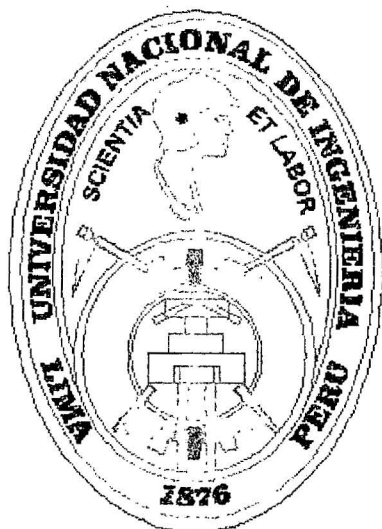


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MECÁNICA



**“EVALUACIÓN Y CONTROL DE LAS PÉRDIDAS
ENERGÉTICAS DE LA CALDERA ILO21 Y LA
INFLUENCIA DEL CARBÓN UTILIZADO”**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

CESAR ALBERTO CORNEJO GÓMEZ

PROMOCION 2001-I

LIMA – PERÚ

2005

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

TABLA DE CONTENIDO

PRÓLOGO	1
1. INTRODUCCIÓN	3
2. CONTEXTO ENERGÉTICO	5
2.1 Contexto Energético Mundial	5
2.2 Contexto Energético Peruano	7
2.3 Mercado del Carbón	9
2.4 Carbón en el Perú	15
3. CENTRAL TERMOELÉCTRICA ILO21	16
3.1 Ubicación	16
3.2 Proceso de Generación de Energía Eléctrica	18
3.3 Principios Básicos del Diseño de Calderas	26
3.4 Descripción General de la Caldera de la C.T.ILO21	87
4. EL CARBÓN Y SUS PROPIEDADES	126
4.1 Clasificación del Carbón	128
4.2 Análisis del Carbón	133
4.3 Propiedades de la Ceniza	154
4.4 Importancia de las Propiedades del Carbón	162
4.5 Carbón Utilizado en la C.T.ILO21	167
5. EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS ENERGÉTICAS	172
5.1 Eficiencia de Calderas	172

5.2	Metodología de Cálculo de las Pérdidas de la Caldera	179
6. DATOS Y PRUEBAS		215
6.1	Fuentes de Información	215
6.2	Adquisición de Datos del SCID	216
6.3	Lecturas de Campo	226
6.4	Muestreos de Laboratorio ILO21	228
6.5	Análisis de Muestras	240
7. CONTROL DE LA EFICIENCIA		261
7.1	Control de la Eficiencia de Planta	262
7.2	Control de la Eficiencia de Caldera	265
8. MODELO ENERGÉTICO		280
8.1	Influencia de los Lazos de Control	280
8.2	Influencia de las Propiedades del Carbón	284
8.3	Influencia del Requerimiento de Aire	288
CONCLUSIONES		292
BIBLIOGRAFÍA		295
APENDICE		297
A.1	Datos del Carbón (Como Recibido)	297
A.2	Datos de Cálculo	298
A.3	Datos de Referencia	301
A.4	Cálculos	307
A.5	Resultados	313
A.6	Ejemplo de Cálculo	316

Lista de Figuras

- Figura 2.1. Reservas Probadadas en Perú – 12/01 (Balance Nacional de Energía 2002)
- Figura 2.2. Balance Energético Nacional – 2002 (Fuente: OTERG-MEM)
- Figura 2.3. Estrategia Triángulo para el Carbón (Fuente: Japan Coal Center)
- Figura 2.4. Producción y Consumo de Carbón en el Mundo (Fuente: British Petroleum)
- Figura 2.5. Precio del Carbón – US\$/ton (Fuente: British Petroleum)
-
- Figura 3.1. Proceso de Generación de Energía Eléctrica
- Figura 3.2. Sistema de Toma de Agua de Mar
- Figura 3.3. Esquema del Tratamiento de Agua
- Figura 3.4. Sala de Control de la C.T. ILO21
- Figura 3.5. Caída de temperatura sobre la superficie y a través de las paredes de agua del hogar
- Figura 3.6. Caída de temperatura en las superficies y a través de las paredes de convección.
- Figura 3.7. Mecanismo de Circulación Natural.
- Figura 3.8. Esquema de un Pulverizador de Carbón
- Figura 3.9. Vista Posterior de la Caldera de la C.T.ILO21
- Figura 3.10. Esquema de la Vista Lateral de la Caldera
- Figura 3.11. Esquema del Sistema de Agua y Vapor de la Caldera
- Figura 3.12. Esquema del Sistema de Aire y Gases
- Figura 3.13. Esquema de los Pulverizadores y Quemadores de Carbón
- Figura 3.14. Silo de Carbón
- Figura 3.15. Zonas de Combustión en la Flama
- Figura 3.16. Quemador Hitachi-NR
- Figura 3.17. Concepto de la reducción de NOx en flama.
- Figura 3.18. Maestro de Caldera
- Figura 3.19. Diagrama de Control del Flujo de Combustible
- Figura 3.20. Control del Flujo de Aire
- Figura 3.21. Control de la Presión de Aire Primario
- Figura 3.22. Control de la Presión de Hogar
- Figura 3.23. Control de Flujo y Temperatura de Aire del Pulverizador
- Figura 3.24. Control de Nivel del Domo
- Figura 3.25. Control de Temperatura de Vapor Sobrecalentado
- Figura 3.26. Control de Temperatura de Vapor Recalentado
-
- Figura 4.1. Clasificación del Carbón (Fuente: Thermal and Nuclear Power Engineering Society)
- Figura 4.2. Poder Calorífico Superior de los Volátiles (MJ/kg)
- Figura 4.3. Composición del Carbón según el Análisis Inmediato
- Figura 4.4. Análisis Inmediato de los Carbones Utilizados en la C.T.ILO21

Figura 4.5. Bases de Análisis

Figura 4.6. Relación entre la Temperatura de Extinción y el Contenido de Materia Volátil

Figura 4.7. Estructura probable de la materia carbonosa

Figura 4.8. Análisis Elemental de los Carbones Utilizados en la C.T. ILO21

Figura 4.9. Índice de esponjamiento libre de carbones.

Figura 4.10. Composición Química de la Ceniza del Carbón Utilizado en la C.T. ILO21

Figura 4.11. Estados de Fusión de la Muestra de Ceniza.

Figura 5.1. Flujos de Energía en la Caldera

Figura 5.2. Volumen de Control de la Caldera de la C.T.ILO21

Figura 5.3. Pérdidas por Calor Radiante (Fuente: ASME PTC 4.1-1969)

Figura 6.1. Estrategia de Manejo de la Información Reportada por el SCID

Figura 6.2. Tendencia de parámetros del Pulverizador A

Figura 6.3. Variación del flujo de carbón en el alimentador.

Figura 6.4. Transductor de flujo de carbón a través del alimentador.

Figura 6.5. Analizador de Gases al Ingreso de la Chimenea

Figura 6.6. Medición de temperatura para los gases a la salida del calentador de aire.

Figura 6.7. Analizador de Oxígeno a la Salida del Economizador

Figura 6.8. Barómetro y Indicador de temperatura y humedad relativa

Figura 6.9. Termocupla para temperatura de gases a la salida del hogar

Figura 6.10. Sistema de Muestreo de Carbón

Figura 6.11. Muestreo de Carbón Pulverizado en el Ducto de Salida B3

Figura 6.12. Distribución de los Ductos de Gases para la Toma de Muestras

Figura 6.13. Muestreo de Gases a la Salida del Economizador

Figura 6.14. Etapas del Muestreo de Ceniza a la Salida del Economizador

Figura 6.15. Preparación inicial de las muestras de carbón

Figura 6.16. Estufa para determinación de Humedad

Figura 6.17. Horno Vertical para Determinación de la Materia Volátil

Figura 6.18. Calorímetro Parr

Figura 6.19. Preparación de la Muestra de Carbón

Figura 6.20. Finalización del Trabajo con el Calorímetro Parr.

Figura 6.21. Determinación de la Granulometría del Carbón Pulverizado

Figura 6.22. Carta de Rosin y Rammles

Figura 6.23. Determinación de Inquemados en la Ceniza

Figura 7.1. Resultados de la Prueba de Potencia Efectiva y Rendimiento – CENERGÍA 2003

Figura 7.2. Estrategia de Control Operativo de la Combustión

Figura 7.3. Pantalla de Control del Pulverizador A

Figura 7.4. Curva de presión hidráulica del Pulverizador

Figura 7.5. Reducción de la Relación Aire Primario/Carbón (CO.CED.07.03 – 14/04/04)

Figura 7.6. Relación entre el porcentaje de oxígeno y la demanda de fuego

Figura 7.7. Pantalla de Control del Sistema de Aire y Gases de Combustión

Figura 7.8. Control y registro de sopladores.

Figura 7.9. Pantalla de Control del Sistema de Agua y Vapor de Caldera

Figura 8.1. Diagrama de Control Simplificado del Control de Combustible

Figura 8.2. Relación entre la Demanda de Fuego de Caldera y el Maestro de Caldera

Figura 8.3. Variación de la Demanda de Aire con el Flujo de Carbón Utilizado

Lista de Tablas

- Tabla 2.1. Reservas Probadas de Carbón a Diciembre de 2002 (Fuente: British Petroleum)
- Tabla 3.1. Características de los Principales Equipos
- Tabla 3.2. Características del Diesel 2
- Tabla 3.3. Características de la Caldera de la C.T.ILO21
- Tabla 3.4. Principales Parámetros de la Caldera
- Tabla 3.5. Pérdidas de Calor y Eficiencia Térmica
- Tabla 3.6. Parámetros del Aire para Combustión
- Tabla 3.7. Ventiladores de la Caldera
- Tabla 3.8. Características del Calentador de Aire
- Tabla 3.9. Especificaciones del Multiciclón
- Tabla 3.10. Parámetros de Gases de Combustión
- Tabla 3.11. Parámetros del Pulverizador de Carbón
- Tabla 3.12. Zonas de Combustión en la Flama
- Tabla 3.13. Principales Símbolos y Abreviaciones del Sistema de Control
- Tabla 4.1. Clasificación de Carbones (ASTM D388)
- Tabla 4.2. Principales Análisis del Carbón
- Tabla 4.3. Normas ASTM de Análisis de Carbón.
- Tabla 4.4. Transformación de Bases de Análisis
- Tabla 4.5. Fineza de Pulverizado Requerida
- Tabla 4.6. Componentes de las cenizas en muestras de carbón mineral
- Tabla 4.7. Evaluación de la Posibilidad de Escoriamiento
- Tabla 4.8. Evaluación de la Posibilidad de Ensuciamiento
- Tabla 4.9. Efecto de las Propiedades del Carbón en el Diseño y Rendimiento de Calderas
- Tabla 4.10. Características del Carbón para la C.T. ILO21
- Tabla 4.11. Embarques de Carbón para la C.T.ILO21 a mayo de 2004
- Tabla 4.12. Codificación de las Mezclas de Carbón
- Tabla 5.1. Comparación de los Métodos para la Determinación de la Eficiencia
- Tabla 5.2. Ajuste por tipo de carbón
- Tabla 5.3. Resumen de las Propiedades de los Residuos
- Tabla 5.4. Composición del Aire
- Tabla 5.5. Resumen de las Propiedades Ambientales del Aire
- Tabla 5.6. Resumen del Aire Teórico y Exceso de Aire.
- Tabla 5.7. Composición Volumétrica de los Gases a la Salida del Economizador (Calculados)
- Tabla 5.8. Resumen de las Características de los Gases a la Salida del Economizador

VII

Tabla 5.9. Resumen de la Temperatura de Aire y Gases

Tabla 5.10. Resumen de la Entalpía de Sub Productos (Referencia: 25°C)

Tabla 5.11. Coeficientes de Entalpía (temperatura entre 255 a 1000 K y más de 1000 K)

Tabla 5.12. Resumen de Pérdidas por Tipo de Carbón

Tabla 5.13. Resumen de Créditos por Tipo de Carbón

Tabla 6.1. Resumen de los Parámetros de Cálculo por Tipo de Carbón

Tabla 6.2. Cuadro de Eficiencia y Factor de Potencia de Motores de 6.9 kV

Tabla 6.3. Resumen de los Parámetros de Referencia (Aire, Oxígeno y Control)

Tabla 6.4. Resumen de los Parámetros de Agua y Vapor

Tabla 6.5. Resumen de los Parámetros de Pulverizadores A y C

Tabla 6.6. Resumen de los Muestras de Gases e Inquemados en la Ceniza.

Tabla 6.7. Resumen del Análisis Inmediato y la Fineza del Carbón Pulverizado.

Tabla 7.1. Parámetros de Control Normal de Tipo Discreto.

Tabla 7.2. Parámetros de Control Normal de Tipo Continuo.

Tabla 8.1. Comparación entre el flujo de carbón medido y estimado.

Tabla 8.2. Influencia del Poder Calorífico en las Pérdidas y Eficiencia de la Caldera

Tabla 8.3. Influencia del Contenido de Ceniza y la Materia Volátil

Tabla 8.4. Influencia del Contenido de Humedad Total.

Tabla 8.5. Influencia de la Humedad en la Diferencia de Temperaturas del Pulverizador.

Tabla 8.6. Influencia del Índice de Molienda en las condiciones de pulverización.

Tabla 8.7. Influencia del Requerimiento de Aire en la Composición de los Gases de Escape.

Tabla 8.8. Influencia del Requerimiento de Aire en las Pérdidas y Eficiencia de la Caldera

Tabla 8.9. Influencia de las Propiedades del Carbón en el Requerimiento de Aire.

Tabla 8.10. Influencia de la Temperatura de Gases en las Pérdidas y Eficiencia de la Caldera

PRÓLOGO

El carbón es una opción de suministro energético abierta para cualquier país, pero al ser un tipo de energía no renovable, su uso debe ser eficiente en concordancia con las restricciones medio ambientales y económicas a las que está sujeto. Las características del carbón varían según su procedencia, y con estas su comportamiento en la caldera, es por ende necesario determinar este comportamiento para identificar potenciales ahorros energéticos y ajustes operativos necesarios.

El Capítulo I describe el contexto energético en la cual se enmarca la tesis, analizando las tendencias energéticas y la evolución de los recursos.

El Capítulo II resume el proceso de generación de energía eléctrica de la Central Termoeléctrica ILO21, describiendo los procesos de transformación de energía que en ella se realizan y los principales sistemas involucrados. Se detalla además los sistemas y principales equipos incluidos en la Caldera, los principales criterios operativos de la misma y las principales características de los equipos más influyentes en la minimización de pérdidas energéticas.

El Capítulo III describe las principales propiedades del carbón para combustión y su influencia en la operación de la caldera. Se detallan las propiedades de los carbones utilizados.

El Capitulo IV presenta las ecuaciones matemáticas empleadas, así como los resultados, para evaluar cada una de las pérdidas de la caldera y las propiedades de los flujos de aire y gases.

El Capitulo V detalla el procedimiento de realización de las pruebas y la fuente de los datos empleados para la evaluación de los resultados.

El Capítulo VI define los ajustes operativos a realizar para controlar y mantener la eficiencia energética de la Caldera.

El Capitulo VII muestra el comportamiento energético de la Caldera como una función de los principales lazos de control, las propiedades del carbón utilizado y el requerimiento de aire para la combustión.

Deseo expresar mi agradecimiento al personal del Departamento de Operaciones ILO21 de Energía del Sur S.A. por haberme proporcionado un ambiente estimulante que ha hecho posible la culminación de la tesis. He contraído una deuda especial de gratitud con el Dr. Salomé Gonzales por su apoyo y consejo durante el desarrollo de la investigación. Finalmente agradecer a todas las personas que aportaron su amistad y experiencia en estos primeros años de experiencia profesional.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La Central Termoeléctrica ILO21, de 135MW de potencia nominal, cuenta en su proceso con una caldera de 420t/h de evaporación (vapor sobrecalentado a 16.57MPa y 537°C) utilizando como combustible carbón bituminoso o sub bituminoso de diferente procedencia.

En el contexto energético mundial y nacional se observa una clara y decidida política de ahorro energético, buscando depender menos de combustibles fósiles y encontrar un desarrollo sostenible basado en la eficiencia de sus procesos productivos, esto es eficiencia en sus costos de producción y un mejor aprovechamiento de su dieta energética. Por ende es importante cuantificar los insumos, productos y pérdidas energéticas de sus procesos, así como las causas de estas pérdidas.

La tesis desarrollada demuestra que *las características del carbón quemado en la caldera, los lazos de control y el requerimiento de aire influyen directamente en su comportamiento energético, por ende es factible la elaboración de un modelo que pronostique este comportamiento en función a las características de un nuevo carbón y sugiera los ajustes necesarios para mantener o mejorar la eficiencia energética.* Para esto es necesario evaluar cada una de las pérdidas energéticas de la caldera y relacionarlas con las propiedades de los tipos de carbón utilizados.

Los alcances de la tesis son:

- Determinación las pérdidas energéticas de la caldera y evaluarlas para cada tipo de carbón utilizado.
- Identificación del potencial de ahorro energético.
- Definición de parámetros operativos a ajustar.
- Elaboración de un modelo de respuesta de la caldera.

La tesis se basa en la primera ley de la termodinámica (de la cual es una aplicación particular) y en la teoría de las reacciones químicas; adicionalmente se apoya en las herramientas de análisis químico para la determinación de las propiedades de los flujos involucrados.

Se evaluará la respuesta de la caldera de la C.T.ILO21 a los carbones utilizados entre Julio de 2002 y Mayo de 2004, mediante muestreos semanales a carga base (135MW). Se incluyen los datos de las pruebas de aceptación de la caldera realizadas por el fabricante con carbón Adaro (IDADS) a modo de referencia. La aplicación del presente estudio puede realizarse a otras calderas de construcción similar con las consideraciones prácticas del caso.

CAPÍTULO 2

CONTEXTO ENERGÉTICO

2.1 Contexto Energético Mundial

La energía es un factor importante en el desarrollo de la humanidad, ya que permite que se realicen los procesos industriales, contribuye al bienestar de las personas y suple muchas de sus necesidades. En otras palabras, “la energía permite que el Mundo se mueva”.

En estas tres últimas décadas han sucedido fenómenos económicos, políticos y ambientales en el ámbito mundial que han causado impactos importantes. Por ejemplo, en Octubre de 1973 la OPEP decidió incrementar el precio del petróleo lo que originó una crisis económica en el ámbito mundial. Debido a ello se buscó diversificar las fuentes energéticas, teniendo como algunas alternativas:

- la utilización de energías renovables como la solar y la eólica,
- la energía nuclear,
- Programas de Ahorro de Energía.

En la década del 80, con la Globalización, los países repararon en sus costos de producción para ser más “competitivos”, entre estos costos de producción tenemos

los costos energéticos. A su vez, el incremento de necesidades y población obligan a un mayor consumo de energía.

Para los 90 se nota que el incremento del dióxido de carbono en la atmósfera, y se pronostica un calentamiento de la tierra (efecto invernadero). Esto ocasiona una crisis ecológica cuyas medidas más efectivas para reducir estos impactos son:

- implementar programas de eficiencia energética,
- utilizar energías alternativas limpias,
- fomentar programas de forestación y reforestación.

Estos impactos muestran la importancia medio ambiental y económica de los suministros de energía, es por esto que para que puedan desarrollarse en un determinado país o región, deben cumplir con los siguientes criterios de utilización:

1. **Acceso:** La energía debe contar con precios que son tanto económicos (lo suficiente para que sea accesible a los pobres) y sostenibles (precios que reflejen el costo real de la producción, transporte y distribución de energía para permitir a compañías que mantengan este servicio)
2. **Disponibilidad:** Se refiere a continuidad de suministro de energía a largo plazo así como la calidad de servicio a corto plazo. Esto también implica que la “correcta mezcla energética” se refiere a una bien diversificada fuente importada o propia de combustibles o fuentes de energía.

3. **Aceptación:** Es un aspecto importante tanto para energía tradicional como moderna; implica muchos temas como deforestación, degradación o acidificación de tierras en un nivel regional, interno o local.

El consumo de energía primaria continua creciendo desde la revolución industrial, un motivo es el rápido crecimiento de la población, donde el incremento del nivel cultural y las actividades industriales hacen aún más rápido el crecimiento del consumo energético.

El suministro energético se está diversificando, aunque aún el mundo depende en un 90% de combustibles fósiles (de los cuales el 27% es carbón)

2.2 Contexto Energético Peruano

El Mercado Energético Peruano ha evolucionado de acuerdo a las tendencias de la Economía Mundial y los criterios de Desarrollo Sostenible, por consiguiente tiende a mercados de libre competencia y poca intervención estatal.

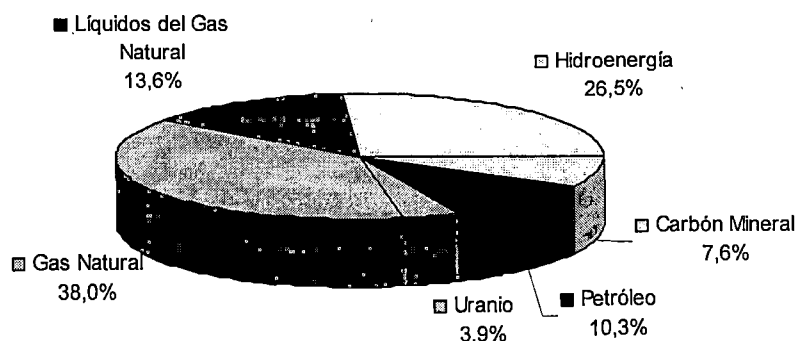


Figura 2.1. Reservas Probadas en Perú – 12/01 (Balance Nacional de Energía 2002)

Los objetivos de la política energética peruana son: cubrir los requerimientos de energía, en calidad y cantidad, de la población; y alcanzar un equilibrio entre el consumo, la infraestructura y los recursos naturales del país.

Las reservas probadas de energía a Diciembre de 2001 fueron de 22 487 275 TJ. Los yacimientos de Camisea poseen el 92.9% de las reservas de gas natural y el 97.7% de las reservas de líquidos de gas natural; el 87% de las reservas de carbón mineral se encuentran en el departamento de La Libertad, el tipo de carbón peruano es principalmente antracítico (aproximadamente un 97% de las reservas).

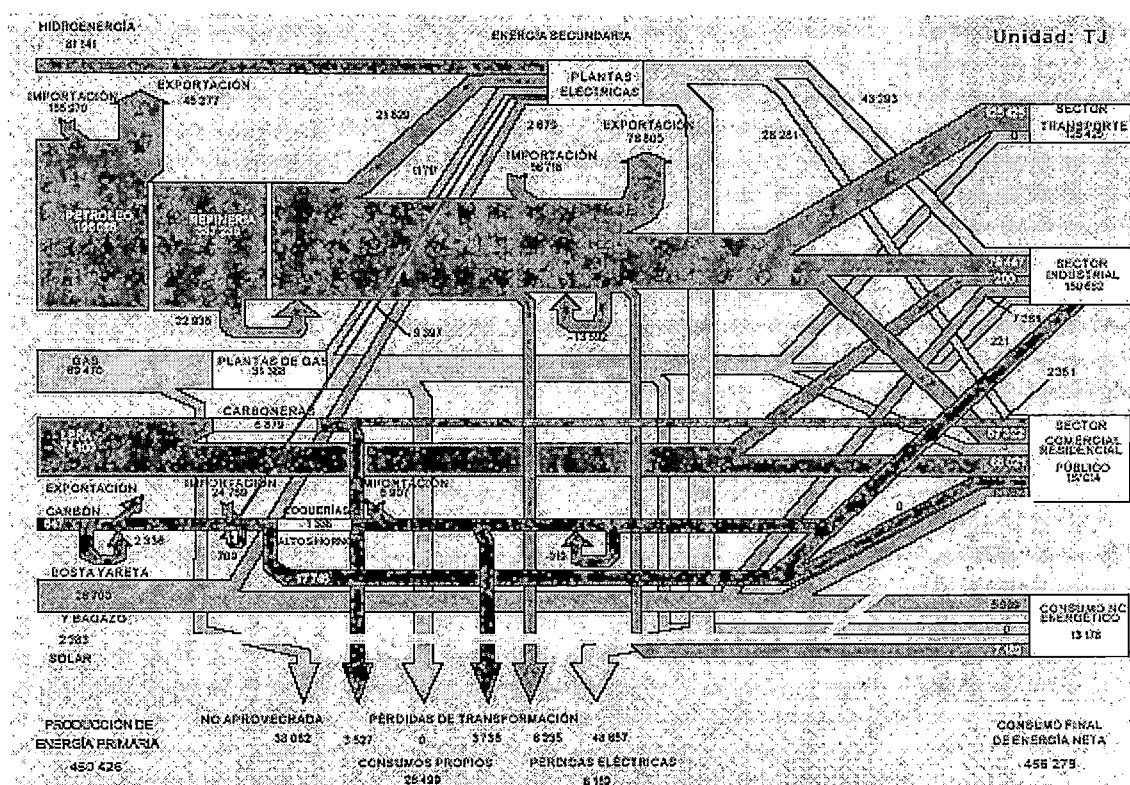


Figura 2.2. Balance Energético Nacional – 2002 (Fuente: OTERG-MEM)

En el año 2002 el consumo final total de energía fue 456 279 TJ superior en 2,1% al del año, siendo el consumo per cápita de 17.1 TJ/10³hab. El consumo tuvo la

siguiente estructura: residencial, comercial y público (36.6%); transporte (27.5%); industria y minería (27.6%); agropecuario, agroindustria y pesca (5.4%); lo cual refleja la poca industrialización existente, siendo los sectores residenciales y transporte los mayores consumidores.

Un punto importante es el peso de la leña en nuestra dieta energética (17.3%) superando al consumo de energía eléctrica (15.2%). Se mantiene la predominancia de los hidrocarburos (59.1%)

2.3 Mercado del Carbón

Analizar las reservas probadas y aprovechables de carbón involucra revisar dos niveles diferentes, por un lado, una revisión en términos de recursos, su ubicación, reevaluación de los estudios pasados y la relación entre reservas y producción/consumo, balances regionales y flujos comerciales. Por el otro lado debemos formular la siguiente interrogante: *¿qué significan las reservas recuperables probadas en términos de recursos energéticos para hoy y mañana, en términos de disponibilidad energética y uso de carbón?*

Para asegurar la disponibilidad de sus recursos se debe incidir en lo siguiente:

4. Exploración y descubrimiento para incrementar las reservas probadas.
5. Un incremento en el ratio de recuperación (actualmente en 20%)
6. Expansión del total de las reservas

7. Ampliar el espectro de utilización de los diversos tipos de carbón

Las perspectivas del desarrollo de los mercados de carbón dependen de la solución a los problemas que estos puedan originar, esta solución se plantea dentro de la “Estrategia Triángulo”, mediante la cual los tres factores: recursos, utilización y ambiente forman un solo triángulo interrelacionado.

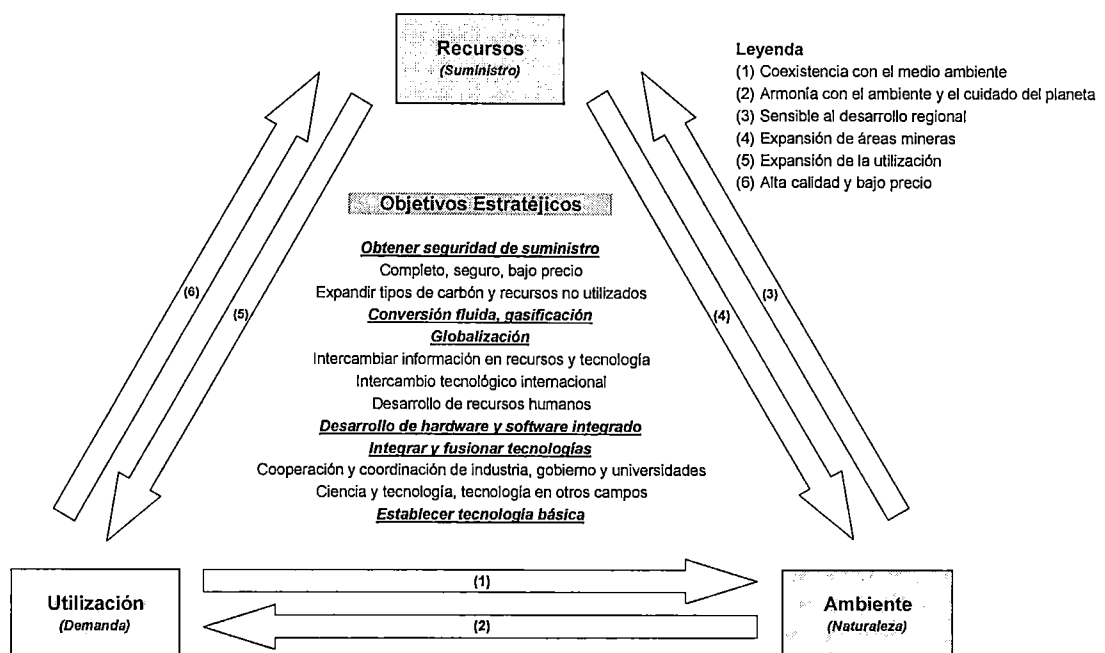


Figura 2.3. Estrategia Triángulo para el Carbón (Fuente: Japan Coal Center)

De este esquema se pueden extraer los principales problemas y soluciones:

1. Utilización

- Establecer sistemas de combustión adecuados para cada tipo de carbón.
- Incrementar la eficiencia de combustión (ahorro de energía y recursos)
- Mejorar el rendimiento económico.

- Expandir el uso de tecnología de conversión (licuefacción y gasificación)
- Utilizar recursos no utilizados (gas metano, lodo de preparación y otros)
- Reformular las aplicaciones.

2. Recursos

- Expandir el potencial de recursos (avanzar en exploración y desarrollar las tecnologías necesarias, determinar cambios en la calidad del carbón y la expansión de tipos de carbón, mejorar el ratio de recuperación)
- Establecer sistemas mineros con mayor eficiencia, bajo precio, estable y seguro.
- Incrementar la profundidad de explotación.
- Desarrollo de carbón limpio (reducción de ceniza, SO_x, NO_x y CO)
- Nuevas medidas para prevenir el calentamiento global (recuperación y reutilización de gas metano, acelerar los programas de reforestación)
- Innovar tecnología.

3. Ambiente

- Desarrollar métodos de prevención de la contaminación.
- Promover medidas medioambientales a escala global
- Establecer métodos y mediciones de evaluación medio ambiental

- Limitación de minería y medidas para proteger el medio ambiente
- Utilización y tratamiento eficiente de ceniza

Las reservas probadas de carbón para fines de 2002 son de 984 453 millones de toneladas, considerando como reservas probadas a aquellas cantidades de carbón que con información geológica y de ingeniería indica que se puede recuperar en el futuro de los yacimientos conocidos bajo las condiciones económicas y operativas existentes. La relación Reservas/Producción es de 204 años.

Tabla 2.1. Reservas Probadas de Carbón a Diciembre de 2002 (Fuente: British Petroleum)

	Antracita y Bituminoso	Sub-bituminoso y Lignito	Total	Estructura	Relación R/P
EEUU	115891	134103	249994	25,39%	252
Otros Norte América	4331	3458	7789	0,79%	97
Total Norte América	120222	137561	257783	26,19%	240
Brasil		11929	11929	1,21%	*
Colombia	6267	381	6648	0,68%	168
Venezuela	479		479	0,05%	60
Otros Sur y Centro América	992	1704	2696	0,27%	*
Total Sur y Centro América	7738	14014	21752	2,21%	404
Alemania	23000	43000	66000	6,70%	317
Kazakhstan	31000	3000	34000	3,45%	464
Polonia	20300	1860	22160	2,25%	138
Federación Rusa	49088	107922	157010	15,95%	*
Ucrania	16274	17879	34153	3,47%	412
Otros Europa y Eurasia	5212	36835	42047	4,27%	110
Total Europa y Eurasia	144874	210496	355370	36,10%	306
Sud África	49520		49520	5,03%	221
Zimbawe	502		502	0,05%	122
Otros África	5149	196	5345	0,54%	*
Medio Oriente	1710		1710	0,17%	*
Total África y Medio Oriente	56881	196	57077	5,80%	247
Australia	42550	39540	82090	8,34%	243
China	62200	52300	114500	11,63%	82
India	82396	2000	84396	8,57%	235
Otros Asia Pacífico	2201	9284	11485	1,17%	52
Total Asia Pacífico	189347	103124	292471	29,71%	126
TOTAL DEL MUNDO	519062	465391	984453	100%	204

* Más de 500 años

La producción de carbón en el 2002 fue de 2379.4 millones de TEP (4832.7 millones de toneladas) mayormente producido y consumido en la región del Asia Pacífico. Los países más intensivos en la producción y consumo de carbón son China y Estados Unidos.

