \frac{Q_U}{H_F} \cdot 100$$

Donde:

H_F – Poder calorífico superior del combustible, Btu/lb

Q_U – Calor total absorbido por el flujo de trabajo, Btu/lb

$$Q_U = D_V (h_{VS} - h_{aa}) + D_p (h_{ls} - h_{aa})$$

Donde:

D_V, D_p – Gasto de vapor sobrecalentado y purga continua, lb/h

h_{VS} – Entalpía de vapor sobrecalentado

h_{ls} – Entalpía de líquido saturado a presión del domo, Btu/lb

4.7. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

[1] ACERCAR. Unidad de Asistencia para la pequeña y mediana industria. Descripción del Proceso. Combustibles. Versión en Revisión.

[2] SUÁREZ RIVACOBÁ, Rafael; MORÍN Rafael . Caña de Azúcar y Sostenibilidad. Enfoque y Experiencias Cubanas. 2005

[3] Grupo Nova Energía. Distribución de Energías renovables. Biomasa. Barcelona. España.

[4] LEON D, Elard F. La importancia del carbón Mineral en el Desarrollo. Revista del Instituto de Investigaciones. Universidad Mayor de San Marcos. Facultad de Ingeniería geológica, minera, metalúrgica y geográfica. Departamento académico de Ingeniería Metalúrgica. Perú. FIGMMG. Vol 9 N° 18, 91 – 97. 2006.

[5] Museo geológico virtual de Venezuela. Módulo mineral de Venezuela. Carbón <http://www.pdusa.com/léxico/museo/minerales/carbon.htm>

[6] Caracterización Tecnológica del Carbón
200.130.9.7/clima/espan/comunic_old/car12_02.htm

[7] Dr Ing E. BRIZUELA – Dr Ing S. D. ROMANO. Combustión. Primera Parte. UBA. Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Mecánica y Naval. Buenos Aires. Argentina. 2003.

[8] Ing LIFSCHITZ, Eduardo A; Ing. RICCI, Carlos. Calderas I. Conceptos de control básico. Asociación Argentina de Control Automático. AADECA. Cuadernos profesionales. N°2 – Vol 1. 1993.
www.aadera.org/publicaciones/cponline/cuaderno_profesional_02.pdf

[9] Tecnología de Combustibles. Textos científicos.

[www.textoscientificos.com/ energia/combustibles/combustion-carbon](http://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/combustion-carbon)

[10] Ing. M. Sc. SERRANO, Juan Carlos; Ing. M. Sc. CARRANZA SÁNCHEZ, Yamid Alberto. Análisis Teórico de la Combustión en Quemadores de Gas Natural. Scientia et Technica. Año XI, No 29, Diciembre de 2005. UTP. ISSN 0122-1701.

[11] La combustión del carbón. Proceso de combustión del carbón. Textos científicos

<http://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/combustion-carbon>

[12] Calor Específico

http://es.wikipedia.org/wiki/Calor_espec%C3%ADfico

[13] Calor específico.

http://enciclopedia.us.es/index.php/Calor_espec%C3%ADfico

[14] WARK, Kenneth. Termodinámica. Cuarta edición. Mc Graw Hill.

[15] Entalpía.

<http://es.wikipedia.org/wiki/Entalp%C3%ADa>

[16] Generadores de Vapor y Accesorios.

<http://www.aeok.org.ar/museo/elmuseo/recorrido/calderas.htm>

[17] GONZÁLES VALIENTE, César; JAVALOYAS GRAU, Francisco.

Instalaciones de Producción de Vapor. Ciclo Formativo Montaje y Mantenimiento

de Instalaciones de Frio, Climatización y Producción de Calor. Grado medio.
Tomo 1.

[18] SEARS, Francis W.; ZEMANSKY, Marck W. FISICA. Colección Ciencia y Técnica. AGILAR. 1966

[19] SERWAY, Raymond A. FISICA. James Madison University. Cuarta Edición. Tomo I. MCGRAW HILL. 1997

[20] Calderas

<http://www.caballano.com/calderas.htm>

[21] ME, MSc. MEZA, Jair I; PhD, MSc HUERTAS, José I., ME. Evaluación del Rendimiento de Calderas Convertidas a Gas Natural. *Grupo de Investigación en Energías Alternativas y Fluidos EOLITO. Universidad Tecnológica de Bolívar.*

[22] RODRÍGUEZ GERRERO, Gonzalo. Generalidades Calderas Acuotubulares. Universidad Autónoma de Occidente. Dirección de Extensión Departamento de Educación Continua

[23] Normatividad Incauca. Cod R-611-001. Generación de Vapor. *Edición No.5 Agosto/2007.*

[24] BORROTO NORDELO, Anibal E. Ahorro de Energía y Sistemas de Vapor. . Centro de estudios de energía y medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos. Cuba. 2002

5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Se determinaron las condiciones más adecuadas para presentar una propuesta que permita optimizar el uso del carbón y bagazo como fuentes de energía en el proceso de generación de vapor de las calderas de INCAUCA S.A. con el fin de obtener altas eficiencias energéticas y económicas, controlando además el impacto ambiental que los combustibles generan.

Para estructurar un modelo práctico y económico en cuanto al consumo de combustibles, se partió del análisis de sus propiedades fisicoquímicas³ y de las variables operativas que influyen en la eficiencia de la caldera

5.1. USO DE LOS COMBUSTIBLES

Para obtener las condiciones más adecuadas de operación y plantear una propuesta que permita optimizar el uso del carbón y bagazo, se hizo necesario estudiar las características fisicoquímicas de las diferentes minas con el fin de determinar las mezclas adecuadas de carbón para ser utilizadas como combustible en las calderas de la planta de INCAUCA S.A. y con base en esto establecer un modelo que sea aplicable y que mantenga estables la combustión y el intercambio de calor, con un rendimiento económico superior.

³ El análisis fisicoquímico se realizó con base a las Normas de Calidad de Conformidad en los combustibles de INCAUCA S.A

Con el fin de obtener altos rendimientos energéticos y económicos y disminuir el impacto ambiental que los combustibles generan, era necesario realizar tanto un análisis próximo como elemental para determinar de forma independiente, el porcentaje de humedad, cenizas, volátiles, azufre y poder calórico para cada mina. Sin embargo, debido a la heterogeneidad de los carbones (cada viaje presenta composiciones diferentes), se utilizaron los valores promedios por minas para este análisis. [1]

Como todo el carbón que llega a INCAUCA S.A. debe ser almacenado para después mezclarlo y depositarlo en la mesa de alimentación de las calderas, se debe tener en cuenta el volumen de dicha bodega de carbón (Anexo 1). Al analizar estas dimensiones se concluye que para un mejor aprovechamiento del combustible, es conveniente, debido a la similitud que tienen las propiedades fisicoquímicas de algunas minas, separarlas de acuerdo a su lugar de procedencia, es decir, almacenar por aparte los carbones de Valle y los de carretera. Por lo tanto fueron estos los promedios que inicialmente se tuvieron en cuenta:

Minas de Valle: Vitonas (El Descanso), Las Mercedes, Inducarbón

Minas de Carretera: Somineros, Cooarbon, Excarbon, Planterra

Al hacer esta separación se realizaron análisis proximales sobre diferentes mezclas entre las minas de Valle y Carretera, sin embargo, al estudiar las minas del Valle se observó que la mina Vitonas (El Descanso) presenta características mejores en relación con las otras minas pertenecientes al mismo sector, por lo tanto se optó por hacer los análisis entre Vitonas-carretera y Valle(Propal)-carretera.

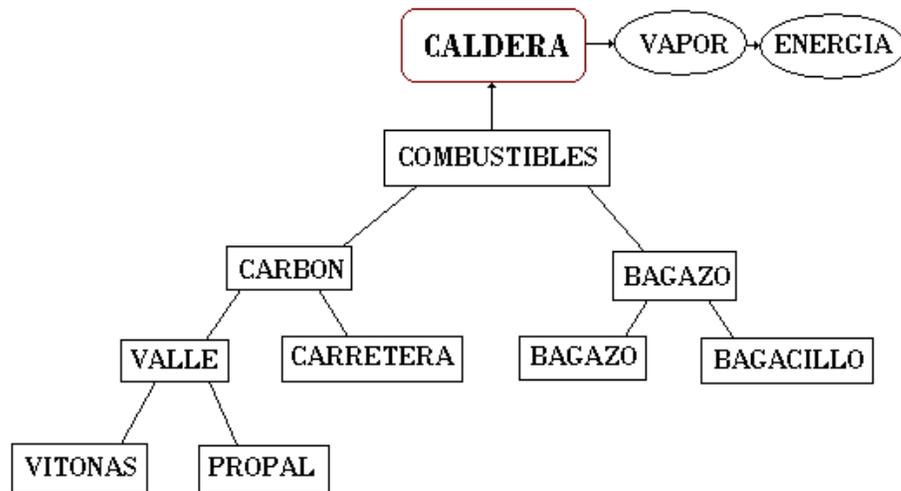


Figura 5.1. Combustibles usados en las calderas

5.1.1. ASPECTOS FISICOQUIMICOS

Las mezclas deben cumplir con parámetros fisicoquímicos tales, como tener un poder calórico en los carbones superior a 10.800 BTU, debido que por debajo de este valor se ve afectada la eficiencia de la combustión dentro del hogar, e inferior a 12.000 BTU porque con poderes caloríficos tan altos se funde o daña la parrilla que soporta el combustible. Además desde el punto de vista ambiental, se debe cumplir con las “NORMAS DE CALIDAD DEL CARBÓN MINERAL” las cuales expresan que el contenido de azufre de las mezclas de combustibles usados en las calderas debe ser menor a 1.5%. [2]

5.1.2. PARAMETRO DE PRODUCCIÓN DE VAPOR

También se debe garantizar que con las mezclas planteadas se pueda cumplir con la demanda de vapor que requiere el Ingenio, tanto para suplir sus necesidades dentro de la planta como para la producción de energía eléctrica para la venta.

5.1.3. ASPECTO ECONÓMICO

La mezcla debe ser rentable tanto económica como energéticamente, motivo por el cual se debe utilizar mayor cantidad de bagazo y bagacillo pues no representan ningún costo para el Ingenio.

En cuanto a los carbones, para plantear una propuesta aplicable en las calderas de Incauca, es de gran importancia que las mezclas no solo posean las características fisicoquímicas apropiadas, sino que también sean rentable económicamente, para ello hay que tener en cuenta algunos aspectos: Incauca cuenta con carbón extraído de varios departamentos, entre ellos Valle, Cundinamarca y Antioquia y cada uno presenta precios diferentes, que dependen del lugar de extracción, de las características fisicoquímicas y del costo de transporte. [3]

Otro aspecto por el cual el precio de los carbones varía, es debido a un convenio de intercambio que maneja Incauca con Propal, donde intercambian carbón por fibra de bagazo de caña y los precios dependen de la calidad de dichas materias primas. [4]

Tabla 5.1. Requerimientos para la mezcla de combustibles a usar en las calderas

ASPECTO FISICOQUIMICO	<ul style="list-style-type: none">• El carbón de alimentación debe tener un poder calórico entre 10.800 y 12.000 BTU.• El contenido de azufre en las mezclas de combustibles debe ser inferior a 1.5 % [2]
PRODUCCION DE VAPOR	Cumplir con la demanda de vapor requerida por el Ingenio.
ASPECTO ECONÓMICO	<ul style="list-style-type: none">• Usar la mayor cantidad de bagazo.• La mezcla de carbones debe ser rentable económicamente

5.2. EFICIENCIA DEL PROCESO

El objetivo principal de conocer la eficiencia del proceso es evaluar la efectividad de la mezcla de los combustibles a ser usada en las calderas.

Para determinar la eficiencia del proceso es preciso conocer los diferentes valores de las variables operacionales que influyen en el correcto desempeño de las calderas.

5.2.1. VARIABLES OPERACIONALES

Las variables operacionales más importantes y de las cuales puede depender la eficiencia de cada caldera son: [5]

Temperaturas: Entre las que se encuentran la temperatura final de vapor, de agua de alimentación, de los gases de entrada y salida del calentador, y del aire entrada y salida del calentador

Presiones: Tales como, presión en el cabezal de salida y del hogar

Porcentaje de exceso de oxígeno en los gases

Respecto a las variables operacionales mencionadas anteriormente, las calderas han sido fabricadas con unos valores nominales para cada una, sin embargo es necesario conocer los valores reales a los cuales operan para determinar si difieren y como se puede ver afectado el proceso debido a su variación; para ello se realiza un seguimiento diario de las variables que influyen en la correcta operación de las calderas

Entre las variables que afectan la eficiencia y el correcto funcionamiento de las calderas se encuentran los flujos de entrada de combustibles, lo cual no se tenía

ninguna forma de medición y por lo tanto era una variable desconocida y no controlada.

5.2.1.1. Flujo de Carbón

El carbón es suministrado por diferentes minas al Ingenio y es transportado por medio de volquetas y tracto mulas las cuales son descargadas en la bodega. Después el carbón es llevado a la mesa de alimentación, la cual esta compuesta por una tolva acoplada a una zaranda, donde el carbón cae gracias a un movimiento vibratorio a través de una malla de 2 pulgadas de apertura hacia los conductores de carbón, desde los cuales se distribuye hacia las tolvas de alimentación de las calderas “Distral 3” y “Distral 4”

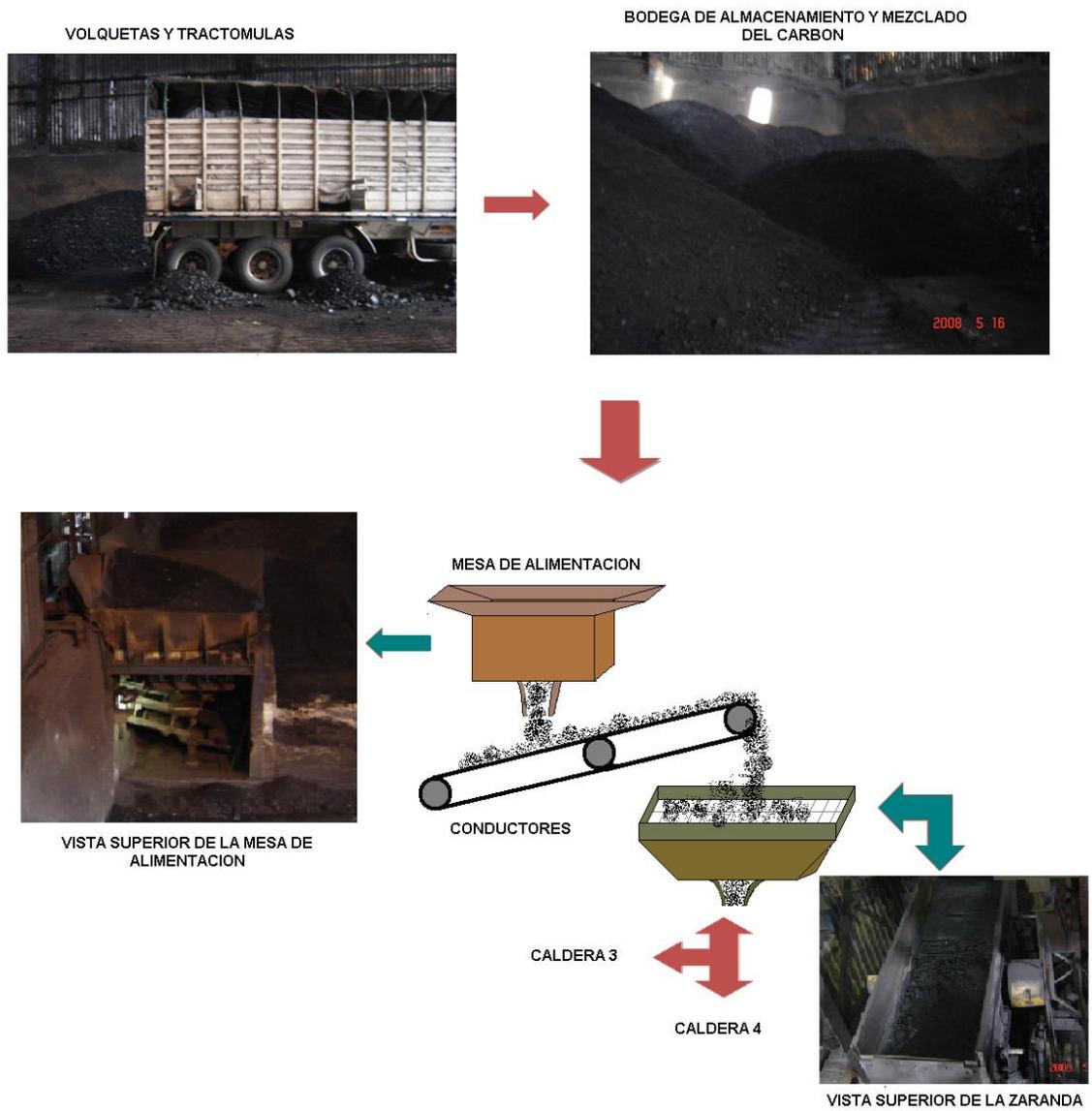


Figura 5.2. Salida del carbón desde la bodega hacia las calderas.

5.2.1.1.1. Caldera Distral 3

El carbón que llega a la caldera D3, cae a través de la tolva de alimentación a la banda transportadora que lo conduce por medio de dos tornillos sin fin que son los encargados de distribuirlo sobre la parrilla.

Para conocer el flujo de carbón que entra a la caldera en un tiempo determinado se utilizó un horómetro que esta acoplado al motor de la banda transportadora, el cual mide el tiempo de operación de esta, debido a que el control que se realiza sobre el flujo de carbón esta basado en el tiempo de funcionamiento del motor que mueve la banda transportadora.

Con el fin de determinar el flujo se hizo necesario conocer la cantidad de carbón que ocupa un metro de banda y el tiempo que tarda en ser transportado, para conocer la velocidad a la que se mueve la banda transportadora y poder determinar el flujo de entrada.