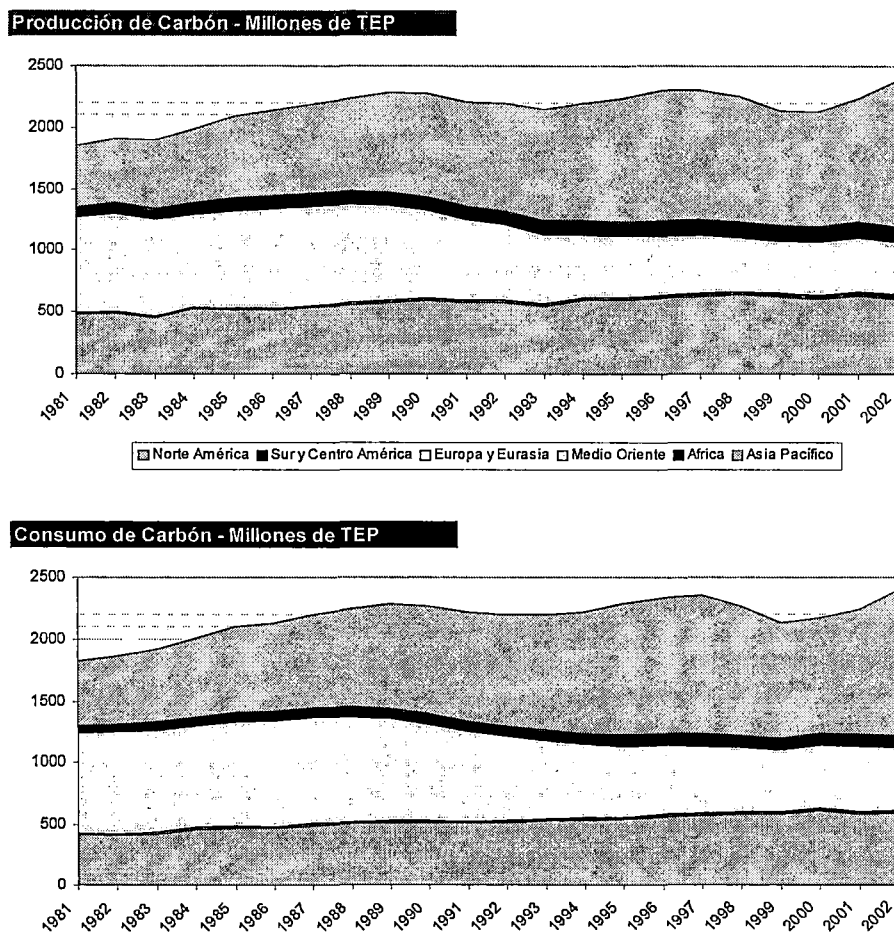


Figura 2.4. Producción y Consumo de Carbón en el Mundo (Fuente: British Petroleum)

La industria del carbón ha sufrido cambios importantes en los últimos años, basados principalmente en una globalización más amplia que incluye competencia, concentración global y reestructuración de mercados (al nivel de países)

La tendencia general que es no se imponga ningún límite a la utilización del carbón debido a su disponibilidad, pero si límites y restricciones a los mecanismos de utilización del mismo y su impacto en el entorno.

En términos de restricciones ambientales, aún no se conoce el impacto futuro de las regulaciones futuras de azufre o la regulación por destrucción de suelos.

Actualmente el mercado mundial de carbón ha incrementado el precio (estuvo con precios bajos hasta el 2002) y la tendencia general es que *“el carbón está disponible justo en la cantidad requerida en el momento deseado”*.

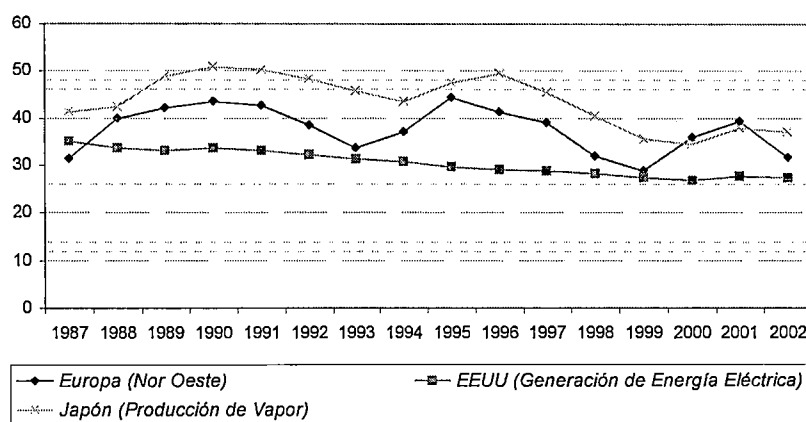


Figura 2.5. Precio del Carbón – US\$/ton (Fuente: British Petroleum)

Las reservas probadas dependen de los logros en exploración. Esta actividad está condicionada directamente por el precio del carbón y el desarrollo tecnológico.

2.4 Carbón en el Perú

El Carbón Peruano es primordialmente antracítico (97%) concentrándose a los largo de la costa y sierra centro y norte. Según el Balance Nacional de Energía 2002 las reservas probadas de carbón mineral son de 58.7 millones de toneladas (87% en La Libertad). Los yacimientos más importantes son Alto Chicama, Oyón, Santa, Tumbes y Cajamarca.

La producción registrada para diciembre de 2002 fue de 22 084 toneladas (realizada en mayor magnitud por Cementos Pacasmayo), mientras que la importación fue de 811 615 toneladas (principalmente realizada por Enersur con 38.5% y LarCarbón con 33.2%).

Prácticamente el 100% del carbón importado es de tipo bituminoso (principalmente procedente de Colombia: 79.5%), con un precio CIF promedio de 44.4 US\$/ton.

CAPÍTULO 3

CENTRAL TERMOELÉCTRICA ILO21

3.1 Ubicación

La Central Termoeléctrica ILO21 está ubicada en el kilómetro 25 de la Carretera Costanera Sur en la Zona denominada “Loma la Buitrera Pampa de Palo”, provincia de Ilo, departamento de Moquegua. El terreno para la unidad tiene una altitud de 25 m.s.n.m.

Tabla 3.1. Características de los Principales Equipos

<i>Turbina</i>		<i>Transformador de Potencia</i>	
<i>Fabricante</i>	Hitachi	<i>Fabricante</i>	Meidensha Corporation
<i>Tipo</i>	De condensación, tandem compuesta con recalentamiento y doble flujo en el escape.	<i>Tipo de enfriamiento</i>	ONAN/ONAF/ODAF
<i>Potencia</i>	135 MW	<i>Potencia</i>	102/136/169 MVA
<i>Velocidad</i>	3,600 rpm	<i>Número de fases</i>	3
<i>Presión de Vapor</i>	16.67 MPa (a)	<i>Frecuencia</i>	60 Hz
<i>Temperatura de vapor</i>	538°C	<i>Alto Voltaje</i>	220 kV
<i>Presión de salida</i>	4.5 kPa (a)	<i>Bajo Voltaje</i>	17 kV
<i>Gobernador</i>	Digital - Electro - Hidráulico.	<i>Taps</i>	220 kV ± 10 x 1.0% (21 taps)
<i>Horas de operación</i>	8000 horas anuales	<i>Conexión</i>	YNd11
<i>Número de arranques</i>	Frío : 10 por año (50 horas de parado) Caliente: 30 por año (8 horas de parado) 2 operaciones en isla por año		
<i>Condensador</i>		<i>Planta Desalinizadora</i>	
<i>Tipo</i>	Carcasa simple, dos pases.	<i>Fabricante</i>	Entropie
<i>Area de superficie</i>	6,480 m ² .	<i>Tipo</i>	MED 2 - destilación multi efecto (2 trenes)
<i>Presión</i>	4.5 kPa (a)	<i>Capacidad</i>	1300 m ³ /día/tren
<i>Carga de calor</i>	562 GJ/h	<i>Consumo de vapor</i>	9.1 t/h a 14 bar (g)
<i>Flujo de agua de mar</i>	15,700 m ³ /h	<i>TDS</i>	10 mg/l (Sólidos Disueltos)
<i>Material tubos</i>	Titaneo	<i>Conductividad</i>	20 µS/cm. a 25°C
<i>Número de tubos</i>	6476		
<i>Diámetro de tubos</i>	28.58 mm		
<i>Generador Eléctrico</i>		<i>Planta Desmineralizadora</i>	
<i>Fabricante</i>	Hitachi	<i>Fabricante</i>	Organo Corporation
<i>Capacidad</i>	169MVA	<i>Tipo</i>	Mixed Bed Polisher (2 trenes)
<i>Voltaje</i>	17.0 kV ± 5%	<i>Capacidad</i>	600 m ³ /día/ tren
<i>Factor de Potencia</i>	0.8		
<i>Frecuencia</i>	60 Hz	<i>Planta de Agua Pótible</i>	
<i>Polos y fases</i>	2 fases y 3 polos	<i>Fabricante</i>	Organo Corporation
<i>Enfriamiento</i>	Enfriado por aire.	<i>Tipo</i>	Por Inyección de Cloruro (2 trenes)
		<i>Capacidad</i>	72 m ³ /día/tren
		<i>Planta de Tratamiento de Aguas Servidas</i>	
		<i>Fabricante</i>	UNIDRO
		<i>Capacidad</i>	550 m ³ /día

Actualmente está constituida por una Unidad de 135 MW de potencia nominal (125 MW de potencia neta) constituidos por una turbina y una caldera que emplea carbón como combustible principal y diesel 2 como combustible alternativo y para arranques.

Adicionalmente se incluye:

- Un muelle para la descarga de carbón de 1,250 metros de longitud.
- Un cabezo de muelle para soportar dos grúas descargadoras de carbón.
- Dos canchas para almacenamiento de carbón (2 x 100 000 toneladas)
- Sistema de equipos y fajas para el transporte y manejo del carbón.
- Una estación de toma y bombeo de agua de mar para el enfriamiento de las unidades.
- Dos tuberías sifón (\varnothing 2.2m por 750 m de longitud) para captar agua de mar.
- Dos plantas de agua desalinizada.
- Una planta de agua desmineralizada.
- Una planta de producción de agua potable.
- Una planta de tratamiento de aguas servidas.
- Un sistema de extracción y manejo de escorias y cenizas.
- Sistema cerrado de agua de enfriamiento.

- Sistema de aire comprimido.
- Sistema de protección contra incendio.
- 01 tanque para el almacenamiento de diesel (5 000 m³).
- 02 tanques para almacenar agua desalinizada (2 x 2 600 m³)
- 01 tanque para almacenar agua desmineralizada (1 500 m³)
- 01 tanque para almacenamiento de agua potable (150 m³)
- Subestación tipo GIS (Gas Insulated Switchgear) en 220 kV.
- Edificio administrativo, talleres y almacenes.
- Cancha para depositar cenizas.

3.2 Proceso de Generación de Energía Eléctrica

3.2.1 Abastecimiento de Combustible

Actualmente el carbón llega a la central por medio de barcos autodescargables de hasta 50 000 toneladas de desplazamiento (1). Los barcos atracan junto a la plataforma de descarga (2), donde sus grúas retiran el carbón de las bodegas de la nave y lo vierten en las tolvas que lo distribuyen sobre la faja transportadora (antes del terremoto del 23 de junio de 2001 se contaba con dos gruas canguro en el muelle para realizar la descarga). Una segunda faja transportadora (3) conduce el carbón a lo

largo del muelle hasta las canchas donde es distribuido por medio del apilador (4) para formar pilas de carbón.

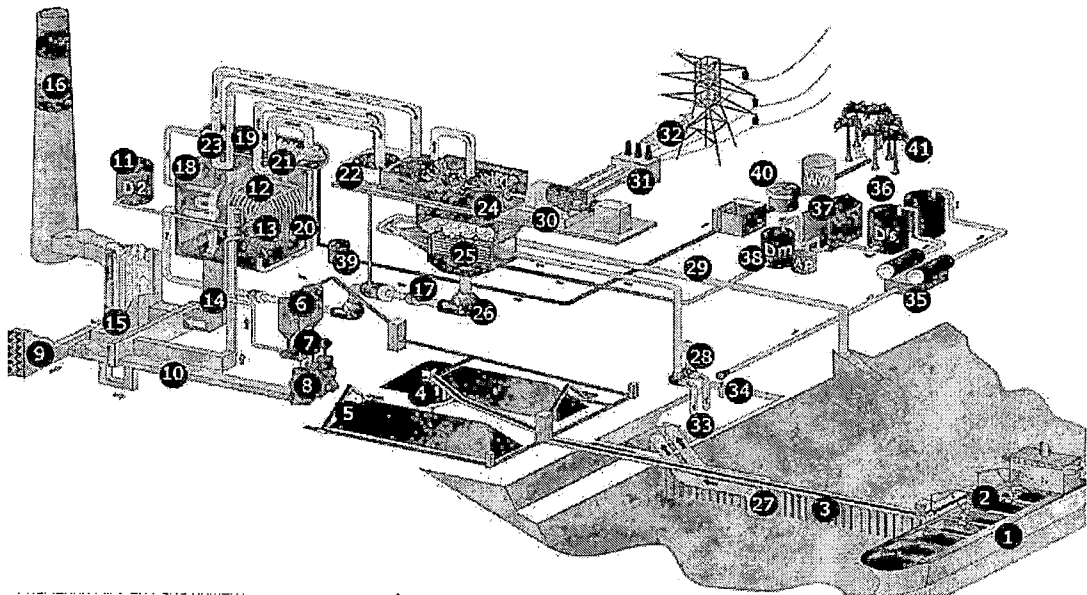


Figura 3.1. Proceso de Generación de Energía Eléctrica

El carbón es recogido de la cancha por dos recuperadores semiautomáticos (5), estos utilizan una banda de paletas, recogen el carbón de la pila y lo depositan sobre fajas transportadoras, las que lo conducen hasta los silos de almacenamiento (6). Esta operación de cargado de silos se realiza todos los días.

El carbón cae desde los silos hasta el alimentador (7) y, luego, al pulverizador (8) donde es triturado hasta convertirse en polvo.

Un ventilador de tiro forzado (9) provee el aire necesario para el proceso de combustión, mientras que el ventilador de aire primario provee el flujo de aire (10) requerido para el transporte de las partículas de carbón desde el pulverizador hasta

los quemadores (12), donde las partículas se encienden formando la llama en el hogar (13).

Como combustible de emergencia y para el arranque de la unidad se tiene el Diesel (11). Este es almacenado en un tanque de 5000m³ de capacidad y bombeado hacia los quemadores manteniendo una presión constante de diesel para su utilización inmediata.

Tabla 3.2. Características del Diesel 2

Especificaciones		Prueba ASTM	Valores en Tanque	
			Mínimo	Máximo
Total Cenizas	ppm	D-482		20
Gravedad API	@ 60°F	D-287	34	
Apariencia, Color ASTM				3
Residuo de Carbón	% peso	D-524		0.012
Punto de Nebulosidad	°C	D-2500	-4	
Índice de Cetano		D-4737	45	
Número de Cetano		D-618	50	
Corrosión por Cobre		D-130		3
Temperatura de Destilación				
	50% °C	D-86		256
	90% °C	D-85		329
Punto de Inflamación	°C	D-93	52	
Hidrógeno	% peso			
Viscosidad Cinemática	Cst (37.8°C)	D-445	1.90	4.1
Lubricidad	gm, min	D-6073	2800	
Poder Calorífico Bajo	kJ/kg	D-240	42566	
Nitrógeno	% peso			
Estabilidad a la Oxidación		D-2274		2
Punto de Fusión	°C	D-97-93	-7	-18
Sodio + Potasio	ppm			4
Gravedad Específica (15.6°C)		D-1298	0.835	0.855
Azufre	% peso	D-2622		0.5
Vanadio	ppm			0.5
Sedimentos y Agua	% volumen	D-2709		0.05

3.2.2 Transferencia de Energía al Circuito Agua - Vapor

Después de formarse la llama en el hogar (13), los gases calientes pasan por el exterior de los tubos del sobrecalentador (21), recalentador (23) y economizador (18), antes de dejar la caldera. Luego, a través de ductos (14) se dirigen al precipitador electrostático (15) donde queda atrapada la ceniza volante y,

finalmente, son emitidos a la atmósfera a través de la chimenea (16). El precipitador electrostático tiene una eficiencia del 99% y constituye uno de los componentes modernos que hacen de la quema de carbón un proceso de combustión limpio acorde a los requerimientos ambientales vigentes.

Los gases calientes transfieren su energía a los tubos del hogar de la caldera (20) por donde circula agua tratada. Esta se evapora en el domo de la caldera (19) y, luego, el vapor formado eleva su temperatura en los tubos del sobrecalentador (21)

3.2.3 Transformación de Energía Térmica en Mecánica

El vapor sobrecalentado se dirige hacia la turbina de alta presión (22) impulsando los álabes de ésta, con lo cual se consigue el giro de la misma. El vapor con menor presión deja la turbina de alta presión y retorna a la caldera donde vuelve a calentarse en el recalentador (23). El vapor recalentado se dirige hacia la turbina de media y baja presión (24) donde impulsa los álabes de éstas, convirtiendo la energía térmica en energía mecánica, la cual se transmite por el eje de la turbina. En la última etapa, el vapor saliente de la turbina de baja presión, cambia a estado líquido en el condensador (25) que emplea como medio enfriador agua de mar.

El condensado obtenido, en la caja del condensador (25), es bombeado hacia el desaereador pasando por tres calentadores de baja presión, del desaereador es bombeado hacia la caldera pasando por tres calentadores de alta presión, a través de la tubería de agua de alimentación (17) ingresando por el economizador (18), completando así este ciclo.

3.2.4 Transformación de Energía Mecánica en Eléctrica

Acoplado al eje de la turbina se encuentra el generador eléctrico (30), donde la energía mecánica se convierte en energía eléctrica, con un voltaje de 17 kV. Esta energía eléctrica eleva su voltaje en el transformador principal (31) hasta 220 kV, para poder viajar por dos líneas de transmisión (32) hacia la sub estación de Moquegua y de allí a los centros de consumo.

3.2.5 Tratamiento de Aguas

El agua de mar, que se emplea como medio enfriador para el condensador, se obtiene por medio de un tubo sifón (27), que la descarga en la poza de captación (33), donde es bombeada (28) hacia el condensador, para finalmente ser descargada al mar (29).

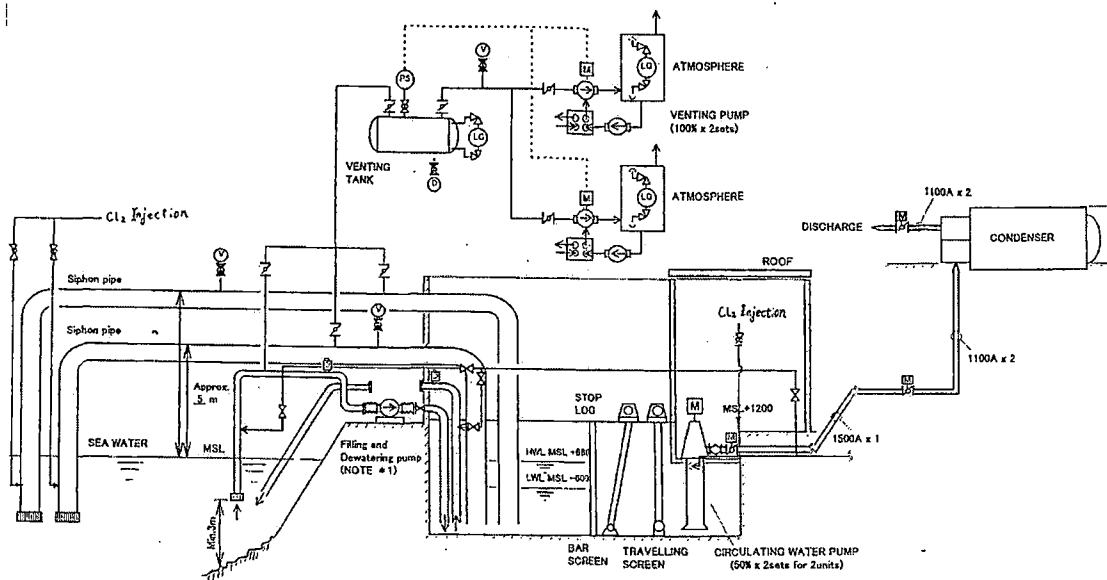


Figura 3.2. Sistema de Toma de Agua de Mar

Asimismo, de la poza de captación (33) se bombea agua de mar (34) hasta la planta desalinizadora (35). El agua desalinizada se almacena en dos tanques (36), y de allí

es conducida a la planta desmineralizadora (37) donde se produce agua sin sales ni minerales. El agua desmineralizada es almacenada en un tanque (38) y de allí es inyectada al condensador a través de una línea de reposición.

Durante la operación de la caldera se producen purgas; las cuales se realizan a través del tanque de "BlowDown" (39). Estas purgas junto con los drenajes industriales de la planta y desagues de las instalaciones, se conducen hasta la planta de tratamiento de aguas servidas (40), y el agua tratada resultante de esta planta se utiliza en el sistema de forestación (41) alrededor del terreno de la Central Termoeléctrica Ilo2.

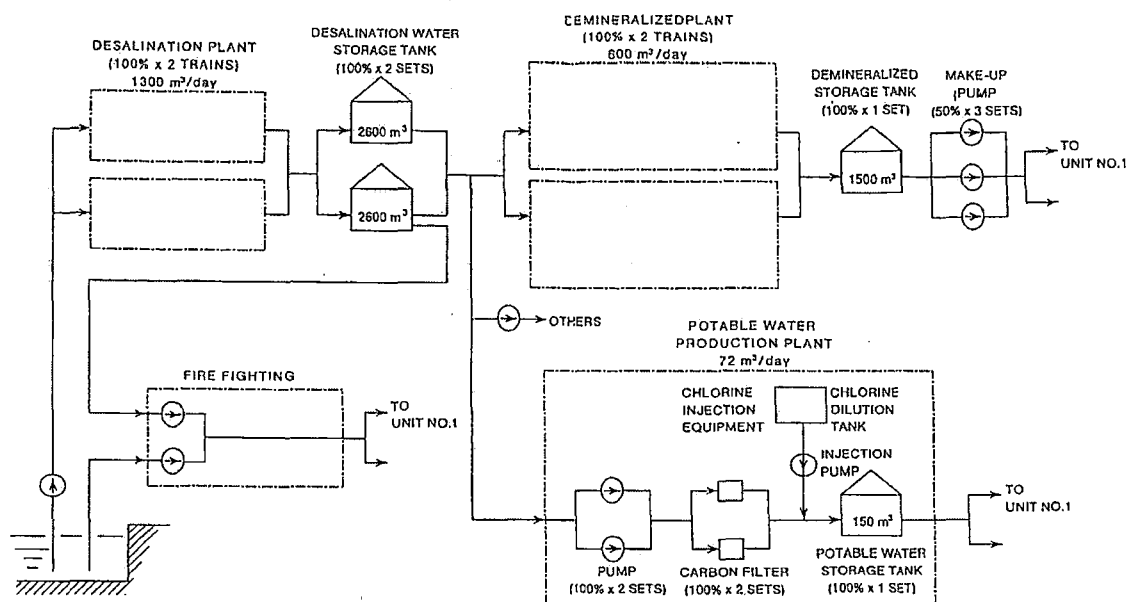


Figura 3.3. Esquema del Tratamiento de Agua

3.2.6 Sistema de Control e Información Distribuido - SCID

El Sistema de Control e Información Distribuido de la Central (SCID o DCIS por sus siglas en inglés) está compuesto, principalmente, por dos SCID (SCID de la Unidad 1 y SCID de Sistemas Comunes a las dos Unidades).

La comunicación del operador con ambos SCID (interfase hombre-máquina) se realiza mediante estaciones de trabajo de operación e impresoras, situadas en la sala de control principal del edificio principal de control.

Por otra parte, existen diversos sistemas de control autónomos que realizan el control y supervisión de distintos sistemas y subsistemas de la central. Estos sistemas de control están distribuidos por la central, en localizaciones cercanas a los equipos que controlan. Los sistemas de control autónomos realizan el control de sus sistemas independientemente del SCID. Sin embargo, se han establecido interfases entre algunos de estos sistemas y el SCID para permitir al operador en la Sala de Control supervisar el estado de algunos equipos, recibir alarmas y ejecutar órdenes de abrir/cerrar o arrancar/parar algunos accionamientos.

El SCID de la Unidad 1 está dividido funcionalmente en 2 secciones: Turbina y Caldera. Los controles de turbina y caldera están distribuidos funcionalmente y son ejecutados por diversos controladores redundantes en la sección correspondiente.

Las funciones del SCID se pueden dividir en los siguientes grupos:

- Funciones de adquisición de datos y emisión de órdenes.
- Funciones de control de accionamientos y de arranque/parada automático.
- Funciones de control analógico
- Funciones de protección (caldera)
- Funciones de alarmas, secuencia de acontecimientos, archivo e informes

- Interfase con sistemas de control autónomos
- Cálculos de rendimiento
- Funciones de supervisión por pantalla

El SCID incluye los controles digitales de los accionamientos más importantes de la unidad así como el arranque/parada automático de la Planta. A través del SCID el operador puede establecer diferentes niveles de automatización de la planta. En el nivel superior, el SCID-U realiza las funciones de control requeridas para el arranque y parada automático de la planta mientras que, en el nivel inferior, el operador tiene control manual directo sobre los accionamientos.

El SCID incluye los controles analógicos de los lazos más importantes de la unidad, así como el control coordinado de la unidad.

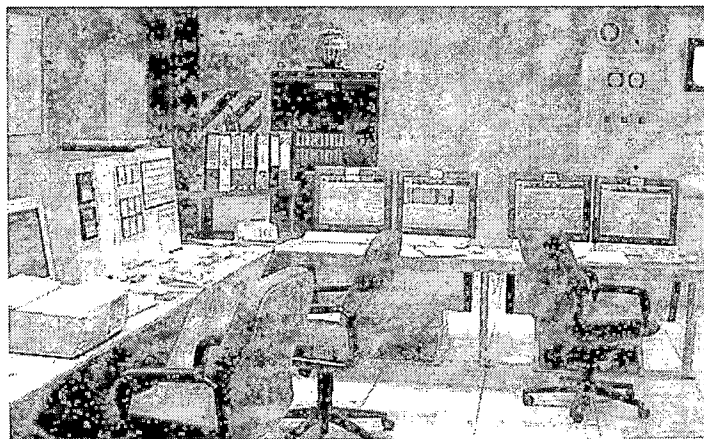


Figura 3.4. Sala de Control de la C.T. ILO21

Las protecciones de planta suministran un medio fiable de protección de la unidad durante todas las fases de operación. Las plantas de caldera, turbina y generador disponen de sistemas de protección separados que están interconectados para

disparar la planta ante situaciones de peligro o si las variables críticas superan los límites de seguridad.

Las funciones de supervisión por pantalla del SCID suministran al operador información sobre el valor y estado de los parámetros de los sistemas de la unidad mediante gráficos de proceso (mímicos) y gráficos de tendencias, a visualizar en las CRT de las estaciones de trabajo. Cada mímico contiene una parte estática, consistente en una representación esquemática del diagrama de flujo de un sistema o parte del mismo (tuberías, depósitos, etc.); una parte dinámica (bombas, válvulas, interruptores, etc.) que cambia de color en función del estado de las variables digitales (rojo para abierta/marcha, verde para cerrada/parada); y, una parte dinámica que muestra el valor de las variables analógicas (en forma de barra, nivel, valor numérico, etc.), controlada por las variables analógicas. En torno a los accionamientos a controlar presentes en los mímicos (válvulas, bombas, etc.) existe una zona de activación que da acceso a la estación de mando virtual correspondiente al accionamiento. Los gráficos de tendencias muestran los trazos coloreados de la evolución en el tiempo de hasta 8 variables. Las tendencias pueden representar tanto valores actuales como valores históricos o almacenados en archivos.

3.3 Principios Básicos del Diseño de Calderas

La ingeniería de combustión es la "*ciencia de quemar un combustible para liberar calor y capacitarlo para desarrollar trabajo útil o proporcionar calefacción*". La operación de una unidad generadora de vapor, comprende en la conversión del

potencial energético del combustible en energía térmica y la transmisión de esta energía a un medio (generalmente vapor de agua) para emplearse en un trabajo útil.

Cada paso dado en el proceso de la generación de vapor, está asociado al fenómeno de transmisión de calor, cuyo punto culminante es el cambio de estado del agua (líquido a vapor).

3.3.1 Consideraciones para el Diseño

El problema básico del diseño de una caldera consiste en "disponer la superficie total de absorción de calor de una manera tal, que extraiga el calor máximo obtenible del combustible y de los productos de la combustión". Al mismo tiempo aparece el problema económico de obtener la máxima eficiencia al costo mínimo posible. Para una economía máxima general, cada parte componente y cada proceso debe estar en correcta proporción en relación con los demás elementos y procesos, de manera que toda la unidad en conjunto represente un diseño equilibrado.

Estos elementos y procesos, incluyen lo siguiente: Caldera, hogar, quemadores, recolección y transporte de cenizas, separadores de vapor, agua de alimentación, purga, aire para la combustión, remoción de los productos de la combustión, cimentaciones y soportes, refractarios y mamparas, precalentamiento de aire y del agua, accesorios de la caldera.

3.3.1.1 Necesidades del Servicio

Un generador de vapor para central termoeléctrica de servicio público, se diseña sobre la base del costo total de la producción de electricidad. Opera con coeficientes de evaporación estrictamente controlados y un ciclo normal de carga. Un personal

altamente competente debe efectuar una inspección rígida, un mantenimiento constante y la programación de reparaciones. El desembolso de grandes sumas se justifica únicamente mientras se obtenga el máximo de eficiencia y costo mínimo por unidad de potencia producida. El ahorro en los combustibles es aun de mayor importancia que los costos de las reparaciones, especialmente si éstas pueden ser previstas para los periodos de carga baja. La caldera y el turbogenerador constituyen el equipo primordial de producción de una central termoeléctrica para servicio público, dedicada a la producción de energía eléctrica.

El diseño determinará la capacidad de la caldera para sostener una carga normal con una eficiencia alta, así como para responder a una demanda alta y los cambios bruscos de la carga. Determinará también las pérdidas por trabajo en vacío y la rapidez con la que la unidad puede calentarse hasta hacer vapor a su plena capacidad.

3.3.1.2 Combustibles y Combustión

Las bases para el diseño de los mecanismos destinados a quemar, son determinados por las cualidades del o de los combustibles que han de emplearse. Se tiene que considerar no solamente la clase de combustible que se puede obtener, sino también su valor calorífico y sus propiedades. Se debe también investigar las propiedades de las cenizas, incluyendo el punto de fusión de la ceniza, las pérdidas por combustible no quemado (carbón en la ceniza suelta y en los desperdicios), y la presencia de azufre, vanadio y otros elementos extraños.

El tipo de equipo para quemar el combustible y el método de su aplicación, impone las condiciones para el diseño del hogar en mayor grado; y en proporción menor

también para el diseño de la caldera. La capacidad del equipo de combustión o el tamaño de la parrilla, determina la cantidad de combustible aplicable. Cada método de combustión tiene sus propias necesidades y peculiaridades de diseño. Los quemadores de aceite combustible, que son más pequeños, requieren una cámara de combustión. Algunos quemadores mecánicos de combustible sólido, precisan de un enfriador de escorias; otros necesitan medios auxiliares para prevenir la coquización del combustible y las dificultades provenientes de la conversión de cenizas en escoria.

Para mantener la combustión es indispensable suministrar aire y desfogar los productos de la combustión. La corriente necesaria de los gases es originada por la diferencia de presiones entre el fogón y el punto de escape de los gases de la caldera, o sea el tiro; éste se puede conseguir por medios naturales (efecto de chimenea) o por medios mecánicos (ventiladores). El tiro por elementos mecánicos puede ser originado por ventiladores de tiro forzado, de tiro inducido, o de ambas cosas a la vez. Los dispositivos del tiro comprenden el aire primario, el aire secundario, así como los aditamentos para su correcta regulación y proporciones. La mezcla íntima del combustible con el aire, es auxiliada en algunos casos utilizando aire adicional por encima del fuego, cuando se opera con inyectores de aire o de vapor. La resistencia por fricción crea una caída de presión a través de la unidad, que determina la magnitud del tiro. Con regímenes de combustión altos, las necesidades de tiro aumentan, requiriéndose motores más grandes para los ventiladores o chimeneas de mayor altura. Si la proporción de combustión es extremada, una cantidad de combustible es arrastrada a través de los pasos de la caldera y descargada por la

chimenea. Si el humo, cenizas u hollín constituyen una molestia, será necesario instalar colectores de ceniza o modificar el método de combustión.

En adición a las necesidades teóricas, es indispensable suministrar exceso de aire, para asegurar una cantidad suficiente de oxígeno para la combustión. Este excedente puede variar, de un porcentaje abajo del 20% para quemar carbón pulverizado, hasta 50% para alimentador de carbón o 100% para alimentación manual de combustible. El porcentaje del exceso de aire tiene influencia sobre la capacidad de la caldera, la temperatura del fogón y la eficiencia total de la unidad.

Unidades de alta eficiencia requieren el precalentamiento del aire de la combustión, quedando la temperatura limitada únicamente por la capacidad del equipo de combustión.

3.3.1.3 Agua de Alimentación

El agua que se introduce a la caldera para ser convertida en vapor, recibe el nombre de agua de alimentación. Si se trata de condensado que es recirculado, habrá pocos problemas. Pero si es agua cruda, probablemente habrá necesidad de liberarla de oxígeno, precipitados, sólidos en suspensión, sustancias incrustantes y otros elementos contaminantes. La presencia de ingredientes que provocan la formación de incrustaciones, espumas o arrastre de agua con el vapor, afectarán desfavorablemente, en todos los casos, el funcionamiento de la caldera. Para obtener eficiencias altas, el agua de alimentación es calentada, generalmente, por medio de economizadores.

3.3.1.4 Hogar

La proporción de calor liberado y la temperatura sostenida del fogón, afectarán a los materiales de las paredes del mismo y con tal motivo rigen su construcción. Si la temperatura o la erosión provocan una destrucción prematura de las paredes refractarias, lo indicado será colocar paredes enfriadas por agua. La cámara de combustión debe tener el espacio suficiente para contener la flama. La forma del fogón se guía por el tipo de combustible a emplear y por el método seguido para quemarlo. Es necesario tomar las debidas providencias para mantener la ignición y la combustión de los gases volátiles.

La recolección y el retiro de las cenizas de una unidad alimentada con carbón mineral, es una operación laboriosa. Los desechos pueden ser removidos a mano en las calderas chicas o recolectados en tolvas en las grandes. La ceniza que se retira puede ser seca o húmeda.

3.3.1.5 Caldera

La función principal de la caldera propiamente dicha, es proporcionar un medio por el cual el calor procedente de la combustión se transmita al agua o al vapor que debe ser calentado. El objetivo es lograr la mejor disposición de la superficie de calefacción, de acuerdo con las limitaciones en cuanto al espacio disponible y los arreglos necesarios en el hogar y en los demás componentes. La superficie de calefacción requerida depende de su clase, puede ser primaria, secundaria, de sobrecalentamiento, recalentamiento, economizador o de calentador de aire.

El tipo de caldera así como la presión y la temperatura de trabajo, tienen gran influencia sobre el diseño. La circulación del vapor y del agua dentro de la caldera, es decisiva para la efectividad de la superficie transmisora de calor. Los precipitados o sedimentos tienen que depositarse en donde no afecten a la superficie principal de transmisión de calor y de donde puedan ser evacuados por purga o limpieza periódica. La cantidad de agua contenida en la caldera determina la rapidez con la que puede calentarse para alcanzar las condiciones de evaporación (o producción de vapor).

Los materiales y los métodos de construcción están controlados por los requisitos para el trabajo a presión y por el código ASME para calderas y tanques de presión.

La transmisión de calor no solamente tiene que ser económica, sino también libre de defectos. Cuando se opere a alta capacidad, los costos de mantenimiento y los periodos de parada, pueden ser excesivos y anular las ventajas obtenidas en la operación inicial. Los requisitos de la limpieza y del mantenimiento tienen que guardar un equilibrio razonable en relación con la más alta eficiencia de transmisión de calor. Como las decantaciones de hollín en estas calderas afectan seriamente la eficiencia, en el diseño se deben tomar previsiones contra la acumulación de cenizas, hollín y escorias en las superficies del lado del fuego, como también contra la acumulación de lodos, incrustaciones y sedimentos en las superficies bañadas por el agua.

Es necesario tomar providencias para la fácil limpieza de los tubos química o mecánicamente, el soplado del hollín y el lavado de las superficies del economizador y del calentador de aire.

3.3.2 Limitaciones de Capacidad y Eficiencia

La limitación más importante para la capacidad de vapor de una caldera, es la cantidad de combustible que puede ser quemado en el hogar. El tamaño de la superficie de calefacción y la forma en que se dispone, tiene un efecto mucho menor, sobre todo si la mayoría del calor es absorbido por las superficies de convección. Es necesario tomar en cuenta la diferencia entre la efectividad de las superficies primaria y secundaria.

Cuando se ha logrado obtener el valor máximo de la eficiencia en la combustión de determinado combustible, el único método a seguir para obtener mayor capacidad, es quemando mayor cantidad de combustible o lograr mayor aprovechamiento de la cantidad de combustible quemada. La cantidad de combustible que se puede quemar, está limitada por el volumen del hogar y por el equipo de combustión.

Las limitaciones de la absorción de calor por las superficies de la caldera, son en primer lugar las relativas a la vida de la misma. Las superficies en contacto con el agua cubiertas con incrustaciones, sedimentos o lodos, tienden a sobrecalentarse y a quemarse. Las superficies en contacto con el fuego, están expuestas a la corrosión, a la fragilidad cáustica y fenómenos similares. Todos los elementos de una caldera son afectados por periodos continuos de calentamiento y enfriamiento y por las dilataciones y contracciones que esto ocasiona. Un servicio prolongado y satisfactorio, obedece a los factores siguientes:

1. Diseño de la caldera,
2. frecuencia, monto y proporción de los cambios de temperatura,

3. materiales,
4. técnicas de construcción,
5. presión de la caldera,
6. corrosión y abrasión.

La eficiencia de una unidad generadora de vapor depende de las características del diseño de la caldera, el combustible empleado y el tipo de quemadores y las condiciones de operación. La eficiencia máxima se obtiene a una carga mayor o menor que la capacidad nominal; la curva de eficiencia tendrá una trayectoria relativamente plana (constante) sobre un margen de rendimientos amplio.

Los factores controlables que afectan la eficiencia máxima de un generador de vapor son el exceso de aire, la temperatura de los gases de combustión, combustión incompleta (combustible que queda sin quemarse), mantenimiento defectuoso y operación a baja capacidad.

3.3.2.1 Exceso de Aire

La cantidad de aire necesario para la combustión se determina por el tipo de combustible. Es preciso suministrar aire en exceso, en una proporción que garantice la combustión completa. El monto de este exceso de aire es determinado por los siguientes factores:

1. Composición, propiedades y condiciones del combustible al ser quemado,
2. método por el cual se quema el combustible,

3. disposición y proporciones de la parilla o de la cámara de combustión,
4. temperatura admisible en el hogar,
5. la turbulencia y la completa mezcla del aire con los gases del combustible volatilizado.

El exceso de aire reduce la eficiencia de la caldera si se baja la temperatura del hogar y porque absorbe calor que de otra manera quedaría disponible para generar vapor.

3.3.2.2 Temperatura de los Gases de Escape

La temperatura final de los gases de la combustión (a la entrada de la chimenea), está limitada por el punto de condensación (punto de rocío). Como la condensación conduce a la corrosión, especialmente si el combustible tiene un contenido alto de azufre, debe evitarse este punto de condensación. Como el uso de superficies de convección no es práctico generalmente para los propósitos de recuperación, se emplean economizadores y calentadores de aire.

Los depósitos de materias extrañas, ya sea en la superficie del lado del fuego o del lado del agua de la caldera, retardará la transmisión del calor. La elevación de la temperatura de los gases de combustión a su salida, es el índice de la pérdida de eficiencia.

3.3.2.3 Combustibles no Quemados

La ceniza de carbón contiene generalmente alguna proporción de combustible no quemado. Este carbón se mezcla con la ceniza y es removido con ésta del foso colector, o se escapa con los gases de la combustión y las cenizas volátiles. La

pérdida de combustibles sólidos variará de acuerdo con el combustible, el método de combustión, el contenido de cenizas, el tamaño del combustible al quemarse, el equipo usado en la combustión y con el diseño del hogar. Esta pérdida puede llegar hasta el 20% del suministro total de combustible.

La combustión incompleta da lugar a la formación de monóxido de carbono o de partículas de carbón no quemado que escapan del hogar en este estado. La combustión incompleta es fomentada por la falta de aire suficiente para la combustión, la mezcla defectuosa del aire y los gases combustibles volatilizados o el enfriamiento de los combustibles.

3.3.2.4 Características de la Flama

La flama es un fenómeno de la reacción química de un gas que ha sido calentado hasta su punto de ignición en la presencia de otro gas, usualmente el oxígeno de la atmósfera. El calor y la luz producida, son características de la reacción química específica. La luminosidad de la flama es causada generalmente por la presencia de partículas sólidas y de cuerpos extraños en el gas en combustión, al ser calentado hasta la incandescencia. Las flamas que contienen partículas finas de carbón incandescente, u otro tipo de residuos de carbón, son las que forman el cuerpo opaco de efectividad radiante. Las flamas no luminosas, como las de la combustión del gas del combustible, obtienen su efectividad radiante del dióxido de carbono y del vapor de agua, que tienen un valor bajo de radiación, de aproximadamente el 10% de la que se obtiene del cuerpo opaco. Grandes cantidades de radiación se desarrollan en las frecuencias de la zona infrarroja (abajo del alcance visual). La flama no luminosa es

mucho más caliente que la luminosa, porque transforma en calor una cantidad mayor de energía.

Hay una notoria diferencia entre las flamas de los diversos combustibles. La luminosidad de la flama del aceite combustible es alta, lo que da por resultado una transmisión alta de calor radiante de la llama al material refractario y a las paredes enfriadas por agua. En los combustibles gaseosos, la mayor parte de la transmisión de calor es por convección, una vez que los gases abandonan el hogar propiamente dicho. Como aquí la radiación es mínima, no se requieren paredes enfriadas por agua en el hogar.

El carbón de antracita arde con una flama corta, casi transparente. El calor radiante proviene sólo del lecho incandescente del hogar. La antracita pulverizada arde con una llama un poco visible. A consecuencia de que la antracita no posee cualidades volátiles, es necesario limitar las superficies de enfriamiento al alcance de lo que pueda radiar el calor: porque de otra manera bajará la temperatura de ignición y entonces el carbón no arde.

El carbón semibituminoso, arde con una flama corta y clara. Los componentes volátiles se destilan en forma de gases permanentes que no se decantan para formar hollín. El carbono fijo residual es denso y arde lentamente sin flama visible. El carbón bituminoso arde con una flama larga y luminosa. El carbón subbituminoso y el lignito arden con una flama larga y amarilla, similar a la del carbón bituminoso. (Semibituminoso, bituminoso, subbituminoso y carbones de lignito, todos ellos requieren un volumen grande del hogar para tener una combustión completa).

3.3.3 Transmisión de Calor

El flujo del calor que se origina al quemarse el combustible y que es conducido por los productos de la combustión hacia el agua o el vapor, se efectúa por tres vías: radiación, convección y conducción. Por uno u otro de estos conductos, o por la combinación de los tres, se desarrollan todas las fases de la transmisión del calor.

1. La *radiación*, es la transferencia directa de calor en forma de energía radiante, procedente de la incandescencia del combustible o de las flamas luminosas y de los refractarios, a los tubos o al cuerpo de la caldera. La absorción radiante en una caldera, es una función de la extensión de superficie que está expuesta al reflejo de los refractarios y a los efectos de las flamas. Es un proceso completamente independiente del espacio circundante.
2. La *convección*, es la transferencia de calor entre un fluido (gaseoso o líquido), causada por el movimiento o agitación, que fuerza a las partículas calientes a reemplazar continuamente a las enfriadas al contacto con la superficie absorbente de calor. La convección natural o libre, es causada solamente por las diferencias de densidad, que provienen del diferencial de temperatura. La convección forzada, es causada por medio de fuerza mecánica, aplicada para impartir movimiento al fluido.
3. La *conducción*, es la transferencia de calor de una parte a otra de un mismo cuerpo o a otro cuerpo con el que está en contacto físico, pero sin un desplazamiento apreciable de las partículas dentro de dicho cuerpo.

La absorción de una gran cantidad de calor del fogón por radiación, es posible. En consecuencia, debe darse especial atención al diseño y colocación correctos de la superficie de absorción de calor radiante (superficie primaria). La superficie de calefacción sobre la que refleja el calor, es la llamada directa o radiante; la que solamente tiene contacto con los gases, es llamada superficie indirecta o de convección. El tamaño de la superficie de calefacción, su distribución y la temperatura en cada uno de sus lados, todo esto ejerce influencia sobre la capacidad de la caldera. La superficie de calefacción directa es más valiosa que la indirecta, ya que aquélla es sometida a temperaturas más altas y también porque está en condiciones de recibir toda la energía radiante producida por el combustible y por su flama. En las llamas no luminosas, las superficies de calefacción directa pierden su valor.

La transferencia de calor es afectada en grado variable por los siguientes factores:

1. La temperatura de la flama o de los productos de la combustión,
2. Turbulencia y choque de los gases calientes sobre las superficies que contienen agua en el lado opuesto, explicable por el coeficiente de transmitancia superficial de calor.
3. Acumulaciones de escorias, cenizas volátiles u hollín en las superficies en contacto con el fuego.
4. Conductibilidad del metal.

5. Acumulación de incrustaciones o sedimentos en las superficies en contacto con el agua.
6. Turbulencia y movimiento del vapor y del agua, explicable por el coeficiente de evaporación superficial.

El contorno, diseño y localización de la superficie de calefacción, son todos factores importantes. La superficie de calefacción debe permanecer limpia. Si se ensucia fácilmente, o no se puede limpiar debidamente, no trabajará con efectividad. Las acumulaciones de escoria y hollín en el lado del fuego, o las de incrustaciones y sedimentos en el lado del agua, tienen el efecto de mayor importancia sobre la transmisión de calor de todos los factores indicados. En las zonas de convección, tales como los retornos de la caldera, es este el factor de control. En las áreas expuestas al calor radiante, desempeña un papel secundario con respecto a la efectividad de la flama.

La acumulación de materiales extraños, ya sea en el lado del agua o en la superficie del fuego, ocasiona pérdida de eficiencia. Los depósitos de lodos o las incrustaciones conducen al sobrecalentamiento y rupturas en los tubos. El hollín y otros cuerpos adheridos a la superficie del lado del fuego, no causan daños mayores, pero los ácidos que se forman por la reacción química entre la humedad y los productos sulfurosos, provoca la corrosión y la ruptura de los tubos. Las cenizas muy finas y otras partículas duras, causan la abrasión de las superficies del lado del fuego.

El acero y el fierro colado, no tienen diferencias de consideración en su conductibilidad térmica ni en las características de transferencia de calor.

3.3.3.1 Transmisión de Calor en el Hogar

Un análisis de la transmisión de calor en el hogar, es extremadamente complicado y no se puede sujetar a cálculos teóricos. Sin embargo es absolutamente necesario prever la temperatura de salida del hogar, porque el diseño del resto de la unidad generadora de vapor depende de este dato.

La temperatura varía a través de todo el hogar. El combustible y el aire entran a una temperatura relativamente baja, alcanzan una temperatura alta durante la combustión y vuelven a enfriarse cuando los productos de la combustión se desprenden de su contenido de calor. Las superficies enfriadas por agua, tienen una temperatura relativamente baja, mientras que los depósitos en los tubos y los refractarios en las paredes del hogar, tienen temperaturas altas. Las temperaturas varían con la carga, exceso de aire, ajuste del quemador y otras condiciones de la operación. La transferencia de calor de un hogar es afectada por la complicada geometría del mismo, por la forma y el largo de la flama, características de la superficie de las paredes, de la emisividad de la flama y el estado de limpieza de las superficies.

El calor obtenible al quemar combustible, corregidos los pequeños detalles, tales como pérdidas por combustión incompleta, es la base para todos los cálculos de diseño de las calderas. La temperatura de salida de los gases del hogar está relacionada con la superficie de absorción por una función logarítmica. El contenido de calor de los productos de la combustión que se encuentran en los gases y el calor absorbido por las paredes de agua depende de la disposición de los tubos.

La emisividad de la flama depende de su luminosidad de volumen del fogón y de la temperatura. La combustión rápida, como la del petróleo, produce generalmente una flama corta, intensa y altamente turbulenta, con un alto grado de emisividad. Las flamas de los carbones bituminosos, son largas y lentas y aunque son luminosas, requieren un volumen mayor de hogar para quemar completamente los gases. Los hogares para carbón de antracita y gas, se proveen de superficies limitadas de absorción de calor radiante, debido a su tamaño comparativamente reducido. La temperatura de la flama del carbón, fluctúa entre los 1092 y 1647°C.

El calor radiante es absorbido de acuerdo con la ley de Stefan Boltzmann. Aplicada a un hogar con paredes enfriadas por agua, la absorción de calor que se expresa de la manera siguiente:

$$q = k \cdot A \cdot e \cdot [T_1^4 - T_2^4]$$

donde:

q	:	Calor total absorbido
A	:	efectiva envolvente de la flama
e	:	factor de emisividad (que variará entre 0.6 y 0.95 para tubos de acero; 0.75 y 0.8 para tabique refractario y hasta 0.95 para superficies cubiertas de hollín)
T1	:	temperatura promedio de la flama
T2	:	temperatura de la superficie fría, de la pared o de los tubos

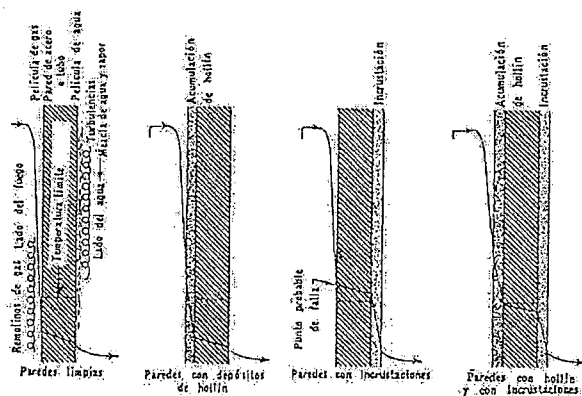


Figura 3.5. Caída de temperatura sobre la superficie y a través de las paredes de agua del hogar

3.3.3.2 Transmisión de Calor a los Tubos de los Retornos

La transmisión de calor a lo largo de los retornos de los tubos, se rige más por las leyes de la convección que por la radiación, excepto para una cantidad relativamente pequeña de partículas radiantes no luminosas contenidas en el gas. La transmisión de calor está en relación directa con el diferencial de temperaturas entre los gases de combustión y el agua o vapor.

Es imposible determinar la transmisión de calor con precisión. La transmisión de gas a tubo, depende de las variaciones en el diámetro y espaciamiento entre los tubos, del cambio de temperatura, de la turbulencia, de la velocidad y del ángulo de choque del gas. El margen de transmisión varía entre los gases que corren paralelamente a tubos de diámetro amplio y aquellos que corren cruzando tubos de diámetro pequeño.

La conductividad térmica k_t , del acero de la caldera, se estima en 161 kcal/ h/m² por °C. Las investigaciones experimentales sobre el coeficiente de la transmisión de calor por convección en corrientes que pasan por tubos atravesados, indican que:

$$U = k \cdot Fa \cdot \left(\frac{C}{u^{0.61}} \right) \cdot \left(\frac{G^{0.61}}{d_t^{0.39}} \right)$$

donde:

U	:	Conductancia de convección en el límite de la parte sólida
Fa	:	Factor de configuración
C	:	Factor de conductividad del gas
u	:	Viscosidad del gas
G	:	Masa del flujo, por unidad del área transversal
d _t	:	Diámetro del tubo

Ambos factores, “k” y “u”, son promedios estimativos de los gases y sus valores representan temperaturas de los tubos o sea, temperaturas peliculares propiamente. Para un diámetro “d_t”, determinado, sólo es afectado el factor “Fa” por la disposición de los tubos. Siendo más grande para tubos dispuestos en forma alternada (zigzag) que para tubos en línea en todas las formas de construcción usuales, este factor depende de la velocidad del gas y del espaciamiento entre los tubos en dirección del flujo del gas.

La transmisión de calor en las calderas acuotubulares, es mucho mayor con flujo transversal que con flujo longitudinal a los tubos, como sucede en las calderas de tubos de humo. La diferencia se debe a que en un caso se desarrolla una acción de choque, mientras que en el otro se trata de un contacto de deslizamiento. Como ejemplo ilustrativo se puede tomar el de un cerillo encendido, si se coloca un dedo por encima de la flama, se sentirá un calor intensísimo, mientras que colocándolo a un lado, la sensación de calor será relativamente baja. Debe hacerse notar que la velocidad de los gases es mayor en las calderas de tubos de humo que en las de tubos

de agua de manera que el efecto de transmisión de calor viene siendo aproximadamente el mismo.

La efectividad de la superficie de calefacción depende de su estado de limpieza y de su localización dentro de la caldera, así como de la circulación del agua y de la forma de los ductos de paso del gas. Si se trabaja con tiro natural, los ductos no deben presentar una resistencia excesiva al flujo de los gases.

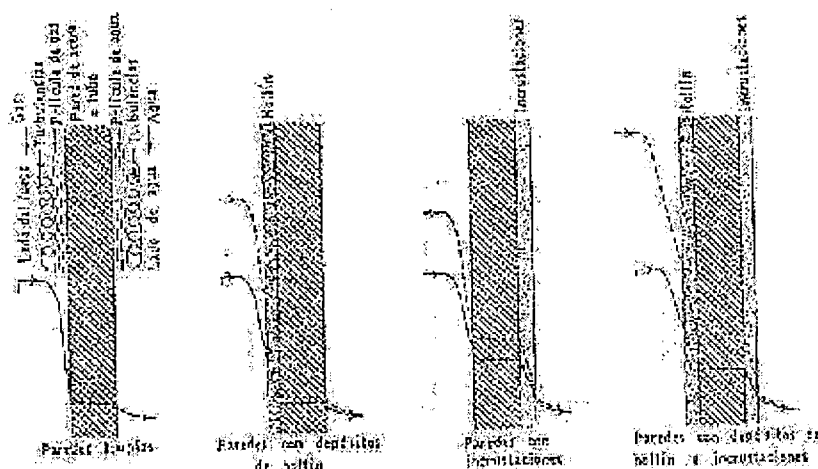


Figura 3.6. Caída de temperatura en las superficies y a través de las paredes de convección.

3.3.4 Hogar

El hogar de la caldera es el espacio localizado abajo o a un lado de la misma, en el que se quema el combustible y de donde parten los productos de esta combustión para pasar a la caldera propiamente dicha. Consta de una cámara en la que puede ser aislada y encerrada la reacción de la combustión, de modo que esta reacción quede sujeta, como una fuerza controlada. Aparte de esto, proporciona la protección y soportes necesarios para el equipo de combustión.

Un fogón convierte la energía química potencial de un combustible, en un agente dinámico: el calor. Su diseño es el factor más importante para el funcionamiento eficiente de una caldera. Una falla en el hogar en cualquier sentido, ocasionará problemas en el mantenimiento o en el trabajo y al mismo tiempo se reducirán la eficiencia y la capacidad de la unidad.

El hogar debe tener las siguientes cualidades:

1. Quemar el combustible satisfactoriamente con quemadores adecuados.
2. Dar forma a un ducto adecuado para conducir los gases de la combustión hacia el resto de las superficies destinadas a la absorción del calor.
3. Proporcionar temperaturas de salida adecuadas para el sobrecalentamiento.
4. Proveer paredes suficientemente accesibles para su limpieza, a fin de asegurar los resultados que se desean.
5. Funcionamiento eficaz con combustibles que tienen características desventajosas, tales como cenizas a baja temperatura, vanadio, alto contenido de cenizas, alto contenido de azufre e impurezas similares.

Hay hogares de muchos tipos y se clasifican igualmente de muchas maneras. Su nombre puede describir algún detalle de su construcción o una característica de su operación, su forma general o el propósito de su diseño, o bien, referirse a la clase de combustible que se ha de quemar. Clasificados de acuerdo con la construcción de las paredes, los hogares pueden ser de paredes refractarias sólidas, de paredes refractarias enfriadas por aire, o de paredes enfriadas por agua. Clasificados por la

presión mantenida en el hogar, se clasifican como hogar de tiro balanceado, a presión o supercargado. El combustible lo clasificará como hogar de carbón, de aceite combustible, de gas, de bagazo o como hogar de combustible de desperdicio. El sistema de alimentación lo catalogará como hogar alimentado a mano, de alimentador mecánico, de carbón pulverizado, etc.

El hogar debe llenar las siguientes condiciones:

1. Instalación, operación y mantenimiento correctos del equipo destinado a quemar el combustible.
2. Volumen suficiente para las necesidades de la combustión.
3. Materiales refractarios y de aislamiento adecuados.
4. Accesibilidad de la caldera para los trabajos de mantenimiento y reparaciones que deben hacerse desde adentro de la cámara de combustión.

El diseño del hogar debe ser integrado y coordinado con el de la caldera, con el equipo de combustión y clase de tiro y con el sistema de mamparas. También se deben tomar en cuenta las características del combustible y las cenizas, así como las necesidades de aire para la combustión, y también su precalentamiento.

Algunas apreciaciones importantes para el diseño de hogares en plantas termoeléctricas, son las siguientes:

1. La forma que se requiere para el desarrollo correcto de las flamas.
2. Altura necesaria para completar la combustión.

3. Enfriamiento que se necesita para el control de la temperatura.
4. Disposición de los quemadores que han de utilizar el volumen aprovechable.
5. Elevación a la que se colocarán los quemadores para controlar el calor de los gases de salida.
6. Disposición de la cámara que encierra el fogón, de manera que se eviten hasta el mínimo las acumulaciones de cenizas y que asegure el fácil retiro de éstas.
7. Disposición de las superficies de absorción de calor de tal manera que impartan una temperatura uniforme a los gases de salida.
8. Disponer las proporciones de tal manera, que se obtenga la mayor superficie de absorción de calor por unidad de volumen.
9. Determinación de la altura de la pared de agua en tal proporción, que satisfaga los requisitos de la circulación del agua (en calderas de circulación natural).

Los sistemas de distribución de los gases afectarán la eficiencia de la combustión, la transmisibilidad de calor a las superficies de la caldera, el grado y localización del deterioro del hogar y del sobrecalentador, ocasionado por corrosión, abrasión, desgaste, etc.

El volumen y la forma del hogar están en función directa con la forma y tamaño de la flama, que dependen a su vez del tipo de combustible y del dispositivo para quemarlo. La longitud de las flamas varía, desde unos cuantos centímetros en el carbón de antracita, quemado en proporciones bajas, hasta las de 12 m (40 pies) o

más, producidas por carbones bituminosos volatilizables, en la combustión de altas proporciones. La antracita, el coque y el gas, se queman en fogones reducidos y bajos, mientras que los carbones grasos, la leña y el aceite combustible, requieren volúmenes más grandes y formas apropiadas, de acuerdo con el sistema que se utilice para quemar el carbón o la leña. No solamente es indispensable un volumen suficiente para quemar el combustible que se usa en particular, sino que es preciso que haya una mezcla íntima entre el aire y los combustibles a una temperatura suficientemente alta y a velocidades lo suficientemente bajas, para lograr la completa combustión de todos los materiales volátiles inflamables, dentro de la cámara de combustión misma.

El volumen del hogar es también una función de la cantidad total de calor requerido en un momento dado y de la liberación de calor permitida por unidad de volumen. El coeficiente de liberación de calor depende del tipo y de la construcción del hogar, así como de la longitud de la flama y de su temperatura, de la temperatura de fusión de las cenizas, método de combustión, cantidad de aire de exceso y de la turbulencia.

La temperatura del hogar ejerce influencia sobre la ignición del combustible, proporción de la destilación de las materias volatilizables del carbón, porcentaje del CO que se forma, régimen de combustión y coeficiente de absorción de calor por las superficies de calefacción.

Una vez que se ha alcanzado la temperatura de ignición, la combustión completa depende de la posibilidad de que se disponga para el suministro rápido de oxígeno en las cantidades adecuadas. Las temperaturas del hogar más altas que la de ignición, no afectan las reacciones químicas entre el carbono y el oxígeno y, por consiguiente,

tienen una importancia mínima en el proceso de la combustión. En cambio, la mezcla íntima entre los gases de la volatilización y el aire, lograda por medios mecánicos, origina una rápida combustión, que es generalmente acompañada de un aumento en la temperatura, independientemente de la temperatura que haya tenido el fogón.

Aproximadamente la mitad del aire necesario para la combustión, llamado aire primario, es introducido junto con el combustible o por abajo del lecho del combustible; el resto, llamado aire secundario, se inyecta en la parte superior del fuego. El aire primario controla el grado de la combustión, mientras que el secundario se encarga de completarla.

El tamaño y la disposición del espacio de la combustión, debe disponerse en tal forma, que todo el volumen sea utilizado lo más íntegramente posible. Si las flamas chocan contra la pared del hogar antes de que se complete la combustión, será preciso que se instale enfriamiento por agua, o que la pared sea revestida con material refractario. El enfriamiento por contacto con la superficie relativamente fría extinguirá la flama, produciendo humo y hollín.

Es conveniente que el hogar sea diseñado con flexibilidad en el uso de combustible. No solamente por consideraciones económicas puede recomendarse el cambio de un grado de combustible a otro, o a otro tipo de combustible diferente, sino que puede ser una emergencia la que obligue este cambio. Las economías en el costo inicial desaparecen en el momento en que un hogar es incapaz de quemar un combustible más barato, o reducir la capacidad de la caldera, o que requiera una costosa mano de obra para combatir las adherencias de escorias.

Un hogar diseñado únicamente para gas, no tiene el tamaño suficiente para quemar carbón; a la inversa, una unidad diseñada exclusivamente para carbón, no tiene la suficiente superficie de convección para quemar gas. Las modificaciones necesarias para quemar combustibles alternados, aparte de ser muy costosas, requieren un largo periodo de paro.

Si un hogar tiene paredes de enfriamiento por agua, una gran cantidad de calor es absorbida por la radiación directa, con lo que la temperatura del hogar se reduce. Y a la inversa, la proporción de liberación de calor aumenta, porque las paredes del hogar enfriado por agua no son tan susceptibles a los daños ocasionados por la flama, el choque contra ellas de las cenizas, o las temperaturas altas, como es el caso en las paredes de materiales refractarios.

La temperatura del hogar y la de los gases de la combustión a la salida del mismo, son una función del efecto refrigerante de la envolvente del hogar. La tendencia del diseño se dirige hacia la fijación de una temperatura máxima para la salida de los gases del hogar, colocando dentro del mismo la mayor superficie de absorción de calor posible.

3.3.4.1 Paredes del Hogar

Existen dos clasificaciones generales para la construcción del hogar de la caldera: la pared refractaria y la pared enfriada por agua. Las paredes sólidas de refractarios son adecuadas y económicas para temperaturas moderadas. Para temperaturas medias, es más conveniente la pared hueca enfriada por aire, o la combinación de la pared

refractaria con el enfriamiento de agua. Para la operación continua a regímenes de combustión y temperaturas altas, son indispensables las paredes enfriadas por agua.

La selección del tipo de pared depende, en primer lugar, de la temperatura del hogar (normalmente 1203 a 1314°C; máxima 1925°C). La temperatura máxima permisible depende a su vez de las condiciones especiales de la combinación del combustible, las cenizas y de los materiales de las paredes del hogar.

Para sostener un contenido relativamente alto de CO₂ en los gases de escape, es preciso mantener un control estricto de la relación combustible-aire. Además del precalentamiento del aire de la combustión, el alto contenido de CO₂ produce temperaturas altas en el hogar. Para una operación prolongada a altas temperaturas, deben tomarse todas las providencias anticipadas para las condiciones que puedan presentarse. Durante la operación a cargas máximas, es justificable un aumento del exceso de aire para reducir las temperaturas del fogón, con los que se previene un posible deterioro de las paredes, pero este procedimiento no es aconsejable durante los periodos de carga normal, por la pérdida de eficiencia resultante.

Al introducirse la combustión a base de carbón pulverizado, la pared de refractarios era la construcción estándar. Pero el carbón pulverizado se quema con un exceso de aire entre 10 y 20%. Esta disminución del exceso de aire ocasionaba un aumento de las temperaturas del hogar, sobrepasando el punto de fusión de las cenizas y las partículas fundidas se adherían a la primera superficie fría que tocaban, causando la destrucción de los refractarios y la acumulación de escorias sobre las paredes y sobre los tubos. Para aprovechar las ventajas que ofrece el quemador de carbón pulverizado, se hizo necesaria la introducción de reformas en el hogar, tales como las

paredes enfriadas por agua. Paralelas a este desarrollo, aparecieron otras mejoras, como la parrilla enfriada por agua, el hogar para drenado de escorias derretidas, la criba de escorias y otros perfeccionamientos. Más tarde, las exigencias de aumentar el supercalentamiento y el recalentamiento, condujeron al desarrollo de mamparas y paredes de división en los supercalentadores.

El problema de la expansión es uno de los más arduos en el diseño de calderas. En consecuencia, en una unidad suspendida, la tolva colectora de cenizas en el fondo del hogar, necesita tener juntas de sello flexibles de un acabado muy minucioso o formar parte integral de la estructura de la unidad.

No importando cuál fuere su precio inicial, una construcción con infiltraciones de aire en una caldera es una instalación costosa, por las razones siguientes: la infiltración de aire baja la eficiencia, aumenta la potencia necesaria del ventilador y reduce la capacidad de producción de vapor; y, el escape de gases y hollín hacia el cuarto de calderas convierte el mantenimiento y limpieza en una tarea imposible. La infiltración de aire afecta desfavorablemente al proceso de combustión, porque el aire no es suministrado en el punto correcto. Para obtener un funcionamiento óptimo en una caldera, deben mantenerse herméticas las construcciones y los sellos.

3.3.4.2 Escorias, Hollín y Abrasión

Los desperdicios sólidos de los productos de la combustión constituyen una fuente de problemas para la operación y para el mantenimiento. Se adhieren a las superficies de calefacción; se acumulan en áreas donde los gases pasan a poca velocidad, obstruyendo los ductos de gases; pueden causar corrosión y abrasión.

Los desperdicios, que varían de acuerdo al tipo, composición y temperatura del combustible, pueden clasificarse de la siguiente manera:

1. *Polvo del humo*: son las partículas sólidas quemadas por el gas y arrastradas por los productos de combustión, incluyendo cenizas volantes (partículas de ceniza muy finas), pavesas (partículas de combustible parcialmente quemado, arrastrados del hogar), y cenizas pegajosas (que se encuentran entre su temperatura de deformación inicial y la de reblandecimiento)
2. *Escorias*: son residuos derretidos o fundidos, incluyendo escorias vítreas (de consistencia vidrosa), escorias semifundidas (escoria dura que al derretirse se han adherido unas con otras parcialmente), escoria plástica (de consistencia viscosa) y escoria en estado líquido.
3. *Hollín y humo*: son combustibles no quemados, formados por vapores de hidrocarburo que no han recibido oxígeno o les faltó la temperatura suficiente para su ignición.

Las adherencias de escoria son cenizas finas derretidas que adquieren una consistencia pegajosa o se autoplastifican y se adhieren a las paredes, formando una costra pastosa blanda. Estas acumulaciones reducen la capacidad de transmisión de calor de las paredes y originan el aumento de la temperatura de la superficie. Entonces se derrite la escoria y escurre hacia abajo a lo largo de las paredes o gotea del cielo del hogar. Al escurrir por las paredes (acción de deslave) se produce una reacción química que causa la erosión o la penetración de la escoria. Las paredes de metal son las que provocan los menores problemas por la adherencia de cenizas,

aunque el escurrimiento de la escoria causa su destrucción, con el tiempo, a consecuencia de la abrasión. Si la temperatura del hogar no es lo suficientemente elevada, las cenizas finas solidificadas se acumularán sobre las paredes, formando una capa tan gruesa, que la temperatura de la superficie igualará a la de fusión de las cenizas. Las variaciones de temperatura del fogón harán que estas acumulaciones se derritan o que aumenten, hasta alcanzar el equilibrio. Las partículas ígneas del combustible se impregnarán en la masa pegajosa, aumentando la temperatura. Alrededor de los registros localizados en las zonas calientes, y cuya superficie circundante se mantiene fría, la escoria se apilará y aumentará formando grandes masas como sucede alrededor de los quemadores. Algunas partículas ígneas de combustible que se encuentran en suspensión en los gases, serán arrastradas hacia los ductos de los retornos de la caldera. La corriente de los gases arrastrará escorias consigo, llevando la acción de éstas hasta las superficies de convección; su penetración continuará mientras la temperatura del gas sea superior al punto de reblandecimiento de las cenizas. Esta fusibilidad (propiedad de la ceniza de derretirse, fundirse y aglutinarse hasta formar una masa homogénea), depende de la temperatura y de las características de solidificación de la ceniza, según la clase de combustible empleado.