Usando la siguiente relación para determinar el flujo de carbón [6]:

$$\dot{m} = \frac{\textit{masa}}{\textit{tiempo}}$$

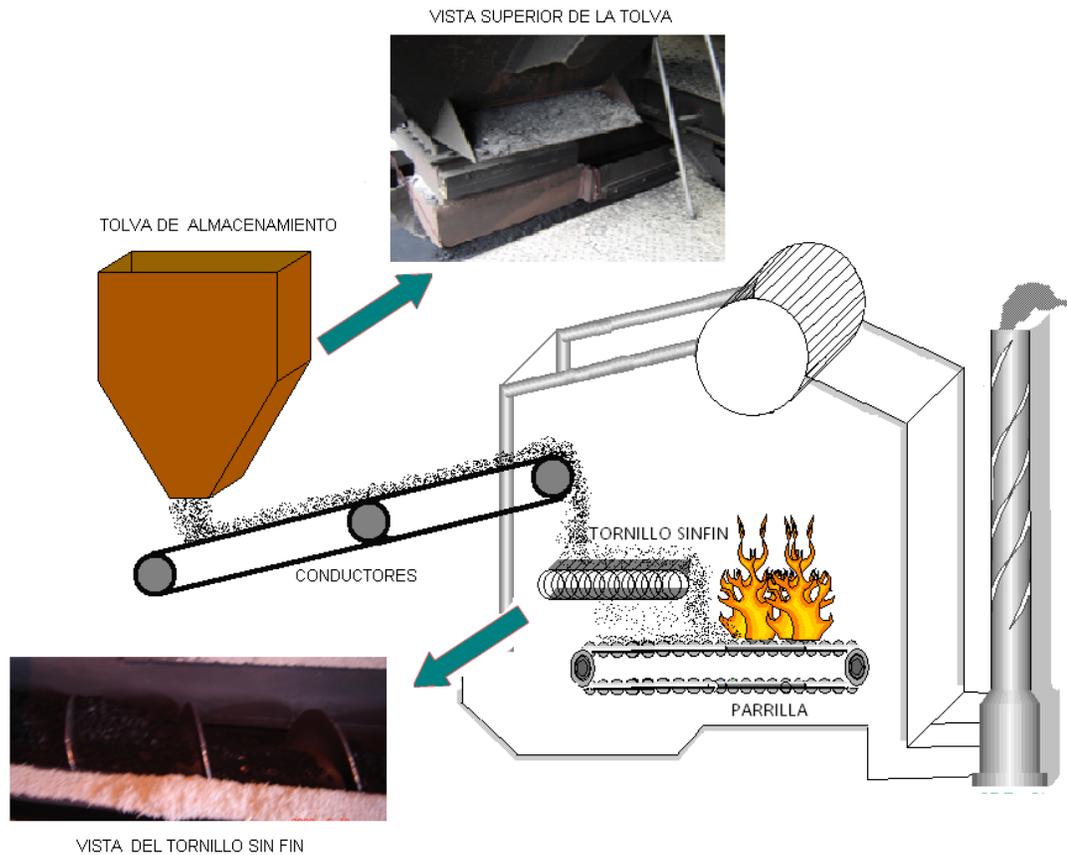


Figura 5.3. Caída del carbón en la caldera Distral 3

5.2.1.1.2. *Caldera Distral 4*

El carbón que es suministrado a la caldera D4, llega primero a dos tolvas de alimentación, las cuales lo depositan en sus respectivas bandas transportadoras para después conducirlo a la caldera por medio de dos tornillos sin fin que ayudan a distribuir el carbón sobre la parrilla.

Se midieron las diferentes velocidades a las que trabaja cada una de las bandas transportadoras, debido a que el control sobre el flujo de entrada del carbón se hace variando la frecuencia del motor que esta acoplado a cada banda, se debía determinar de forma independiente, el tiempo que tarda en recorrer un metro de

distancia cada una de las bandas, de acuerdo a sus frecuencias de trabajo. También se requería conocer la cantidad de carbón que ocupa un metro de banda y así, conociendo el tiempo de recorrido y la masa, poder determinar el flujo de entrada del carbón.

Sabiendo la masa transportada y las velocidades de acuerdo a la frecuencia de trabajo, se utilizó un horómetro que esta acoplado a cada motor de las bandas transportadoras, el cual mide su tiempo de operación, para así poder conocer el flujo del combustible durante un tiempo determinado.

En este caso se usa la relación [6]:

$$\dot{m} = \frac{\text{masa}}{\text{tiempo}}$$

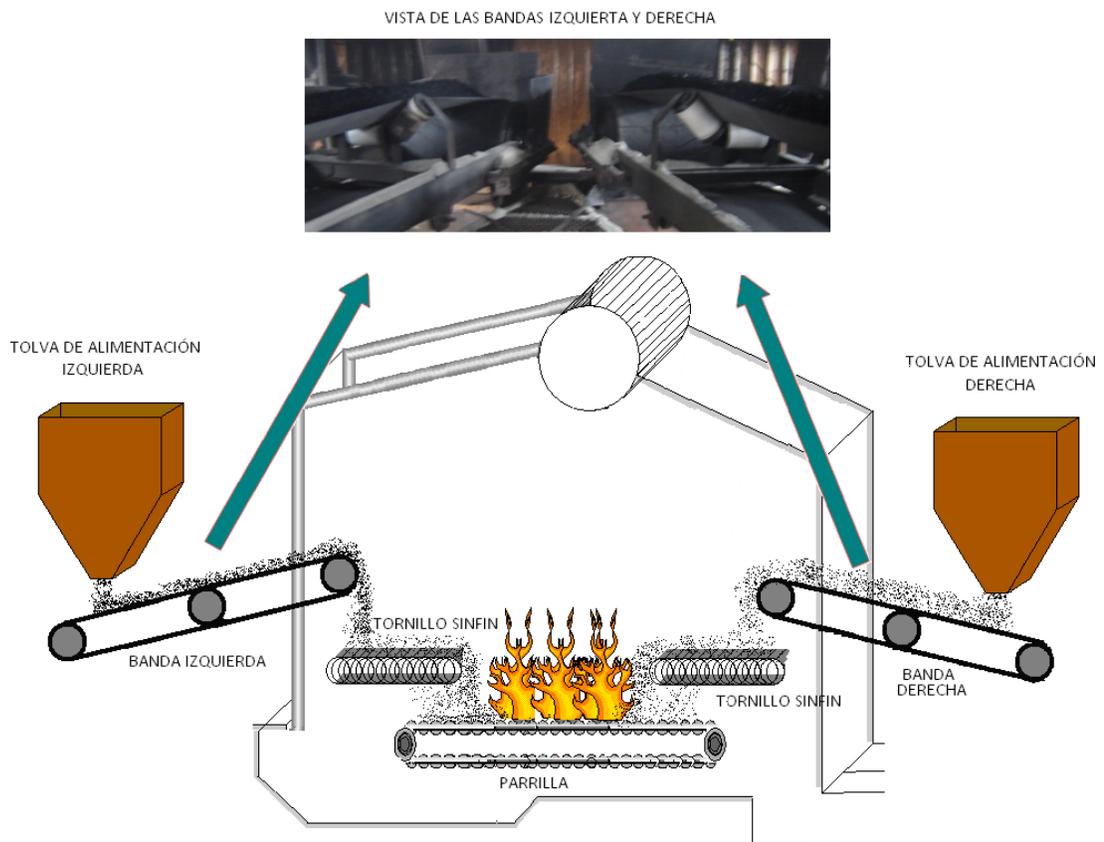


Figura 5.4. Caída del carbón en la caldera Distral 4

5.2.1.2. Flujo de Bagazo

El bagazo es un subproducto generado en la extracción del jugo de la caña de azúcar en los molinos. Una vez obtenido este subproducto es enviado directamente a las cuatro calderas a través de los conductores de bagazo. Es distribuido desde el molino Fulton II hacia la caldera Distral 4 y seguidamente a la Distral 3, las calderas Distral 2 y Distral 1 son abastecidas en su orden, con el bagazo generado en el molino Farrel.

Gracias a unos orificios que poseen los conductores de tablillas, el bagazo cae hacia los chutes, los cuales lo acumulan para ir depositándolo a la caldera a través de unas paletas que se encuentran acopladas a los motores que le imprimen la velocidad necesaria para introducir el bagazo requerido para mantener las condiciones de la caldera.

Para conocer el flujo de bagazo en cada una de las calderas se determinó el volumen de los chutes para determinar la cantidad de bagazo presente de acuerdo con la densidad aparente del bagazo. Después se determinó el tiempo necesario para desalojar el chute de acuerdo a las diferentes velocidades a las que trabajan los motores.

Con los datos de volumen, densidad (ρ) y tiempo de desalojo, se recurre a las siguientes relaciones [6]:

$$Masa = \rho * Volumen$$

$$\dot{m} = \frac{masa}{tiempo}$$

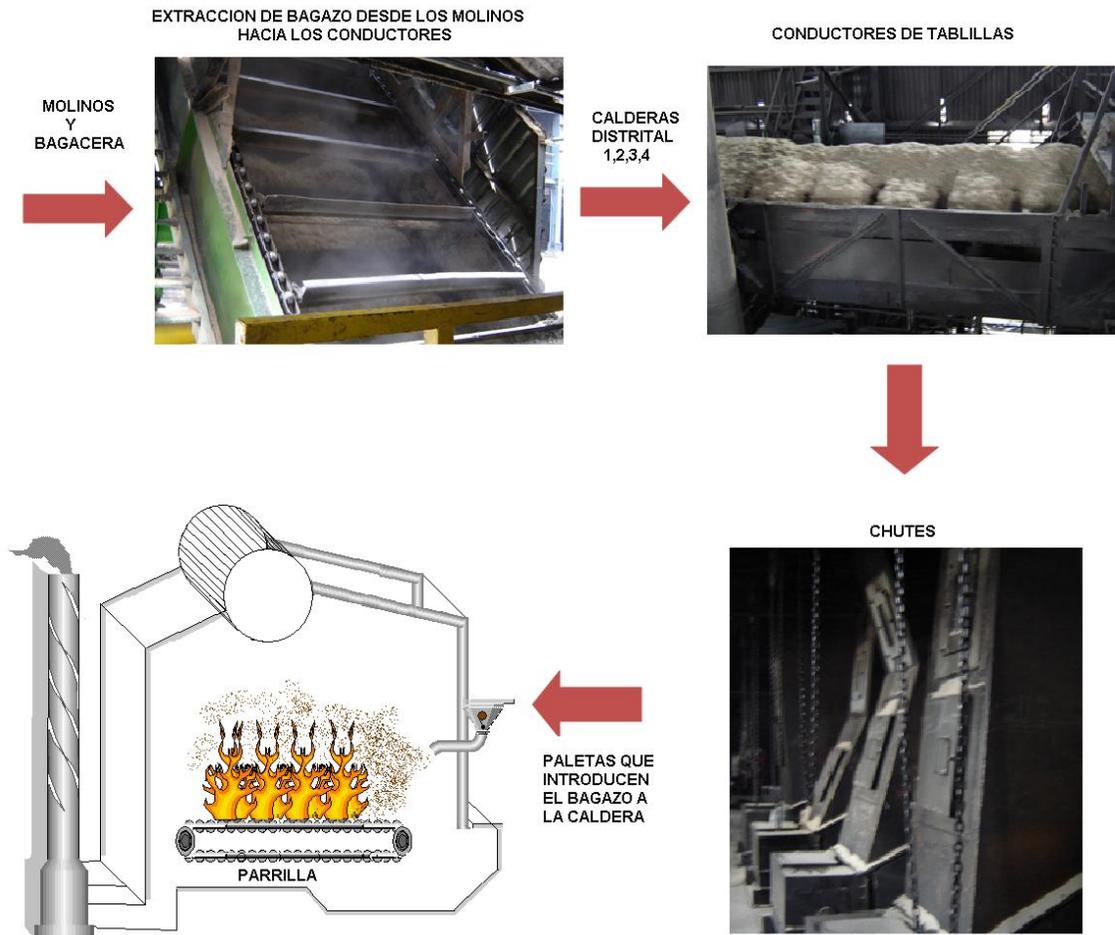


Figura 5.5. Alimentación del bagazo en las calderas.

5.2.1.2.1. *Alimentadores de Bagazo*

DISTRAL 1: Cinco alimentadores de bagazo y un motor hidráulico para variar la velocidad

DISTRAL 2: Cinco alimentadores de bagazo y un motor hidráulico para variar la velocidad

DISTRAL 3: Cuatro alimentadores y dos motores que varían la velocidad de entrada del bagazo. Llamados motor hidráulico y de bías⁴.

⁴ Nombre asignado en Incauca a uno de los motores para diferenciarlo

DISTRAL 4: Cuatro alimentadores de bagazo y un motor hidráulico para variar la velocidad

5.2.1.3. Flujo de Bagacillo

El bagacillo es el polvillo del bagazo, el cual es retornado por la planta de Propal después de ser tratado y de haber extraído la fibra requerida por la empresa.

El bagacillo es retornado por medio de bandas transportadoras, para ser suministrado inicialmente a la caldera Distral 4 y después a la Distral 3. Es transportado por medio de conductores de tablillas que lo llevan hasta los tornillos sin fin, los cuales lo suministran directamente a las calderas, la cantidad de bagacillo que entra a las calderas es proporcional a la cantidad de bagazo que se envía a la planta de Propal para ser desmedulado, lo que depende del porcentaje de apertura de las compuertas de recepción de bagazo.

En cada uno de los tornillos sin fin que poseen las dos calderas que son alimentadas con bagacillo, se midió la cantidad de polvillo que cae en un tiempo determinado, dependiendo del porcentaje de apertura en las compuertas de recepción de bagazo en la planta de Propal. Con estos datos se usa la siguiente relación para determinar el flujo de bagacillo [6]:

$$\dot{m} = \frac{\textit{masa}}{\textit{tiempo}}$$

PLANTA DESMEDULADO DE PROPAL Y BANDAS TRANSPORTADORAS QUE RETORNAN EL BAGACILLO



CONDUCTORES DE TABLILLAS



TORNILLOS SIN FIN PARA SUMINISTRAR EL BAGACILLO

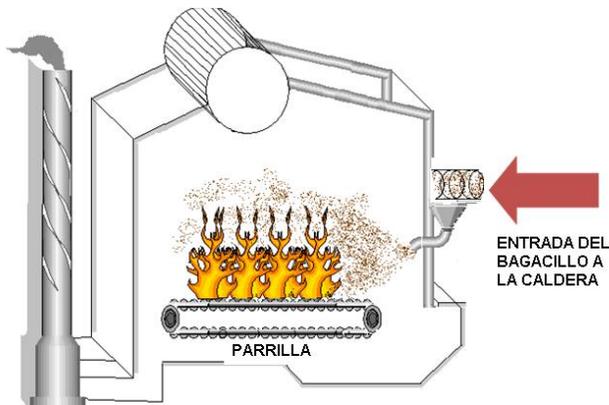


Figura 5.6. Alimentación del bagacillo en las calderas.

5.2.1.3.1. *Alimentadores de Bagacillo*

DISTRAL 3: Cuatro alimentadores de bagacillo.

DISTRAL 4: Cuatro alimentadores de bagacillo.

5.2.2 EFICIENCIA DEL QUEMADO DEL COMBUSTIBLE

Con el fin de determinar la eficiencia de la combustión se deben conocer las variables tanto de entrada como de salida que tienen gran influencia en esta reacción. Entre estas variables se encuentran los flujos, el poder calórico y las cenizas de los combustibles y de los residuos o cenizas de combustión.

A todas las cenizas generadas por cada una de las calderas se le hicieron los respectivos análisis fisicoquímicos.

Los flujos de salida de cenizas son determinados de forma teórica y experimental. De forma teórica se hace teniendo en cuenta la ley de conservación de la masa [7], donde la parte inerte o el porcentaje en cenizas del combustible se debe mantener constante, debido a que no va a reaccionar. Para ello se usa la siguiente relación:

$$\dot{m}_{comb} * \%Cenizas_{comb} = \dot{m}_{cenz} * \%Cenizas_{cenz}$$

Donde:

\dot{m}_{comb} = Flujo del combustible

$\%Cenizas_{comb}$ = Porcentaje de cenizas en el combustible

\dot{m}_{cenz} = Flujo de los residuos

$\%Cenizas_{cenz}$ = Porcentaje de cenizas en los residuos

Para determinar el flujo de forma experimental se hizo de acuerdo a la cantidad de residuos obtenidos en un tiempo determinado [7].

Teniendo estos datos importantes se realizaron los cálculos para determinar la eficiencia de la combustión de acuerdo a dichas variables. Para ello se usó la siguiente relación:

$$\%Ef = \frac{\dot{m}_{comb} * PC_{comb} - \dot{m}_{cenizas} * PC_{cenizas}}{\dot{m}_{comb} * PC_{comb}}$$

Donde:

$\%Ef$ = Porcentaje de eficiencia

\dot{m}_{comb} = Flujo del combustible

PC_{comb} = Poder calórico del combustible

$\dot{m}_{cenizas}$ = Flujo de los residuos

$PC_{cenizas}$ = Poder calórico de las cenizas

5.2.2.1. Producción de Residuos

La producción de residuos depende de la forma como se obtengan.

DISTRAL 1 Y DISTRAL 2: Poseen dos tipos de cenizas de combustión, uno a través de la parrilla, la cual es limpiada manualmente cada 4 horas y las de multiclación que salen junto con los gases de combustión y son acumuladas en una tolva llamada tolva de cenizas.

DISTRAL 3: También posee dos tipos de cenizas de combustión, las de multiclación que salen junto con los gases de combustión y son acumuladas en la tolva de cenizas y las de la parrilla móvil, la cual elimina constantemente las cenizas hacia una banda transportadora que las lleva a la tolva de cenizas.

DISTRAL 4: Posee varios tipos de cenizas de combustión, las de multiclación que salen junto con los gases de combustión y son acumuladas en la tolva de cenizas, las del precipitador que son las cenizas que recupera el precipitador electrostático de los gases de combustión que van hacia la atmósfera y las de la parrilla, la cual

es una parrilla móvil y elimina constantemente las cenizas hacia la tolva de cenizas.



Figura 5.7. Residuos generados por las calderas.

5.2.3. EFICIENCIA DE LAS CALDERAS

En el cálculo de la eficiencia de las calderas se tuvieron en cuenta los flujos de entrada de los combustibles, la temperatura de entrada tanto del aire como del agua de alimentación y la temperatura de los gases de combustión, para hacer un balance de materia y energía y así determinar la cantidad teórica de vapor que debe producirse en cada caldera [5].

Por lo tanto, se determinó el aire teórico que debe ser usado de acuerdo a la cantidad de combustible y a su composición estequiométrica, sin embargo, es necesario tener en cuenta que para llevar a cabo una mejor combustión se debe manejar cierta cantidad de exceso de aire, el cual varía de acuerdo a las condiciones de cada caldera. Bajo estas condiciones se determina la cantidad real de aire que debe ser suministrado, teniendo en cuenta su humedad, para lo cual

se utiliza la carta psicrométrica que define la cantidad de agua existente en el aire, de acuerdo a la temperatura del aire y la humedad del ambiente.

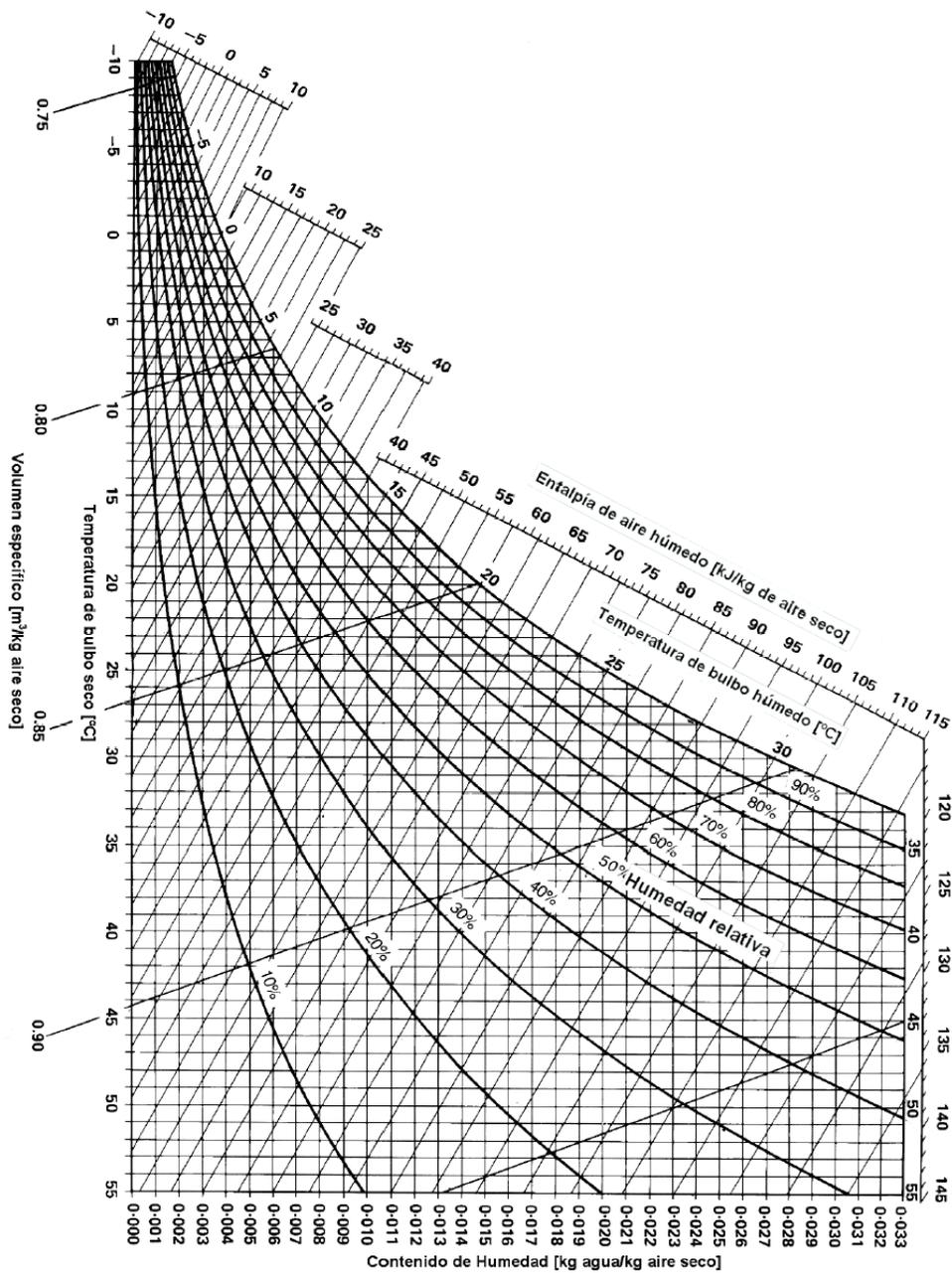


Figura 5.7. Carta psicrométrica. [8]

Con el fin de determinar la cantidad teórica de vapor producido se deben conocer las entalpías de cada uno de los gases de combustión, para ello se usa la ecuación para el calor específico a presión constante de diferentes gases y teniendo en cuenta la temperatura de salida, se determino su entalpía por medio de la siguiente ecuación [9].

$$C_p/R_u = a + bT + cT^2 + dT^3 + eT^4$$

Tabla 5.2. Constantes de los gases para la ecuación de calor específico a presión constante de diferentes gases. [9]

Gas	A	b x 10 ³	c x 10 ⁶	d x 10 ⁹	e x 10 ¹²
CO	3.710	-1.009	1.140	-0.348	0.0229
CO ₂	2.401	4.853	-2.039	0.343	-0.1726
H ₂	3.057	1.487	-1.793	0.947	0.0769
H ₂ O	4.070	-0.616	1.281	-0.508	0.2054
O ₂	3.626	-1.043	2.178	-1.160	-0.0215
N ₂	3.675	-0.671	0.717	-0.108	
Aire (seco)	3.640	-0.617	0.761	-0.162	
NH ₃	3.591	0.274	2.576	-1.437	0.2601
NO	4.046	-1.899	2.464	-1.048	0.1517
NO ₂	3.459	1.147	2.064	-1.639	0.3448
SO ₂	3.267	2.958	0.211	-0.906	0.2438
SO ₃	2.578	8.087	-2.832	-0.136	0.1878
CH ₄	3.826	-2.211	7.580	-3.898	0.6633
C ₂ H ₂	1.410	10.587	-7.562	2.811	-0.3939
C ₂ H ₄	1.426	6.324	2.466	-2.787	0.6429

Con los datos anteriores y de acuerdo a la tabla de cálculos de combustión, se aproximaron las pérdidas por radiación al 0.2 % y por calor cedido al ambiente de

un 1.5% del calor de combustión generado en el hogar, a continuación se realizó un programa que determina la producción de vapor, de acuerdo a las variables mencionadas, para poder determinar cuanto difiere la producción real de la teórica y así conocer la eficiencia del proceso.

Se determinaron los valores teóricos de producción de vapor en cada caldera, teniendo en cuenta los promedios de flujo de combustibles y los valores promedio de las variables operacionales, generados durante el trabajo continuo de las calderas para compararla con la producción real obtenida.

Finalmente se analizaron datos puntuales, es decir, de acuerdo a los datos diarios obtenidos se determinó cual es la producción teórica y se comparó con la generación de vapor obtenida para dicho día.

Tabla 5.2. Cálculos de combustión

Pérdidas por 10.000 Btu de Combustible Introducido	
Inquemados en el combustible	40 Btu
Perdidas desconocidas	150 Btu
Pérdidas por radiación	80 Btu
Calor latente, H ₂ O en el combustible	312 Btu
Calor sensible, gases de combustión	495 Btu
Total perdidas	1.077 Btu
Total perdidas en porcentaje	10.8 %

5.3. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] Análisis Mensual del Carbón por Mina. Calidad de Conformidad. INCAUCA S.A
- [2] Colombia. Ministerio del Medio Ambiente. Resolución 898 del 23 de agosto de 1995. Capitulo II. Normas de Calidad del Carbón Mineral.
- [3] Facturas liquidación por minas. INCAUCA
- [4] Liquidación de Fibra Apta y Carbón Sustituto para Bagazo Pretratado Humedo. INCAUCA.
- [5] Babcock & Wilcox. Steam. Its Generation and Use. New York .1972
- [6] SEARS, Francis W.; ZEMANSKY, Marck W. FISICA. Colección Ciencia y Técnica. AGILAR. 1966
- [7] SERWAY, Raymond A. FISICA. James Madison University. Cuarta Edición. Tomo I. McGRAW HILL. 1997
- [8] Colombia. Ministerio de trabajo y seguridad Social. Sistema General de Riesgos Profesionales. Reglamento Técnico para Exposición a Sobrecarga Térmica.
- [9] WARK, Kenneth. Termodinámica. Cuarta edición. Mc Graw Hill.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el fin de determinar la mezcla adecuada de combustibles se hizo un análisis económico, energético y medio ambiental.

6.1. PROPUESTA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL USO DE LOS COMBUSTIBLES

Plantear una propuesta para el uso de los combustibles requiere conocer las características con las cuales son introducidos en las calderas.

El bagazo sale de los molinos directamente hacia las calderas para ser suministrado como combustible, sin alterar sus características.

El carbón que se usa para alimentar las calderas es una mezcla generalmente de 1 a 1 entre los carbones del Valle y carretera.

6.2. SITUACION ACTUAL

6.2.1. DESCRIPCIÓN CALDERAS INCAUCA

En las calderas de Incauca, los combustibles principales para la generación de vapor sobrecalentado son el carbón y el bagazo; los cuales son transportados a la caldera por medio de los conductores que posteriormente lo depositan en los

alimentadores de carbón y en los alimentadores de bagazo, para ser introducidos a las parrillas donde se realiza la combustión. Las calderas de Incauca son acuotubulares, es decir que el sistema de alimentación hace circular el agua por el interior de tubos y en el exterior de estos circulan con la ayuda del ventilador de tiro inducido los gases producidos por la combustión, transmitiendo al agua la energía térmica necesaria y producir la diferencia de densidad entre el agua fría que entra y la mezcla vapor/agua caliente que sale para transformar su estado de líquido a vapor sobrecalentado y distribuirlo a las turbomáquinas. (Figura 1) [1]

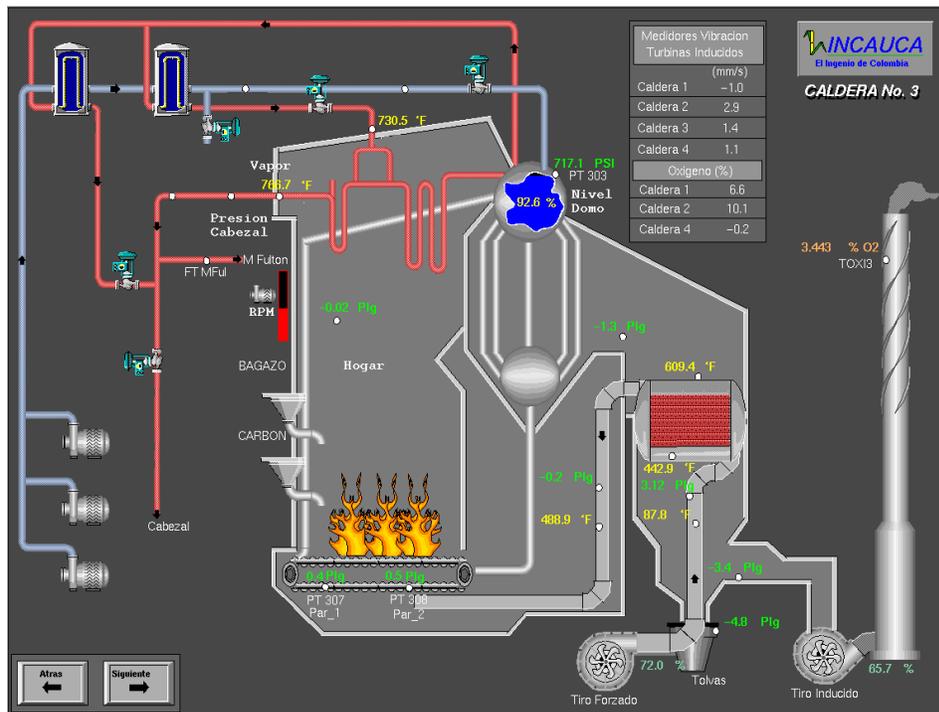


Figura 6.1. Caldera de Incauca (Distral 3). [1]

6.2.2. CONSUMOS DE LOS COMBUSTIBLES

De acuerdo al estudio realizado durante aproximadamente un mes y medio, se determinaron promedios de consumo de combustibles en condiciones normales de operación de las calderas, obteniendo los siguientes rangos:

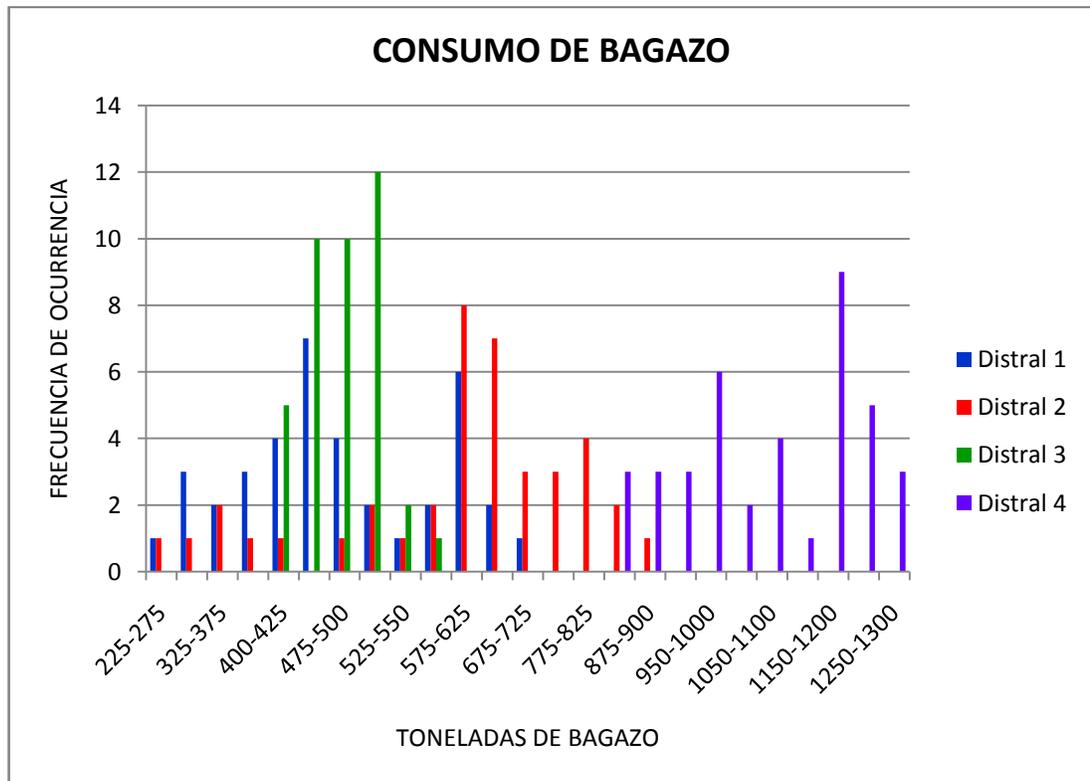


Figura 6.2. Consumo de bagazo en las calderas de Incauca

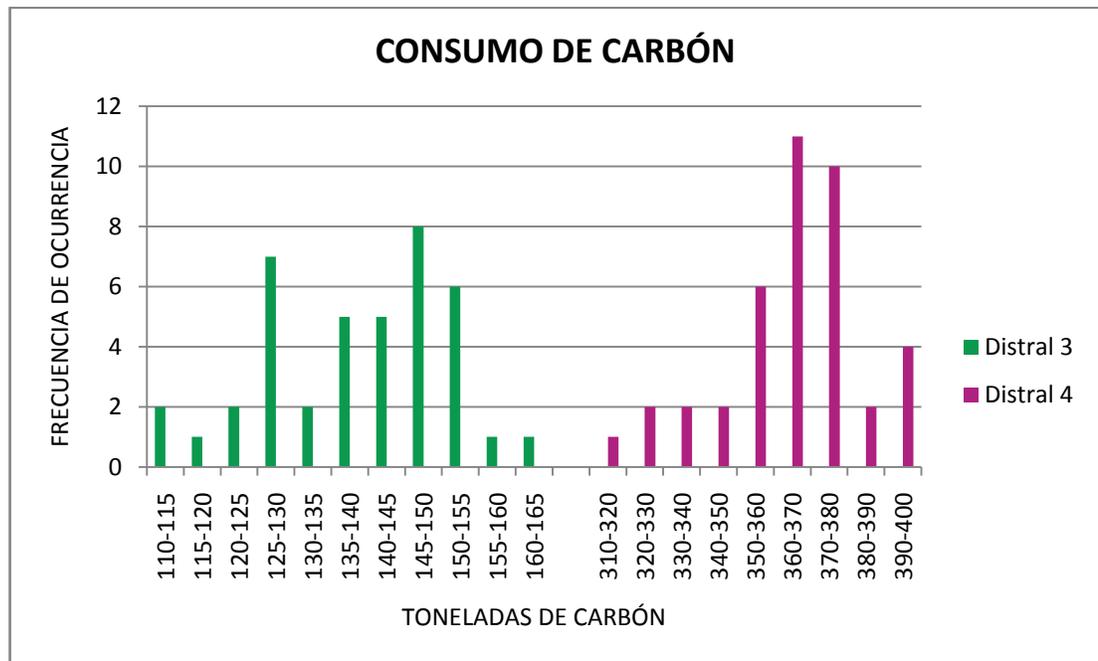


Figura 6.3. Consumo de carbón en las calderas de Incauca

También se determinaron los porcentajes de carbón presentes en el combustible suministrado a las calderas.

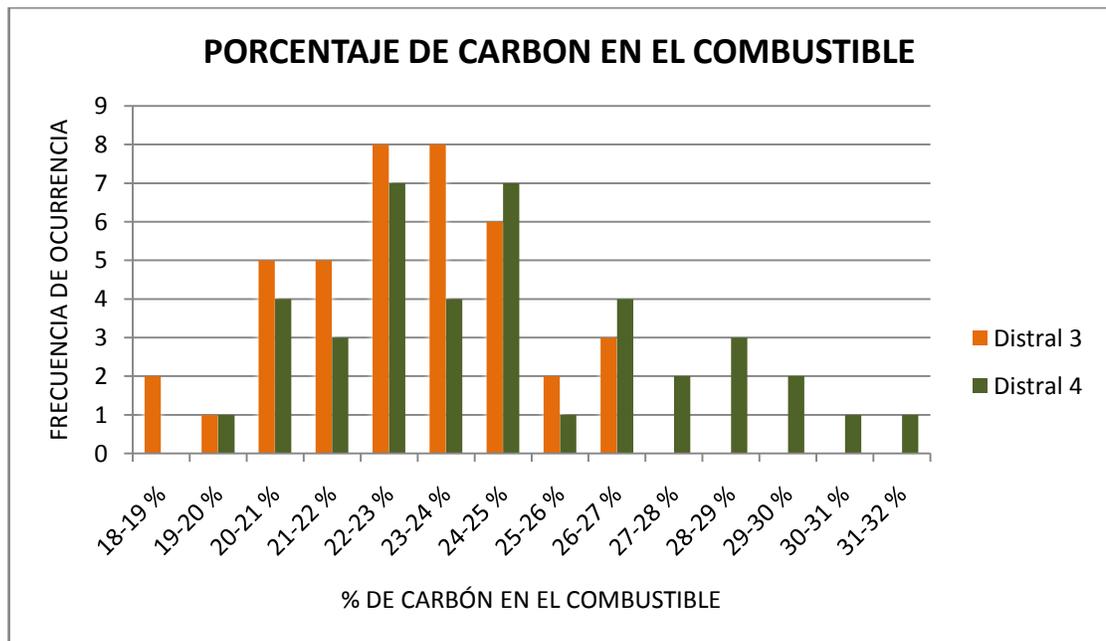


Figura 6.4. Porcentaje de carbón usado en las calderas de Incauca

6.2.3. CALDERAS DE INCAUCA

Tabla 6.1. Características principales de calderas de Incacuca [2].

CALDERA	PRODUCCION (LB/H)	PRESIÓN (PSI)	CONSUMO CARBÓN (TON)	CONSUMO BAGAZO (TON)
DISTRAL 1	150.000	275	0	450
DISTRAL 2	150.000	275	0	600
DISTRAL 3	200.000	650	140	500
DISTRAL 4	300.000	650	360	1100

6.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LOS COMBUSTIBLES EMPLEADOS

Se requiere conocer las características con las cuales son ingresados los combustibles a las calderas para poder plantear una propuesta en cuanto a su uso.

6.3.1. BAGAZO

El bagazo sale de los molinos directamente hacia las calderas para ser utilizado como combustible, sin alterar sus características. El bagacillo es retornado desde la planta de desmedulado de Propal, para ser suministrado directamente a las calderas.

Sin embargo, en este estudio se toman el bagazo y el bagacillo como un todo, debido a que de acuerdo al estudio realizado durante varios días se determinó que

la diferencia entre sus características fisicoquímicas es mínima, por lo tanto se tienen en cuenta sus promedios.