Las obstrucciones son acumulaciones de los residuos del carbón o del petróleo que ahogan los ductos de paso de los gases, reducen el coeficiente de transmisión de calor y el de evaporación. Estas acumulaciones toman diferentes formas, que incluyen las siguientes:

1. *Cenizas esponjosas*: aglomeraciones de partículas de ceniza seca, de consistencia porosa, que tiene apariencia de esponja.
2. *Adherencias*: acumulaciones de residuos y escorias que bloquean parcial o totalmente los espacios o aberturas entre los tubos de absorción de calor.
3. *Suciedad*: aglomeraciones de desechos en los ductos de paso de los gases o en las superficies de absorción de calor, que ocasionan restricciones indeseables del flujo de los gases o del calor.
4. *Formaciones de panal*: son aglomeraciones de masas porosas de residuos y escorias de escasa consistencia, que se adhieren a la primera batería de tubos en las calderas acuotubulares.
5. *Segregación*: es la tendencia de los desechos de composición diferente; de acumularse, selectivamente en determinadas partes de la unidad.

Más allá de las zonas calientes, las cenizas empiezan a enfriarse y su naturaleza aglutinante va disminuyendo. En los ductos posteriores, la ceniza adquiere consistencia de escamillas ligeras, igual que el hollín, y es fácilmente retirada de los tubos por sopleteado.

La abrasión ocurre en dondequiera que las concentraciones de cenizas son arrastradas en las corrientes de gas, tal como sucede en las mamparas o en las baterías de tubos. Para prevenir esta abrasión, debe mantenerse baja la velocidad de los gases, o eliminar las mamparas hasta donde sea posible.

Los depósitos tienden a acumularse sobre el equipo que queda en el lado más frío de la caldera (calentador de aire, economizador, colector de polvo, en donde la temperatura de los gases baja hasta cerca o más abajo del punto de rocío. Las concentraciones de hollín son higroscópicas y como el hollín del carbón mineral tiene huellas de SO_2 y SO_3 mientras que el hollín de petróleo contiene además sulfatos de sodio y de potasio. Con la humedad, estos componentes reaccionan químicamente para formar ácidos sulfúrico y sulfuroso, diluidos pero altamente corrosivos, cuya acción se suma a la de la oxidación normal. La escoria producida por el petróleo combustible, puede contener pentóxido de vanadio, el cual atacará y corroerá el acero, inclusive el de alta aleación de cromo.

Las acumulaciones de escorias y hollín en el lado del fuego, tienen que ser removidas por medio de sopladores, escobillas de alambre, lavado con vapor o con agua, así como por escarificación a mano. El método más usado para la limpieza, es el de soplado, que consiste en el empleo de aparatos mecánicos para lanzar chorros de vapor o de aire a presión para limpiar las superficies de absorción de calor. Los sopladores son aparatos dedicados más bien al control de la acumulación de escorias, que a su eliminación. Con su funcionamiento, contribuyen a mantener las temperaturas de los gases dentro de su valor de eficiencia y promover condiciones de operación más satisfactorias en general.

En los hogares ordinarios, es la temperatura del vapor la que limita principalmente la formación de escorias. Con una formación de escoria excesiva, las paredes de agua absorberán menos calor, dejando mayor cantidad para el sobrecalentamiento. Este

eleva la temperatura del vapor más allá de los límites de control, lo que obliga, o a bajar la carga, o librarse de la escoria.

Ahora hay una tendencia hacia un punto de vista más conservador en las dimensiones del hogar y hacia la utilización de la más alta turbulencia en la combustión, que de esta manera es forzada a desarrollar una flama caliente. Un diseño de esta naturaleza se basa en la suposición de que un hogar debe crear suficientes acumulaciones de escorias para proporcionar una cantidad de bastante magnitud de calor en los retornos del sobrecalentador y del recalentador. Cuando una unidad enteramente limpia entra en servicio, tiene cierta tendencia a mantener temperaturas bajas, algunas veces más abajo de los límites de control del sobrecalentamiento. Una formación normal de escorias, tendrá la propiedad de corregir esta situación y el uso de combustión turbulenta admite una proporción mayor en las acumulaciones de escorias.

3.3.4.3 Hogar para Carbón Pulverizado

El carbón puede quemarse finamente pulverizado inyectándolo hacia adentro del hogar en forma similar a la empleada para los combustibles líquidos. El carbón se pulveriza a una finura de 70% o más de paso por tamiz de malla 200. Después es transportado por el aire primario caliente (que a la vez lo seca) hacia el hogar.

El número de pulverizadores se determina por su capacidad individual y las necesidades de reserva. La dotación de tres pulverizadores, uno para cada grupo de quemadores y el resultante como unidad de reserva, es una disposición usual. Las calderas aumentadas con carbón pulverizado pueden ser del tipo de fondo seco, o de

drenado de escorias derretidas. Se emplean los métodos de combustión vertical, horizontal, compuesta o tangencial.

La capacidad de la planta, la presión y temperatura de trabajo, el espacio disponible, las características del combustible a emplear, la temperatura de fusión de las cenizas, el tipo de quemadores seleccionados y el método previsto para retirar las cenizas, son los factores que determinan el volumen del hogar, la extensión de la superficie de enfriamiento de agua y en suma, el diseño de la unidad generadora de vapor completa. Los fogones a base de carbón pulverizado son generalmente convertibles para quemadores de aceite combustible o gas.

El tipo y la variedad de los quemadores, su disposición y la forma de su flama, determinarán las dimensiones de ancho y profundidad del hogar. Su altura es una función del volumen requerido.

La temperatura de salida de los gases debe estar por abajo de la temperatura de fusión de la ceniza del combustible de más baja calidad que se utilice. Por esta razón, el carbón con cenizas de baja fusión requiere una superficie mayor de paredes de agua, lo que a la vez condiciona un volumen de hogar mayor. Las temperaturas de salida se regirán por los requisitos del sobrecalentador.

Todos los hogares para carbón pulverizado se construyen con enfriamiento de agua parcial o total. Si se usan quemadores tangenciales, el hogar tiene que dotarse de enfriamiento total de agua, debido a que en este sistema hay un considerable choque de las flamas. Hay que eliminar, hasta donde sea posible, el golpe directo de las flamas contra las paredes del hogar. Las partículas de ceniza derretida se pegan y

disuelven a la mayoría de los materiales refractarios. El calor y un alto contenido de azufre en el carbón, conducen a un ataque o desgaste de las paredes enfriadas por agua.

La longitud de la flama varía con el tamaño de las partículas de carbón (la longitud se acorta con la pulverización fina y uniforme), con el porcentaje y composición de los elementos volatilizables, con la turbulencia, temperatura del hogar y el exceso de aire.

3.3.5 Circulación

Para remover el calor de las superficies de la caldera, es necesario prever una circulación positiva y adecuada del agua y del vapor (que debe efectuarse en una dirección predeterminada), a través de todos los circuitos de la caldera. El flujo de agua, vapor o cualquier otro fluido dentro de la caldera, es llamado circulación.

El agua, al calentarse, pierde densidad y tiende a elevarse hacia la parte superior del recipiente; a la inversa, el agua fría tiene la tendencia a desplazarse hacia el fondo. Si el agua es calentada hasta su temperatura de ebullición, se forman pequeñas burbujas de vapor en la superficie calentada. Estas burbujas se adhieren al metal (a consecuencia de la tensión superficial), hasta que son arrastradas por la circulación del agua.

Como el vapor es mucho más ligero que el agua, se eleva rápidamente y este movimiento del vapor ocasiona turbulencia y circulación.

Unas cuantas calderas de vapor de alta presión y la mayoría de las calderas para agua caliente, dependen de la circulación forzada, la cual es efectuada por medio de bombas. La mayoría de las otras calderas dependen de la circulación natural. En algunas calderas se ha combinado la circulación natural con la circulación forzada.

La única función del flujo del agua en el sistema de la caldera, es asegurar la alimentación de una cantidad suficiente de agua a cada uno de los tubos que reciben calefacción para mantener su superficie completamente bañada por agua. Es necesaria una asignación adicional de flujo para proveer un amplio margen de trabajo y para arrastrar sales y productos de contaminación hacia el punto de purga.

La velocidad del flujo del agua en una caldera bien diseñada de circulación natural, es tan alta como en una de circulación forzada. Las velocidades de 0.3 a 3.05 m/s, tienen un efecto extremadamente reducido sobre la transmisión de calor.

La superficie de los tubos representa más bien el área por la cual debe pasar la cantidad de agua requerida a la velocidad de entrada obtenible. En la circulación forzada, esta área es fijada por la capacidad de la bomba. En la circulación natural, regirán las características del sistema (incluyendo la proporción entre el flujo ascendente y el descendente a diferentes coeficientes de evaporación).

La circulación en las calderas acuotubulares es rápida y empieza tan pronto como el calor es lo suficientemente alto para formar vapor en los tubos, porque las burbujas de vapor ocasionan turbulencia y agitación a todo lo largo de los tubos. La acción del vapor y del agua, al elevarse por un tubo caliente, basta para obligar la bajada de agua por otro tubo que esté sometido a menos calor.

La capacidad de producción de vapor, está en relación directa con el grado de circulación del agua. Una circulación lenta, o el estancamiento de la misma permite la formación de grandes burbujas, que conducen al ampollamiento de los tubos o a que se quemen. Las restricciones de la libre circulación deben mantenerse al mínimo posible, de manera que el agua no tenga que ser forzada a través de los tubos. El movimiento del agua dentro de los tubos de agua debe seguir una sola dirección, de ser posible en todos ellos absolutamente. El movimiento del agua en ambas direcciones, hacia arriba y hacia abajo, dentro de un solo tubo, ocasionará trastornos.

El método para producir flujo en los circuitos de la caldera, ya sea de manera natural o mecánica, no tiene virtualmente ninguna influencia sobre la efectividad de la superficie de absorción de calor. El requisito principal es mantener una superficie interna bañada de agua, por medio de la mezcla de agua y vapor de calidad adecuada para las condiciones imperantes. Una vez satisfecho este requisito fundamental, la resistencia de la película de agua al paso del calor es insignificamente baja y la conductancia general depende de la película de gas y de la resistencia de la pared de los tubos. Si existen fallas en la satisfacción de este requisito, se presentará el fenómeno de la resistencia de la película de vapor con la reducción de la transmisibilidad de calor que le acompaña.

El punto de entrada del agua de alimentación, marca el punto final, así como el principio de la circulación del agua. El agua, relativamente fría, tiene que retornar a la caldera en un punto, en donde no interfiera el curso de la circulación natural.

3.3.5.1 Circulación Natural

El agua puede circular a través de los circuitos de la caldera, solamente por la diferencia de densidad entre el contenido de los tubos de generación y los de bajada. La circulación natural es el movimiento del fluido circulante, de acuerdo con su altura disponible.

En cualquier sistema de circulación natural, el movimiento del vapor y del agua aumentará hasta un valor máximo, o punto final, en el cual el grado de evaporación en los tubos generadores, del lado del fuego, superará la capacidad del flujo del agua en los tubos de bajada y en los recirculadores. Después de este punto, cualquier aumento subsecuente de absorción de calor, dará por resultado la disminución de la circulación y el descenso de nivel de agua en los tubos

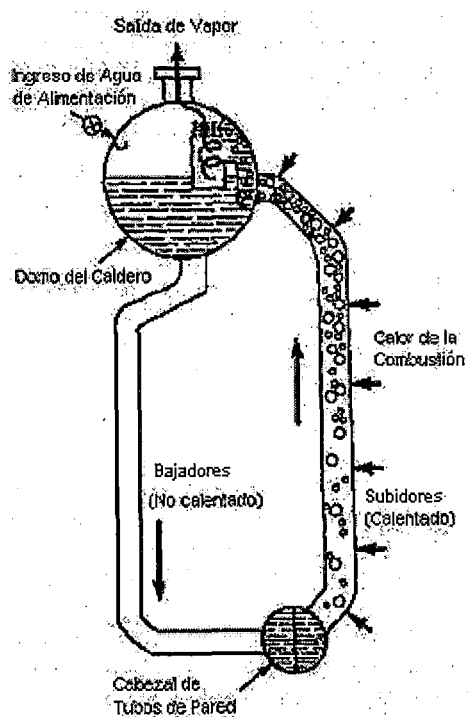


Figura 3.7. Mecanismo de Circulación Natural.

Una disminución de la circulación ocurre tan pronto como las dos fuerzas opuestas, flujo ascendente y flujo descendente, se han equilibrado. Un aumento del diferencial de densidades, en sí mismo, tiende a aumentar el flujo, pero será obstaculizado por las pérdidas de impacto, fricción del fluido, turbulencia y aceleración, las que tienden, todas, a reducir el flujo. Las calderas acuotubulares son particularmente susceptibles a sufrir caídas en el régimen de flujo. Un diseño correcto tiende a mantener la operación de todos los circuitos en la zona de valores máximos de la curva. Para disminuir las pérdidas, es necesario usar tubos de diámetros grandes.

Los tubos de las calderas acuotubulares tienen grandes variaciones en la velocidad de los circuitos y en la relación del agua con el vapor dependiendo de la localización del circuito, el coeficiente de transmisión de calor, la longitud de los tubos y el diámetro de los tubos. Los regímenes de combustión variables, dificultan extremadamente el diseño para una circulación adecuada. La proporción mínima de circulación para evitar temperaturas excesivas, fluctúa entre 0.3 y 1.52 m/s.

A medida que la presión aumenta, el diferencial de densidad entre el fluido descendente y el ascendente, va disminuyendo. Para mantener un régimen determinado de circulación, es necesario aumentar la altura vertical del sistema circulatorio y eliminar todo el vapor del agua de circulación antes de que ésta entre en los tubos de bajada.

Una caldera de circulación natural tiende a la autocompensación para las variaciones de absorción de calor usuales, incluyendo aquellas que provienen de sobrecargas súbitas, adherencias de hollín y de otra índole, falta de uniformidad en las condiciones del quemador y la imposibilidad de prever el sostenimiento permanente

de las condiciones efectivas de trabajo durante el resto de su tiempo de duración. La autocompensación puede hacerse más comprensible con las siguientes aclaraciones: el coeficiente de absorción de calor puede ser un poco más alto de lo previsto debido a algún error de cálculo de las pérdidas por fricción, a la formación de puntos aislados de sobrecalentamiento, o por circunstancias imprevistas. Esto reduce el promedio de la densidad en determinado circuito, con lo que aumenta el flujo a través del mismo.

Los principios básicos de la circulación natural de las calderas, son los siguientes:

1. Limitación del porcentaje de volumen de vapor en la mezcla de vapor y agua (determinado por la presión y tipo de circuito) durante la operación a la capacidad máxima.
2. La velocidad del agua debe ser mínima, al entrar a las secciones de calefacción de los tubos.
3. Separación del agua y del vapor en el domo para mantener libre de vapor el agua que entra a los tubos de bajada.
4. Segregación de los circuitos que tienen coeficientes distintos de absorción.

El agua que baja (a la temperatura de saturación o un poco menos), no está mezclada con burbujas de vapor. Los circuitos de ascenso (a la temperatura de saturación o más), arrastran una mezcla de agua y vapor hacia el domo de la caldera o al espacio de vapor. La densidad menor de la mezcla dentro de los tubos de subida, proporciona la fuerza que mantiene la circulación.

Si se aumentan las proporciones de la combustión, aumenta el número de tubos que actúan como ascensores, con la correspondiente disminución de los tubos de bajada. Una combustión excesiva puede reducir el número de tubos de descenso; por abajo del límite tolerable. Cuando se presenta esta situación, es acompañada por una tendencia al congestionamiento, ocasionado por el agua que trata de bajar por los tubos en los cuales el vapor tiende a subir. Esto ocasionará daños en los tubos de transición (entre los tubos de subida y los de bajada) y no en las hileras de los tubos que dan al hogar como podría suponerse.

Las calderas con hogar de paredes de agua, tienen un problema adicional con la circulación. El calor radiante es absorbido con tal celeridad, que una gran parte del tubo se llena de vapor, cerca de su extremo superior. Para subsanar este inconveniente, se necesitan conexiones que faciliten la circulación en las paredes de agua, es decir, tubos de bajada que alimenten los cabezales de las paredes de agua y tubos de subida que conecten los cabezales con los domos y completen así el circuito. Las áreas de flujo de las bajadas dependen del tamaño de la pared expuesta al fuego, la altura efectiva del agua en la pared y la cantidad de calor absorbida. Hay muchos sistemas de construcción de tubos de bajada y de subida, en los cuales se conectan las paredes de agua con el circuito de la caldera.

3.3.5.2 Relación de Circulación

Es una cualidad altamente deseable en una caldera, que evapore toda el agua que circula a través de los tubos de generación. Sin embargo, al ocurrir esto, la cantidad de materias sólidas adheridas a los tubos, sobrepasará el máximo tolerable. Por este motivo se acostumbra circular de tres a veinte veces la cantidad de agua que puede

ser evaporada. Esta mezcla de vapor y agua, lava los sedimentos de las paredes de los tubos.

La evaporación total presenta también otros problemas, entre ellos el mantenimiento de un nivel de agua constante (cada cambio en la carga, en el régimen de combustión o en la alimentación de agua, ocasiona grandes fluctuaciones en el nivel) y la espuma, formada, como consecuencia de una superficie inadecuada para la liberación de burbujas.

La relación en peso, entre el agua alimentada a los tubos de generación de vapor y el vapor generado al mismo tiempo, (kg agua/kg vapor), recibe el nombre de relación de circulación. En las calderas continuas de circulación forzada, la relación de circulación puede ser tan baja como 3:1 y tan alta como 20:1. Un coeficiente característico de circulación es de 5 kg de agua inyectada por cada kilo evaporado (generado a vapor) siendo 4 kg la cantidad recirculada.

3.3.5.3 Admisión del Agua de Alimentación

En la introducción de agua en la caldera, debe tenerse la seguridad de evitar lo siguiente:

1. Impedancia de la circulación natural.
2. La creación de esfuerzos locales, ocasionados por focos fríos.
3. El choque del agua fría contra uniones remachadas.
4. La precipitación de sales solubles y de sólidos dentro de las superficies en contacto con el fuego.

5. La agitación de precipitados que se hayan decantado.

En las calderas acuotubulares, la entrada se localiza en un domo o en un cabezal, de tal manera que el agua se inyecte en un circuito de bajada. En este tipo de instalación se coloca un tubo de alimentación interno que tiene prácticamente la misma longitud del domo. Es una práctica establecida, que el agua sea introducida en un domo de vapor y de agua, en donde se le utiliza para lavar el vapor. Si el agua no se utiliza para lavar el vapor, el tubo perforado se coloca a una distancia aproximada de la cuarta parte del diámetro del domo, sobre el fondo de éste y abajo del nivel del agua. Esta disposición del tubo asegura una distribución uniforme del agua a través de la longitud total del domo, reduciendo al mínimo las concentraciones que producen esfuerzos, a la vez que se logra una mezcla completa del agua. Para asegurar un flujo adecuado, la suma de las áreas de las secciones transversales de los agujeros de los tubos, equivale al doble del área del tubo de alimentación.

3.3.6 Capacidad

3.3.6.1 Contenido de Agua

Una caldera con un contenido grande de agua en relación con su capacidad, necesitará un periodo largo para calentarse, especialmente si se trata de una unidad de servicio intermitente con combustión automática. Esta tardanza no es deseable, debido a que la caldera no puede ser correctamente controlada y su eficiencia anual será relativamente baja. A la inversa, si la caldera es demasiado pequeña, se calentará rápidamente (y se sobrecalentará también), haciendo trabajar al quemador con ciclos cortos que afectarán desventajosamente la operación de la unidad.

La reserva limitada de calor proporcionada por la caldera y su contenido de agua, debe ser suficiente para satisfacer la demanda durante todo el tiempo que necesite el quemador hasta sostener dicha demanda. Las calderas con muy escaso contenido de agua, presentarán dificultades para su control, porque los cambios de su temperatura serán muy bruscos, lo que entorpece la acción de los aparatos de control (debido al retraso por inercia).

3.3.6.2 Espacio para Vapor

Es indispensable contar con un espacio adecuado de vapor para impedir el arrastre de agua. El arrastre de espuma y agua ocurrirá siempre que la caldera esté sucia, independientemente del tamaño de la cámara de vapor. Otros factores que afectan las características del arrastre de agua son el tamaño de la superficie de evaporación, el número y tamaño de las tomas de vapor y el sistema de circulación de agua de la caldera. El tamaño de la cámara de vapor, debe estar de acuerdo con las demandas de la carga. Una cámara de vapor insuficiente tiene un efecto nocivo para el mantenimiento de la presión constante con cargas variables, lo que ocasionará golpes, tanto en la caldera como en la tubería de vapor.

El tamaño del domo de vapor y agua, depende de muchos factores:

1. Área del domo requerida para la conexión de los tubos.
2. Necesidades de la cámara de vapor.
3. Área necesaria para la superficie de separación del vapor.
4. Necesidades de espacio para los accesorios que van dentro del domo.

3.3.7 Recuperación de Calor

Si se aprovecha una gran parte del calor contenido en los gases, una vez que éstos han abandonado las zonas de combustión de la caldera, la eficiencia general aumenta. Además, si se varía convenientemente la proporción de la combustión, se obtendrá un alargamiento de la curva de eficiencia y el correspondiente aumento de la capacidad, con un mínimo gasto adicional de combustible. Como se ve, la recuperación del calor, a pesar de ser de menor importancia, es un factor importante dentro del cuadro general de la planta generadora de vapor.

La reducción de la temperatura de los gases hasta 140°C o menos, solamente resulta práctica mediante el empleo de economizadores y calentadores de aire. Pero el uso del equipo de recuperación de calor no se puede justificar si los costos del combustible son bajos; si el trabajo de la unidad es sólo de temporada o si la unidad ha sido diseñada solamente como una caldera de auxilio.

En la operación de los generadores de vapor, la temperatura de los gases de combustión desciende hasta un punto en el que resulta más económico detener la absorción de calor en las superficies de la caldera a la temperatura de saturación, para iniciar el aprovechamiento del calor en un economizador o un calentador de aire. Hay invariablemente una temperatura determinada de los gases, que es la más económica; arriba y abajo de este nivel, los costos de producción de vapor aumentan. Las reducciones excesivas de la temperatura de los gases de escape, pueden elevar de tal manera el capital invertido y los gastos fijos, que cualquier mejoramiento de la eficiencia sería anulado completamente.

La temperatura de entrada de los gases a los diferentes aparatos de recuperación de calor variará de acuerdo con los diversos tipos de calderas, condiciones de trabajo, características del combustible y condiciones de combustión. La temperatura a la que pueden ser reducidos los gases durante su paso a través de la unidad, se determina por los factores siguientes:

1. Cantidad de calor que puede ser absorbido.
2. Temperatura de entrada del agua de alimentación o del aire de la combustión.
3. Punto de condensación de los gases de escape.
4. Temperatura económica de salida, abajo de la cual es anulado cualquier aumento de la eficiencia debido al aumento de los costos (un calentador de aire controlará la temperatura de salida, bajándola al mínimo obtenible en los gases procedentes del economizador).

Las desventajas del equipo de recuperación de calor, son las siguientes:

1. La operación a cargas bajas crea complicaciones en el diseño.
2. Si en la combustión se origina polvo, éste ocasionará congestionamientos en la unidad.
3. Se requieren ventiladores para vencer la resistencia opuesta al tiro por los diferentes aparatos.
4. Son necesarios el mantenimiento y la atención de operación de los equipos.

5. Para reducir al mínimo la corrosión en la parte más fría, es necesario derivar en puente todos o parte de los gases de escape, alrededor de la unidad de recuperación de calor, para permitir la operación con la planta básica; es también necesaria la recirculación de una parte del agua de alimentación (economizador) o del aire de la combustión (calentadores de aire).

La corrosión externa es el principal factor que limita las posibilidades de recuperación de calor en el diseño del equipo correspondiente. La corrosión de las superficies externas (lado en contacto con los gases de la combustión) así equipo de recuperación de calor, ocurre cuando los gases son enfriados abajo de la temperatura de condensación, así como por la condensación de vapor de agua sobre dichas superficies. Esta corrosión es acelerada por la presencia de sustancias sulfurosas (dióxido y trióxido de azufre), que forman ácidos sulfurosos y sulfúrico al mezclarse con la humedad. Estos productos son resultantes de la combustión de la mayoría de los combustibles.

El ácido sulfúrico diluido tiene un punto de condensación de 93°C más alto que el del agua. Esta relación varía según las proporciones entre el ácido y el vapor de agua. Las mediciones de los puntos de rocío (o condensación) alcanzan temperaturas entre 38 y 121°C, en donde los valores más altos corresponden a los carbones con mayor contenido de azufre. El coeficiente potencial de corrosión aumenta en cuanto sube el punto de rocío. La proporción de ácido en gas seco es baja, aproximadamente 0.005% en volumen y los grados de corrosión son bajos pero persistentes.

La humedad que se concentra en los tubos, forma una mezcla con las cenizas, que ocasiona su acumulación. El enmohecimiento y la corrosión de los calentadores de

aire aumentan generalmente cuando la temperatura del metal baja a menos de 149°C. Si se trabaja con combustibles con alto contenido de azufre, el límite de la temperatura debe ser más alto. Tanto el contenido de azufre, como el de polvo, afectan el diseño del equipo, debido a la corrosión y a la oclusión, respectivamente, que pueden ocasionar. Los gases que tienen contacto con tubos y placas, alcanzan el punto de rocío más pronto que los que se desplazan en la corriente principal. Los gases que abandonan la caldera misma, no tienen todos igual temperatura. La corrosión es por lo general más intensa en la parte más fría del economizador o del calentador de aire.

Una proporción de corrosión menor ocasionada por el ácido sulfúrico, tiene lugar también a temperaturas elevadas hasta 326°C. Sin embargo, las dificultades más serias ocurren abajo del punto de condensación del ácido, que varía entre 138 y 160°C, bajo condiciones normales de operación.

El ácido sulfúrico reacciona con la ceniza volátil, formando una costra vidriosa e insoluble, si el agua de alimentación excede de 260°C y la caldera es alimentada con carbón mineral.

3.3.7.1 Aplicación del Equipo de Recuperación de Calor

El economizador, calentador de aire, colector de cenizas volátiles, ventiladores (de tiro forzado y tiro inducido) que se instalan por separado, junto con los aditamentos necesarios de tubos y ductos de conexión, tienen que adaptarse a las limitaciones de espacio de la planta. Los dispositivos tienen que considerarse, tanto desde el punto de

vista económico, como en lo relativo a la accesibilidad para su manejo y mantenimiento.

Usualmente se coloca el calentador de aire después del economizador. Ocasionalmente se llega a montar el calentador de aire entre dos secciones del economizador, pero nunca se le coloca antes de éste. La instalación incluye un colector de polvo (cenizas volátiles) que se sitúa antes del economizador, entre el economizador y el calentador de aire o después del calentador de aire.

3.3.7.2 Economizador

En una unidad generadora de vapor, el economizador representa una sección independiente de superficie de intercambio de calor, destinada a recuperar calor de desperdicio de los gases de escape, para retornarlo, en forma de calor útil al agua de alimentación, antes de que ésta se mezcle con el agua que circula en la caldera. Este calor recuperado que se agrega al del sistema, mejora la economía de la unidad y de este hecho se deriva su denominación de economizador. El economizador puede definirse como un aditamento de recuperación de calor, diseñado para transmitir calor de los productos de combustión a un fluido, generalmente agua. Su empleo se justifica únicamente cuando tiene la aptitud de absorber calor con mayor economía que otros tipos de superficie de calefacción. Usualmente no se produce vapor en el economizador, aun cuando se han construido algunos economizadores para evaporación.

El economizador está formado por una sección de tubos, a través de los cuales pasa el agua de alimentación justamente antes de inyectarla a la caldera. Los gases de

combustión, al abandonar las superficies de convección de la caldera, pasan por los tubos del economizador y de esta manera calientan el agua de alimentación.

Como el agua de alimentación tiene al entrar al economizador una temperatura más baja que la del vapor que se encuentra en la caldera, la transmisión de calor en esta sección es más efectiva que en las superficies de convección de la caldera.

Comparado con el calentador de aire, el economizador tiene las siguientes ventajas:

1. Su costo inicial es más favorable en las instalaciones chicas, así como en las unidades que operan a presiones de vapor bajas.
2. Se requiere menos fuerza auxiliar.
3. Su acción acumulante de calor facilita una evaporación más rápida cuando se trabaja en ciclos alternados de arranque y parada.
4. Su espacio requerido es menor para una capacidad determinada.
5. La carga sobre hogar y el equipo de combustión que se deriva de su operación es reducida.

3.3.7.3 Calentador de Aire

El calentador de aire es un aparato de intercambio de calor, a través del cual se pasa el aire que es calentado por medios cuya temperatura es mayor, tales como los productos que proceden de la combustión, o por medio de vapor. Se le utiliza para la recuperación de calor de los gases de escape en una unidad generadora de vapor; ocasionalmente se le utiliza para extraer calor de alguna otra fuente. Este calor

recuperado se agrega al aire requerido para la combustión, o se usa para secado u otros procesos.

Las unidades empleadas para calentar el aire de la combustión en las plantas generadoras de vapor, se designan también con el nombre alternativo de calentadores de aire. El calentador de aire se compone, en lo esencial, de una superficie de intercambio de calor instalada en el curso de la corriente de los gases de escape de combustión procedentes de la caldera, entre ésta y la chimenea, o entre el economizador (si lo hay) y la chimenea. El aire para la combustión es calentado por los gases del escape, al ser empujado a través del calentador por medio de un ventilador de tiro forzado.

El calentador de aire no es un aditamento absolutamente necesario para la operación de una planta generadora de vapor. Su empleo depende de las condiciones y necesidades de la instalación así como de los factores técnicos y económicos de la planta. Los factores económicos más importantes incluyen: el costo inicial, el costo de operación relacionado con el combustible y con la energía consumida por el ventilador y, el costo de mantenimiento. Las principales consideraciones técnicas para su instalación comprenden el espacio disponible, características del combustible y la temperatura a la que se desea precalentar el aire y la temperatura final de los gases de escape.

La eficiencia alta y las características óptimas de operación en las grandes plantas generadoras de vapor, se obtienen únicamente por medio del calentador de aire. En el proceso de molienda para carbón pulverizado, se requiere el aire caliente para el secado y para el transporte del combustible. El desarrollo de las paredes de hogar con

enfriamiento de agua, precisa forzosamente de altas temperaturas de precalentamiento de aire.

El aire absorbe el calor con más lentitud que el agua y en consecuencia, el calentador de aire requiere mayor superficie de calefacción, por cuyo motivo ocupa un espacio mas grande que el economizador. A pesar de todo, es de diseño mas simple y su peso es menor que el del economizador, por dos razones: la temperatura de entrada del aire es menor que la del agua que entra el economizador y el economizador trabaja con agua a presiones altas.

Además de las ventajas generales obtenidas con el empleo del equipo de recuperación de calor, los calentadores de aire ofrecen las siguientes características, altamente deseables:

1. La eficiencia de la combustión mejora, porque esta es casi completa con menor cantidad de aire de exceso.
2. Ayuda a la estabilización de la ignición del combustible, que mejora la combustión con cargas bajas.
3. La aceleración de la ignición, que permite mayor flexibilidad en la carga.
4. La aceleración de la combustión, que permite la reducción del tamaño del hogar, o en su defecto una mayor liberación de calor para un volumen determinado.
5. Temperatura mas elevada en el hogar, lo que permite un coeficiente mas elevado de absorción de calor, con el consiguiente aumento en la producción de vapor.

6. Un aumento de la eficiencia general de la caldera, a consecuencia del mejoramiento de la combustión y temperatura de los gases de escape, que permite la reducción de la superficie de calefacción de la caldera.
7. Si el total del calor recuperable es mayor que el que se puede aprovechar para el calentamiento del agua de alimentación, el calor remanente se puede emplear para calentar el aire necesario para la combustión.
8. El carbón puede ser secado durante la pulverización, permitiendo su fácil transporte, alimentación y combustión.
9. Entre mayor sea el precalentamiento, menor será el contenido de SO_3 en los gases de escape, lográndose menor temperatura en la chimenea y un aprovechamiento mayor del calor.
10. La combustión mas completa del combustible reduce los periodos de parada de la caldera para su limpieza, dando por resultado que la producción de escorias sea menor y que los gases que lleguen a los colectores de cenizas volátiles vayan mas limpios.
11. El aire caliente ayuda al secado y apoya la ignición de los desperdicios húmedos tales como los combustibles volátiles de bajo grado, como son los desechos de los aserraderos y fabricas de papel, madera, lignitos, turba, bagazo y productos similares.
12. El aire caliente puede utilizarse para calefacción de locales, secado de productos y otras aplicaciones similares.

Las desventajas de los calentadores de aire, incluye lo siguiente:

1. El precalentamiento del aire aumenta los costos de mantenimiento de la chimenea.
2. Los depósitos de combustible que se forman, pueden incendiarse, causando daños considerables.
3. Las oclusiones pueden afectar seriamente la operación de la unidad generadora de vapor.
4. Las necesidades del espacio requerido y del peso para el calentador, para el ventilador de tiro forzado así como los ductos requeridos, imponen problemas de diseño que requieren un estudio cuidadoso.
5. Las fugas de aire pueden descompensar la capacidad de calefacción, necesiéndose una compensación mediante el aumento de fuerza para el ventilador.
6. Las fugas no se perciben usualmente, sino cuando la corrosión esta muy avanzada, requiriéndose una reparación.

Los calentadores de aire se pueden clasificar, de acuerdo con su principio de operación, en calentadores recuperativos y regenerativos.

El **calentador de aire del tipo regenerativo**, es un medio de calefacción indirecta, en el cual una masa adecuada (una estructura que sirve de cuerpo intermedio de almacenamiento de calor), es térmicamente regenerada por el paso de los productos

de la combustión calientes (o por cualquier otra fuente de calor), después de que ha sido enfriado por la corriente del aire.