Tabla 6.2. Características fisicoquímicas del bagazo y el bagacillo. [3]

	BAGAZO	BAGACILLO	PROMEDIO
% HUMEDAD	50.88	50,91	50,9
% VOLÁTILES	79.64	74,5	77.07
% CENIZAS	11.91	15,81	13.86
% AZUFRE	0.12	0,08	0.1
P. CALORICO (BTU/LB)	7.885	6.827	7.356

6.3.2. CARBÓN

El carbón que se usa para alimentar las calderas es una mezcla generalmente de 1 a 1 entre los carbones del Valle y los de carretera.

6.3.2.1. Carbón de Alimentación

Con el fin de determinar las características, se hizo un muestreo del carbón de alimentación durante dos meses. Con estos datos se obtuvo un variado rango de valores para el poder calórico, que van desde 10445 BTU/lb hasta 12056 BTU/lb. En cuanto al porcentaje de azufre, se obtuvo un rango desde 1.57 hasta 3,15 %.

Tabla 6.3. Promedio de las características fisicoquímicas del carbón de alimentación.

% Humedad	% Cenizas	% Volátiles	% Azufre	Poder Calórico Btu/lb
5,72	23,23	29,74	2,06	11.614

Por lo tanto este es el rango promedio entre el cual se buscan las características de las mezclas a proponer.

6.3.2.2. Costos

Inicialmente se parte de que el Ingenio usa una relación entre los carbones de Valle y carretera de 1 a 1, sin embargo, al realizar el análisis económico y de acuerdo a las compras mensuales se tiene una relación promedio de 1.61 a favor del carbón de carretera. Esta relación se determinó del siguiente estudio.

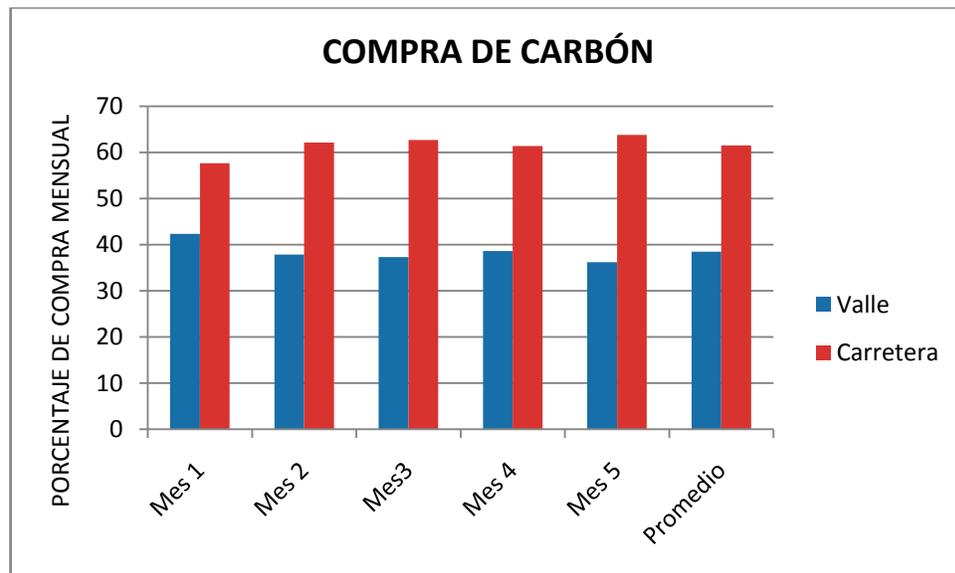


Figura 6.5. Porcentaje de los carbones de Valle y carretera consumidos por Incauca mensualmente [4] [5].

Lo que produce los siguientes costos mensuales para el Ingenio (Anexo 2), incluyendo también el costo del carbón que suministra Propal por medio del convenio de intercambio existente:

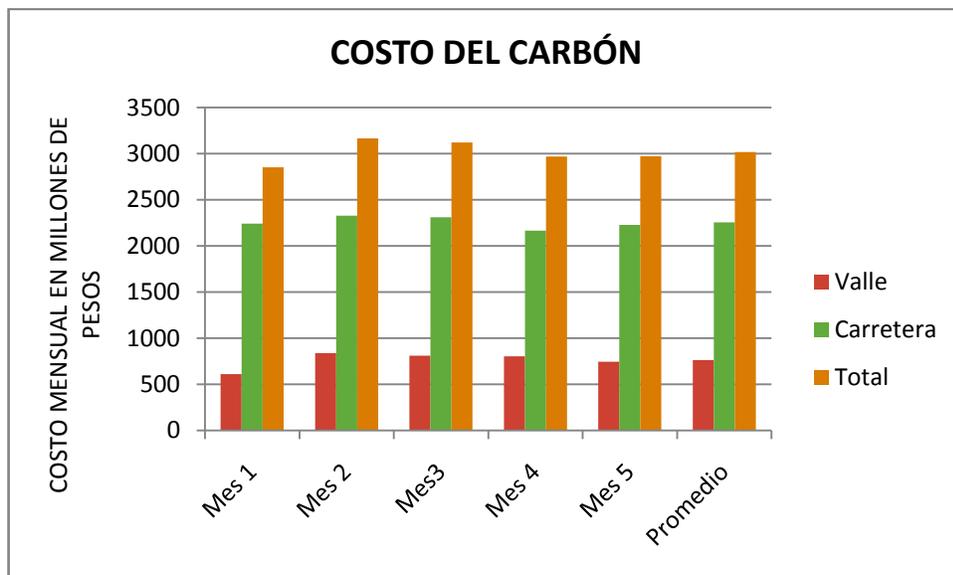


Figura 6.6. Costo del carbón consumido por Incauca mensualmente [4] [5].

6.3.2.2.1. Costo Actual por Libra de Vapor

Teniendo en cuenta que actualmente las calderas Distral 3 y Distral 4 consumen aproximadamente 500 ton de carbón diarias, y de acuerdo a la compra promedio mensual (Anexo 2), se deben suministrar diariamente 263.25 Ton de carbón con un costo de \$ 25.635.839, más 241.8 Ton que suministra Propal a través del convenio de intercambio con el Ingenio por un costo de \$ 25.793.337. Lo que equivale a un costo diario de \$ 51.429.176 por 505.05 Ton de carbón. Por lo tanto el costo por tonelada de carbón es de \$ 101.829.

DISTRAL 1 Y 2: Producen 150.000 lb/h de vapor, usando como combustible solo bagazo, por lo tanto no genera ningún costo para el ingenio.

DISTRAL 3 y 4: La caldera “Distral 3” produce 4.800.000 lb de vapor al día y la “Distral 4” 7.200.000 lb/día, es decir, entre las dos calderas que trabajan con bagazo y carbón se generan 12.000.000 lb de vapor durante el día.

De acuerdo a la inversión diaria que se realiza en el ingenio en cuanto al carbón, el costo por 1000 lb de vapor producida por las calderas Distral 3 y 4 es de \$ 4.285,76.

Tabla 6.4. Costos por libra de vapor producida actualmente en las calderas de Incauca

Costo por tonelada de carbón	\$ 101.829
Costo por 1000 lb de vapor producido en las calderas “Distral 1 y 2”	\$ 0
Costo por 1000 lb de vapor producido en las calderas “Distral 3 y Distral 4”	\$ 4.285,76

6.3.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS CARBONES

Debido a la similitud entre las propiedades fisicoquímicas de las minas y a la gran diferencia entre sus precios, se formaron dos grupos de tipos de carbones de acuerdo a su lugar de procedencia y se determinaron los promedios de sus características fisicoquímicas para la realización del análisis enfocado hacia el mejor aprovechamiento del combustible.

Minas de Carretera: Somineros, Cooarbon, Excarbon, Planterra

Minas de Valle: Vitonas (El Descanso), Las Mercedes, Inducarbón

Tabla 6.5. Características fisicoquímicas promedio de las minas actuales

	% HUMEDAD	% CENIZAS	% VOLATILES	% AZUFRE	P CALORICO (BTU/LB)
MINAS DE CARRETERA	5,04	11,81	36,36	1,17	12.782
MINAS DEL VALLE	4,37	22,62	27,04	2,93	11.452

Al estudiar de forma independiente cada una de las minas del Valle se encontró que la mina Vitonas “El Descanso” presenta mejores características que las minas abastecidas por Propal, especialmente en cuanto a % de cenizas, de azufre y de poder calórico. Por este motivo, se optó por analizar de forma separada esos carbones, presentando las siguientes características.

Tabla 6.6. Diferencias entre las características fisicoquímicas de la mina Vitonas “El Descanso” y las otras minas de Valle [6].

	Vitonas “El Descanso”	Valle (Propal)
% Humedad	5,11	4,97
% Cenizas	17,41	22,62
% Volátiles	29,96	27,04
% Azufre	1,91	2,93
Poder Calórico (BTU/lb)	12223,31	11.052

A continuación se presentan los promedios de las características de las minas de acuerdo a la forma como fueron agrupadas.

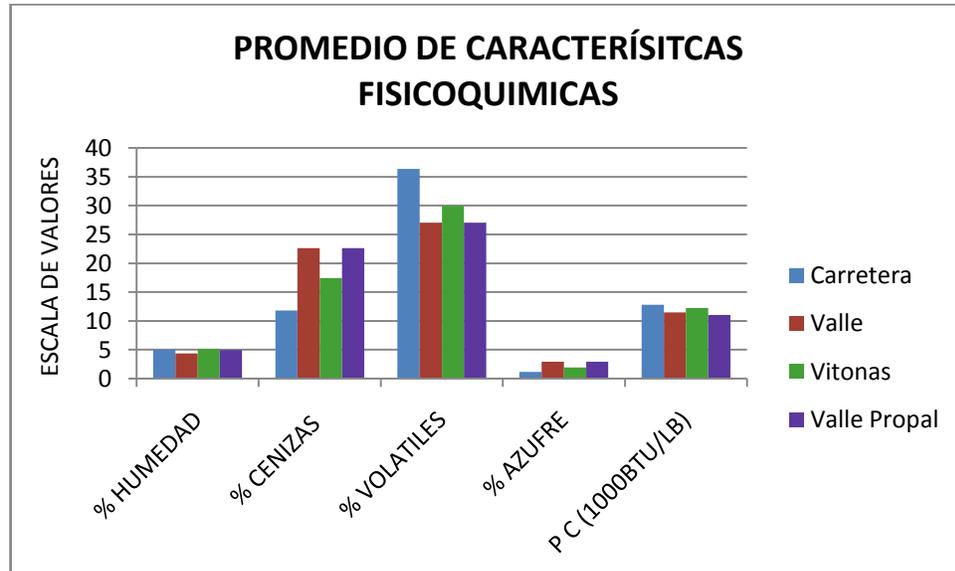


Figura 6.7. Características fisicoquímicas de los diferentes grupos de minas.

6.4. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS EN LAS MEZCLAS DE CARBONES

6.4.1. PODER CALÓRICO

Cuando el poder calórico es muy bajo se generan problemas para la combustión, debido a que se debe aumentar la cantidad de carbón que entra a la caldera, lo que genera un pobre contacto entre el aire y el combustible, por lo tanto requiere un mayor tiempo de residencia en la parrilla. Si el poder calórico es muy alto, las parrillas que sostienen el carbón pueden verse afectadas por las altas temperaturas y llegar a fundirse o deteriorarse. Por lo tanto se estableció experimentalmente que para que una caldera opere de manera normal el poder calórico del carbón de alimentación debe estar entre 10.800 y 12.000 Btu/lb.

6.4.2. PORCENTAJE DE AZUFRE

Debido a que el contenido de azufre de las mezclas de combustibles usados en las calderas debe ser menor a 1.5%, se tiene en cuenta este límite para plantear mezclas que se mantengan dentro de un rango lo suficientemente bajo, sin embargo, conociendo que el bagazo no aporta prácticamente ningún contenido de azufre, las mezclas de carbón pueden encontrarse con un porcentaje ligeramente superior al 1.5%.

6.4.3. OPERABILIDAD Y PRODUCCIÓN DE VAPOR

La mezcla de los combustibles es efectiva, si no se presentan problemas con la operación de las calderas (mala combustión, bajo o alto oxígeno en exceso, baja producción de vapor, etc) manteniendo las variables de operación dentro de un rango aceptable, mediante el cual la eficiencia de las calderas sea la adecuada.

6.4.4. MANIOBRABILIDAD

La mezcla de carbones que se realiza en la carbonera o bodega de carbón debe ser fácil de realizar y esto es posible simplificando las porciones a mezclar entre los carbones, debido a que esto mejora homogeneidad y reduce el tiempo de mezclado.

6.4.5. RENTABILIDAD ECONÓMICA

Para el Ingenio es más rentable económicamente aumentar el consumo del carbón del Valle debido a que es más económico que el de carretera.

Tabla 6.7. Principales características a buscar en las mezclas de carbones.

Poder calórico	Entre 10.800 y 12.000
Porcentaje de azufre	Alrededor de 1.5 %
Operabilidad y producción de vapor	Eficiencia adecuada en las calderas
Maniobrabilidad	Porciones pequeñas de carbón para mezclar
Rentabilidad económica	Mayor consumo de carbón del Valle

6.5. ANÁLISIS DE LAS MEZCLAS PROPUESTAS PARA LOS CARBONES

Se utilizó una pequeña “pala” para hacer una representación aproximada de la forma como se efectúa la mezcla de los carbones en la planta, realizando diferentes pruebas para estimar los resultados de las mezclas.

6.5.1. ANALISIS FISICOQUÍMICO DE LAS MEZCLAS

Inicialmente, se realizó un estudio durante varios días haciendo mezclas entre los carbones de las diferentes minas que llegan durante el transcurso del día. Obteniendo los siguientes promedios de los análisis fisicoquímicos:

Tabla 6.8. Promedios de los análisis fisicoquímicos de las primeras mezclas realizadas.

IDENTIFICACION MUESTRA	% HUMEDAD	% CENIZAS	% VOLATILES	% AZUFRE	PODER CALORICO Btu/Lb
1V 1C	5,68	19,20	32,93	1,92	10597
2V 1C	7,09	25,62	31,41	2,60	11343
5V 2C	6,51	22,84	31,64	1,82	10974
3V 2C	5,96	22,34	32,18	1,83	11396
2V 3C	4,95	21,91	32,78	1,71	11675

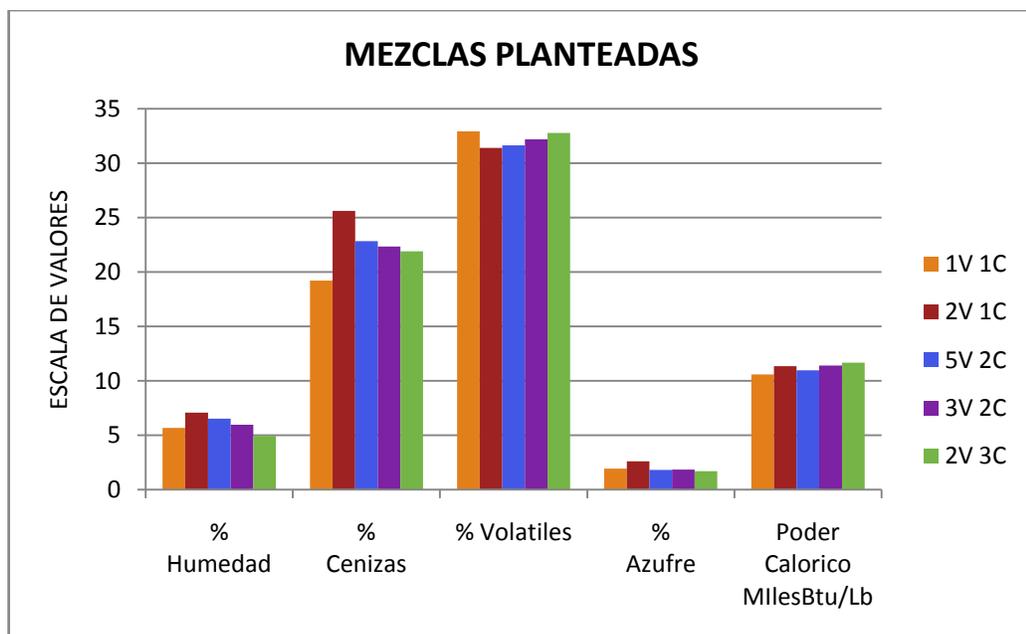


Figura 6.8. Promedios de los análisis fisicoquímicos de las primeras mezclas realizadas.

A partir de estos resultados y de acuerdo con los análisis tanto económicos como fisicoquímicos se tomó la determinación de enfocar el estudio a las mezclas con relaciones de 5 a 2 y de 3 a 2 entre Valle y Carretera (5V / 2C y 3V / 2C)

Una vez realizadas las pruebas anteriores y después de estudiar los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a cada una de las minas del Valle, se optó por separar las minas de acuerdo sus características, entre las que son abastecidas por Propal (Las Mercedes e Inducarbón) y la que compra directamente el Ingenio (Vitonas “El Descanso”) debido a que esta última presenta mejores características, esencialmente en cuanto cantidad de cenizas, azufre y poder calórico

Después de haber decidido estudiar por separado las mezclas de carbón entre las minas de Vitonas-carretera y Valle (Propal)-carretera, se analizaron fisicoquímicamente las mezclas en las proporciones planteadas.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las mezclas realizadas entre los carbones de Vitonas y carretera

Tabla 6.9. Análisis fisicoquímicos de las mezclas entre Vitonas y carretera.

Relación	% Humedad	% Cenizas	% Volátiles	% Azufre	Poder Calórico Btu/lb
5V 2C	5,30	21,50	25,35	2,44	11.067
	4,65	26,81	24,36	2,42	10.595
3V 2C	5,35	18,82	29,71	2,37	11.994
	4,70	20,02	30,52	2,21	11.524

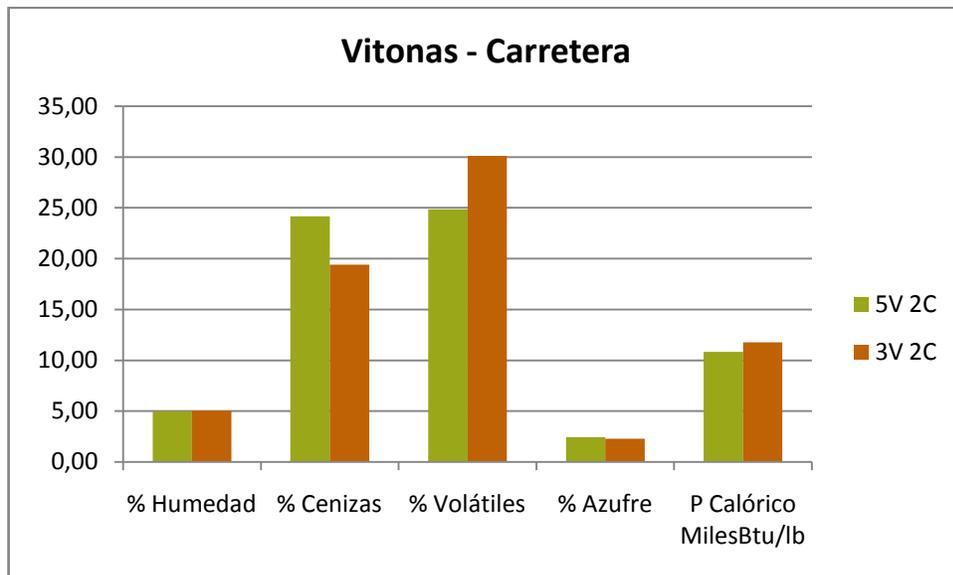


Figura 6.9. Análisis fisicoquímicos de las mezclas entre Vitonas y carretera.

Con estos resultados, se determinó que al mezclar con el carbón de carretera en una relación de 3 a 2, es decir 1.5 a favor del carbón de Vitonas, se tienen unas características apropiadas para ser utilizado como carbón de alimentación, porque aunque el porcentaje de azufre se encuentra un poco alto, el nivel de cenizas y esencialmente el poder calórico se encuentran dentro del rango de características deseadas para el carbón de alimentación, además en cuanto a manipulación al momento de mezclarlos es más operable esta mezcla.

Las mismas pruebas se hicieron mezclando el carbón del Valle suministrado por Propal (Las Mercedes e Inducarbón) con el carbón de carretera:

Tabla 6.10. Análisis fisicoquímicos de las mezclas entre Valle (Propal) y carretera.

Relación	% Humedad	% Cenizas	% Volátiles	% Azufre	Poder Calórico Btu/lb
5V 2C	4,95	28,46	30,91	2,41	10.863
	4,1	30,63	29,26	2,78	10.006
3V 2C	4,65	20,13	31,91	1,87	11.797
	3,75	22,21	29,8	2,18	11.235

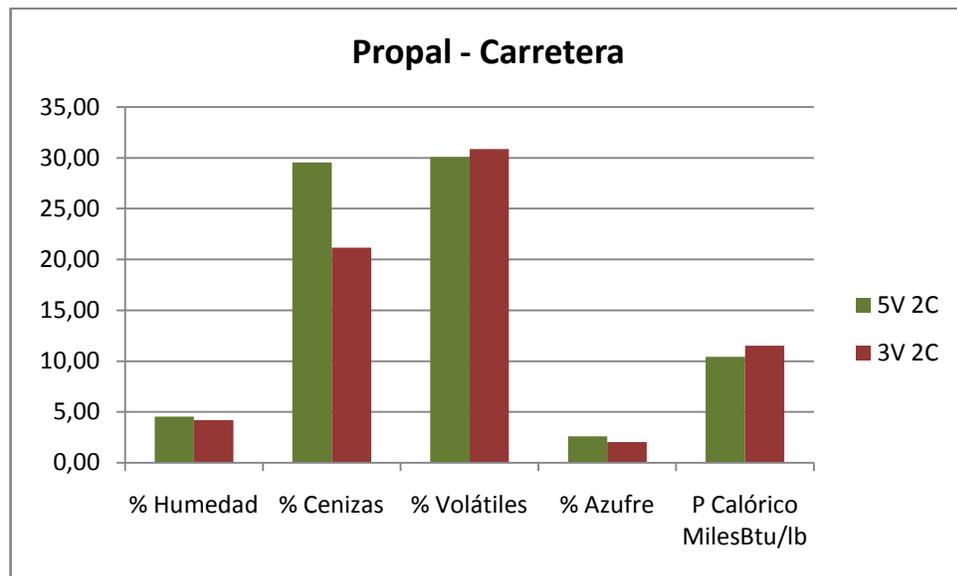


Figura 6.10. Análisis fisicoquímicos de las mezclas entre Valle (Propal) y carretera.

De acuerdo a estos resultados, se determinó que las características más apropiadas para la alimentación de las calderas se obtienen en una relación 1.5 a favor de Valle (Propal), es decir con una relación de 3 a 2. Aunque para este caso el Poder calórico no sea tan alto como en la mezcla entre Vitonas y carretera, también se encuentra dentro del rango aceptable de valores.

Sin embargo al hacer las mismas pruebas para una mezcla de carbones de carretera y todos los del Valle (el adquirido directamente por el Ingenio más el que provee Propal) no se obtuvieron resultados favorables para ser usados como carbón de alimentación en las calderas de Incauca.

Tabla 6.11. Análisis fisicoquímicos de las mezclas entre Valle (Total) y carretera.

Relación	% Humedad	% Cenizas	% Volátiles	% Azufre	Poder Calórico Btu/lb
5V 2C	4,95	26,32	20,61	3,15	10.700
	4,30	34,50	28,02	2,57	9.104
3V 2C	4,70	25,19	27,46	1,87	10817
	3,70	27,31	29,71	1,71	10.210

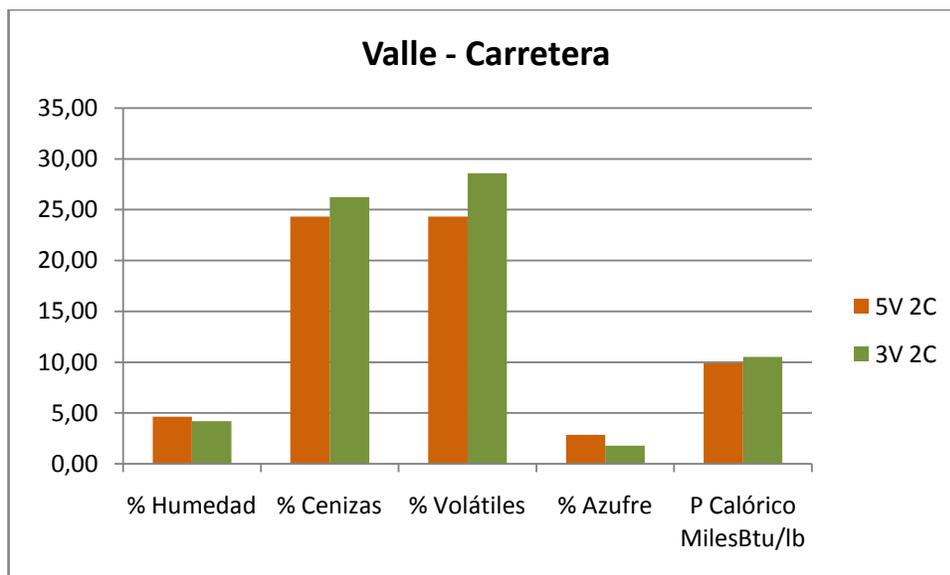


Figura 6.11. Análisis fisicoquímicos de las mezclas entre Valle (Total) y carretera.

En las pruebas Vitonas-carretera y Valle (Propal)-carretera se obtuvieron valores que concuerdan con el rango obtenido para los análisis realizados al carbón de alimentación de las calderas, por lo tanto es recomendable desde el punto de vista fisicoquímico estas dos mezclas.

6.5.2. ANALISIS ECONÓMICO DE LAS MEZCLAS

Usando esta mezcla de carbones, el ingenio puede reducir el consumo actual del carbón de carretera supliéndolo con carbón del Valle, debido a que este último tiene ventajas económicas por su costo reducido y como se demostró en las pruebas realizadas, también se pueden obtener las características fisicoquímicas apropiadas para el consumo en las calderas.

Conviene tener en cuenta que al realizar la mezcla de carbones planteada, es decir con una relación de 3V a 2C y reducir el consumo de carbón de carretera que es mas costoso, se puede minimizar el costo total a cargo del Ingenio en aproximadamente \$ 165.967.178 con relación al gasto actual (Anexo 3), si solo compra carbón de Valle de la mina Vitonas “El Descanso” y el carbón de carretera es suministrado por Propal a través del convenio de intercambio por fibra de bagazo que mantiene con el Ingenio.

Debido a que el consumo de carbón en las calderas Distral 3 y 4 es aproximadamente 500 Ton, esta es la cantidad total (lo que suministra Propal más lo que compra directamente Incauca) que debe ser adquirida por el Ingenio durante el día. Para usar las mezclas planteadas es necesario que Incauca compre una carga diaria de 264 Ton de carbón de la mina Vitonas, lo que equivale en viajes de carbón a 22 volquetas y por parte de Propal 3 viajes de volquetas y 6

de mulas que equivalen a 36 y 204 Ton de Valle y carretera respectivamente (Anexo 3).

Otra opción para las mezclas planteadas es que el Ingenio compre tanto carbón del Valle como de carretera (Anexo 4), además del suministrado por Propal a través del convenio, minimizando el costo total a cargo del Ingenio en aproximadamente \$145.052.978 mensuales. Para ello es necesario comprar una carga diaria de 216 y 34 Ton de carbón de Valle y carretera respectivamente, lo que equivale a 18 viajes de volquetas y una de mula. Por parte de Propal se hacen necesarios 7 volquetas y 5 mulas, es decir 84 y 170 Ton de carbón de Valle y de carretera, respectivamente.

Tabla 6.12. Tabla resumen de las propuestas planteadas para la mezcla de carbones

	PROPUESTA 1		PROPUESTA 2	
DETALLES	El Ingenio sólo compra carbón de la mina Vitonas.		El Ingenio compra carbón de la mina Vitonas y carretera	
COMPRA POR PARTE DEL INGENIO (ton)	Vitonas	Carretera	Vitonas	Carretera
	264	0	216	34
SUMINISTRO DE PROPAL	Valle	Carretera	Valle	Carretera
	36	204	84	170
AHORRO TOTAL MENSUAL	\$ 165`967.178		\$ 145`052.978	
AHORRO TOTAL ANUAL	\$ 1.991`606.136		\$ 1.740`635.736	

6.5.2.1. Costo por Libra de Vapor de las Propuestas

6.5.2.1.1. Costo “Propuesta 1”

Para esta propuesta se plantea que el ingenio compre solamente carbón de la mina Vitonas (El Descanso) que corresponde al sector del valle y el resto se complementa con el carbón suministrado por Propal mediante el convenio de intercambio.

Por lo tanto el Ingenio debe invertir diariamente \$20.103.600 para comprar 264 Ton y más lo que suministra Propal a través del convenio de intercambio con el Ingenio que equivale a 240 Ton con un costo de \$ 25.601.364. Lo que equivale a un consumo diario de 504 Ton con un costo de \$45.704.964, por lo tanto cada tonelada de carbón consumido por las calderas cuesta en promedio \$ 90.684,45.

DISTRAL 1 Y 2: Producen 150.000 lb/h de vapor, usando como combustible solo bagazo, por lo tanto no se genera ningún costo para el ingenio.

DISTRAL 3 y 4: Las dos calderas que trabajan con bagazo y carbón son la Distral 3 que produce 4.800.000 lb de vapor al día y la Distral 4 que produce 7.200.000 lb/día, es decir, generan 12.000.000 lb de vapor durante el día.

De acuerdo a la propuesta planteada para el consumo de los combustibles, las dos calderas deben trabajar con un % 22 de carbón en el total del combustible usado por las calderas, lo que equivale a un consumo de la caldera Distral 3 de 138.47 Ton y de la caldera Distral 4 de 364.89 ton diarias de bagazo.

Con la propuesta planteada y teniendo en cuenta la inversión diaria que se debe realizar, el costo de 1000 lb de vapor producida por las calderas Distral 3 y 4 es de \$ 3.808,74.

6.5.2.1.2 Costo “Propuesta 2”

La base de esta propuesta es la reducción en la compra del carbón de carretera a cargo del Ingenio Cauca, requiriendo así un mayor porcentaje de carbón de Valle perteneciente a la mina Vitonas “El descanso” además del carbón suministrado por medio del convenio con Propal.

Para este caso el Ingenio debe comprar diariamente 216 Ton de carbón del Valle con un costo de \$16.448.400 y 34 Ton de carbón de carretera que equivalen a \$ 4.352340. Es decir diariamente la inversión que debe realizar el Ingenio es de \$20.800.740 para comprar un total de 250 Ton de carbón.

Por parte de Propal el suministro diario de carbón es de 254 Ton con un costo de \$ 27.094.776. Por lo tanto, el consumo diario es de 504 Ton lo que equivale a \$ 47.895.516, de donde se determina que el costo por cada tonelada de carbón es de \$ 95.030,79.

DISTRAL 1 Y 2: Producen 150.000 lb/h de vapor, usando como combustible solo bagazo, por lo tanto no se genera ningún costo para el ingenio.

DISTRAL 3 y 4: Entre las calderas Distral 3 y Distral 4, que son las que usan los dos combustibles para trabajar, se generan 12.000.000 lb de vapor durante el día. De acuerdo a la propuesta planteada para el uso de los combustibles, el costo de 1.000 lb de vapor producidas entre las dos calderas es de \$ 3.991.29

Tabla 6.13. Tabla comparativa de los costos actuales y las propuestas planteadas.

	ACTUAL	PROPUESTA 1	PROPUESTA 2
Consumo diario de carbón del Ingenio	263.25 Ton	264 Ton	250 Ton
Inversión diaria del Ingenio	\$ 25.635.839	\$ 20.103.600	\$ 20.800.740
Carbón que suministra Propal	241.8 Ton	240 Ton	254 Ton
Costo del carbón de Propal	\$ 25.793.337	\$ 25.601.364	\$ 27.094.776
Consumo diario total de carbón	505.05 Ton	504 Ton	504 Ton
Costo diario del carbón consumido	\$ 51.429.176	\$ 45.704.964	\$ 47.895.516
Costo por tonelada de carbón	\$ 101.829	\$ 90.684	\$ 95.030
Costo por 1.000 lb de vapor	\$ 4.285,76	\$ 3.808,74	\$ 3.991.29

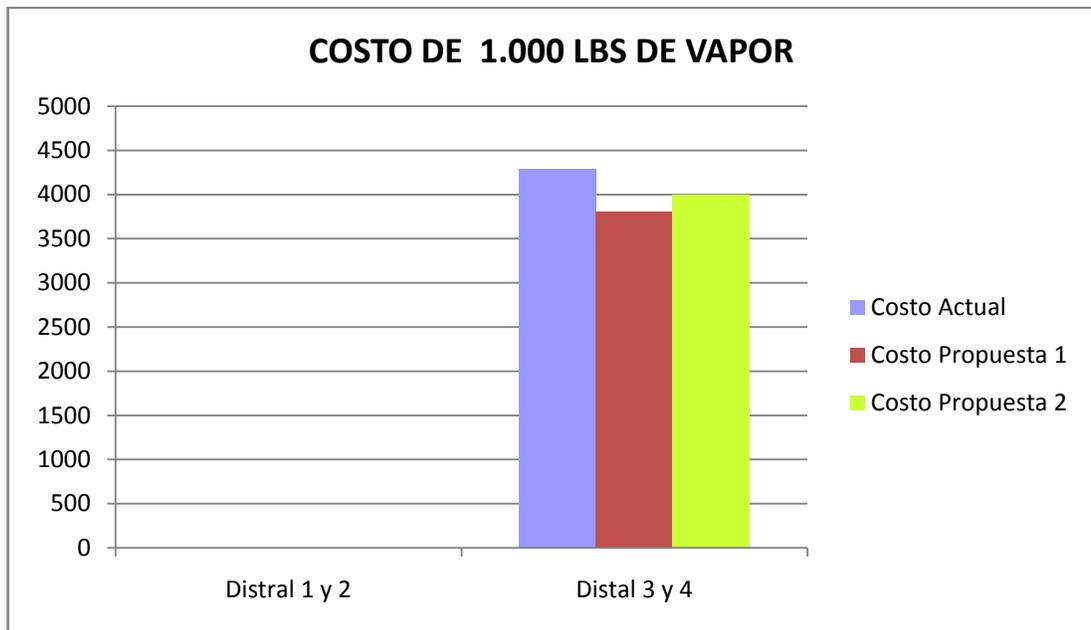


Figura 6.12. Costos de 1.000 lbs de vapor.

6.5.3. CONSUMO DE LOS COMBUSTIBLES

De acuerdo a los consumos presentados por las calderas “Distral 3 y Distral 4” que son las que trabajan de forma mixta con los combustibles y teniendo en cuenta que para el Ingenio es más rentable económicamente tener un menor consumo de carbón, manteniendo la operación de las calderas estables se analizaron los valores más acordes a dichas condiciones, determinando que el consumo óptimo de los combustibles para la caldera Distral 3, esta aproximadamente en 22,42% de carbón que equivale a 138,48 Ton, 77,58% de bagazo equivalente a 479.28 Ton. Para la caldera Distral 4 el consumo más adecuado es de 22,75% de carbón que equivale a 364,89 Ton, 77.25 % de bagazo equivalente a 1239.29 Ton.

Tabla 6.14. Tabla resumen de los consumos de las calderas Distral 3 y 4.

	CARBÓN		BAGAZO	
	%	TON	%	TON
DISTRAL 3	22.42	138.48	77.58	479.28
DISTRAL 4	22.75	364.89	77.25	1239.29

6.5.4. ANALISIS MEDIO AMBIENTAL

Las anteriores condiciones del consumo de los combustibles mantienen estable la combustión y por lo tanto del intercambio de calor. Es rentable económicamente debido a que se tiene un mayor consumo de bagazo que es el combustible que no genera ningún costo para el Ingenio, y además se cumple las “NORMAS DE CALIDAD DEL CARBÓN MINERAL” donde expresa que a partir de enero de 2006 el contenido de azufre de las mezclas de combustibles usados en las calderas debe ser menor a 1.5% para la zona pacífica a la cual pertenece el departamento del Cauca [7].

Esta norma se cumple teniendo en cuenta que el contenido de azufre del bagazo es casi nulo y que el consumo óptimo de este combustible en las calderas es de aproximadamente un 78%, mientras que el consumo de carbón está alrededor del 22% y posee un contenido de azufre promedio de 2%, lo que implica que en cada caldera se quema un 0,44% de azufre.

6.6. EFICIENCIA DEL PROCESO

Para corroborar que la mezcla planteada para el uso de los combustibles es adecuada y no presenta dificultades operacionales, se observó su comportamiento en planta, determinando inicialmente, la eficiencia en el quemado de los combustibles y posteriormente la eficiencia global de las calderas.

Previamente se hizo un estudio de las principales variables, para determinar los rangos entre los cuales trabaja cada variable que influye en el correcto desempeño de las calderas.

6.6.1. VARIABLES OPERACIONALES

6.6.1.1. Variables Operacionales Calderas Distral 1 Y 2

Se hizo un estudio de las variables operacionales de las calderas que usan solo bagazo, cuando trabajan en condiciones normales [2].

Tabla 6.15. Variables operacionales de las calderas Distral 1 y 2.

	DISTRAL 1		DISTRAL 2	
	VALORES NOMINALES	VALORES PROMEDIO REALES	VALORES NOMINALES	VALORES PROMEDIO REALES
CARGA (LB/h)	150.000	94480	150.000	113060
TEMPERATURA DEL AIRE ENTRANDO AL HOGAR (°F)	400 – 500	378,30	400 – 500	357,41
TEMPERATURA DE GASES A LA SALIDA DEL HOGAR (°F)	600 – 700	552,31	600 – 700	534,00
TEMPERATURA FINAL DE VAPOR (°F)	575	592,08	575	579,69
TEMPERATURA DE AGUA DE ALIMENTACION (°F)	240 – 250	178,46	240 – 250	185,78
TEMPERATURA DE GASES DE SALIDA DEL CALENTADOR (°F)	400 – 520		400 – 520	
TEMPERATURA DEL AIRE DE ENTRADA DEL CALENTADOR (°F)	80 – 90		80 – 90	87,97
PRESION EN EL CABEZAL DE SALIDA (PSIG)	275	260,33	275	263,72
PRESION EN EL HOGAR ("H ₂ O)	-1 a 1	0,05	-1 a 1	0,03

OXIGENO EN LOS HUMOS (%)	3 – 8	5,57	3 – 8	5,85
CONSUMO DE BAGAZO (TON)		450		600

6.6.1.2. Variables Operacionales Calderas Distral 3 Y 4

Para la caldera Distral 3 se estudiaron sus variables operacionales cuando trabaja en condiciones normales usando como combustible unas mezclas entre bagazo y carbón. En el caso de la caldera Distral 4 se estudiaron sus variables operacionales cuando trabaja usando como combustible solo carbón y cuando usa mezclas entre el bagazo y el carbón.