Aunque es expuesto intermitentemente a las mismas superficies de almacenamiento de calor, el aire no entra en contacto directo con el medio de calefacción. El calor de los gases de escape no pasa a través de una barrera metálica, sino que más bien es absorbido por la masa acumuladora; más tarde es liberado por el aire para la combustión, que entra. La unidad es de una alta eficiencia, las temperaturas del metal son uniformes y se eliminan los focos de calor.

El cambio de ciclo de calefacción al de enfriamiento, se efectúa por los siguientes métodos:

1. Por medio del movimiento, generalmente de rotación, de la unidad acumuladora de calor, de la corriente de gases calientes a la corriente de aire frío.
2. Calentando y enfriando alternativamente una masa acumuladora estacionaria, cambiando las corrientes de gas y de aire respectivamente.

El calentador de Ljungstrom (calentador de aire regenerativo del tipo rotatorio) se compone de una caja dividida en dos compartimientos, en donde los gases calientes de la combustión están confiados al compartimiento de uno de los lados, mientras que el aire a calentar se encuentra en el lado opuesto. Una masa con movimiento de rotación lento (el rotor con los elementos de calefacción) pasa por la corriente de los gases absorbiendo calor y continúa girando por una sección sellada hasta llegar al sector de la corriente de aire en donde se despoja del calor, continuando la rotación por una segunda sección sellada para regresar nuevamente a la sección atravesada

por la corriente de los gases. En cada rotación se cierra un ciclo completo de intercambio de calor.

Los principales elementos componentes de un calentador de aire Ljungstrom son: el rotor con su mecanismo de movimiento, los elementos de calefacción, la canastilla y los sellos de aire. La estructura es fuerte y a la vez de peso ligero y tiene flexibilidad para la expansión motivada por la temperatura. Los elementos de calefacción se componen de laminas de acero delgadas onduladas y dispuestas en forma compacta, con el canto dirigido hacia el curso del flujo de los gases, de manera que los listones forman pasos amplios longitudinalmente, que proporcionan un flujo turbulento con el mínimo de resistencia. Este dispositivo permite la obtención de una superficie de calefacción amplia y efectiva, que puede ser colocada de manera compacta dentro de un rotor relativamente chico. La superficie de calefacción de este calentador es eficiente. La profundidad de las capas va proporcionada de acuerdo con las condiciones y los requisitos de operación, ofreciendo las siguientes ventajas:

1. La temperatura de escape de los gases mas baja y ésta se justifica, porque la capa del lado frío se puede construir de una aleación resistente a la corrosión, volteándola cuando uno de los extremos se ha adelgazado apreciablemente (duplicando prácticamente su duración efectiva), o puede cambiarse a un costo económico.
2. El espaciamiento de la superficie puede ser variado completamente en la totalidad de las secciones del calentador para satisfacer diferentes condiciones de las demandas de operación.

3. Se pueden emplear materiales diferentes en cada uno de las capas, adecuadas a las temperaturas, así como a otras condiciones existentes en cada zona de aplicación particular.
4. La capa localizada en el lado frío puede ser desmontada a través de una puerta especial de acceso, sin ocasionar trastornos en las demás superficies.

Se utiliza sellos radiales y periferales montados en los bordes de la placa del rotor, para reducir al mínimo los escapes de gas y de aire. Los sellos pueden ser fácilmente ajustados y cambiados, para asegurar la hermeticidad y mantener el gas y el aire dentro sus ductos de flujo respectivos, como se desea. Hay tres tipos de fugas hacia los corrientes de aire y gas en el calentador de Ljungstrom:

1. Fugas hacia la cámara de gases, a consecuencia de la entrada de aire en los pasos del rotor.
2. Fugas a través de los sellos radiales.
3. Fugas alrededor de la circunferencia del rotor.

Como cada una de las secciones de la superficie de calefacción pasa a través de la corriente total del aire y del gas, no hay tendencia alguna a la estratificación. Por esta motivo quedan eliminados los focos de calor, pudiendo obtenerse temperaturas uniformes. Si se forma alguna condensación durante las cargas bajas de la caldera en el lado frío de los elementos de calefacción, el aire que entra tiende a eliminar esta humedad a un paso por estas secciones.

El calentador de aire de Ljungstrom se construye en cierto numero de diámetros y longitudes, de elementos estandarizados, permitiendo la selección de la unidad dentro de un amplio numero de tamaños.

El calentador es obtenible para flujo horizontal o vertical normalmente las corrientes de gas y de aire fluyen en direcciones opuestas (contracorriente); sin embargo, se obtienen unidades dispuestas para flujo paralelo. Algunos operadores aseguran que una unidad con flecha vertical (con la entrada de los gases en el fondo), se limpia con mas facilidad. Las unidades que se instalan a la intemperie, con ventilador y calentador de aire montados al nivel del piso, están dotados de flecha horizontal.

Aunque la forma y configuración de los ductos del flujo ejercen influencia sobre el factor de transferencia de calor, la consideración más importante debe dársele a la velocidad. Las pérdidas por fricción del tiro aumentan con el cuadrado de la velocidad de los gases y del aire. En consecuencia, la velocidad y con esto también, el coeficiente de transferencia de calor, están limitados por la pérdida de tiro admisible a través del calentador de aire. Para cada instalación hay una velocidad determinada más allá de la cual, cualquier ganancia que se obtenga en la eficiencia, no podrá contrarrestar el aumento de fuerza requerido.

Con el empleo de un calentador de aire, se reducen al mínimo las variaciones de la eficiencia que provienen de las fluctuaciones de la carga de la caldera. Un aumento en la carga de la caldera, aumenta a su vez el volumen y la temperatura de los gases de la combustión. Esta circunstancia mejora, por su parte, el coeficiente de transferencia de calor a través del calentador de aire. Con variaciones muy grandes

en la carga, el calentador de aire tiene la tendencia de mantener un alto promedio de eficiencia en la planta generadora de vapor.

La temperatura a la que se debe precalentar el aire para la combustión, varía considerablemente y es afectada por las características del combustible, el método de combustión empleado, el equipo de alimentación de combustible y la construcción del hogar.

Si la temperatura del aire precalentado es demasiado alta, las parrillas se sobrecalentarán y se flexionarán. El aire caliente que pasa a través de las aberturas de la parrilla a las altas velocidades que se requieren para quemar carbón de tamaño menudo, estimula el arrastre. Un aumento de la temperatura del hogar, ocasionará el aumento de la temperatura de trabajo del material refractario, ocasionando el rápido deterioro del recubrimiento del hogar.

La temperatura del aire primario para la operación con carbón pulverizado, está limitada por los molinos y los quemadores, dependiendo esto del contenido de humedad del carbón.

3.3.7.4 Pulverización de Carbón

Pulverizar es reducir el tamaño de las partículas de carbón; los pulverizadores de carbón utilizan algunos de los siguientes principios: impacto, atrición (pulverización por fricción), y trituración.

Para el carbón pulverizado se pueden tener tres sistemas diferentes de combustión: combustión directa, indirecta y semidirecta.

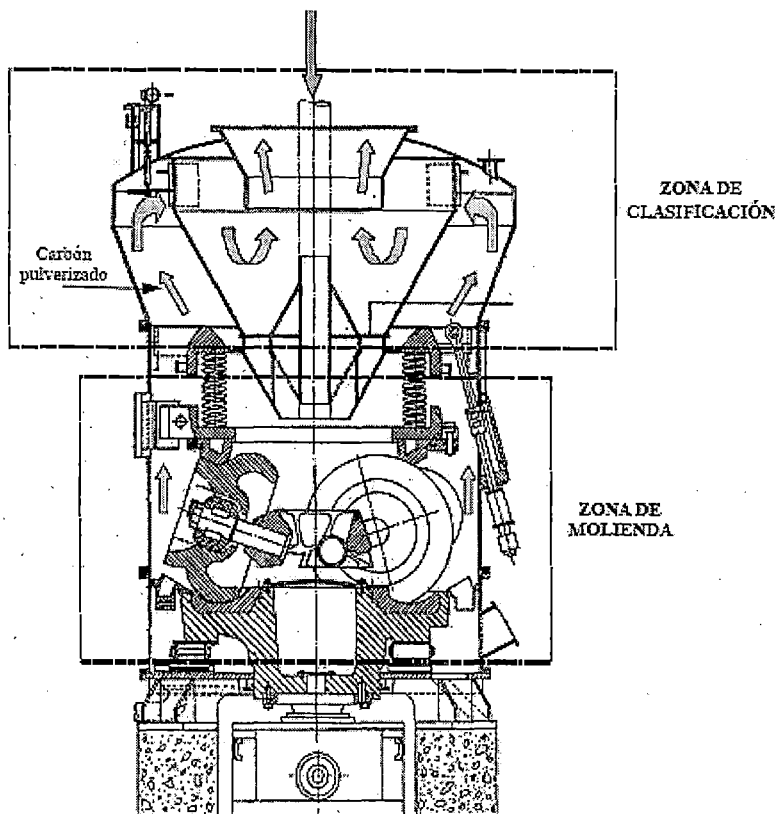


Figura 3.8. Esquema de un Pulverizador de Carbón

El sistema de combustión directa es aquel en el cual el carbón es pulverizado al ritmo en que se está quemando, siendo alimentado directamente del pulverizador; en el sistema de combustión indirecta, el carbón pulverizado es almacenado en un silo; y el sistema de combustión semidirecta utiliza un clasificador ciclónico de carbón entre el pulverizador y el hogar, esto permite quemar carbón con una granulometría adecuada.

En los pulverizadores verticales barridos por aire, el carbón es alimentado al pulverizador desde un ducto en el medio de la parte superior y pasa entre los rodillos y la mesa rotativa. Cada paso de las partículas bajo las ruedas reduce el tamaño del carbón; el efecto combinado de la fuerza centrífuga y el movimiento de la capa de

carbón por los rodillos hace fluir el carbón parcialmente molido hacia el borde de la mesa. Un flujo de aire ascendente fluidifica y levanta el carbón pulverizado.

El punto donde el aire es introducido es normalmente llamado anillo de aire, anillo de toberas o garganta. El flujo de aire ascendente, mezclado con las partículas de carbón, crea una cama de partículas fluidificada justo encima del anillo. La velocidad del aire es lo suficientemente baja de tal manera que levanta sólo las partículas más pequeñas y realiza una preselección de estas. El flujo de aire y sólidos dejando la cama forma la etapa inicial de la separación de partículas o clasificación. La corriente de aire precalentado también seca el carbón para lograr el proceso de combustión. Mientras los sólidos fluyen hacia arriba, el área de flujo aumenta disminuyendo la velocidad, haciendo regresar las partículas más grandes directamente a la zona de molienda.

El estado final de clasificación es dado por el clasificador ubicado en la parte superior del pulverizador. El carbón que logra llegar a la parte superior del pulverizador debe pasar por una etapa de clasificación estacionaria, el clasificador estacionario es un conjunto de paletas inclinadas por el cual pasa la mezcla de aire y carbón; la inclinación de las paletas induce el giro del flujo de mezcla donde las partículas más pesadas golpean el perímetro y caen a la zona de molienda. Las partículas que se mantienen suspendidas entran a las paletas rectas del clasificador rotativo, de acuerdo a la velocidad de rotación, las partículas más pesadas serán expulsadas hacia la periferia y caerán por el cono de rechazo, uniéndose al carbón de ingreso. Las partículas que logran pasar con el aire salen por los ductos de carbón hacia los quemadores de carbón.

3.4 Descripción General de la Caldera de la C.T.ILO21

La caldera es de tipo de presión subcrítica de recalentado simple, circulación natural, tiro balanceado, de un solo tambor, para servicio a la intemperie, diseñado para quemar carbón pulverizado como combustible principal, y diesel 2 para el arranque. Utiliza un sistema de quemadores directos y opuestos. Las paredes del hogar son enfriadas completamente por tubos de agua del tipo tubo-membrana.

Los sobrecalentadores consisten de sobrecalentador secundario tipo suspendido en la zona de alta temperatura y sobrecalentador primario tipo horizontal en la zona de baja temperatura. El recalentador es del tipo suspendido y horizontal. Las temperaturas del vapor sobrecalentado y recalentado, son controladas por un atemperador tipo rociador de una etapa y por la recirculación de gases, respectivamente.

El aire de combustión del ventilador de tiro forzado es distribuido a los sistemas primario y secundario de aire. El aire secundario pasa por el calentador de aire y luego es enrumbado a los quemadores a través de las cajas de viento. El aire primario es presurizado por el ventilador de aire primario para obtener la presión requerida para vencer las resistencias del calentador de aire, pulverizadores y ductos de carbón pulverizado hasta los quemadores.

Los gases de combustión desde la salida de la caldera son direccionados hacia el calentador de aire a través de un ducto de conexión. De la salida del calentador de

aire, los gases de combustión pasan al precipitador electrostático, succionados por el ventilador de tiro inducido, finalmente salen por la chimenea.

El carbón de los silos es descargado a los pulverizadores a través de alimentadores de carbón. El carbón pulverizado es transportado por el aire primario hacia los quemadores a través de los ductos de carbón pulverizado.

Tabla 3.3. Características de la Caldera de la C.T.ILO21

Tipo		
<i>Circulación</i>	Natural de un tambor	
<i>Transferencia de Calor</i>	Radiación y convección	
<i>Tiro</i>	Balanceado	
<i>Recalentamiento</i>	Simple	
<i>Localización</i>	Intemperie (con techo)	
Combustión		
<i>Combustibles</i>	Carbón Bituminoso o Sub Bituminoso Diesel 2	
<i>Trabajo con carbón</i>	50% a 100% de MCR	
<i>Emisión de NOx</i>	270 g/MBtu (@6%O ₂ , base seca)	
<i>Inquemado en cenizas volantes</i>	3% (10% de contenido de cenizas en carbón)	
Diseño		
<i>Evaporación a MCR</i>	432000 kg/h	
<i>Presión de diseño (SC)</i>	19.2 MPa(g)	
<i>Presión de diseño (RC)</i>	4.6 MPa(g)	
Parámetros Operativos - MCR		
<i>Salida del Sobre Calentador</i>	17.26 MPa(g)	541 °C
<i>Entrada del Recalentador</i>	3.89 MPa(g)	541 °C
<i>Salida del Recalentador</i>	3.73 MPa(g)	335 °C
<i>Agua de alimentación</i>		275 °C

Notas:

(1) *Abreviaturas:*

SC - Sobrecalentador

RC - Recalentador

MCR - Producción Máxima Continua

Tb - Capacidad Nominal de la Turbina

(2) *Las condiciones de MCR y emisiones son para carbón garantizado (P.T. Adaro)*

El sistema de circulación natural asegura una circulación de agua estable y confiable, sin la ayuda de bombas de circulación forzada. Esto es muy ventajoso porque permite ahorros en energía eléctrica y mantenimiento y se tiene un tipo de operación más sencilla.

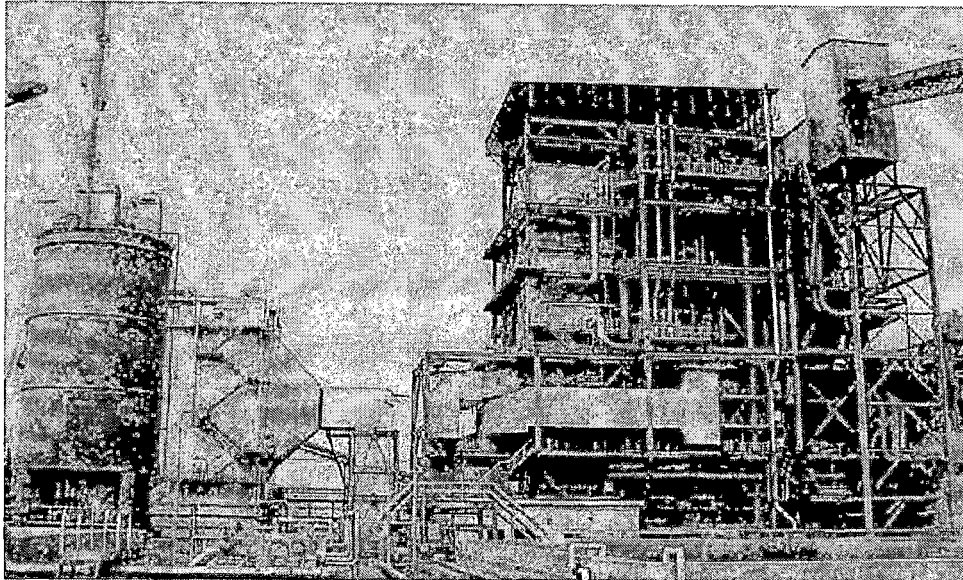


Figura 3.9. Vista Posterior de la Caldera de la C.T.ILO21

La caldera es diseñada para ciertas características de circulación, esto es, para la condición de autocompensación, donde el flujo de circulación se incrementa con el aumento de la absorción de calor y la producción de vapor. Similar efecto de compensación no se produce en una unidad de circulación forzada operando a presiones subcríticas.

Cada pared de agua está dividida en numerosos circuitos independientes con suministros individuales y tubos de ascenso. De esta manera se logra mantener el flujo de circulación suficiente que corresponda a la absorción de calor en cada circuito.

La temperatura de salida del vapor recalentado es controlado por medio del sistema de recirculación de gases. El efecto termodinámico del método de recirculación de gases depende de la cantidad de gases de recirculando y del lugar de introducción de los mismos. En cargas altas de la caldera, el exceso de calor puede ser absorbido en

los sobrecalentadores y luego removido por la atemperación. Para este fin se utiliza un atemperador de simple etapa.

El tambor de la caldera (o domo) fue construido con soldadura tipo fusión, fabricada de plancha de acero. Está diseñado para tener la capacidad suficiente para la función de separar el vapor del agua, suministrando vapor puro a la turbina y manteniendo una circulación de agua estable. El diámetro interno del tambor es de 1,676 mm. La separación del vapor será realizada efectivamente mediante separadores tipo ciclón y atrapadores de agua.

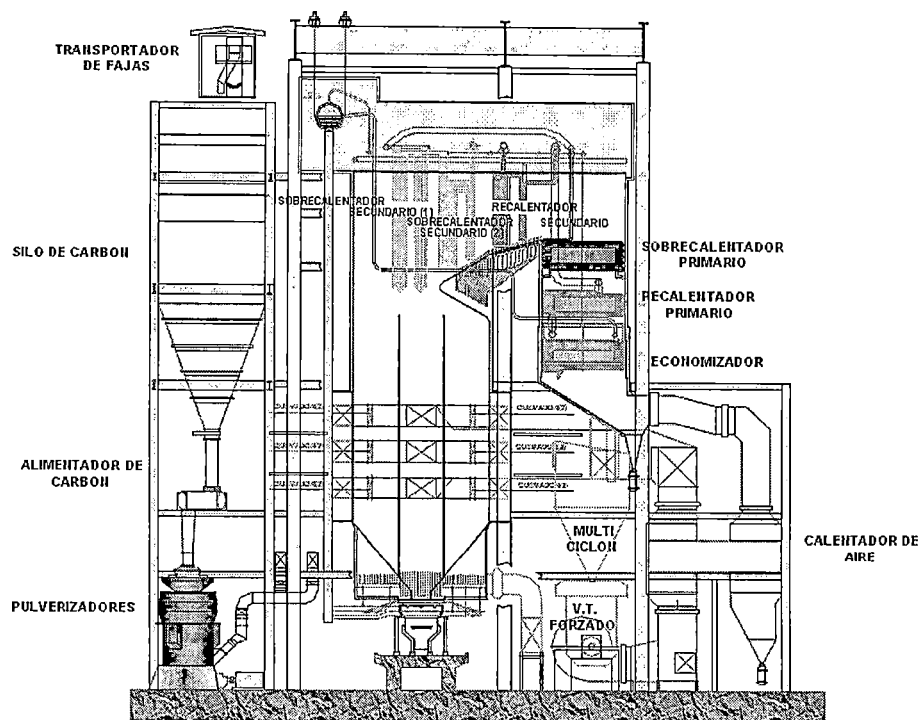


Figura 3.10. Esquema de la Vista Lateral de la Caldera

Las paredes del hogar son enfriadas mediante tubos de agua del tipo tubo-membrana. Los tubos van espaciados, con sólidas conexiones metálicas soldadas entre tubos

adyacentes. Los tubos de las paredes del hogar tienen un diámetro externo de 63,5 mm.

El hogar fue diseñado con volumen suficiente para proveer una combustión eficiente y completa del combustible especificado a todas las cargas. Doce quemadores tipo bajo NOx, están dispuestos en las paredes frontal y posterior, para asegurar alta disponibilidad y estabilidad de operación.

El sobre calentador secundario se encuentra en la zona de alta temperatura y el sobre calentador primario, en la zona de baja temperatura de gases. Un atemperador tipo rociador va instalado entre los sobrecalentadores primario y secundario para el control de la temperatura de vapor principal. El sobre calentador primario es del tipo convección horizontal. Los sobrecalentadores secundarios, tipo placas radiantes, (“platen”) están dispuestos de tal manera que el flujo de vapor en ellos sea en paralelo, de modo que se minimicen las temperaturas de metal de los tubos. Las paredes del techo y de la canasta o jaula (“cage”), las cuales encierran los bancos de convección del sobre calentador primario y la sección de entrada del recalentador, consisten de circuitos de vapor saturado, que conectan el tambor y el banco del sobrecalentador primario.

El recalentador secundario es del tipo suspendido y el recalentador primario de convección horizontal. La temperatura de vapor de salida del recalentador es controlada normalmente (control primario) por el sistema de recirculación de gases de combustión. Un atemperador tipo rociador va instalado entre el recalentador primario y el secundario, para el control secundario. No se requerirá agua de

atemperación para el control de la temperatura de recalentado, en todas las cargas, durante la operación estable normal.

Tabla 3.4. Principales Parámetros de la Caldera

		BMCR	100% Tb	70% Tb	50% BMCR
Flujo de vapor a la salida del sobrecalentador	t/h	432	400	270	216
Presión de vapor a la salida del sobrecalentador	MPa(g)	17.26	17.16	16.84	16.75
Temperatura de vapor a la salida del sobrecalentador	°C	541	541	541	541
Temperatura de vapor al ingreso de sobrecalentadores	°C	359	357	354	353
Flujo de vapor al ingreso del recalentador	t/h	343	320	224	181
Presión de vapor al ingreso del recalentador	MPa(g)	3.89	3.62	2.50	2.00
Temperatura de vapor al ingreso del recalentador	°C	335	327	305	305
Presión de vapor a la salida del recalentador	MPa(g)	3.73	3.47	2.39	1.91
Temperatura de vapor a la salida del recalentador	°C	541	541	541	530
Flujo de agua de alimentación al ingreso del economizador	t/h	426	390	249	200
Temperatura de agua de alimentación al ingreso del economizador	°C	275	270	245	233
Temperatura de agua de alimentación a la salida del economizador	°C	311	308	297	287
Temperatura de los gases de escape a la salida del precalentador de aire (con fuga de aire)	°C	133	131	123	119
Coefficiente de exceso de aire a la salida del precalentador de aire	-	1.3	1.3	1.42	1.55
Consumo de carbón	t/h	56.9	53.6	38.8	31.5

El economizador es de tubos sin aletas, tipo horizontal de lazo continuo y dispuesto en contra flujo del agua en relación a los gases, es decir, los gases fluyen hacia abajo y el agua hacia arriba. El agua proveniente de la bomba de agua de alimentación, vía los calentadores de alta presión, es introducida en el cabezal inferior del economizador, luego fluye hacia arriba a través de los tubos del economizador y luego llega al tambor a través de 2 tuberías de conexión desde los cabezales superiores del economizador. El economizador es de construcción totalmente soldada, formando parte integral de la caldera y es de tal diseño y construcción que es capaz de soportar cambios bruscos de temperatura.

Se cuenta con sopladores de hollín, cuya función es limpiar las superficies de la caldera y del calentador de aire. Cuenta con sopladores de hollín largos, tipo retráctil, para los sobrecalentadores y recalentadores; sopladores de hollín medianos, tipo retráctil, para el economizador; sopladores de hollín cortos, tipo retráctil, para las superficies del hogar; y, sopladores de hollín adecuados para el calentador de aire.

Existe un calentador de aire tipo regenerativo, de eje vertical y sector triple (gases, aire secundario y aire primario). El calentador de aire será diseñado para los flujos de aire y gases correspondientes a la máxima capacidad de la caldera. La temperatura de gases de combustión en la salida del calentador de aire, a B-MCR, es 140°C (sin fugas de aire).

La caldera es de tiro inducido, siendo los ventiladores de tipo centrífugo, horizontal y de velocidad constante, con control de flujo mediante alabes en la entrada. Cuenta con un ventilador de tiro inducido, un ventilador de tiro forzado, un ventilador de recirculación de gases y un ventilador de aire primario.

Tabla 3.5. Pérdidas de Calor y Eficiencia Térmica

		BMCR	100% Tb	70% Tb	50% BMCR
Pérdida en los gases de escape seco	%	5.10	5.00	5.10	5.40
Pérdida por hidrógeno y humedad en el combustible (LHm)	%	0.60	0.60	0.60	0.60
Pérdida por humedad en el aire (LmA)	%	0.10	0.10	0.10	0.10
Pérdida por combustión incompleta (Luc)	%	0.50	0.50	0.50	0.50
Pérdida por radiación y convección (L _B)	%	0.30	0.30	0.40	0.40
Margen del fabricante (Lm)	%	0.30	0.30	0.30	0.30
Eficiencia térmica del Caldero	%	93.10	93.20	93.00	92.70

3.4.1 Sistema de Agua y Vapor

Es el sistema más complejo, ya que genera y suministra vapor a la turbina para la generación de potencia eléctrica. El agua es suministrada a la caldera a través del Sistema de Agua de Alimentación y calentada hasta convertirse en vapor. El vapor es separado de la mezcla agua-vapor en el domo y sobrecalentado en las dos etapas del sobrecalentador. El vapor sobrecalentado (o Vapor Principal) va hacia la turbina de alta presión, el escape de esta turbina regresa a la caldera para un recalentamiento en las dos etapas del recalentador para ir a la turbina de presión intermedia.

La función del **economizador** es calentar el agua de alimentación antes de su ingreso al domo.

El **domo** es un tanque horizontal en la parte superior de la caldera en el cual el vapor saturado es separado de la mezcla agua-vapor dejando los tubos de la caldera. El agua de alimentación ingresa al domo y luego a los dos “downcomers” conectados al domo. El agua fluye a través de los downcomers a la parte inferior del hogar, de donde se distribuye a la parte inferior de los tubos de pared. El agua sube a través de los tubos de pared hacia los cabezales de salida, absorbiendo el calor del hogar para realizar el cambio de estado y convertirse en vapor. Este vapor se colecta en cabezales para luego regresar al domo donde pasa a través de separadores ciclónicos y lavador. El vapor seco va hacia los sobrecalentadores a través de los tubos de vapor saturado.

Los **sobrecalentadores** incluyen dos etapas de sobrecalentamiento con un aatemperador intermedio para el control de la temperatura de vapor principal. El vapor

sobrecalentado antes del ingreso al sobrecalentador secundario (luego del atemperador) se utiliza como suministro de vapor auxiliar (en arranques y paradas de Unidad) y vapor para el sistema de soplado.

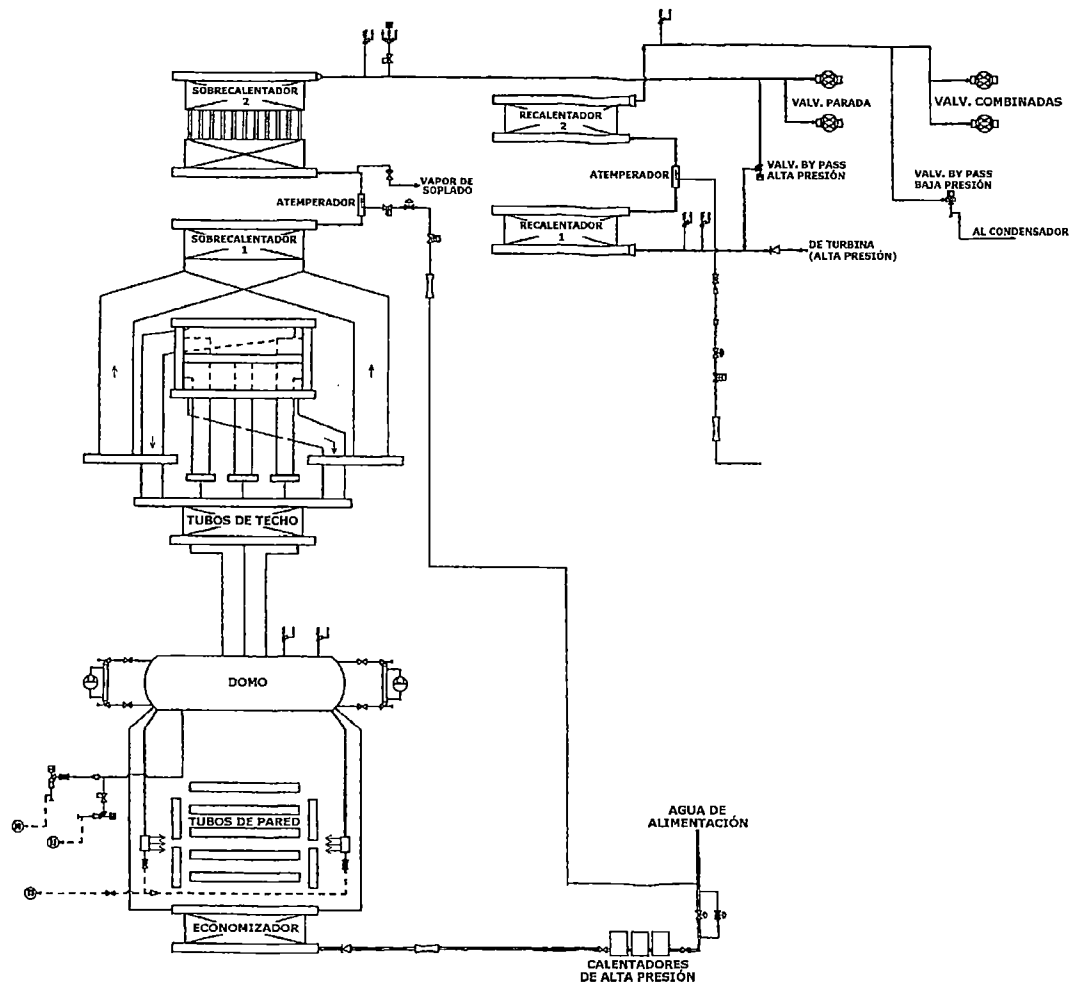


Figura 3.11. Esquema del Sistema de Agua y Vapor de la Caldera

La función de los **recalentadores** es mejorar la eficiencia del ciclo. El vapor de escape de la turbina de alta presión va a los recalentadores para luego dirigirse a la turbina de presión intermedia. La temperatura de vapor recalentado caliente (salida del recalentador secundario) es controlada en primer lugar por la recirculación de

gases; adicionalmente se ha instalado un atemperador en el intermedio entre el recalentador primario y el recalentador secundario.

La **purga** está conformada por la purga continua y la purga de arranque. La purga continua tiene como función mantener la calidad del agua, descargando el agua conteniendo impurezas como sólidos disueltos (TDS) y sílice (SiO_2) que puede ingresar del ciclo y concentrarse en el domo. La purga de arranque previene la posibilidad de ingreso de agua del domo a los sobrecalentadores debido al incremento del nivel del domo producido por el esponjamiento en el arranque. Esta línea está cerrada durante operación normal. El esponjamiento del agua del domo se produce debido a la baja presión en el arranque y el rápido calentamiento del agua, produciendo huecos de vapor en el agua e incrementando el nivel.

La caldera cuenta con **líneas de drenaje**, un tanque de drenajes, una tubería de descarga, una tubería de drenaje, un atemperador del drenaje y un pozo de drenajes. Los drenajes descargados en el tanque de drenajes es separado en vapor (descargado a la atmósfera a través de la línea de descarga) y agua de drenaje (que es atemperada por debajo de la máxima temperatura admisible por el pozo de drenajes y luego descargada a este a través de la línea de drenaje).

Los **venteos** son utilizados para la ventilación del sistema durante el llenado de la caldera para el fuego inicial o para pruebas hidrostáticas. Adicionalmente sirven como puntos de ingreso de nitrógeno para la preservación durante paradas.

La función de las **válvulas de seguridad** es proteger la caldera de sobrepresión del agua o vapor. Se encuentran instalados en el domo (2), salida de los

sobrecalentadores (1), ingreso (2) y salida (1) de los recalentadores. Una válvula electromagnética es instalada en la salida del sobrecalentador para aperturar en caso de sobrepresión antes que cualquier otra válvula de seguridad.

Se cuenta con un **sistema de soplado**, cuya función es limpiar la suciedad acumulada en los tubos de la caldera y los elementos del calentador de aire. El sistema debe mantener una temperatura adecuada durante la operación de soplado. Está formado por dos sub sistemas:

- El sub sistema de soplado de la caldera dividido en tres sectores dependiendo de la zona a ser soplada: sopladores cortos de pared, sopladores largos de tubos suspendidos, sopladores largos y medianos de serpentines horizontales.
- El sub sistema de soplado del calentador de aire consiste en dos sopladores para la zona caliente y zona fría de gases.

3.4.2 Sistema de Aire y Gases

La caldera esta diseñada para ser del tipo de tiro balanceado, y el hogar de la caldera se mantiene a una presión menor a la atmosférica por seguridad de la combustión y para mantener limpia la parte externa de la caldera.

El aire de combustión es suministrado por el Ventilador de Tiro Forzado al Ventilador de Aire Primario y al Calentador de Aire. El sistema de aire primario lleva el aire en condiciones adecuadas al Pulverizador. Aire secundario es calentado en el calentador de aire y de ahí es llevado a través de las cajas de aire (“windbox”) a los quemadores.