Tabla 6.16. Variables operacionales de las calderas Distral 3 y 4.

	DISTRAL 3		DISTRAL 4		
	VALORES NOMINALES	VALORES PROMEDIO. COMBUSTIBLE : CARBON + BAGAZO	VALORES NOMINALES	VALORES PROMEDIO. COMBUSTIBLE : CARBÓN	VALORES PROMEDIO. COMBUSTIBLE: CARB + BAGAZ
CARGA (LB/hr)	200	191.390	300.000	182.000	303.666,67
TEMPERATURA AIRE ENTRANDO AL HOGAR (°F)	420 – 500	436,83	420 – 500	434,67	512,33
TEMPERATURA DE GASES A	600 – 700	412,39	600 – 700	600,33	663,33

LA SALIDA DEL HOGAR(°F)					
TEMPERATURA FINAL DE VAPOR (°F)	750	645,75	750	745,67	741,37
TEMPERATURA DE AGUA DE ALIMENTACION (°F)	240 – 250	317,69	240 – 250		
TEMPERATURA DE GASES DE SALIDA DEL CALENTADOR (°F)	400 – 500	412,39	400 – 500	386,33	433,67
TEMPERATURA DEL AIRE DE ENTRADA DEL CALENTADOR (°F)	80 – 90	85,39	80 – 90	89,29	85,04
PRESION EN EL CABEZAL DE SALIDA (PSIG)	650	579,08	650	672,14	648,97
PRESION EN EL HOGAR ("H ₂ O)	-0.05 a 0.05	-0,07	-0.05 a 0.05	-0,02	-0,10
OXIGENO EN LOS HUMOS (%)	3 – 6		3 – 6	13,53	8,87
CONSUMO DE CARBÓN (TON)		140		300	370
CONSUMO DE BAGAZO (TON)		500		0	1100

6.6.2. EFICIENCIA DEL QUEMADO DEL COMBUSTIBLE

Para conocer la eficiencia de la caldera, es necesario determinar si el quemado de los combustibles esta ocurriendo de manera la adecuada, para ello se debe determinar la eficiencia de este proceso.

6.6.2.1. Caldera Distral 1

La caldera “Distral 1” posee dos tipos de cenizas de combustión, uno a través de la parrilla, la cual es limpiada manualmente cada 4 horas y las de multiciclón que salen junto con los gases de combustión y son acumuladas en una tolva llamada tolva de cenizas.

El flujo de las cenizas de parrilla fue determinado de acuerdo a la cantidad de cenizas generada durante el tiempo que transcurre entre una y otra limpieza de la parrilla de combustión. El flujo promedio obtenido fue de 1.12 ton/h

El flujo de cenizas de multiciclón se determinó midiendo la cantidad de cenizas que caen en la tolva durante pequeños lapsos de tiempo, obteniendo un flujo promedio de 0.45 ton/h

Y el flujo teórico es determinado de acuerdo a los porcentajes en ceniza del combustible y de las cenizas de combustión.

Con estos flujos de cenizas de combustión y de acuerdo a los análisis realizados por varios días en el combustible y en las cenizas, se obtuvieron eficiencias promedio de 99.12 % con el flujo experimental y una eficiencia de 98.05% con el flujo teórico.

De donde se observa que para la caldera Distral 1 se tienen eficiencia en combustiones bastante altas, esto es debido esencialmente a los pequeños flujos

de salida de las cenizas de combustión, comparados con los flujos de entrada del combustible.

Tabla 6.17. Datos de la eficiencia en el quemado del combustible para la caldera Distral 1.

BAGAZO			PARRILLA		MULTICICLON		EFICIENCIA COMBUSTION	
% CENIZA	P CALOR (BTU)	FLUJO (Ton/h)	% CENIZA	P CALOR (BTU)	% CENIZA	P CALOR (BTU)	EXPERIMENTAL	TEORICA
7,14	7.556	22,646	97,704	0	65,392	3217,8	99,12	98,05

6.6.2.2. Caldera Distral 2

La caldera “Distral 2” en cuanto a las cenizas trabaja de la misma forma que la Distral 1 y sus flujos son medidos de la misma manera.

Teniendo un flujo promedio de cenizas de parrilla de 1.18 Ton/h y de cenizas de multiciclón de 0.25 ton/h

De acuerdo a los análisis realizados al bagazo y a las cenizas de combustión se obtuvo una eficiencia promedio del quemado del combustible de 99.67% con el flujo determinado de forma experimental y eficiencia promedio de 98.34 %usando el flujo teórico hallado con los porcentajes en cenizas.

Estas eficiencias son altas gracias a los pequeños flujos de las cenizas de combustión. Y la diferencia entre las eficiencias teóricas y experimental es debido a las fallas que pueden surgir al medir directamente los flujos de cenizas

Tabla 6.18. Datos de la eficiencia en el quemado del combustible para la caldera Distral 2.

BAGAZO			PARRILLA		MULTICICLON		EFICIENCIA COMBUSTION	
% CENIZA	P CALOR (BTU)	FLUJO (Ton/h)	% CENIZA	P CALOR (BTU)	% CENIZA	P CALOR (BTU)	EXPERIMENTAL	TEORICA
7,12	7470,00	26,86	97,34	0,00	70,83	2719,00	99,67	98,34

6.6.2.3. Caldera Distral 3

La caldera “Distral 3” también posee dos tipos de cenizas de combustión, las de multiciclón que salen junto con los gases de combustión y son acumuladas en la tolva de cenizas y las de la parrilla móvil, la cual elimina constantemente las cenizas hacia una banda transportadora que las lleva a la tolva de cenizas.

Los flujos de cenizas de multiciclón y de parrilla se midieron juntos debido a que se unen antes de caer a la tolva de cenizas y se determinaron de acuerdo a la cantidad de cenizas que cae a la tolva durante cierto tiempo, obteniendo un flujo promedio de 2.28 ton/h

Y el flujo teórico es determinado de acuerdo a los porcentajes en ceniza del combustible y de las cenizas de combustión.

Con el consumo normal de combustibles de la caldera Distral 3 y de acuerdo a los valores de los análisis realizados se obtienen eficiencias con los flujos de cenizas experimentales de aproximadamente 95% y con el flujo teórico una eficiencia promedio del quemado de los combustibles de 96,72%

Tabla 6.19. Datos de la eficiencia en el quemado del combustible para la caldera Distral 3.

BAGAZO		BAGACILLO		CARBON		FLUJOS COMBSUTIBLE		
% CENIZA	P CALOR (BTU)	% CENIZA	P CALOR (BTU)	% CENIZA	P CALOR (BTU)	CARBON Ton/h	BAGAZO Ton/h	BAGACILLO Ton/h
5,85	7767,67	8,11	7345,00	24,67	10951,00	6,07	18,51	0,56

SALIDA DE CENIZAS				EFICIENCIA DE LA COMBUSTION	
PARRILLA		MULTICICLON		EXPERIMENTAL	TEORICA
% CENIZA	P CALOR (BTU)	% CENIZA	P CALOR (BTU)		
93,30	173,00	66,68	4593,33	95,27	96,72

Con el consumo planteado en la propuesta para el uso de los combustibles que equivale aproximadamente a 22% de carbón en el total del combustible usado, se tiene una eficiencia experimental promedio de 95.41% y con el flujo teórico una eficiencia aproximada de 97%

Tabla 6.20. Datos de la eficiencia en el quemado del combustible para la caldera Distral 3 usando los consumos planteados en la propuesta.

BAGAZO		BAGACILLO		CARBON		FLUJOS COMBSUTIBLE		
% CENIZA	P CALOR (BTU)	% CENIZA	P CALOR (BTU)	% CENIZA	P CALOR (BTU)	CARBON Ton/h	BAGAZO Ton/h	BAGACILLO Ton/h
5,17	7701,50	8,67	7382,50	21,62	11262,00	5,87	19,17	1,28

SALIDA DE CENIZAS				EFICIENCIA DE LA COMBUSTION	
PARRILLA		MULTICICLON		EXPERIMENTAL	TEORICA
% CENIZA	P CALOR (BTU)	% CENIZA	P CALOR (BTU)		
93,35	259,50	67,14	4859,50	95,41	97,16

6.6.2.4. Caldera Distral 4

La caldera “Distral 4” posee varios tipos de cenizas de combustión, las de multiciclón que salen junto con los gases de combustión y son acumuladas en la tolva de cenizas, las del precipitador que son las cenizas que recupera el precipitador electrostático de los gases de combustión que van hacia la atmósfera y las de la parrilla, la cual es una parrilla móvil y elimina constantemente las cenizas hacia la tolva de cenizas.

Los flujos de cenizas de multiciclón, del precipitador y de parrilla, también se midieron juntos debido a que se unen antes de caer a la tolva de cenizas. Para este flujo de cenizas se obtuvo un promedio de 5.52 ton/h

De acuerdo a los valores de los análisis realizados y teniendo en cuenta el consumo normal de combustibles de la caldera Distral 4 y se obtiene una eficiencia experimental para el quemado de los combustibles de de 91.74%, y con el flujo teórico una eficiencia de 95.11%

Tabla 6.21. Datos de la eficiencia en el quemado del combustible para la caldera Distral 4.

BAGAZO		BAGACILLO		CARBON		FLUJOS COMBSUTIBLE		
P CALOR (BTU)	% CENIZA	P CALOR (BTU)	% CENIZA	P CALOR (BTU)	% CENIZA	CARBON (Ton/h)	BAGAZO (Ton/h)	BAGACILLO (Ton/)
7896,50	6,10	7262,50	7,55	10889,50	25,38	14,45	37,21	6,98

SALIDA DE CENIZAS						EFICIENCIA DE LA COMBUSTION	
PARRILLA		TOLVAS		PRECIPITADOR		EXPERIMENTAL	TEORICA
% CENIZA	P CALOR (BTU)	% CENIZA	P CALOR (BTU)	% CENIZA	P CALOR (BTU)		
90,80	0,00	61,33	4930,00	78,70	2771,50	91,74	95,11

Con la propuesta planteada para el consumo de combustibles, que es con un 22% de carbón, se tiene una eficiencia experimental de 89.73% y una eficiencia teórica de 93.65%

Tabla 6.22. Datos de la eficiencia en el quemado del combustible para la caldera Distral 4 usando los consumos planteados en la propuesta.

BAGAZO		BAGACILLO		CARBON		FLUJOS COMBSUTIBLE		
% CENIZA	P CALOR (BTU)	% CENIZA	P CALOR (BTU)	% CENIZA	P CALOR (BTU)	CARBON (Ton/h)	BAGAZO (Ton/h)	BAGACILLO (Ton/)
5,23	7637,67	8,86	7425,00	21,53	11371,00	15,31	33,15	18,78

SALIDA DE CENIZAS						EFICIENCIA DE LA COMBUSTION	
PARRILLA		TOLVAS		PRECIPITADOR			
% CENIZA	P CALOR (BTU)	% CENIZA	P CALOR (BTU)	% CENIZA	P CALOR (BTU)	EXPERIMENTAL	TEORICA
89,63	946,00	64,41	4389,33	64,76	4602,00	89,73	93,65

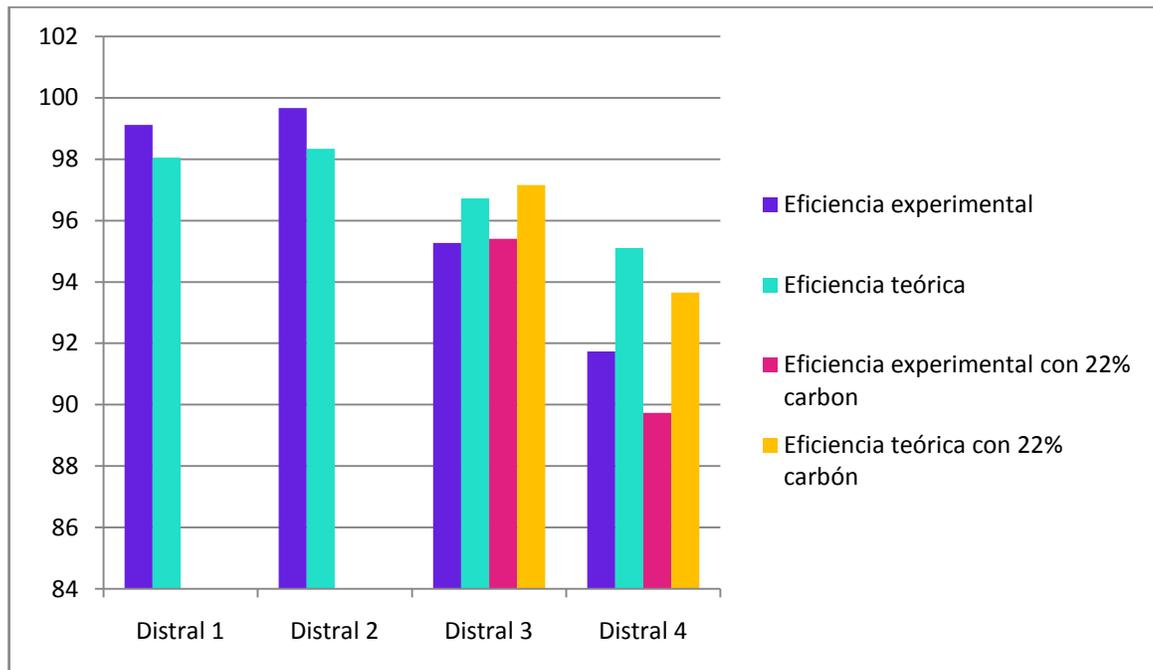


Figura 6.13. Eficiencias en el quemado del combustible.

6.6.3. EFICIENCIA DE LAS CALDERAS

El balance de materia y energía se realizó a través de un pequeño programa mediante el cual se podía determinar la cantidad teórica de vapor que debe producirse en cada caldera de acuerdo a su forma de operación, de las variables que afectan este proceso y a sus condiciones de diseño.

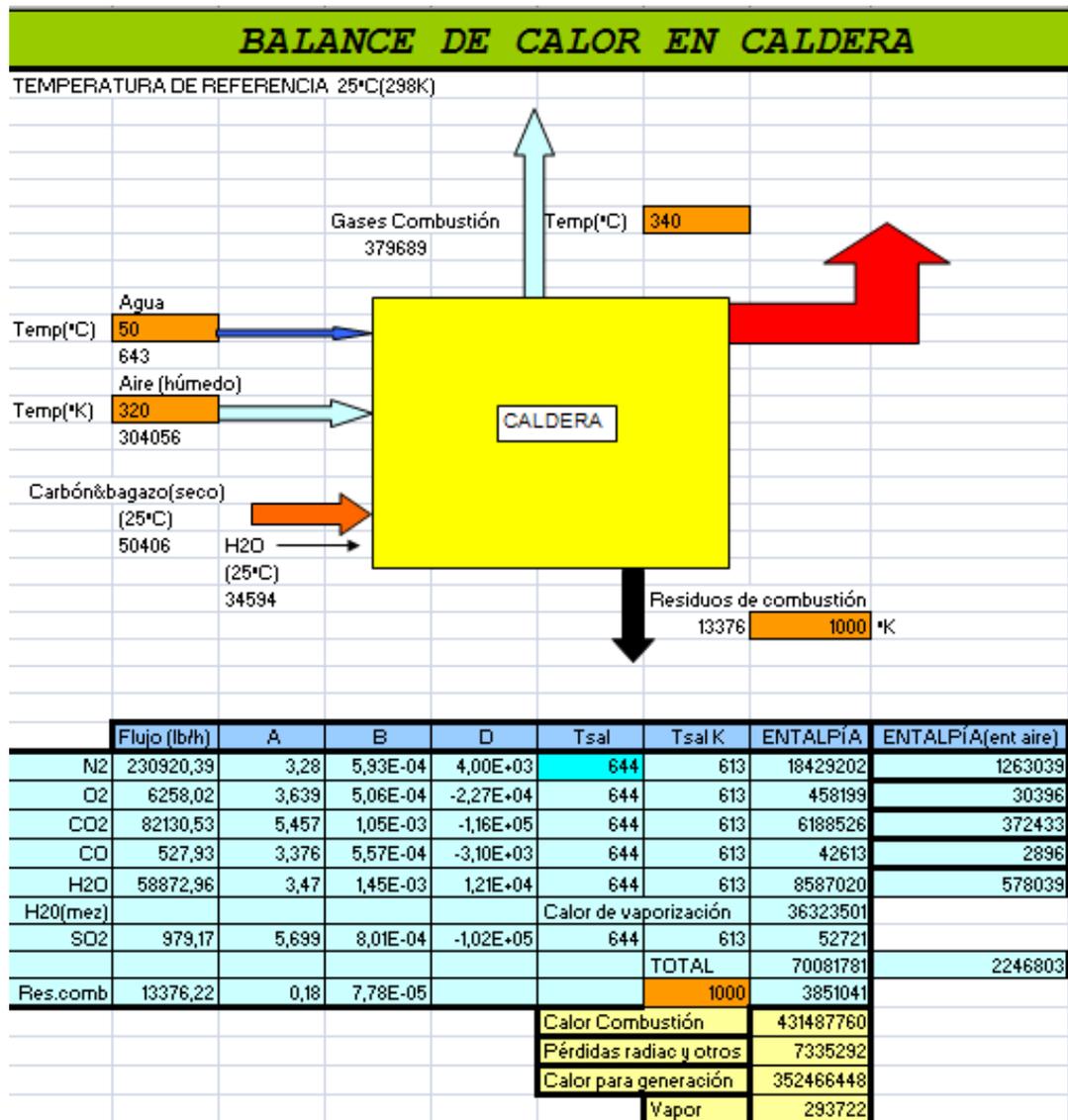


Figura 6.14. Programa usado para el balance de calor de las caderas de Incauca.

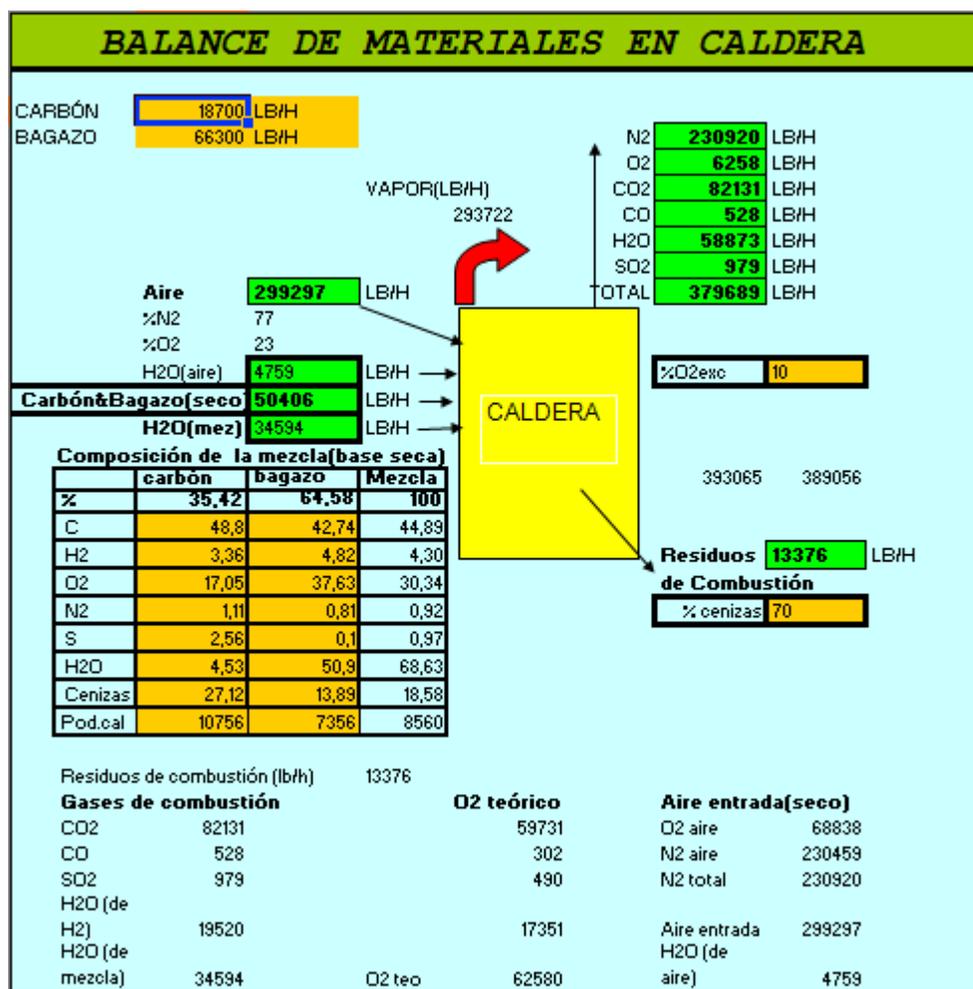


Figura 6.15. Programa usado para el balance de materia en las caderas de Incauca

6.6.3.1. Composición Estequiométrica

Para determinar la eficiencia de las calderas se partió de los análisis elementales y próximos de cada uno de los combustibles utilizados en las calderas

Tabla 6.23. Análisis próximo y elemental de los combustibles.

	CARBON	BAGAZO	BAGACILLO
% C	48,8	42,74	40,68
% H ₂	3,36	4,82	4,62
% O ₂	17,05	37,63	36,15
% N ₂	1,11	0,81	0,68
% S	2,56	0,1	0,07
% H ₂ O	4,53	50,9	50,91
% Ceniza	27,12	13,89	17,81
Poder Calorífico (BTU)	10.756	7.356	6.527

6.6.3.2. Eficiencia de la Caldera Distral 1

6.6.3.2.1. Eficiencia con los Valores Promedio

Teniendo en cuenta los promedios de los valores operacionales que afectan directamente la eficiencia de la caldera, se determinó una producción de vapor teórica de 90,385 lb/h, sin embargo la producción promedio fue de 94.480 lb/h, lo que genera una eficiencia por encima del valor teórico del 4.33 % del valor promedio de producción de vapor.

Tabla 6.24. Ineficiencia promedio de la caldera Distral 1.

FLUJO DE BAGAZO (LB/H)	% O2 EN EXCESO	% CENIZA –EN RESIDUO	T AIRE IN HOGAR	T AGUA ALIM	T GASES	VAPOR TEO LB/H	DIFERENCIA TEOR-PROM	% DE INEFICIENCIA PROMEDIO
37.500	5,57	94	378,3 °f 465,54 °k	178,5 °f 81,36°C	552,31°f 289,0°C	90.385	-4.095	-4,33

De acuerdo a los valores los promedios de las variables operacionales, el flujo de bagazo debe ser de 62.239 lb/h para generar 150.000 lb/h de vapor

6.6.3.2.1. Eficiencia con Algunos Datos Diarios

Para los análisis puntuales realizados con base en los datos diarios se obtuvieron diferencias entre la producción teórica y la real desde 3.578 hasta 14.465 lb/h, lo que produce una ineficiencia entre el 4.21 y 14.17%, con respecto al valor real

Tabla 6.25. Ineficiencias puntuales de la caldera Distral 1.

FLUJO DE BAGAZO (LB/H)	%EXCESO O ₂	% CENIZA –RESID	T AIRE IN HOGAR	T AGUA ALIM	T GASES	VAPOR TEO LB/H	VAPOR REAL LB/H	DIFERENCIA TEOR- REAL	% DE INEFICIENCIA
40.093	3,81	94	370 ^o f 460,92 ^o k	182 ^o f 83,33 ^o c	568 ^o f 297,77 ^o c	96.191	89.000	7.191	8,08
55.376	6,14	94	379 ^o f 465,92 ^o k	188 ^o f 86,66 ^o c	562 ^o f 294,44 ^o c	133.149	121.000	12.149	10,04
47.470	6,61	94	371 ^o F 461,48 ^o k	186 ^o f 85,55 ^o c	554 ^o F 290 ^o c	114.171	100.000	14.171	14,17
34.444	5,8	94	378 ^o F 465,37 ^o k	184 ^o F 84,44 ^o c	531 ^o F 277,22 ^o c	83.370	80.000	3.370	4,21

Generando un promedio puntual en la ineficiencia de la caldera de 9.12 %.

6.6.3.3. Eficiencia de la Caldera Distral 2

6.6.3.3.1. Eficiencia con los Valores Promedio

El valor de carga promedio generado por la caldera es de 113.060 lb/h y de acuerdo a los promedios de las variables operacionales con las que trabaja la caldera, se tiene una producción de vapor teórica de 120.212, obteniendo una ineficiencia de 6.33 % con respecto al valor promedio de producción de vapor.

Tabla 6.26. Ineficiencia promedio de la caldera Distral 2.

FLUJO DE BAGAZO (LB/H)	EXCESO %O2	% CENIZA EN RESIDUOS	T AIRE IN HOGAR	T AGUA ALIM	T GASES	VAPOR TEO LB/H	DIFERENCIA TEOR- PROM	% DE INEFICIENCIA PROMEDIO
50.000	5,85	74,16	357,41°F 453,93°K	185,78°F 85,43°C	534°F 278,89°C	120.212	7.152	6,33

El flujo de bagazo debe ser de 62.375 lb/h, de acuerdo a los valores los promedios de las variables operacionales para generar 150.000 lb/h de vapor.

6.6.3.3.2. Eficiencia con Algunos Datos Diarios

Para los análisis puntuales realizados con base en los datos diarios se obtuvieron diferencias entre la producción teórica y la real desde 2.544 hasta 13.897 lb/h, lo que genera ineficiencias de acuerdo al valor real, entre el 2.16 y el 13.39%

Tabla 6.27. Ineficiencias puntuales de la caldera Distral 2.

FLUJO DE BAGAZO (LB/H)	%O2 EN EXCESO	% CENIZA -RESID	T AIRE IN HOGAR	T AGUA ALIM	T GASES	VAPOR TEO LB/H	VAPOR REAL LB/H	DIFERENCIA TEOR- REAL	% DE INEFICIENCIA PUNTUAL
50.211	6	74,16	373 ^o f 462,59 ^o k	187 ^o f 86,11 ^o c	556 ^o f 291,11 ^o c	120.544	118.000	2.544	2,16
54.281	4,6	74,16	378 ^o f 465,32 ^o k	187 ^o f 86,11 ^o c	560 ^o f 293,33 ^o c	135.048	126.000	9.048	7,18
37.416	5,7	74,16	367 ^o f 459,26 ^o k	188 ^o f 86,66 ^o c	539 ^o f 281,66 ^o c	90.042	86.000	4.042	4,7
48.964	5,14	74,16	370 ^o f 460,92 ^o k	189 ^o f 87,22 ^o c	548 ^o f 286,66 ^o c	117.697	103.800	13.897	13,39

De donde se obtiene una ineficiencia promedio de 6.86 %

6.6.3.4. Eficiencia de la Caldera Distral 3

6.6.3.4.1. Eficiencia con los Valores Promedio

El valor promedio de producción de vapor es de 191.780 lb/h, sin embargo, de acuerdo al análisis realizado se tiene un valor teóricos de producción de vapor 201.379 lb/h, lo que genera una ineficiencia con base en el valor promedio de 5.01%

Tabla 6.28. Ineficiencia promedio de la caldera Distral 3.

TOTAL FLUJO BAGAZO (LB/H)	FLUJO DE CARBON (LB/H)	%O2 EN EXCESO	% CENIZAS EN CENIZAS	T AIRE IN HOGAR	T AGUA ALIM	T GASES	VAPOR TEOR LB/H	DIFERENCIA TEOR- PROM	% DE INEFICIENCIA PROMEDIO
41.667	11.667	5,5	80	436,83°F 498,05°k	317,69 °f 158,71°c	412,39 °f 211,32°c	201.379	9.599	5,01

6.6.3.4.2. Eficiencia con Algunos Datos Diarios

Para analizar la eficiencia de la caldera con algunos datos puntuales se tuvieron en cuenta los porcentajes de bagazo y carbón que son usados como combustible.

Porcentajes aleatorios

Para este caso, se obtuvieron diferencias entre la producción teórica y la real de 11.464 y 15.101 lb/h, es decir, ineficiencias de 5.46 y 8.97% con respecto al valor real

Tabla 6.29. Ineficiencias puntuales de la caldera Distral 3 tomando porcentajes aleatorios de carbón presente en el combustible.

FLUJO DE BAGAZO (LB/H)	FLUJO DE BAGACILO (LB/H)	TOTAL FLUJO BAGAZO (LB/H)	FLUJO DE CARBON (LB/H)	%O2 EN EXCESO	% CENIZAS EN RESIDUO	T AIRE IN HOGAR	T AGUA ALIM	T GASES	VAPOR TEO LB/H	VAPOR REAL LB/H	DIFERENCIA TEOR- REAL	% DE INEFICIENCIA PUNTUAL
40.248	615	40.863	14.896	4	80	476°F 519,81°k	312°F 155.55°c	595°F 312.77°c	221.464	210.000	11.464	5,46
37.624	0	37.624	12.204	5,8	80	450°F 505.37°k	310°F 154.44°c	596°F 313.33°c	190.701	175.000	15.701	8,97

Con una mezcla aleatoria entre de los combustibles, se tiene una ineficiencia promedio de 7.21%

Porcentajes según la propuesta realizada para el uso de combustibles (22% de carbón)

Teniendo en cuenta este porcentaje en el uso de los combustibles, los flujos requeridos por la caldera para producir 200.000 lb/h de vapor, son de 42.273 lb/h de bagazo y 11.929 lb/h de carbón.

Para estos análisis puntuales se obtuvieron diferencias entre la producción teórica y la real desde 3.710 hasta 5.338 lb/h, lo que genera ineficiencias entre el 1.85 y el 2.65 % de acuerdo al valor real.

Tabla 6.30. Ineficiencias puntuales de la caldera Distral 3 con el 22% de carbón presente en el combustible.

FLUJO DE BAGAZO (LB/H)	FLUJO DE BAGACILLO (LB/H)	TOTAL FLUJO BAGAZO (LB/H)	FLUJO DE CARBON (LB/H)	%O2 EN EXCESO	% CENIZAS EN RESIDUO	T AIRE IN HOGAR	T AGUA ALIM	T GASES	VAPOR TEO LB/H	VAPOR REAL LB/H	DIFERENCIA TEOR- REAL	% DE INEFICIENCIA PUNTUAL
39.415	3.562	42.977	12.461	5,23	80	432 ^o f 495.37 ^o k	281 ^o f 138.33 ^o c	611 ^o f 321.66	204.710	201.000	3.710	1,85
40.819	0	40.819	11.596	6,14	80	473 ^o f 518.15 ^o k	275 ^o f 135 ^o k	601 ^o f 316.11 ^o c	194.002	189.000	5.002	2,65
39.847	5.113	44.960	12.880	4,7	80	466 ^o f 514.26 ^o k	313 ^o f 156.11 ^o c	602 ^o f 316.66 ^o c	214.338	209.000	5.338	2,55

De acuerdo a la propuesta planteada para la mezcla de combustibles se obtuvo una ineficiencia promedio de 2.35%

6.6.3.5. Eficiencia de la Caldera Distral 4

6.6.3.5.1. Eficiencia con los Valores Promedio

Con los valores teóricos se puede determinar la eficiencia teniendo en cuenta dos casos; cuando la caldera trabaja solo con carbón y cuando es usada con los dos combustibles.

Solo carbón:

Durante los días que la caldera trabajo usando solo carbón como combustible se hizo un seguimiento para determinar los valores de las variables operacionales cuando trabaja bajo estas condiciones. Por lo tanto, para este análisis se tienen en cuenta dichos promedios además del flujo de ingreso de carbón a la caldera.

Cuando la caldera trabaja solo con carbón se tiene un promedio de producción de vapor de 182.000 lb/h, por lo tanto se genera una ineficiencia de 11.79 % debido a que la producción teórica de vapor es de 203.470 lb/h

Tabla 6.31. Ineficiencia promedio de la caldera Distral 4 trabajando solo con carbón.

FLUJO DE CARBON (LB/H)	EXCESO %O2	% CENIZA EN RESIDUOS	T AIRE IN HOGAR	T AGUA ALIM	T GASES	VAPOR TEOR LB/H	DIFERENCIA TEOR- PROM	% DE INEFICIENCIA PROMEDIO
25.000	13,53	80	434,67°F 496.85°K	245°F 118.33°C	600,33°F 315.73°C	203.470	21.470	11,79

Con carbón y bagazo

Cuando la caldera trabaja con carbón y bagazo se obtiene una producción de vapor promedio de 303.666 lb/h. Sin embargo, para el estudio realizado se tiene una producción de 404.825 lb/h, por lo tanto se tiene una ineficiencia de 33.31% con respecto al valor promedio de producción de vapor.

Tabla 6.32. Ineficiencia promedio de la caldera Distral 4 trabajando con carbón y bagazo.

TOTAL FLUJO BAGAZO (LB/H)	FLUJO DE CARBON (LB/H)	%O2 EN EXCESO	% CENIZAS EN RESIDUOS	T AIRE IN HOGAR	T AGUA ALIM	T GASES	VAPOR TEOR LB/H	DIFERENCIA TEOR- PROM	% DE INEFICIENCIA PROMEDIO
63.484	30.833	8,87	80	512,33°F 540°C	245°F 118.33°C	663,33°F 350.73°C	404.825	101.159	33,31

6.6.3.5.2. Eficiencia con Algunos Datos Diarios

Para determinar la eficiencia de la caldera con algunos datos puntuales se tuvieron en cuenta los porcentajes de bagazo y carbón que son usados como combustible. Sin embargo, es de tener en cuenta que las eficiencias pueden dar con un mayor rango de error, debido a que no se tiene conocimiento exacto sobre la temperatura del agua de alimentación, por lo tanto se toma el valor promedio entre el rango de los valores nominales.

Porcentajes aleatorios

Para este caso, se obtuvieron diferencias entre la producción teórica y la real de 178.290 y 170.558 lb/h, de donde se tienen ineficiencias de 59.43 y 56.85 % con respecto al valor real

Tabla 6.33. Ineficiencias puntuales de la caldera Distral 4 tomando porcentajes aleatorios de carbón presente en el combustible

FLUJO DE BAGAZO (LB/H)	FLUJO DE BAGACILO (LB/H)	TOTAL FLUJO BAGAZO (LB/H)	FLUJO DE CARBON (LB/H)	%O2 EN EXCESO	% CENIZAS EN RESIDUO	T AIRE IN HOGAR	T AGUA ALIM	T GASES	VAPOR TEO LB/H	VAPOR REAL LB/H	DIFERENCIA TEOR- REAL	% DE INEFICIENCIA PUNTUAL
77.00 5	0	77.005	31.268	5,5	80	510 ^o f 538.7 ^o k	245 ^o f 118.33 ^o c	701 ^o f 371.66 ^o c	438.290	260.000	178.290	59,43
64.89 4	31.466	96.360	30.082	5,5	80	512 ^o f 539.8 ^o k	245 ^o f 118.33 ^o c	700 ^o f 371.11 ^o c	475.558	305.000	170.558	56,85

Cuando se usan los combustibles de una forma aleatoria se obtienen ineficiencias promedio de 58.14 %.

Porcentajes según la propuesta realizada para el uso de combustibles (22% de carbón)

Teniendo en cuenta la propuesta para el uso de los combustibles y con los valores promedio de operación, los flujos requeridos por la caldera para producir 300.000 lb/h de vapor, son de 63.614 lb/h de bagazo y 17.942 lb/h de carbón.

Usando la propuesta de mezclas de combustibles planteada se tienen diferencias entre la producción teórica y la real entre 149.247 y 171.985 lb/h, de donde se tienen unas ineficiencias entre 49.76 y 57.44% con respecto al valor real.

Tabla 6.34. Ineficiencias puntuales de la caldera Distral 4 con el 22% de carbón presente en el combustible.

FLUJO DE BAGAZO (LB/H)	FLUJO DE BAGACILO (LB/H)	TOTAL FLUJO BAGAZO (LB/H)	FLUJO DE CARBON (LB/H)	%O2 EN EXCESO	% CENIZAS EN RESIDUO	T AIRE IN HOGAR	T AGUA ALIM	T GASES	VAPOR TEO LB/H	VAPOR REAL LB/H	DIFERENCIA TEOR- REAL	% DE INEFICIENCIA PUNTUAL
66.223	35.288	101.511	29.755	5,5	80	521ºf 544.81ºc	245ºf 118.33ºc	708ºf 375.55ºc	485.315	313.000	172.315	57,44
70.541	24.422	94.963	27.288	5,5	80	515ºf 541.48ºc	245ºf 118.33ºc	706ºf 374.44ºc	449.279	300.000	149.279	49,76
99.093	0	99.093	29.083	5,5	80	515ºf 541.48ºc	245ºf 118.33ºc	690ºf 365.55ºc	474.985	303.000	171.985	57,33

Al usar la mezcla de los combustibles planteada en la propuesta se obtiene una ineficiencia del 54.84 %.