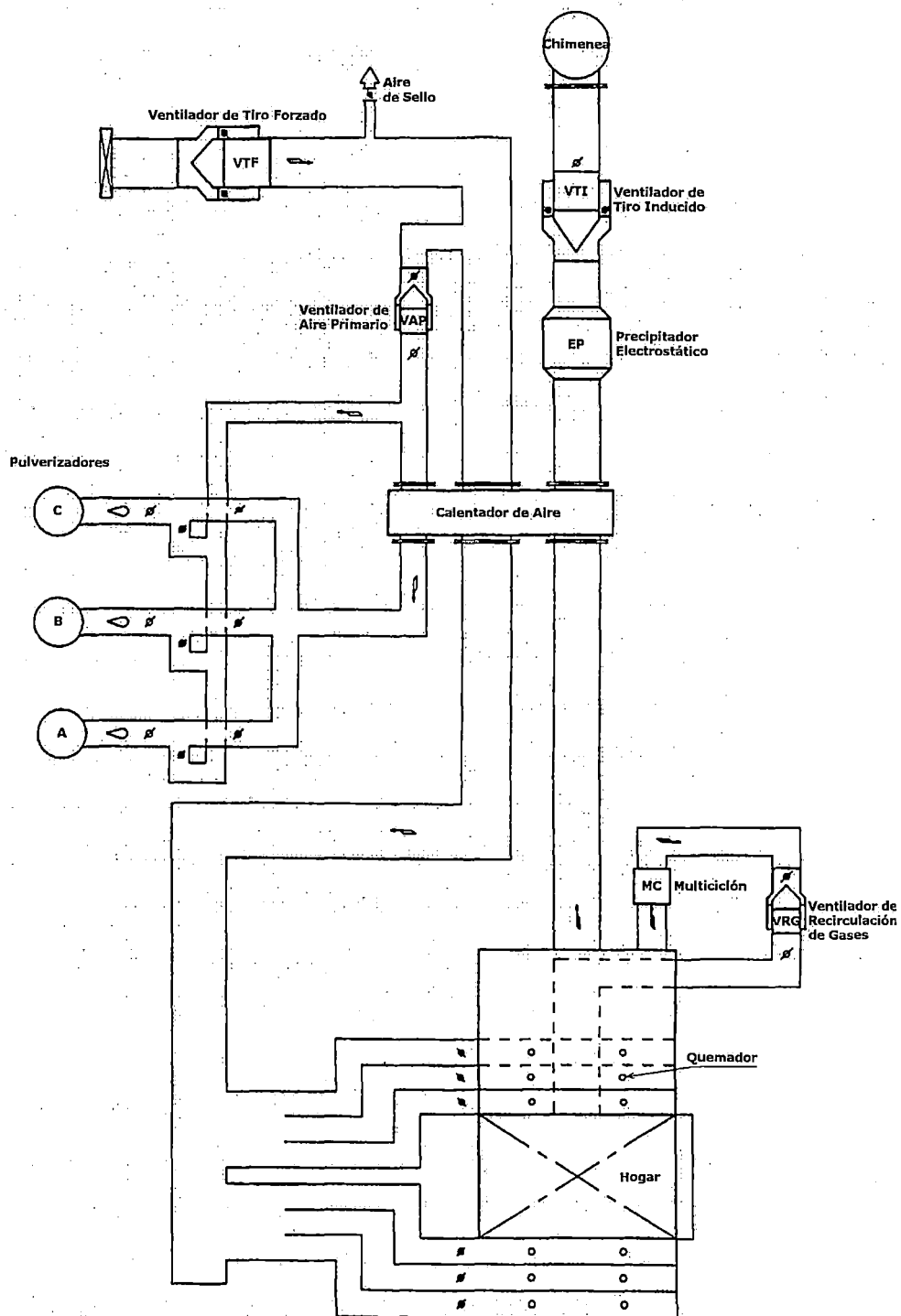


Figura 3.12. Esquema del Sistema de Aire y Gases

El Ventilador de Tiro Inducido, en el sistema de gases de escape, succiona los gases de combustión a través del calentador de aire y el Precipitador Electroestático hasta la chimenea.

Este sistema cuenta con sistemas auxiliares, como el sistema de agua de enfriamiento para las máquinas rotativas, sistema contra incendio para el calentador de aire, sistema de remoción de cenizas, sistema de agua para sello de la caldera, entre otros.

Tabla 3.6. Parámetros del Aire para Combustión

		BMCR	100% Tb	70% Tb	50% BMCR
Flujo de aire primario al ingreso del Calentador de Aire	t/h	146	143	125	123
Flujo de aire secundario al ingreso del Calentador de Aire	t/h	346	320	232	188
Flujo de aire primario a la salida del Calentador de Aire	t/h	102	99	80	71
Flujo de aire secundario a la salida del Calentador de Aire	t/h	350	324	239	193
Flujo de aire primario al ingreso del pulverizador	t/h	125	120	103	94
Flujo de aire primario de fuga hacia el lado de gases	t/h	19	19	19	24
Flujo de aire secundario de fuga hacia el lado de gases	t/h	21	21	19	23
Flujo de aire primario de fuga hacia el lado de aire secundario	t/h	24	24	26	28
Caída de Presión desde la caja de viento de los quemadores hasta el hogar	kPa	1.81	1.58	0.92	0.66
Caída de Presión total desde el ingreso al Ventilador de Tiro Forzado hasta el hogar	kPa	3.78	3.30	1.90	1.37
Caída de Presión del Calentador de Aire en el lado de aire primario	kPa	1.42	1.32	0.93	0.74
Resistencia del pulverizador	kPa	6.10	5.89	4.96	4.51
Caída de Presión desde la salida del pulverizador hasta los ductos del quemador	kPa	2.68	2.48	1.72	1.39
Caída de Presión total desde el ingreso de aire primario hasta el hogar	kPa	12.36	11.73	9.06	7.88
Temperatura al ingreso del Ventilador de Tiro Forzado	°C	18	18	18	18
Temperatura a la salida del Ventilador de Tiro Forzado	°C	23	23	23	23
Temperatura al ingreso del Ventilador de Aire Primario	°C	23	23	23	23
Temperatura a la salida del Ventilador de Aire Primario	°C	33	33	33	33
Temperatura primario a la salida del Calentador de Aire	°C	346	346	328	313
Temperatura secundario a la salida del Calentador de Aire	°C	336	336	321	308

El sistema de aire primario consiste de un Ventilador de Tiro Forzado, un Ventilador de Aire Primario, ductos y compuertas. El propósito principal del sistema

de aire primario es transportar el carbón del pulverizador al quemador en condiciones adecuadamente secas. El aire primario también es usado para sello del Calentador de Aire y el Pulverizador. El aire del Ventilador de Tiro Forzado es presurizado aun mas por el Ventilador de Aire Primario, el cual es suministrado al Pulverizador, al aire de sello del pulverizador y sello del Calentador de Aire. El aire primario es suministrado al pulverizador de dos fuentes, una proveniente del Calentador de Aire (Aire Primario Caliente) y otra directamente del Ventilador de Aire Primario (Aire Primario Frío). Estos dos suministros son mezclados antes de ingresar al pulverizador, regulando así la temperatura de aire primario a la entrada del Pulverizador a un valor específico.

Tabla 3.7. Ventiladores de la Caldera

Ventilador	Tipo	Potencia (KW)	Flujo (m ³ /min)	Presión (kPa)	Temperatura (°C)
Tiro Forzado	Centrífugo	920	8.6	-0.39 / 4.41	18
Aire Primario	Centrífugo	800	3.2	3.28 / 15.19	23
Tiro Inducido	Centrífugo	1400	13.7	-3.82 / 0.78	133
Recirculación de Gases	Centrífugo	430	4.6	-3.14 / 0.88	353

El **sistema de aire secundario** consiste de un Calentador de Aire, ductos y compuertas. El propósito del sistema de aire secundario es de suministrar el aire caliente que es adecuado para la combustión en los quemadores. Aire del Ventilador de Tiro Forzado es calentado por el intercambio de calor entre el aire primario y los gases de combustión en el Calentador de Aire, de ahí circula hacia los quemadores por la caja de aire (windbox).

El ducto de aire secundario se divide para poder distribuir la cantidad de aire adecuada a cada caja de aire (windbox).

El **hogar** esta formado por paredes de agua y cada pared está formada por tubos con membrana enfriados por agua para mantener la temperatura del metal dentro de límites aceptables. El hogar es un ambiente cerrado muy grande y vacío donde se realiza la combustión y sirve para el enfriamiento de los gases de combustión antes de su paso a la zona de convección. Los serpentines de Sobrecalentado, Recalentado y Economizador están ordenados a lo largo del flujo de gases en el interior de la caldera. La presión del hogar es controlada y se mantiene ligeramente menor a la presión atmosférica por medio del Ventilador de Tiro Inducido.

Tabla 3.8. Características del Calentador de Aire

Tipo	Precalentador de aire Ljungstrom rotativo regenerativo de tres secciones.		
Velocidad de giro del Rotor	0.9 RPM (Aprox.)		
Superficie de calentamiento	18940 m ²		
Elemento de Transferencia de Calor		<i>Lado Caliente</i>	<i>Lado Frio</i>
	<i>Tipo – espesor</i>	DU – 0.5mm	DU – 1.2mm
	<i>Ancho</i>	1500mm	300mm
Fuga de aire (BMCR)	39.1 t/h ($\Delta\text{CO}_2 < 1.2\%$)		
Temperatura gases escape (sin fugas)	Menor a 140 °C		
Caída de presión a 100% de carga	<i>Lado aire primario</i>	No mayor a 1.27 kPa	
	<i>Lado aire secundario</i>	No mayor a 0.78 kPa	
	<i>Lado gases</i>	No mayor a 1.13 kPa	

El **sistema de recirculación de gases** esta formado por un Ventilador de recirculación de Gases, un Ciclón Múltiple para Cenizas, compuertas y ductos. El sistema de recirculación de gases sirve para controlar la temperatura del vapor a la salida del recalentador. Los gases de combustión a la salida del Economizador son recirculados a través del fondo del hogar hacia el hogar por medio del Ventilador de Recirculación de Gases.

La recirculación de gases por la parte inferior del hogar, reduce la absorción de calor en el hogar debido a la disminución de temperatura de gases en el hogar y a su vez aumenta la absorción de calor por convección debido al aumento de flujo de gases. La recirculación de gases puede fácilmente cambiar la distribución de calor en la caldera, de tal manera que se puede mantener constante y estable la temperatura del vapor a la salida del recalentador. Adicionalmente, se tiene un Ciclón para atrapar las cenizas de los gases a la salida del Economizador, esto evitara la erosión del impulsor del Ventilador de Recirculación de Gases.

Tabla 3.9. Especificaciones del Multiciclón

Carga de la Caldera	70% (*)
Flujo de gases	94 260 Nm ³ /h (húmedo)
Temperatura de gases	352 °C
Presion de Gases	-1.03 kPa
Ingreso de cenizas	18.2 g/Nm ³ (seco)
Numero de ciclones	80
Caida de presion	Menor a 1.47 kPa
Salida de Cenizas	Menor a 6 g/Nm ³ (seco)

(*) El flujo de gases es maximo a 70 % de carga.

El **sistema de gases de combustión** comprende un Calentador de Aire, un Precipitador Electrostático, un Ventilador de Tiro Inducido, Compuertas y ductos. Los gases del Economizador son llevados por el Ventilador de Tiro Inducido hacia el Calentador de Aire. Finalmente los gases son descargados a la atmósfera pasando por el Precipitador Electrostático y la Chimenea.

El fundamento del **Precipitador Electrostático** es la sedimentación rápida de pequeñas partículas de polvo y ceniza al ser sometidas a un campo electrostático. El precipitador electrostático está constituido por las unidades siguientes:

- *Carcasa y tolvas de recogida de polvo*: Construidas con paneles prefabricados de acero soldados. Las cenizas y polvo son recogidas en las tolvas localizadas en la parte baja. La parte inferior de la tolva es calentada para evitar condensaciones y los consiguientes problemas que ello conlleva de corrosión y apelmazamiento de cenizas. Placas deflectoras están instaladas debajo de los campos, para evitar flujos preferenciales del gas.

Tabla 3.10. Parámetros de Gases de Combustión

		BMCR	100% Tb	70% Tb	50% BMCR
Presión del hogar	kPa	-0.147	-0.147	-0.147	-0.147
Flujo a la salida del hogar	t/h	552	519	401	340
Temperatura a la salida del hogar	°C	1120	1100	1000	940
Temperatura a la salida de sobrecalentadores	°C	982	967	887	835
Temperatura a la salida de recalentadores	°C	833	821	763	719
Flujo a la salida del economizador	t/h	556	523	404	342
Presión a la salida del Economizador	kPa	-0.79	-0.71	-0.50	-0.46
Temperatura a la salida del economizador	°C	380.00	375.00	352.00	333.00
Flujo a la salida del Calentador de Aire	t/h	595	562	442	388
Presión a la salida del Calentador de Aire	kPa	-2.31	-2.00	-1.36	-1.04
Temperatura a la Salida del Calentador de Aire (sin fugas)	°C	140	138	132	131
Temperatura a la salida del Calentador de Aire (con fugas)	°C	133	131	123	119
Flujo al Ingreso al Precipitador Electrostático	t/h	595	562	442	388
Presión al Ingreso al Precipitador Electrostático	kPa	-2.50	-2.17	-1.47	-1.13
Flujo a la salida del Precipitador Electrostático	t/h	598	566	445	391
Flujo al Ingreso al Ventilador de Tiro Inducido	t/h	598	566	445	391
Presión al Ingreso del Ventilador de Tiro Inducido	kPa	-2.90	-2.53	-1.68	-1.30
Flujo al Ingreso a la chimenea	t/h	598	566	445	391

- *Sistema de Electroodos de Descarga*: Es el sistema más importante del precipitador. Los electrodos están instalados simétricamente respecto al campo eléctrico evitando chispas y cortocircuitos. La seguridad e insensibilidad a los gradientes de temperatura son críticos con objeto de

mantener la operación óptima del precipitador. Además de los electrodos convencionales, se dispone de electrodos espirales de acero inoxidable especial, que se montan en estructuras soporte verticales. Este diseño reduce el volumen del equipo.

- *Golpeadores de electrodos de descarga:* Para evitar el crecimiento de depósitos o películas de polvo en los electrodos, se utilizan martillos golpeadores, montados en ejes horizontales. Hay un sistema de golpeadores instalado por cada sección eléctrica. La operación de cada sección es independiente y está controlada por un microprocesador que está programado con una frecuencia de golpeo óptima. El sistema de accionamiento de los golpeadores está instalado en las paredes o en el techo de la envolvente. En ambas situaciones el eje está en una caja aislada y calentada eléctricamente.
- *Sistema de Electrodos Colectores:* Los electrodos colectores están suspendidos de una estructura del techo separada y ajustable. La barra de suspensión se puede ajustar verticalmente si fuera necesario. Hay tres electrodos de descarga por panel colector. Están instalados de forma que se garantiza la máxima eficiencia.
- *Golpeadores de electrodos colectores:* Un martillo golpeador sirve para cada fila de electrodos colectores a través de una barra que transmite el golpe.
- *Distribuidores de gases:* Sirven para distribuir los gases uniformemente desde la entrada del precipitador y a lo largo de toda la longitud, con objeto de conseguir una óptima eficiencia en la separación de partículas. Esto se

consigue con la instalación en serie de placas perforadas en la entrada al precipitador. También se instala una placa de distribución de gases a la salida del precipitador para asegurarse que la distribución se mantiene en el último campo optimizando la eficiencia de éste.

3.4.3 Sistema de Pulverización de Carbón

Antes de su combustión en el hogar de la caldera, el carbón debe ser debidamente preparado. Este proceso de preparación consiste básicamente en tres actuaciones: pulverización, secado y su transporte a los quemadores. Las funciones del sistema de combustión de carbón son:

- Almacenar en las tolvas el carbón suficiente para un día y medio de operación del grupo térmico a plena carga.
- Proporcionar a los molinos el caudal de carbón requerido en cada momento por el control de combustión de caldera y el mantenimiento del nivel de molino en su valor de consigna.
- Pulverizar el carbón con una finura de diseño (paso del 70% a través de un tamiz de 75 μm) para su combustión.
- Realizar el secado del carbón pulverizado en el molino y durante su transporte a quemadores mediante aire primario.
- Transportar el carbón pulverizado suspendido en una corriente de aire primario y temperatura controlada hasta los quemadores de carbón, y a una

velocidad tal que minimice la erosión de la tubería y evite la deposición de partículas de carbón en el mismo.

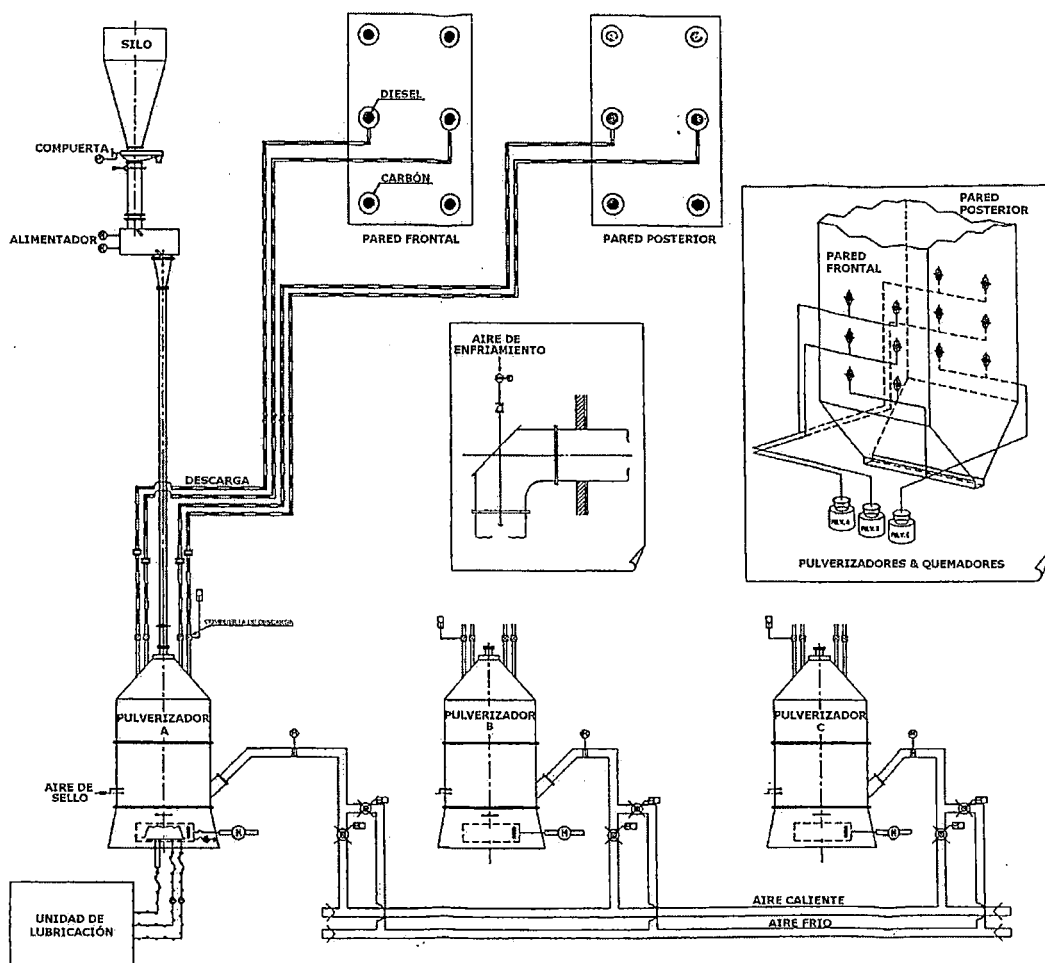


Figura 3.13. Esquema de los Pulverizadores y Quemadores de Carbón

El carbón es transferido de los silos a los pulverizadores de carbón. Una vez pulverizado y secado el carbón, es transportado a los quemadores de carbón, produciendo su inyección y quemado en el hogar.

Los equipos que integran el Sistema de Combustión de Carbón son los siguientes:

- Tres tolvas o silos de almacenamiento de carbón.

- Tres alimentadores gravimétricos de carbón, para conducir el carbón desde cada silo a su correspondiente pulverizador de carbón.
- Tres pulverizadores o molinos de carbón verticales, donde se produce la pulverización y secado del carbón.
- Doce quemadores de carbón, situados en grupos de cuatro en tres elevaciones (dos en la pared frontal y dos en la pared posterior de caldera). Cada molino alimenta los cuatro quemadores de una misma elevación.

El carbón es transportado por fajas transportadoras desde las canchas de almacenamiento a los **silos de carbón**. Existen tres tolvas de carbón, una por pulverizador. Cada silo es del tipo cilíndrico-cónica. El material es de chapa de acero al carbono con acero inoxidable en la parte cónica. Cada silo está calculado para almacenar el carbón consumido en un día a máxima carga con dos tolvas y dispone de un conjunto de instrumentos para vigilancia y control del nivel de carbón.

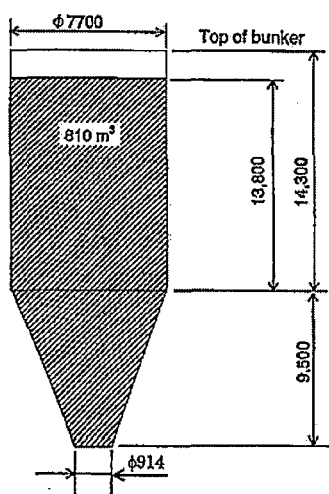


Figura 3.14. Silo de Carbón

El carbón es conducido desde cada silo a su correspondiente pulverizador mediante un **alimentador gravimétrico de carbón**. Existen, pues tres alimentadores situados cada uno en la descarga de su correspondiente silo. Una compuerta motorizada aísla el silo del alimentador, la compuerta de aislamiento dispone de una válvula para drenaje del agua, acumulada en el cuello de la tolva. Una vez abierta la compuerta, el alimentador puede transferir carbón al molino, el caudal de carbón se regula mediante regulación de la velocidad de la cinta de alimentador (El rango de regulación es de 10 a 1); un detector de peso en la cinta permite medir el caudal de carbón y transmitirlo al Sistema de Control e Información Distribuido. La cinta del alimentador vierte el carbón por la canaleta de salida al conducto vertical que conecta con el pulverizador, a donde llega el carbón por gravedad.

El conducto vertical de comunicación entre el alimentador de carbón y el pulverizador es también la vía por la cual el aire primario caliente del molino puede invadir el alimentador. Para evitarlo, se inyecta en el alimentador aire de sellado, que está a una presión ligeramente superior a la del aire primario.

El carbón cae por gravedad desde el alimentador a su correspondiente **pulverizador** vía el conducto vertical que los une. El carbón se introduce por la parte superior y es pulverizado por un conjunto de rodillos, y secado por el aire primario, que también sirve de medio de transporte para portar en suspensión el carbón pulverizado a los quemadores. Existen tres pulverizadores de carbón, cada uno con una capacidad de diseño de 33,9 t/h con el carbón de garantía. El pulverizador es modelo MPS-212, tipo vertical y de rodillos. La mesa, con un diámetro de 2.12 m en hierro fundido, gira a 24.8 rpm. Los rodillos, con un diámetro de 1.65 m y también de hierro

fundido, giran a 31.8 rpm. El motor principal es del tipo refrigerado por ventilador, con una potencia de 560 kW a 6.6 kV.

Cada molino dispone de un **clasificador de carbón tipo rotativo**, que gira normalmente a 50 rpm accionado por un motor de 31 kW. El aire primario que se inyecta en el molino arrastra las partículas de carbón a través del clasificador rotativo y sale por las tuberías de carbón pulverizado a los quemadores de carbón. En estas tuberías, a la salida del molino, se han instalado cuatro compuertas automáticas de aislamiento.

El **aire primario** para secar y transportar a los quemadores el carbón pulverizado se introduce en el pulverizador mediante la apertura de una compuerta motorizada cuando el pulverizador entra en servicio. A su vez, este aire primario es el resultado de la mezcla de dos flujos de aire: aire primario frío y aire primario caliente.

Tabla 3.11. Parámetros del Pulverizador de Carbón

		BMC	100% Tb
Consumo de carbón	<i>t/h</i>	56.9	53.56
Molinos en servicio	-	2	2
Consumo por molino	<i>t/h</i>	28.45	26.78
Carga del molino (Máxima condición de desgaste)	%	84	79
Temperatura de aire caliente	°C	350	346
Flujo de aire caliente	<i>t/h</i>	102.2	98.7
Temperatura de aire frío	°C	33	33
Flujo de aire frío	<i>t/h</i>	22.2	21.7
Temperatura de aire antes del molino	°C	296	292
Temperatura de aire después del molino	°C	65	65
Granulometría (fineza) del carbón (bajo malla 200)	%	70	70
Consumo de potencia de molinos en servicio	<i>kW</i>	978	944

El aceite del **sistema de lubricación del pulverizador** se utiliza para la lubricación de cojinetes y ruedas dentadas. Cada pulverizador tiene depositado el aceite de lubricación en su caja de engranajes. Dentro de la caja de engranajes están situados el calentador eléctrico y los instrumentos de temperatura, nivel y vibración. El aceite se enfría pasando por el circuito de enfriamiento.

Cada pulverizador posee una **unidad hidráulica** cuyo objetivo es aportar aceite a presión a los cilindros hidráulicos que están mecánicamente conectados al rodillo del pulverizador y con esto aumentar la fuerza de apriete del rodillo al carbón, aportando aceite a presión a los cilindros sobre la superficie del anillo del embolo (lado rodillo) o contrapresión, aportando aceite a presión sobre la cara inferior del émbolo de los cilindros (lado cabeza). El aceite a presión aportado por el sistema hidráulico a los cilindros hidráulicos en su lado rodillo sirve para aumentar la fuerza de trituración, la presión de aceite en este lado de los cilindros está regulada por el control automático. La presión requerida se establece por el operador en un rango de ajuste previsto en función de la carga de carbón al pulverizador y las características físicas del carbón (dureza y humedad). El aceite a presión aportado por el sistema hidráulico a los cilindros hidráulicos en su lado cabeza normalmente tiene una presión fija. Esta contrapresión sirve para evitar vibraciones en el pulverizador en todo su margen de funcionamiento. La presión de aceite del lado de la cabeza puede aumentar hasta superar la presión de aceite del lado del rodillo, este aumento de presión tiene lugar en los regímenes de arranque, parada y vaciado del pulverizador. El objetivo de este aumento es aliviar las cargas del motor del pulverizador, así como de los cojinetes de engrase y rodillos, en los regímenes mencionados.

Con el fin de evitar que el carbón pulverizado o el polvo de carbón se introduzca en los sellos del pulverizador y provoque su obstrucción, se inyecta **aire de sellado** en cuatro zonas del pulverizador: clasificador, rodillos, varilla de carga y mesa de rotación. Este aire de sellado esta a una presión ligeramente superior a la del aire primario en el interior del pulverizador, de este modo actúa como barrera a la penetración de partículas y polvo de carbón.

3.4.4 Combustión de Carbón

Las tuberías de carbón pulverizado unen los pulverizadores de carbón con los **quemadores de carbón**. Cada pulverizador de carbón alimenta cuatro quemadores, existen pues cuatro tuberías de carbón por pulverizador. La caldera dispone de 12 quemadores, en grupos de cuatro por elevación, total tres elevaciones (En cada elevación se ubican 2 en una cara y otras 2 en la cara opuesta). La capacidad de cada quemador es de 8 t/h de carbón garantizado. El control del caudal de aire se realiza mediante compuertas de entrada a la caja de vientos, y el ajuste fino de cada quemador mediante registro y persianas de aire. Cada quemador dispone de un detector de llama del tipo infrarrojo.

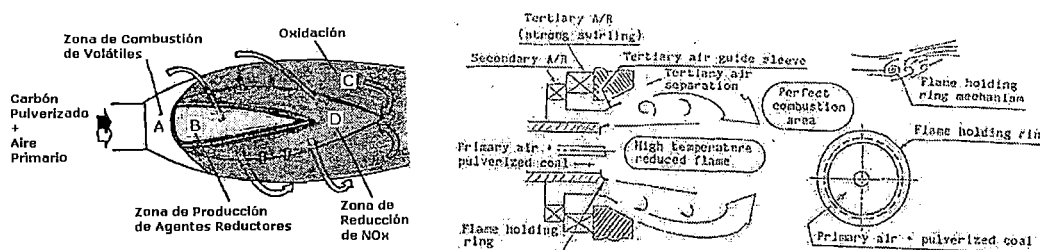


Figura 3.15. Zonas de Combustión en la Flama

El modelo del quemador es el **NR-Hitachi**, que es un quemador de bajo NO_x, cuya tecnología reduce la cantidad de NO_x en flama de alta temperatura (sin reducir su temperatura)

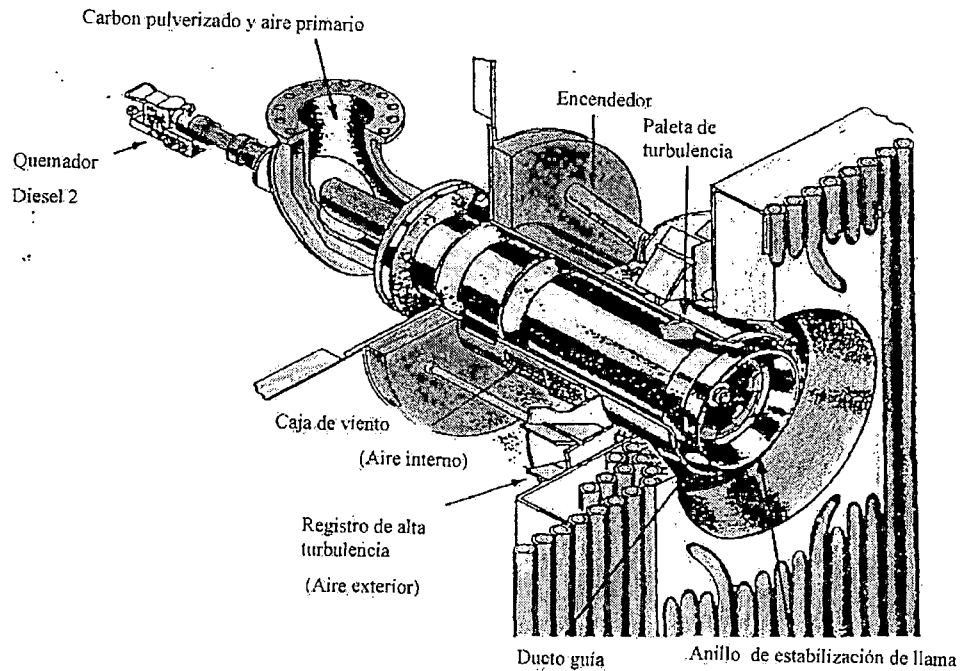


Figura 3.16. Quemador Hitachi-NR

Tabla 3.12. Zonas de Combustión en la Flama

Zona	Proceso	Descripción	Reacción
A	Combustión de Volátiles	Se incrementa la temperatura rápidamente, combustionando los volátiles de Nitrógeno.	$N_{\text{volátil}} + O_2 \rightarrow NO$
B	Producción de Agentes Reductores	Mantiene una combustión rica (sólo aire primario)	$Materia\ Volátil\ (\cdot CH; NO; \cdot C) + O_2 \rightarrow (CO; \cdot CN; \cdot NH)$
			$N_{\text{volátil}} \rightarrow (\cdot CN; \cdot NH)$
C	Oxidación	Mantiene la combustión luego de la reacción de desnitrización con un incremento en la turbulencia	$N_{\text{flama}} + O_2 \rightarrow NO$
D	Reducción de NO _x	Se reduce la cantidad de oxígeno y se facilita las reacciones de desnitrización	$\cdot NH + NO \rightarrow N_2 + \cdot OH$
			$\cdot CN + NO \rightarrow N_2 + \cdot CO$
			$Flama + NO \rightarrow \frac{1}{2}N_2 + CO$

Si el carbón pulverizado se enciende y el oxígeno (O₂) es rápidamente consumido por una mezcla combustible–aire rica, el NO_x producido de los volátiles de nitrógeno

reacciona con los productos intermedios de hidrocarburos (.CH presentes de forma abundante en una flama de alta temperatura con combustión rica) y se reduce a nitrógeno (N_2) mediante productos intermedios de nitrógeno (.NX). Los puntos más importantes en la reducción de NO_x del quemador son:

- Rápida ignición gracias al anillo estabilizador de flama.
- Separación del aire periférico en la flama para producir una combustión rica en el centro de la flama.
- Mejoramiento de la mezcla de aire luego de la zona de reducción de NO_x mediante los registros de aire terciario.

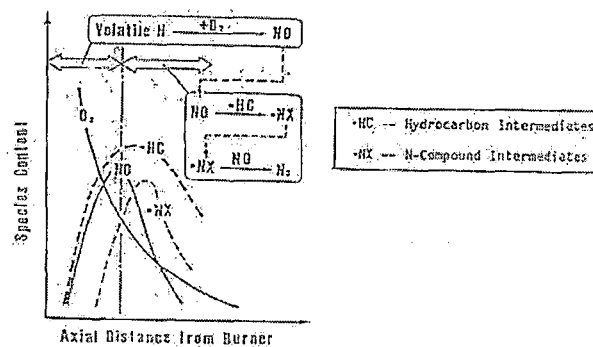


Figura 3.17. Concepto de la reducción de NO_x en flama.

3.4.5 Principales Sistemas de Control de la Caldera

Los sistemas de control de la caldera están basados en la redundancia de sensores para las diferentes acciones de control tipo proporcional, integral y/o derivativo (la mayoría de controles utilizan la acción proporcional – integral).

3.4.5.1 Controles Maestros

El Maestro de la Unidad es la señal de control principal que se encarga de fijar el valor consigna de generación de la Unidad, haciendo que el Maestro de Caldera y el Maestro de Turbina busquen la manera más adecuada de cumplirla. El Maestro de Caldera (Boiler Master) es aquel que fija la demanda de fuego y aire para producir la evaporación adecuada para una determinada carga. El Maestro de Turbina (Turbina Master) se encarga de gobernar el flujo de vapor de ingreso a la turbina para que se pueda generar la potencia eléctrica solicitada.