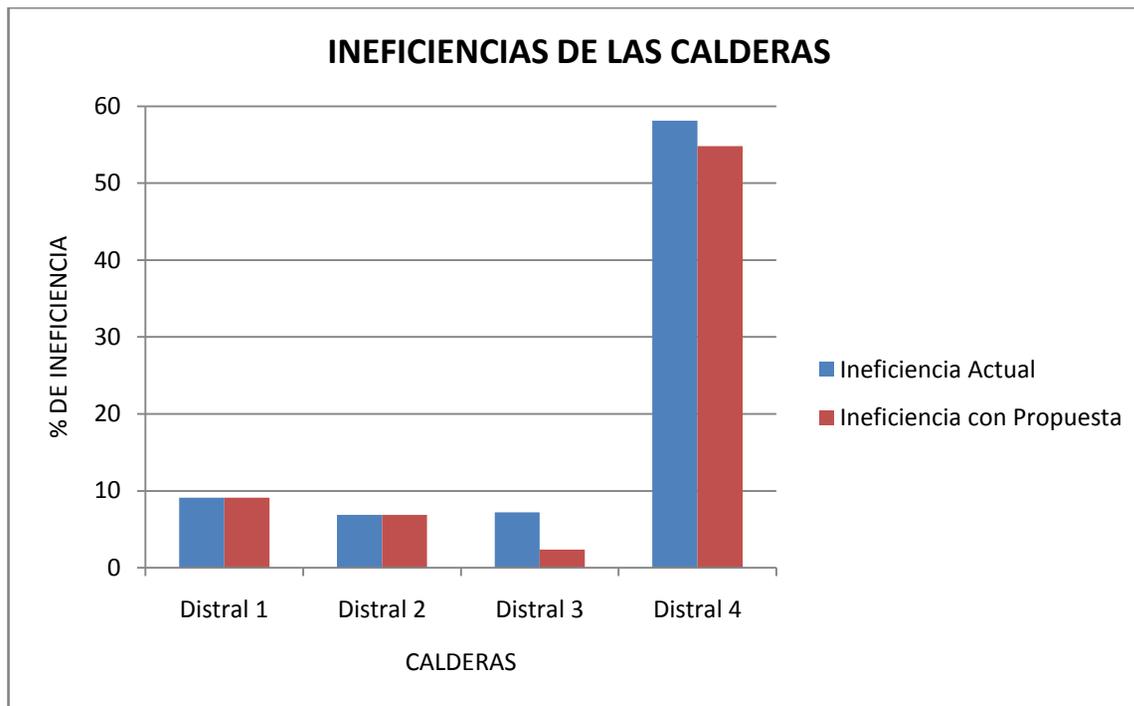


Figura 6.16. Ineficiencias promedio de las calderas.

6.7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

[1] Normatividad Incauca. Cod R-611-001. Generación de Vapor. *Edición No.5 Agosto/2007*. I/A Incauca.

[2] Reporte de operación calderas Distral 1, 2, 3 y 4. Incauca.

[3] Análisis Mensual de Bagazo. Calidad de Conformidad. INCAUCA S.A

[4] Facturas liquidación por minas. INCAUCA

[5] Liquidación de Fibra Apta y Carbón Sustituto para Bagazo Pretratado Humedo. INCAUCA.

[6] Análisis Mensual del Carbón por Mina. Calidad de Conformidad. INCAUCA S.A

[7] Colombia. Ministerio del Medio Ambiente. Resolución 898 del 23 de agosto de 1995. Capitulo II. Normas de Calidad del Carbón Mineral.

7. CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

1. Por medio de esta práctica se logro obtener experiencia en cuanto a los procesos industriales, además de adquirir conocimientos multidisciplinarios para generar aportes a la empresa tales como el análisis y estudio de las diferentes variables que afectan el proceso.
2. El análisis de diferentes variables y parámetros que influyen en la operatividad de las calderas y la rentabilidad económica, variables tales como las operacionales y las propiedades fisicoquímicas que permitieron formular una propuesta fácilmente aplicable.
3. Las mezclas de carbones planteadas poseen características fisicoquímicas que cumplen con el rango de parámetros aceptable para la operación de las calderas, son de fácil maniobrabilidad y generan grandes ahorros para el ingenio. Los consumos propuestos para los combustibles implican más rentabilidad económica debido a que hay un mejor aprovechamiento del bagazo.
4. La eficiencia del proceso se hizo necesaria para demostrar que las mezclas planteadas no afectan la producción de vapor, por lo que se determinaron los flujos de entrada de los combustibles y de salida de residuos, debido a que no existía control sobre esta variable. Demostrando que son más eficientes las calderas con las mezclas propuestas que con las actuales y se demuestra un mayor rendimiento económico con las mezclas planteadas.
5. Para la mezcla de combustibles se plantearon consumos aproximados de un 22% de carbón en el total del combustible consumido en las calderas Distral 3 y 4. Para la mezcla de carbones se planteó una relación de 3 a 2 entre el carbón del

Valle y de carretera, determinando que es más rentable económicamente para el ingenio elevar la compra de carbón de la mina Vitonas “El Descanso”

6. El Ingenio del Cauca ha tomado esta propuesta como alternativa para reducir costos en la generación de la energía requerida para su operación y para la venta.

8. FUTUROS TRABAJOS

Con base en la experiencia y resultados adquiridos durante el desarrollo de este trabajo es de considerar los siguientes aspectos:

Analizar cuidadosamente la eficiencia de la caldera Distral 4 porque de acuerdo al estudio realizado esta siendo subutilizada.

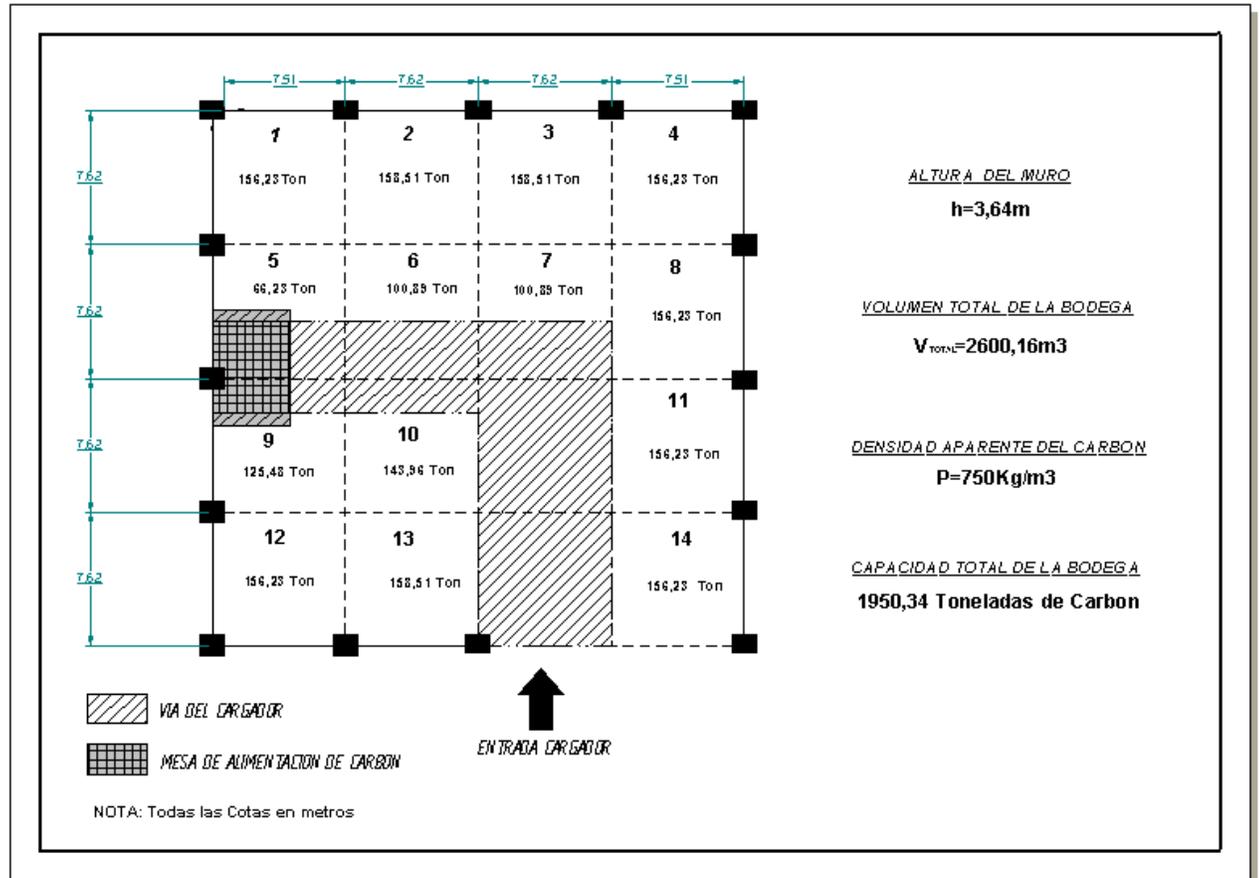
Implementar métodos mas exactos para las mediciones de los flujos de los combustibles.

Formular un método más efectivo para tener control sobre la cantidad y procedencia de los carbones que ingresan al ingenio y poder llevar a cabo un adecuado almacenamiento y distribución en la bodega de carbón.

ANEXOS

ANEXO 1

BODEGA DE CARBÓN



ANEXO 2

COMPRA ACTUAL DE CARBÓN

CARBON DE CAUCA

		MINAS	TON MESUAL	PRECIO POR TONELADA (\$)		TOTAL (\$)
				Carbón		
C A U C A	VALLE	VITONAS	3.140,80	Carbón	58.150	193.689.627,30
				Transporte	18.000	
	CARRETERA	COOCARBON	2.422,07	Carbón	76.530	252.332.007,06
				Transporte	51.480	
		PLANTERRA	2.334,61	Carbón	138.375,81	323.053.543,67
				Transporte		

Por lo tanto para el carbón que debe comprar el Incauca (Cauca) es:

TONELADAS DE CARBON PARA CAUCA	
VALLE	CARRETERA
3140,80	4.756,68

PRECIO DE CARBON PARA CAUCA	
VALLE	CARRETERA
\$ 193.689.627,30	\$ 575.385.550,74

Cantidad total de Carbón mensual a cargo del Ingenio: 7.897,48 Ton

Es decir, 263.25 Ton diarias

Precio total mensual del carbón a cargo del Ingenio: \$ 769.075.178

Lo que equivale a \$ 25.635.839 diarios

CARBON DE PROPAL

		MINAS	TONELADAS	PRECIO POR TONELADA (\$)	TOTAL (\$)
P R O P A L	VALLE	LAS MERCEDES	624,4	84.038,90	52.473.889
		INDUCARBON	1.602,74	79.497,67	127.414.249
		YOLANDA	389,91	82.339,75	32.105.298
	CARRETERA	SAN FERNANDO	1.426,07	111.319,17	158.749.147
		SOMINERO	1.861,74	126.484,80	235.481.390
		EXCARBON	1.349,13	124.210,17	167.576.159

Para el carbón de Propal:

TONELADAS DE CARBON PARA PROPAL	
VALLE	CARRETERA
2.617,05	4.636,94

PRECIOS DE CARBON PARA PROPAL	
VALLE	CARRETERA
\$ 211.993.436,20	\$ 561.806.695,58

Lo que equivale a un suministro diario de carbón por medio de Propal de 241.8 Ton con un costo \$ 106.672.35 por tonelada.

POR LO TANTO MENSUALMENTE SE TIENE ENTRE LOS DIFERENTES PROVEEDORES, TANTO LO QUE COMPRA INCAUCA COMO LO QUE PROVEE PROPAL:

VALLE (TON)	CARRETERA (TON)	TOTAL (TON)
5.757,85	9.393,62	15.151,47

De donde se obtiene que la mezcla de carbones que se estaba usando era aproximadamente 1 a 1 entre carbón de Valle y el de Carretera (relación C/V: 1,61)

ANEXO 3

PROPUESTA: COMPRANDO SOLO CARBON DE VITONAS

Si Cauca solo comprara carbón de la mina Vitonas “El Descanso”:

		MINAS	TONELADAS	PRECIO POR TONELADA (\$)		TOTAL (\$)
C A U C A	VALLE	VITONAS	3.140,80			239.171.793,08
			2.422,07	Carbón	58.150	184.440.678,09
			2.334,61	Transporte	18.000	177.780.551,50

Por lo tanto, teniendo en cuenta que Incauca solo va a comprar carbón de Valle se tiene mensualmente lo siguiente:

TONELADAS DE CARBON PARA CAUCA	
VALLE	CARRETERA
7.897,48	

PRECIO DE CARBON PARA CAUCA	
VALLE	CARRETERA
\$ 601.393.022,68	\$ 0

Es decir, 263.25 Ton diarias, con un costo de \$ 20.046.434,09

Entonces, Propal debe suplir la cantidad de carbón que hace falta para cumplir con los requerimientos mensuales del consumo de carbón en las calderas, sabiendo que el carbón total que se compra inicialmente es de 15.151, 48 Ton :

TONELADAS DE CARBON PARA PROPAL	
VALLE	CARRETERA
2.617,05	4.636,94

PRECIOS DE CARBON PARA PROPAL	
VALLE	CARRETERA
\$ 161.848.784,36	\$ 481.245.147,28

Generando un total para cada región de:

VALLE	CARRETERA
10.514,53 Ton	4.636,94 Ton

VALLE	CARRETERA
\$ 763.241.807,03	\$ 481.245.147,28

Por lo tanto para que el Ingenio Cauca debe comprar mensualmente 7.897.48 Ton, lo que equivale a adquirir diariamente 263,25 Ton de carbón.

Sin embargo, como las volquetas con carbón del Valle transportan una carga de 12 Ton y se obtiene una relación de 21,94 volquetas diarias, este alor se debe redondear a viajes completos:

Teniendo así, 22 viajes de volquetas en el día

TONELADAS PARA CAUCA (VALLE)	
DIARIO	264
MENSUAL	7.920

COSTO PARA CAUCA (\$)	
DIARIO	20.103.600,00
MENSUAL	603.108.000,00

Al variar la cantidad de carbón recibido en el día, es necesario modificar también la cantidad de carbón que proporciona Propal para poder mantener la relación planteada de 3V 2C es decir de 1,5. Donde Valle equivale a un 60% del carbón total y carretera a un 40%

Valle 60%	Carretera 40%
9.090,89	6.060,59

CARBÓN MENSUAL PARA PROPAL

Valle: Como Incauca compra 7.920 ton de carbón del valle, se tiene:

$$7.920 + X = 9.090,89,$$

Entonces: $X = 1.170,89$, lo que equivale a la cantidad de carbón del Valle que debe suministrar Propal.

Carretera: Debido a que el Ingenio Cauca solo compra carbón del Valle, entonces todo el carbón de carretera debe ser proveído por Propal:

Entonces: $X = 6.060,59$

TONELADAS DE CARBON PROPAL		
	VALLE	CARRETERA
Mensual	1.170,89	6.060,59
Diario	39,03	202,02

Como las mulas transportan 34 ton y las volquetas 12 ton:

Mulas y volquetas diarias para Propal	
3,25	5,94

Redondeando se aproximan a 3 volquetas t 6 mulas:

Por lo tanto se obtiene:

	VALLE (TON)	CARRETERA (TON)
Carbón Diario de Propal	36	204
Carbón Mensual de Propal	1.080	6.120
Carbón Diario de Cauca	264	
Carbón Mensual de Cauca	7.920	
Carbón Total Diario	300	204
Carbón Total Mensual	9.000	6.120

Generando una relación de: 1,471 Entre los carbones de Valle y Carretera

	TONELADAS DE CARBÓN PARA CAUCA	COSTO DE CARBÓN PARA CAUCA
Mensualmente	7.920,00	\$ 603.108.000

AHORRO PLANTEADO CON ESTA PROPUESTA:

Si inicialmente se invertían: \$ 769.075.178

Y el costo mensual de esta propuesta es de: \$603.108.000

El ahorro es de: \$ 165.967.178 mensuales.

ANEXO 4

PROPUESTA: REDUCCIÓN EN LA COMPRA DE CARBON DE CARRETERA A CARGO DE INCAUCA.

Sabiendo que inicialmente el carbón total que consume el Ingenio es: 15.151,48 Ton

Para mantener la relación de 1,5 entre los carbones de Valle y carretera, se tiene una equivalencia de 60% para Valle y carretera a un 40% del carbón total.

Valle 60%	Carretera 40%
9.090,89	6.060,59

CARBÓN DE PROPAL:

TONELADAS DE CARBON PARA PROPAL	
VALLE	CARRETERA
2.617,05	4.636,94

CARBON DE INCAUCA

Para el carbón del Valle:

$2.617,05 + X = 9.090,89$, entonces: $X = 6.473,83$, lo que equivale a la cantidad de carbón del Valle que debe comprar Incauca.

Para el carbón de carretera:

$4.636,94 + X = 6.060,59$, entonces: $X = 1.423,65$, lo que equivale al carbón de carretera que debe comprar el Ingenio Cauca

C A U C A	MINAS	TONELADAS	PRECIO POR TONELADA (\$)		TOTAL (\$)
			Carbón	Transporte	
VALLE	VITONAS	6.473,83	Carbón	58.150	492.982.243,98
			Transporte	18.000	
CARRETERA	COOCARBON	1.423,65	Carbón	76.530	182.241.152,74
			Transporte	51.480	

Por lo tanto, el carbón que debe adquirir el Ingenio Cauca es:

TONELADAS DE CARBON PARA CAUCA	
VALLE	CARRETERA
6.473,83	1.423,65

PRECIO DE CARBON PARA CAUCA	
VALLE	CARRETERA
\$ 492.982.243,98	\$ 182.241.152,74

El carbón suministrado por Propal:

TONELADAS DE CARBON PARA PROPAL	
VALLE	CARRTERA
2.617,05	4.636,94

PRECIOS DE CARBON PARA PROPAL	
VALLE	CARRETERA
\$ 211.993.436,20	\$ 561.806.695,58

A partir de la cantidad de carbón que debe comprar mensualmente el Ingenio, se determina la el consumo diario para cada sector:

CARBON DIARIO PARA CAUCA (TON)	
VALLE	CARRETERA
215,79	47,45

Como las Volquetas con carbón del Valle transportan una carga de 12 Ton y las mulas que transportan carbón de carretera equivalen a 34 Ton:

Volquetas	Mulas
17,98	1,40

Datos que al ser aproximados se acercan a 18 volquetas y 1 mula

TONELADAS DE CARBON PARA CAUCA		
	VALLE	CARRETERA
DIARIO	216,00	34,00
MENSUAL	6.480,00	1.020,00

Ahora se hace el análisis para Propal teniendo en cuenta la cantidad de carbón mensual que es suministrado:

CARBON DIARIO PARA PROPAL (TON)		
	VALLE	CARRETERA
	87,24	154,56

De donde se determinan la cantidad de volquetas que deben transportar dicho carbón

Volquetas	Mulas
7,27	4,55

Lo que equivale a 7 volquetas y 5 mulas por parte de Propal

TONELADAS DE CARBON PARA PROPAL		
	VALLE	CARRETERA
DIARIO	84,00	170,00
MENSUAL	2.520,00	5.100,00

	VALLE (TON)	CARRETERA (TON)
Carbón Diario de Propal	84	170
Carbón Mensual de Propal	2.520	5.100
Carbón Diario de Cauca	216	34
Carbón Mensual de Cauca	6.480	1.020
Carbón Total Diario	300	204
Carbón Total Mensual	9.000	6.120

Generando una relación de: 1,471 entre el carbón de Valle y carretera

Por lo tanto mensualmente se tiene a cargo del Ingenio Cauca:

TONELADAS DE CARBON PARA CAUCA	
VALLE	CARRETERA
6.480,00	1.020,00

COSTO DEL CARBON PARA CAUCA	
VALLE	CARRETERA
\$ 493.452.000,00	\$ 130.570.200,00

Lo que equivale a una inversión total de \$ 624.022.200

Si inicialmente el costo mensual era de: \$ 769.075.178

El ahorro con esta propuesta es de: \$ 145.052.978,04