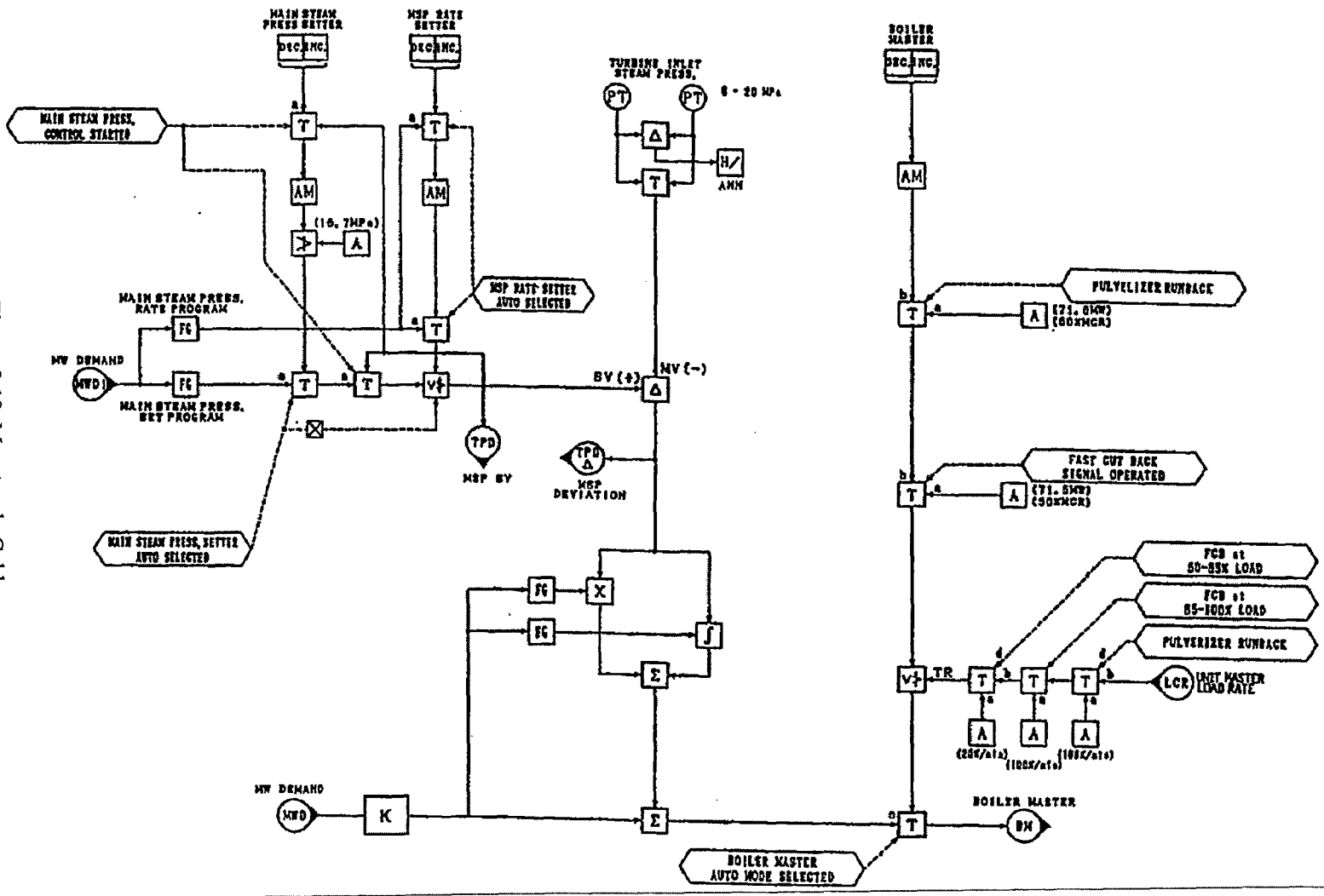
Tabla 3.13. Principales Símbolos y Abreviaciones del Sistema de Control

Símbolo	Función
\otimes	Transmisor
Σ	Suma
FG	Generador de Funciones
PI	Acción Proporcional - Integral
PID	Acción Proporcional - Integral - Derivativa
A/H	Estación de Control Auto / Manual
X	Multiplicador
Δ	Diferencia
SG	Generador de Señal
T	Relé de Transferencia
>H	Selector de Alto
<L	Selector de Bajo
d/dt	Derivativo
BIR	Boiler Input Rate

La combinación de estos controles define distintos modos de control:

- El **Modo de Control Coordinado** requiere un control coordinado entre la turbina y la caldera de la señal de potencia requerida. La demanda de fuego de la caldera es igual a esta demanda, pero corregida por la desviación de la presión de vapor principal.

Figura 3.18. Maestro de Caldera



- En el **Modo de Control Caldera Sigue**, la demanda de fuego de la caldera es proporcional a la demanda de energía de la turbina. Esta demanda de energía reemplaza a la potencia requerida.
- En el **Modo de Control Turbina Sigue** la turbina responde de acuerdo a la demanda de fuego de la caldera, controlando la presión de vapor principal.

3.4.5.2 Control del Flujo de Combustible

La demanda de fuego de la caldera se deriva de lo solicitado por el Maestro de Caldera, siendo el objetivo mantener la presión de vapor sobrecalentado en un valor constante.

La caldera consume inicialmente diesel (con los encendedores), luego de una secuencia de pasos, el combustible quemado es carbón. El sistema permite la combustión de la mezcla carbón y diesel mediante una relación energética diesel/carbón establecida. La demanda de combustible está limitada por el flujo de aire medido.

3.4.5.3 Control del Flujo de Aire

El flujo de aire es controlado para suministrar el aire de combustión equivalente al flujo de combustible por medio del damper de succión del ventilador de tiro forzado. El flujo de aire secundario se mide en el ducto de salida del Calentador de Aire.

Para asegurar combustión completa, la cantidad de aire suministrada debe ser mayor a la requerida teóricamente, este adicional se denomina “exceso de aire”. El exceso de aire para una determinada carga se calcula, comparándose con el valor real, y se

agrega a la demanda de aire. El exceso de aire se mide mediante dos analizadores de porcentaje de oxígeno en los gases a la salida del economizador.

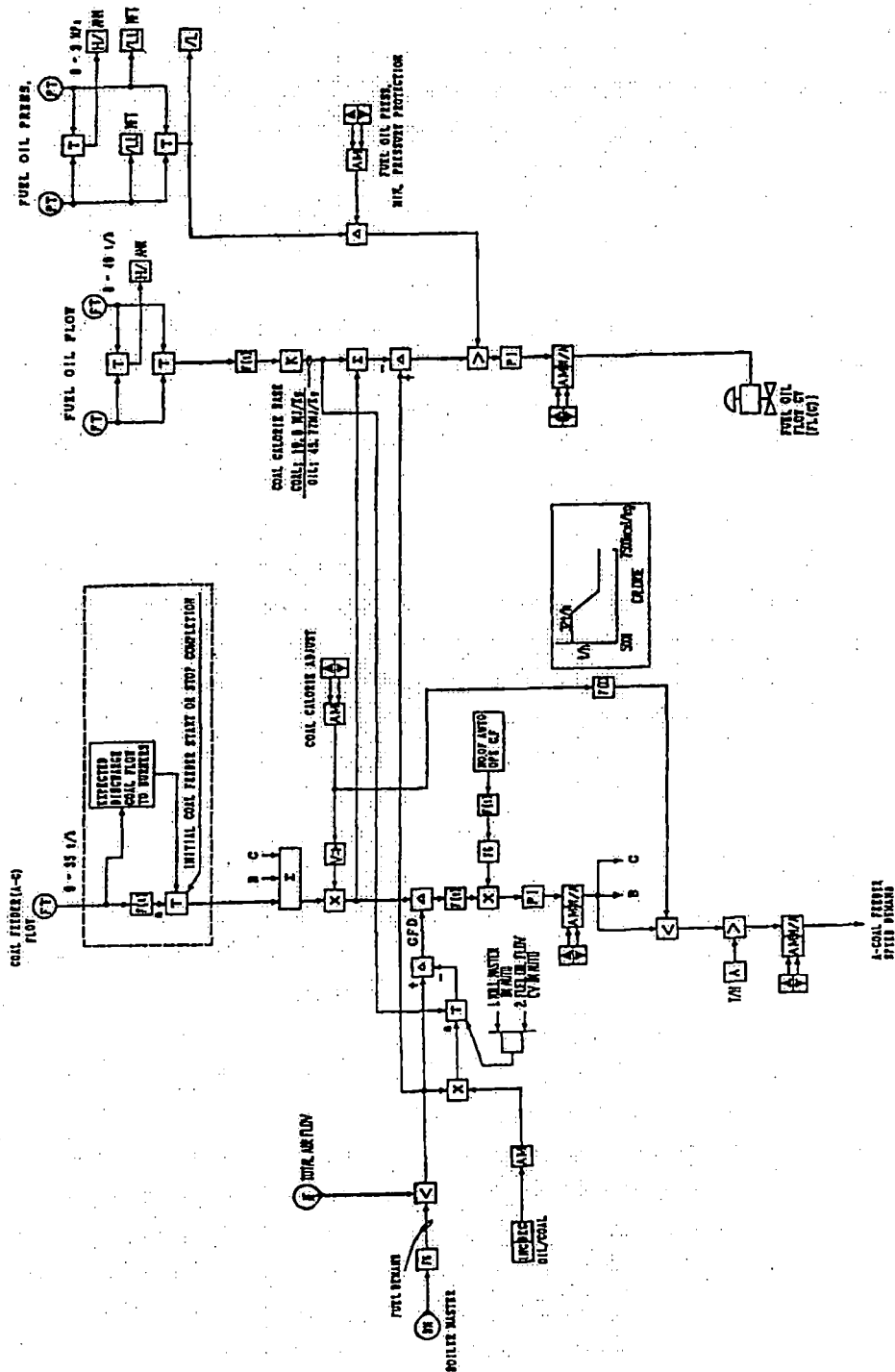


Figura 3.19. Diagrama de Control del Flujo de Combustible

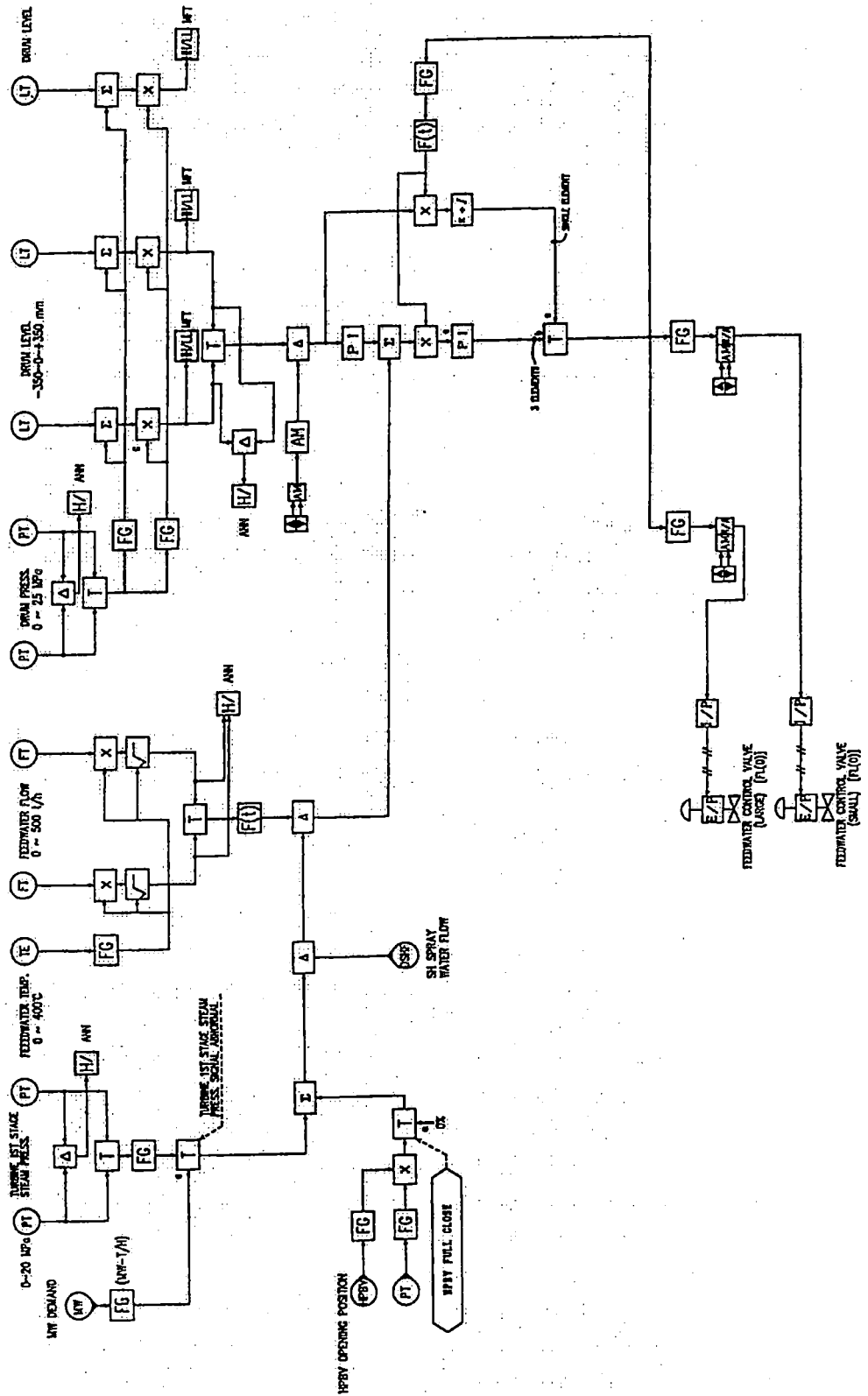


Figura 3.24. Control de Nivel del Domo

El sistema realiza control sobre la base del nivel de agua en el domo debido a una operación de emergencia (disparo de turbina, disparo de pulverizador) o bajo flujo de vapor. Los elementos de control son dos válvulas de control. La diferencia entre el flujo de agua de alimentación y el vapor de ingreso a la turbina se utiliza como una señal de adelanto “feedforward” a la señal de nivel del domo. Este control de tres elementos no se aplica durante baja carga por la inconsistencia entre el agua de alimentación y el vapor; se utiliza para flujos de vapor mayores a 25% de máxima generación.

El nivel del domo es una variable muy importante en la operación de Calderas a vapor debido a las condiciones de seguridad operativa. Un muy bajo nivel del domo puede dejar sin agua de enfriamiento a las paredes del hogar con el consiguiente riesgo de fundir los tubos de pared; un muy alto nivel del domo puede inducir el arrastre de partículas de agua a los serpentines del sobrecalentador y poder llegar a la turbina con riesgo de dañar los alabes de la misma.

3.4.5.8 Control de la Temperatura de Vapor Sobrecalentado

La temperatura de vapor a la salida del sobrecalentador secundario es controlada por un atemperador instalado a la salida del sobrecalentador primario. Debido a la atemperación, existe el riesgo de que la temperatura alcance valores de saturación a la presión de vapor, por ende se disminuirá la atemperación si la temperatura de vapor al ingreso del sobrecalentador secundario alcanza la temperatura de saturación más 15°C.

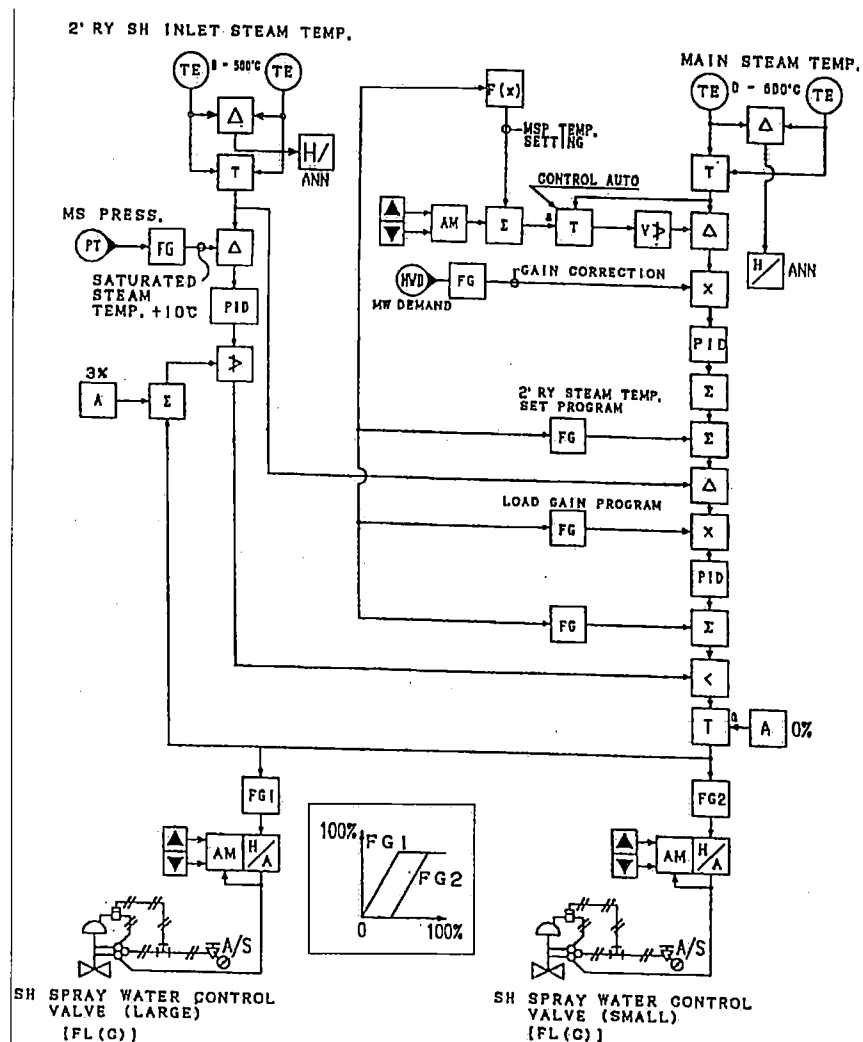


Figura 3.25. Control de Temperatura de Vapor Sobrecalentado

3.4.5.9 Control de la Temperatura de Vapor Recalentado

Es controlada de forma primaria por el flujo de recirculación de gases, el atemperador se utilizará solamente cuando la temperatura exceda los valores especificados. Al igual que con la atemperación de vapor sobrecalentado, presenta una seguridad cuando la temperatura se aproxime a 15°C de la temperatura de saturación. La atemperación empieza a operar cuando la temperatura de vapor recalentado sea mayor en 8°C a su valor consigna.

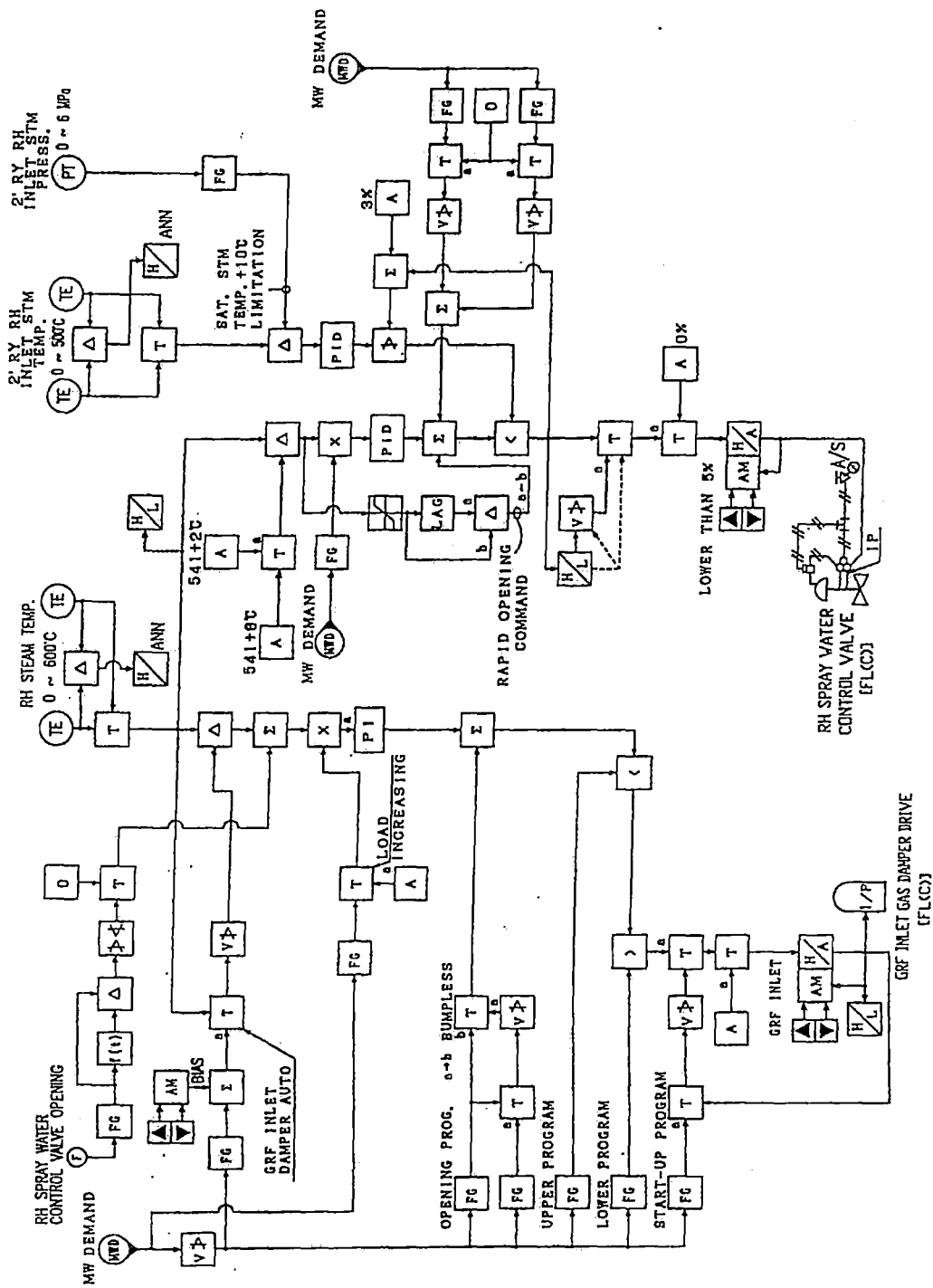


Figura 3.26. Control de Temperatura de Vapor Recalentado

La recirculación de gases se realiza tomando los gases a la salida del economizador y impulsándolos a través del ventilador de recirculación de gases a la base del hogar.

CAPITULO 4

EL CARBÓN Y SUS PROPIEDADES

La energía térmica necesaria para el funcionamiento de las máquinas térmicas se toma, generalmente, de materiales que se denominan combustibles por medio del proceso de combustión (que es la oxidación exotérmica del combustible). Actualmente la industria energética usa casi exclusivamente los combustibles fósiles, dentro de estos el carbón, que es el más abundante.

El carbón es una roca de fácil combustión que contiene más del 50 por ciento de su peso, y mas del 70 por ciento de su volumen, de material carbonoso (incluyendo la humedad inherente), formada por la compactación y endurecimiento de restos de plantas diversamente alteradas, semejantes a la presentes en la turba. El Carbón normalmente se encuentra en la corteza de la tierra.

Por lo menos 20 metros cúbicos de vegetación compactada es necesaria producir un 1 metro cúbico de carbón. La vegetación apretada, en ausencia de aire y a altas presiones y temperaturas es convertida en turba (un combustible muy de bajo grado), luego carbón castaño, luego lignito, luego carbón sub bituminoso, luego bituminoso, y finalmente antracita. Con el proceso de envejecimiento, el carbón se pone más duro, el contenido de hidrógeno y oxígeno disminuye, la humedad normalmente disminuye, y el contenido de carbono aumenta.

Aun cuando el carbón está compuesto por derivados orgánicos (plantas), no deja de constituir un tipo especial de roca que aparece intercalado como filones individuales entre otros tipos de filones rocosos sedimentarios, tales como los de piedra arenisca, las gredas, la piedra caliza, los esquistos, y varias mezclas de los anteriores. Los estudios geológicos indican que el material de las plantas, que llegó a convertirse en depósito de carbón en la forma que hoy se le conoce, se acumuló originalmente en ciénagas en el altiplano, o en pantanos en la costa o cerca de ella, así como en las llanuras de los deltas de los ríos. Las ciénagas, los pantanos, y las acumulaciones en los deltas, que originaron la formación de carbón, pueden haber variado en tamaño desde unas cuantas hectáreas hasta cientos de kilómetros cuadrados.

Fue necesario, después de periodos de acumulación de plantas, que aquellos pantanos quedaran sumergidos, bien por hundimiento de la tierra, o por elevación del nivel del mar, hasta quedar cubiertos por lodos o arenas arrastrados desde las sierras altas adyacentes. Al continuar el hundimiento, las formas calcáreas pueden haber quedado también depositadas en aguas más profundas, situadas dentro o por encima de los lodos y las arenas. En ciertos periodos geológicos y climáticos adecuados, tales intervalos de crecimiento de plantas, y de inmersión interrumpida pero continua de las mismas, se repitió muchas veces antes de que llegase el fin de cada uno de los dichos periodos.

Durante las eras geológicas posteriores, y dependiendo de la variación de los aumentos en las combinaciones de la profundidad, el calor, y la presión a lo largo de diferentes periodos, las acumulaciones de plantas enterradas se compactaron, y pasaron sucesivamente por una o más etapas de carbonización, bien fuese de la turba

al lignito, al carbón sub bituminoso, al carbón bituminoso o a la antracita. Los lodos, arenas o restos calcáreos intercalados se convertían, entre tanto, en esquistos, piedra caliza, y piedra arenisca, productos que forman las series estratigráficas en las que pueden estar contenidos los estratos de carbón explotable.

La naturaleza de cualquier muestra de carbón depende tanto de la materia originalmente depositada en ese lugar como de la historia a la cual se ha sometido mientras ha estado depositado, es por esto que las características del carbón varían de lugar en lugar. El carbón está constituido principalmente de carbono, hidrógeno y oxígeno (con un pequeño porcentaje de nitrógeno y azufre).

4.1 Clasificación del Carbón

Se denomina fermentación bituminosa la que se produce en la sustancia vegetal en ausencia del aire y con humedad abundante, situación en la que se retienen los volátiles y da por resultados la formación de bitúmenes (betunes) tales como la turba y el carbón. La transformación metamórfica del carbón bituminoso en antracita se conoce con el nombre de antracitización. La carbonización es la alteración o metamorfismo del material de la planta en carbón. La teoría denominada turba-antracita, relativa a la formación de carbón, se explica como un proceso en el que los rangos progresivos del carbón aparecen como indicación del grado de carbonización, y, por deducción, de la edad geológica del depósito. La turba, como etapa inicial de la carbonización, es de una era geológica reciente. El lignito, como etapa intermedia,

es habitualmente Terciario o Mesozoico, y el carbón bituminoso y la antracita, como etapas más adelantadas de la carbonificación, son habitualmente Carboníferos.

Los carbones más importantes pueden definirse:

- **Carbón antracita.** Carbón del más elevado rango metamórfico, en el que el contenido de carbono fijo oscila entre 92 y 98 por ciento. Es duro y negro; tiene un lustre semi metálico. La antracita se inflama con dificultad, y arde con una llama corta y azul y sin humo. El carbón antracita se conoce también como carbón duro, carbón de piedra, carbón Kilkenny, o carbón negro.
- **Carbón semiantracita.** Es un carbón que tiene un contenido de carbono fijo de entre 86 y 92 por ciento. Su rango metamórfico lo sitúa entre el carbón bituminoso y el carbón de antracita, aun cuando sus propiedades físicas se asemejan más a las de la antracita.
- **Carbón Semibituminoso.** Es un carbón que ocupa un rango entre el bituminoso y el semiantracita. Es mas duro y mas frágil que el carbón bituminoso; tiene una proporción mas elevada de combustible, y arde sin humo. El carbón semibituminoso se conoce también como carbón metabituminoso, se define con un contenido del 89 y 91.2 por ciento de carbono, analizado en seco y libre de cenizas. También se le aplica el nombre de carbón sin humo.
- **Carbón bituminoso.** Este carbón ocupa un rango entre el subbituminoso y el semibituminoso, y contiene del 15 al 20 por ciento de material volátil. Su color va del pardo oscuro al negro, y quema con llama humeante. El carbón

bituminoso constituye el tipo más abundante del carbón, y procede habitualmente de la era carbonífera. El sinónimo que más comúnmente se le aplica es el de carbón graso.

- **Carbón subituminoso.** Carbón negro, intermedio en su rango entre el lignito y el carbón bituminoso, y que recibe en algunas clasificaciones el título de lignito negro. Se distingue del lignito por un contenido más elevado de carbono y una proporción menor de humedad.
- **Carbón lignito.** Carbón parduzco-negro intermedio en carbonificación entre la turba y el carbón subituminoso. Como sinónimos se emplean las expresiones lignito pardo y carbón pardo. Con base en su valor térmico se lleva a cabo una clasificación más detallada del lignito: Lignito A (lignito negro) y Lignito B (lignito pardo o carbón pardo).
- **La turba.** Es un depósito no consolidado de restos de plantas semicarbonizados en un ambiente saturado de agua, tal como una marisma o pantano, y con un contenido persistentemente elevado de humedad (por lo menos un 75 por ciento). Se le considera como una etapa o tipo inicial en el desarrollo del carbón. El contenido de carbono es de aproximadamente 60%; el de oxígeno del 30% aproximadamente. Las estructuras de la sustancia vegetal pueden ser observadas. Cuando esta seca la turba arde libremente.
- **El carbón de turba.** Abarca dos materiales: un carbón de transición entre la turba y el carbón pardo o lignito, y una turba artificialmente carbonizada utilizada como combustible.

- **El carbón mate**, de bujía, o de ampelita, es un carbón compacto que contiene esporas, y que se caracteriza por un lustre mate a cerúleo y solidez. Se le denomina carbón mate, carbón de bujía, carbón de ampelita, de cotorra, o rizado. Se deriva de residuos orgánicos (material de plantas finamente divididas, esporas, algas, etc.), en masas de aguas estancadas o sin actividad.

4.1.1 Clasificación del Carbón por Rango

Los carbones se clasifican con el objeto de identificar su empleo final, y también para obtener datos útiles al especificar y seleccionar el equipo de manejo y para combustión, así como al diseñar y disponer las superficies de transferencia térmica. Una de las clasificaciones del carbón es por rango, es decir de acuerdo con el grado de su metamorfismo, o alteración progresiva, en la serie natural que va del lignito a la antracita. La materia volátil, el carbono fijo, la humedad inherente o de estrato (equilibrada a 30 y 97% de humedad ambiente), y el oxígeno, son todas indicaciones del rango, pero ninguno de ellos define completamente este.

Al establecer los rangos del carbón es necesario utilizar información que muestre una variación apreciable y sistemática por la edad. En el caso de los carbones más viejos, un buen criterio es el de carbono fijo o materia volátil en base seca en ausencia de sustancias minerales. Sin embargo, este valor no es adecuado para designar el rango de los carbones más jóvenes. Un medio confiable de clasificación de estos últimos es el de poder calorífico en base húmeda sin sustancia mineral, lo que varía poco en el caso de los carbones viejos, pero lo hace en forma apreciable y sistemática en los carbones más jóvenes.

En el caso de la antracita y de los carbones bituminosos y volátiles bajos y medios, los valores térmicos cambian muy poco con el producto húmedo y libre de sustancias minerales; por tal razón se aplica el criterio correspondiente al carbono fijo. Por el contrario, en el caso de los bituminosos con volatilidad elevada, los carbones subbituminosos y ligníticos, se utiliza el valor térmico correspondiente a producto húmedo y libre de sustancias minerales, ya que el contenido de carbón es casi siempre el mismo en todas las clasificaciones.

Tabla 4.1. Clasificación de Carbones (ASTM D388)

	Carbón Fijo	Materia Volátil	Poder Calorífico	Carácter
	% (a)	% (a)	kJ / kg (b)	Aglomerante
1 Antracita				
a Metantracita	>= 98	<= 2	-	No
b Antracita	92 - 98	2 - 8	-	No
c Semiantracita	86 - 92	8 - 14	-	No
2 Bituminoso				
a bajos volátiles	78 - 86	14 - 22	-	Comunmente
b medios volátiles	69 - 78	22 - 31	-	Comunmente
c altos volátiles A	< 69	> 31	>= 32565	Comunmente
d altos volátiles B	-	-	30237 - 32565	Comunmente
e altos volátiles C	-	-	24422 - 30237	Si
3 Sub Bituminoso				
a Subbituminoso A	-	-	24422 - 26749	No
b Subbituminoso B	-	-	22098 - 24422	
c Subbituminoso C	-	-	19305 - 22098	
4 Lignito				
a Lignito A	-	-	14654 - 19305	
b Lignito B	-	-	< 14654	

(a) Base seca sin ceniza

(b) Base húmeda sin ceniza

Hay otras clasificaciones del carbón por rango (o tipo), que se emplean en forma limitada en el Continente Europeo. Se trata de la International Classification of Hard Coals by Type y la Internacional Classification of Brown Coals. Estos sistemas fueron creados por un Grupo de Trabajo para la clasificación, establecido en 1949 por el Coal Committee of the Economic Comisión for Europe (Comité del Carbón de la Comisión Económica Europea).

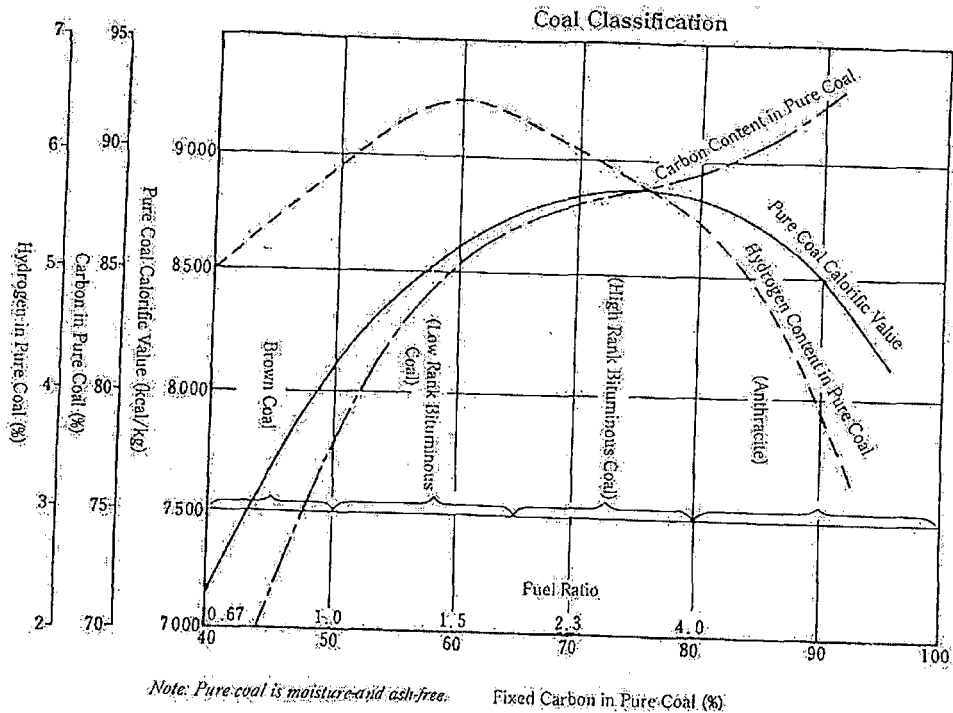


Figura 4.1. Clasificación del Carbón (Fuente: Thermal and Nuclear Power Engineering Society)

4.2 Análisis del Carbón

El carbón puede ser geológicamente definido como una roca combustible, carbonosa, compuesta principalmente de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, azufre, y sustancia mineral. El carbón ha eludido una formulación química oficial, por razón de la compleja variedad de sus estructuras químicas, y por las variaciones en la cantidad de especies identificables observables entre un depósito de carbón y el siguiente. Además de la heterogeneidad química, los carbones contienen cantidades variables de sustancia mineral extraña. Por razón de que estas variaciones alteran tanto las propiedades químicas como las propiedades físicas, los análisis de caracterización del carbón actualmente en uso, son muy importantes, tanto para los productores como para los consumidores de carbón. Básicamente, la caracterización

de carbón mineral se puede realizar por dos tipos diferentes de análisis químicos; el análisis inmediato y el análisis elemental.

Tabla 4.2. Principales Análisis del Carbón

Inmediato "Proximo"	Elemental "Ultimo"
% Humedad	% Humedad
% Ceniza	% Ceniza
% Materia Volátil	% Carbono
% Carbón Fijo	% Oxígeno
100%	% Nitrógeno
Poder Calorífico	% Hidrógeno
Contenido de Azufre	% Azufre
	100%

La selección de un tipo de carbón para una aplicación particular incluye la consideración de sus propiedades físicas y químicas, así como otros factores como almacenamiento, manejo o pulverizado. Factores relacionados al diseño de una caldera incluyen volumen, área, y la cantidad superficie radiante.

Tabla 4.3. Normas ASTM de Análisis de Carbón.

Análisis Estándar	ASTM	Análisis Estándar	ASTM
Muestreo		Clasificación del Carbón	
- Colección de la Muestra	D-2234-86	- Tipo de Carbón	D-388-84
- Preparación de la Muestra	D-2013-86	Tamaño	
Análisis Inmediato		- Designación de Malla	D-431-84
- Humedad	D-3173-87	- Análisis de Malla	D-410-84
- Ceniza	D-3174-82	- Carbón Bituminoso	D-311-84
- Materia Volátil	D-3175-82	- Carbón Antracítico	D-310-69
- Poder Calorífico	D-2015-85	- Carbón Pulverizado	D-197-82
- Humedad	D-1412-85	Dureza y Fragilidad	
Análisis Último		- Hardgrove Grindability - Molienda	D-409-85
- Carbono e Hidrógeno	D-3178-84	- Drop-Shatter	D-440-86
- Nitrógeno	D-3179-84	- Tumbler	D-441-86
Formas de Azufre		Especial	
- Total	D-3177-84	- Free Swelling Index	D-720-83
- Sulfato, Pirita, Orgánica	D-2492-84	- Washability	D-4371-84

4.2.1 Poder Calorífico

El poder calorífico de un combustible se expresa por la cantidad de calor producido en la combustión por unidad de masa de este producto. Normalmente, se expresa en

kcal/kg o MJ/kg. El valor térmico o poder calorífico es una de las determinaciones más importantes entre las necesarias en la relación comprador vendedor.

Su determinación se puede efectuar a través de una bomba calorimétrica de tipo adiabático o isotérmico. La evaluación consiste en una muestra de carbón mineral pulverizado y comprimido en forma de pastilla, después se efectúa su ignición en una atmósfera con oxígeno presurizado a través de la chispa de un filamento conductor. En el caso de las bombas calorimétricas, los productos resultantes de la combustión del carbón disminuyen con la temperatura ambiente y el vapor de agua formado se condensa suministrando calor latente de condensación para el agua de la bomba. Por lo tanto el valor del calor se mide por el incremento en la temperatura del agua (se aplican correcciones para tener en cuenta el calor producido por el alambre de ignición, y los calores de formación de ácido nítrico y ácido sulfúrico). El método mayormente utilizado es el calorímetro adiabático de bomba (ASTM D2015).

El valor del calor neto, un valor más bajo, es calculado con base en el valor bruto, suponiendo que toda el agua de los productos de combustión se mantiene bajo forma de vapor (ASTM D407).

Dentro del concepto de poder calorífico existen dos variaciones:

1. **Poder calorífico superior (PCS):** Como resultantes del proceso de combustión tenemos la producción de cenizas, gases de dióxido de carbono, dióxido de azufre, nitrógeno y considerando también la formación de vapor de agua condensado.

2. **Poder calorífico inferior (PCI):** Considera la producción de las mismas sustancias que en la definición anterior, aunque toda el agua producida se encuentra en estado vapor. Este valor puede ser estimado, considerando la misma base húmeda, empleando cualquiera de las siguientes ecuaciones:

Recomendación ISO R1928

$$PCI = PCS - 0.212 \cdot (H) - 0.0008 \cdot (O) - 0.0245 \cdot (H_2O) \quad \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$

Recomendación BSI 526

$$PCI = PCS - 0.212 \cdot (H) - 0.0007 \cdot (O) - 0.0244 \cdot (H_2O) \quad \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$

Recomendación ASTM D407

$$PCI = PCS - 0.212 \cdot [9 \cdot (H) + (H_2O)] \quad \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$

En aplicaciones industriales, el agua no se condensa, siendo, en este caso, el poder calorífico inferior al determinado en la bomba calorimétrica. En este caso, el PCI es el que mejor representa las condiciones de combustión del carbón en calderas industriales, siendo, por lo tanto, el que debe tener prioridad respecto a la decisión sobre el tipo de energético a ser utilizado.

Otra manera de determinar el poder calorífico se deriva del análisis último o elemental, por ejemplo con la utilización de la fórmula empírica de Dulong para el Poder Calorífico Superior:

$$PCS = \underbrace{2.326 \cdot 10^{-3}}_{k_{Dulong}} \cdot \left[146.4 \cdot (C) + 620 \cdot \left[(H) - \frac{(O)}{8} \right] + 40 \cdot (S) \right] \quad \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$

donde (C), (H), (O) y (S) representa el porcentaje de carbono, hidrógeno, oxígeno y azufre en el carbón. Para el caso del Poder Calorífico Inferior:

$$PCI = 2.326 \cdot 10^{-3} \cdot [146.4 \cdot (C) + 517 \cdot (H) - 76 \cdot (O) + 40 \cdot (S) - 11 \cdot (H_2O)] \quad \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$

Existen otras relaciones que facilitan la estimación del Poder Calorífico en función del análisis inmediato, tales como la fórmula de Goutal:

$$PCS = \underbrace{4.187 \cdot 10^{-3}}_{k_{Goutal}} \cdot [82 \cdot (\% \text{Carbono Fijo}) + 2.388 \cdot \alpha \cdot (\% \text{Materia Volátil})] \quad \left[\frac{MJ}{kg} \right]$$

donde “ α ” es el poder calorífico superior de los volátiles en MJ/Kg. Este valor es inversamente proporcional al porcentaje de volátiles en el combustible puro (Contenido de Volátiles más Carbono Fijo). El poder calorífico de los volátiles disminuye al aumentar al aumentar su proporción debido a que una parte de los volátiles está constituida por combinaciones de oxígeno y nitrógeno, no combustibles.

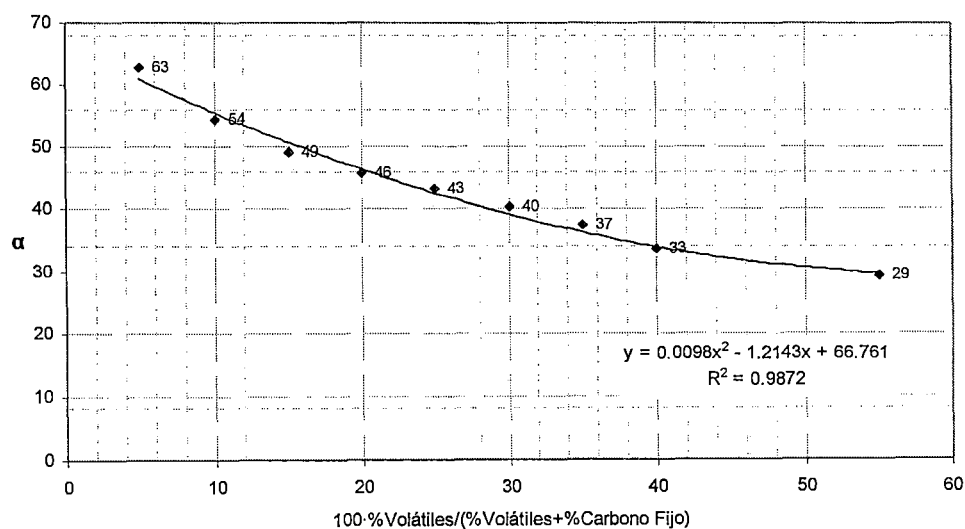


Figura 4.2. Poder Calorífico Superior de los Volátiles (MJ/kg)

De esta relación se derivan otras que emplean la relación entre el contenido de volátiles y el contenido de carbono e hidrógeno:

$$\% \text{ Volátiles} = k_{VM} [1061 \cdot (H) - 124 \cdot (C) + 84.15]$$

4.2.2 Análisis Inmediato

También llamado “Análisis Próximo o Inmediato” (ASTM D3172), determina los principales componentes de un carbón mineral y sus proporciones en peso. Su importancia está relacionada con la clasificación de los carbones, caracterización del combustible para aplicación industrial, como también a efectos comparativos entre alternativas energéticas.

Humedad Total		Materia Mineral		Carbón Puro	
Humedad Superficial	Humedad Inherente	Ceniza	Materia Volátil Mineral	Materia Volátil Orgánica	Carbón Fijo
			Materia Volátil		

Figura 4.3. Composición del Carbón según el Análisis Inmediato

Incluye la determinación de la humedad total, de la materia volátil y de la ceniza, y el cálculo del carbono fijo en carbones y coques. La expresión histórica “inmediato” (en inglés proximate) no debe confundirse con la palabra “aproximado”, ya que todas las pruebas del análisis inmediato se llevan a cabo sujetas a estrictas especificaciones y tolerancias. Los resultados de los análisis inmediatos pueden ser utilizados para determinar el rango del carbón, para indicar la razón entre sus constituyentes combustibles y no combustibles, para suministrar la base para su compra y venta, y para evaluarlo con vista a su beneficio, o con otros propósitos.

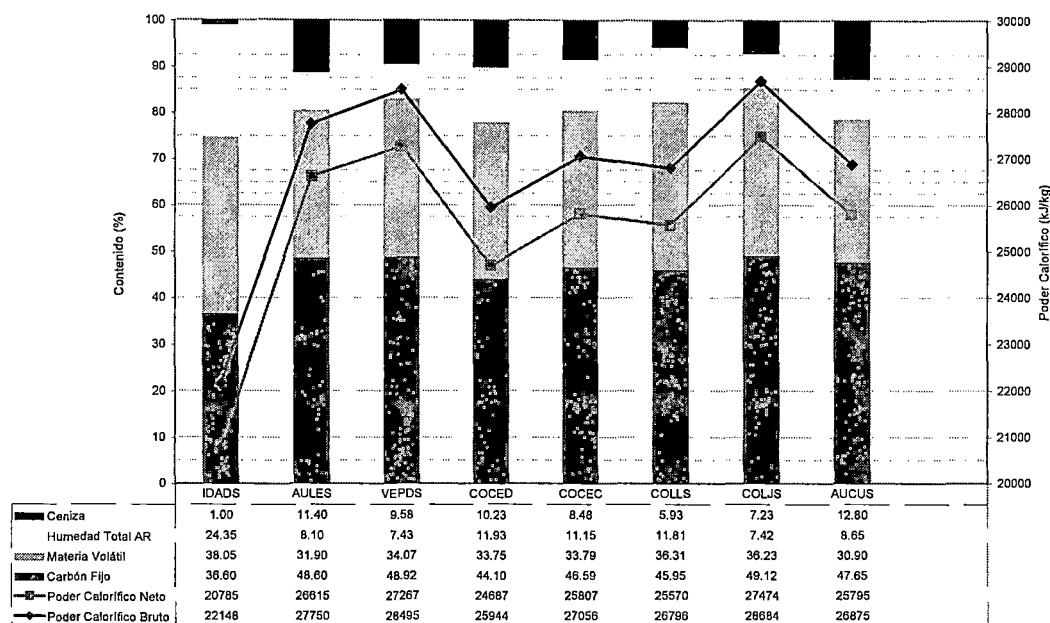


Figura 4.4. Análisis Inmediato de los Carbones Utilizados en la C.T.ILO21

Aunque no es parte del esquema del ensayo, en un reporte de Análisis Inmediato usualmente se reporta también el poder calorífico y el contenido de azufre.

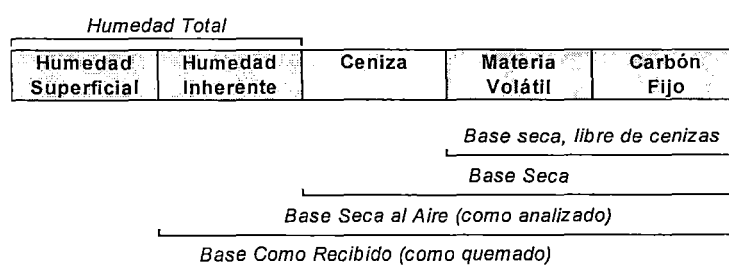


Figura 4.5. Bases de Análisis

En términos simples el carbón se constituye de: humedad, materia mineral y “carbón puro”. Debido a los mecanismos de análisis, estas propiedades se pueden fijar a una determinada base, considerando la ausencia de alguno de los constituyentes. Los tipos de bases más utilizados son:

- como recibido, es decir con toda su humedad.
- seco, cuando se ha retirado toda su humedad.
- como quemado, es la situación en que se toma la muestra de los depósitos hacia la caldera, normalmente con menos humedad que “como recibido”

Tabla 4.4. Transformación de Bases de Análisis

BASE ORIGINAL	BASE REQUERIDA			
	<i>Como recibido (como muestreado) (como quemado)</i>	<i>Seca al Aire (como analizado)</i>	<i>Seca</i>	<i>Seca, libre de cenizas</i>
<i>Como recibido (como muestreado) (como quemado)</i>	-	$\frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - (M_{ar} - A_{ar})}$
<i>Seca al Aire (como analizado)</i>	$\frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}}$	-	$\frac{100}{100 - M_{ad}}$	$\frac{100}{100 - (M_{ad} - A_{ad})}$
<i>Seca</i>	$\frac{100 - M_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad}}{100}$	-	$\frac{100}{100 - A_d}$
<i>Seca, libre de cenizas</i>	$\frac{100 - (M_{ar} - A_{ar})}{100}$	$\frac{100 - (M_{ad} - A_{ad})}{100}$	$\frac{100 - A_d}{100}$	-

donde: M: humedad total; y, A: ceniza
ar: como recibido; ad: seca al aire; y, d: base seca

4.2.2.1 Humedad Total

La ASTM ha definido la humedad total como una pérdida en peso, en atmósfera abierta, en situaciones rígidamente controladas de temperatura, tiempo, y aire en circulación. Por lo menos en principio, la humedad total representa una medición de toda el agua que no esta combinada químicamente. En forma tradicional, el tratamiento térmico ha suministrado el método mas comúnmente utilizado para tratar de separar del carbón el agua no químicamente combinada. La separación absoluta de humedad absorbida, sin perdida de una porción del agua químicamente

combinada, resulta difícil, especialmente en el caso de los carbones de los rangos mas bajos.

La humedad total se determina mediante un procedimiento en dos etapas (ASTM D3302). Este procedimiento implica el secado por aire, para la eliminación de la humedad superficial en la muestra grande, la división y reducción de dicha muestra grande, y la determinación de al humedad residual en al muestra separada (ASTM D3173). Para obtener el valor de la humedad total se aplica un cálculo algebraico.

Las definiciones de algunas formas de humedad aparecen descritas por Brown en la ASTM D3302. Estas formas pueden ser humedad libre o adherente (esencialmente agua superficial), humedad físicamente unida o inherente (humedad conservada por presión del vapor y otros procesos físicos), y agua unida químicamente (agua de la hidratación, o agua “combinada”).

La humedad al recibir es la humedad total en un determinado momento. Esta expresión se utiliza habitualmente en el comercio para indicar la humedad presente cuando es entregado el carbón en un punto de transferencia.

La humedad de equilibrio es la capacidad de conservación de la humedad en el carbón a 30°C, en una atmósfera con humedad ambiental relativa de 97% (ASTM D1412). La humedad de equilibrio de una muestra de carbón se considera es igual a la humedad del estrato correspondiente a la clasificación del carbón por rango (ASTM D388). Igualmente pueden utilizarse los resultados de la humedad de equilibrio para estimar la humedad superficial o accidental del carbón húmedo, especialmente cuando parece observarse una humedad excesiva.

La humedad superficial es la disminución de peso de la muestra colocada en el interior de un horno a una temperatura no mayor a 45°C. La humedad inherente se define como el porcentaje másico de pérdida de 1 gramo de muestra seca al aire de carbón después de secarlo a 105°C por 100 a 150 minutos. La humedad total se obtiene también sumando la humedad superficial y la humedad inherente. La humedad incorporada en algunos componentes orgánicos o minerales no se pueden determinar sino hasta llegar a temperaturas mayores a 500°C, por lo que no es incluida como parte de la humedad total.

4.2.2.2 Cenizas

Es simplemente el residuo inorgánico no combustible resultado de la combustión completa del carbón. Se determina como el porcentaje másico remanente de 1 gramo de carbón el cual ha combustionado completamente en un horno a 750°C.

Durante la formación geológica de los yacimientos de carbón, diversas impurezas minerales se acrecientan a la matriz carbonosa inicial. Las procedencias de estos materiales se deben a las litologías adyacentes, a la combinación entre materiales orgánicos e 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 carbón mineral trae consigo la reducción de su poder calorífico. En este caso, las relaciones entre el contenido de cenizas, poder calorífico y costo del producto poseen relación directa.

En aplicaciones industriales, las cenizas acarrearán una reducción en los niveles de intercambio térmico de los sistemas de agua/vapor, reduciendo así la cantidad de calor que podría obtenerse por el combustible.

Las características de las cenizas, también pueden hacer con que ellas mismas se fundan, derivando en la formación de escoria que acaba perjudicando los hornos refractarios y aumentan los costos de manutención del sistema de generación.

Para aproximar más la combustión industrial se introdujo el concepto de Materia Mineral, agrupando el material que no va a arder y para lo que se harán las correcciones apropiadas sobre el resultado del análisis elemental (fórmula de Parr original):

$$\% \text{ Materia Mineral} = 1.08 \cdot \% \text{ Cenizas} + 0.55 \cdot \% \text{ Azufre}$$

La ceniza es una sustancia mineral, no combustible, que queda cuando el carbón ha sido quemado en condiciones rígidamente controladas de temperatura, tiempo y atmósfera (ASTM D3174). La ceniza resultante, obtenida por este método, difiere en su constitución de los constituyentes orgánicos presentes en el carbón original. La combustión da lugar a la expulsión del agua de las arcillas y del sulfato de calcio, y del dióxido de carbono de los carbonatos, así como origina la conversión de las piritas de hierro en óxido de carbono de los carbonatos, así como origina la conversión de las piritas de hierro en óxido férrico. Cada una de estas reacciones trae consigo una pérdida de peso en el material original. En la ASTM D388 se incluyen fórmulas para corregir los valores de ceniza, partiendo de la base de la sustancia mineral original.

Hay otros procedimientos para la utilización de los valores de ceniza, entre ellos los siguientes: para calcular otros valores de caracterización del carbón sobre una base de ausencia de ceniza, para evaluar la eficiencia de los procesos para limpieza y beneficio del carbón, y para estimar la cantidad de residuos una vez que el carbón ha sido quemado comercialmente.

4.2.2.3 Materia Volátil

Cuando el carbón se calienta, materia gaseosa y líquida se libera, principalmente monóxido de carbono y pequeñas cantidades de metano. La cantidad de materia volátil liberada depende principalmente de la temperatura de calentamiento, la atmósfera en la que se encuentra y el tamaño promedio de la partícula de carbón.

La materia volátil se define como los productos gaseosos, con exclusión de los vapores de humedad, obtenidos bajo las condiciones de pruebas estandarizadas (ASTM D3175). Los gases combustibles son el monóxido de carbono, el hidrógeno, el metano, y otros hidrocarburos orgánicos. Los que habitualmente se clasifican como no combustible son el dióxido de carbono, el amoníaco, el sulfuro de hidrógeno y algunos cloruros. La materia volátil constituye una característica determinada empíricamente y no un componente natural del carbón. Usando los procedimientos estándar ASTM es con frecuencia difícil lograr resultados repetibles o reproducibles cuando se trata de muchos carbones de rango bajo. Para superar estos problemas, los carbones de rango bajo han sido mezclados con ciertos carbones bituminosos de baja volatilidad. Los resultados de las pruebas acerca de la materia volátil se utilizan para determinar el rango de los carbones, indicar su rendimiento en

coque durante los procesos de carbonización, o para encontrar sus características de combustión.

No existe una medición que exprese el contenido exacto de materia volátil, pero se realiza un ensayo en condiciones estándares, donde determina como la pérdida másica de 1 gramo de carbón calentado por 7 minutos a 950°C en ausencia de aire (restando luego la humedad total determinada anteriormente).

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. La materia volátil del carbón tiene importancia fundamental en la ignición del mismo, debido a que el carbón calentado emite gases y vapores que se encienden a bajas temperaturas y se queman primero. Un alto contenido de materia volátil es un indicativo de un carbón que se encenderá fácilmente y se quemará con una flama larga.

La relación entre el contenido de materia volátil del carbón y la ignición del carbón se obtiene con la prueba de CERCHAR en la cual se registra la temperatura en la cual el carbón pierde la ignición (llamada temperatura de extinción)

La temperatura de extinción es una medida de la “reactividad” del carbón y se aplica para determinar la fineza del carbón pulverizado necesaria para mantener un encendido estable y una buena eficiencia de combustión.

En principio, es de esperar un aumento en el poder calorífico por el mayor tenor de volátiles hasta un contenido del 20%. Por encima de estos valores, 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.

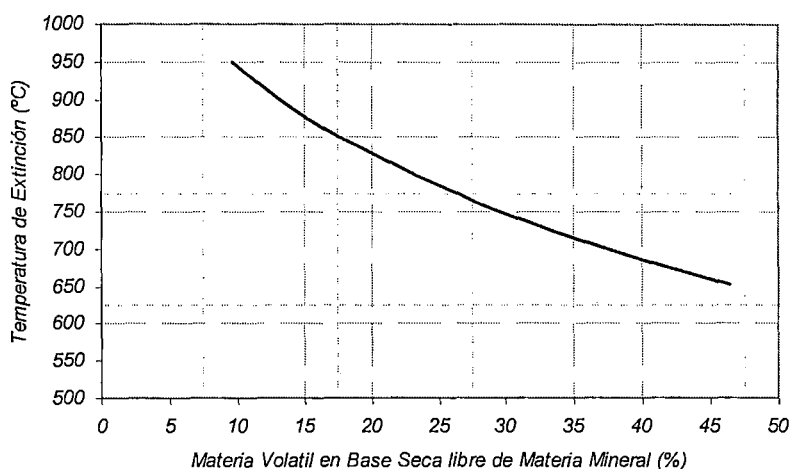


Figura 4.6. Relación entre la Temperatura de Extinción y el Contenido de Materia Volátil

Tabla 4.5. Fineza de Pulverizado Requerida

Temperatura de Extinción °C	Fineza Requerida % a través de malla 200
< 750	70
750 - 825	75
825 - 900	80
> 900	85

4.2.2.4 Carbono Fijo

En resumen, el carbono fijo es la fracción residual del carbón mineral, descontados los contenidos de cenizas, humedad y materia volátil. Este se quemará en forma sólida luego de la combustión de los volátiles (ASTM D3172).

Se puede determinar de la siguiente manera:

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

4.2.3 Análisis Elemental

También conocido como “Análisis Final o Último” (ASTM D3176), se refiere a los elementos individuales combinados en la estructura molecular del carbón complejo: carbono total, hidrógeno total, azufre total, nitrógeno total, y oxígeno. La ceniza aparece en el análisis final como estimación de la sustancia mineral en el carbón, de manera que será posible calcular el contenido de oxígeno.

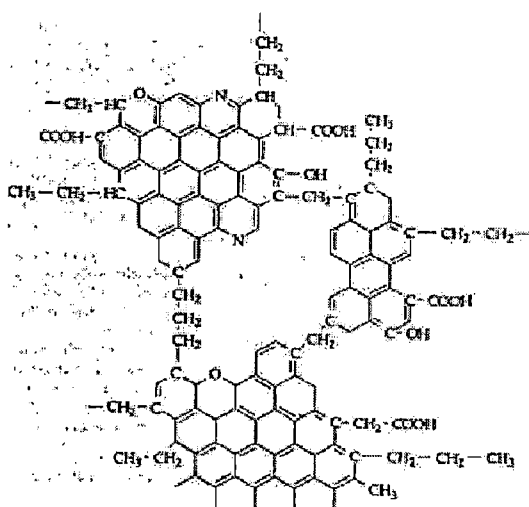


Figura 4.7. Estructura probable de la materia carbonosa

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.

El carbono, principal responsable por el proceso de combustión, está presente en el carbón mineral tanto en la materia carbonosa, como en los minerales carbonatados de las cenizas. La cantidad total de carbono es resultante de la suma entre los contenidos de carbono fijo y de carbono presente en las materias volátiles.

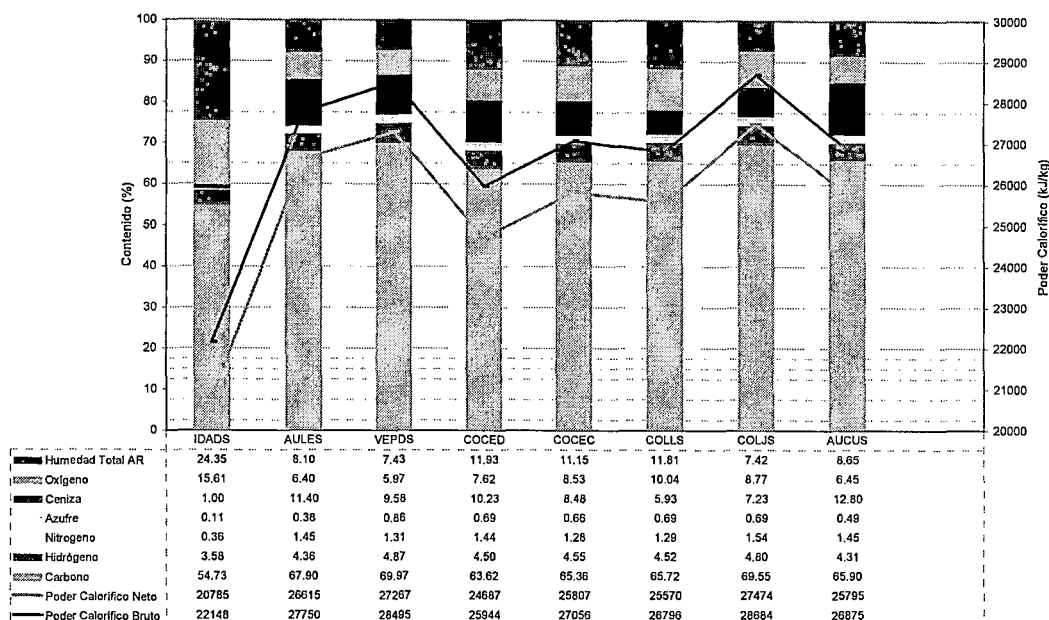


Figura 4.8. Análisis Elemental de los Carbones Utilizados en la C.T. ILO21

4.2.3.1 Carbono (C)

El carbono total viene determinado por la combustión catalítica de muestra en el oxígeno, para formar dióxido de carbono, el cual puede ser medido con facilidad (ASTM D3178). El carbono total incluye tanto el carbono orgánico como el carbonato. El carbono orgánico total puede calcularse restando del carbono total el carbono carbonato, como lo determina la ASTM D1756. Para una muestra dada, el contenido de carbono total es siempre superior al del carbono.

4.2.3.2 Hidrógeno (H)

El hidrógeno total se determina también mediante la combustión catalítica de una muestra en el oxígeno para formar agua. Esta agua es absorbida en un desecador y pesada directamente (ASTM D3178). El hidrógeno resultante, como viene determinado en la ASTM D3178, incluye el hidrógeno presente tanto en la humedad

de la muestra como en el agua de hidratación. El oxígeno procedente de la humedad de la muestra puede ser eliminado en forma estequiométrica (ASTM D3176). Los resultados pueden ser calculados en relación con otras bases de humedad, aplicando las fórmulas que vienen dadas en la ASTM D3176.

4.2.3.3 Nitrógeno (N)

El nitrógeno está asociado a los constituyentes orgánicos del carbón. Debido a la combustión, el nitrógeno se convierte en óxido y por ende en contaminante. Para combustión se prefiere carbón con bajo contenido de nitrógeno; en la carbonización de carbón a coque, parte del nitrógeno reacciona para formar compuestos de amonio, utilizables como fertilizantes o ácidos.

El nitrógeno total se determina aplicando métodos de absorción química (Kjeldahl-Gunning) (ASTM D3179). El nitrógeno total se convierte en amoníaco por catálisis. El amoníaco es destilado, absorbido por un ácido, y medido mediante una elevación con base ácida.

4.2.3.4 Azufre (S)

El azufre total es otra de las partes del análisis final. El azufre está presente en general en tres formas, y la suma de ellas representa el azufre total. El azufre total puede determinarse por tres métodos químicos (ASTM D3177): el método Eschka, el método de lavado con bomba, y el método de combustión a alta temperatura. En el método Eschka, la mezcla se hace arder en una mezcla de óxido de magnesio y carbonato de sodio. El azufre, ahora en forma soluble, es lixiviado con agua, y precipitado de la solución resultante bajo la forma de sulfato de bario (BaSO_4). El

precipitado es filtrado, quemado, y pesado. En el método de lavado por bomba se precipita el azufre como BaSO_4 partiendo de lo lavado en el calorímetro con bomba de oxígeno. En el método de combustión a alta temperatura la muestra se quema en un horno de tubo, y se recogen los óxidos de azufre, determinando su presencia mediante una valoración con base ácida.

4.2.3.5 Oxígeno (O)

Se encuentra en la materia orgánica del carbón, humedad y muchas especies de materia mineral. La cantidad de oxígeno (ASTM D3176) se calcula restando del 100% el carbono total, el hidrógeno, el azufre total, el nitrógeno total, y la ceniza (analizada de acuerdo con la ASTM D3174).

$$\% \text{ Oxígeno} = 100\% - \% \text{ Carbono} - \% \text{ Hidrógeno} - \% \text{ Nitrógeno} - \% \text{ Azufre}$$

Con esto este término asume todos los errores del análisis último.

4.2.4 Otros Análisis Físicos y Químicos

4.2.4.1 Formas de Azufre

El azufre existente en el carbón se produce tanto en la forma orgánica como en la forma inorgánica. En la ASTM D2492 se reconocen tres formas de azufre, las cuales son: el azufre sulfatado, que puede encontrarse bajo la forma de sulfato de calcio o de hierro; el azufre pirítico, que es el azufre combinado con hierro bajo la forma de minerales (pirita y marcasita); y, azufre orgánico, unido a la estructura del carbono.

Primeramente, se procede al cálculo del contenido total de azufre de la muestra de carbón mineral. Este cálculo se puede hacer a través de procedimientos de análisis

químicos o por vía instrumental. Las formas de azufre son determinadas por procedimientos titulométricos. El tenor de azufre sulfático de la muestra se calcula por su introducción en una solución diluida de ácido clorhídrico, donde en este caso la forma orgánica y pirítica son insolubles no reaccionando con el diluyente. Posteriormente, el azufre pirítico se determina por su extracción en una solución de ácido nítrico diluido, efectuándose la determinación a través de la cantidad de hierro presente en la pirita (Fe_2S). La forma orgánica del azufre, finalmente, se determina por diferencia, efectuando la substracción de las formas sulfática y pirítica y resultando en el contenido de azufre total.

$$\% \text{Azufre Total} = \% \text{Azufre Sulfático} + \% \text{Azufre Pirítico} + \% \text{Azufre Orgánico}$$

Analizando las formas del azufre, se observa que la reducción en el tenor total de azufre del carbón mineral se puede hacer a partir de la remoción de la pirita existente. Los procedimientos para esta separación son de fácil realización pues la liberación de los granos de pirita sucede fácilmente a partir de la etapa de trituración, después por la diferencia existente entre las densidades específicas de los materiales se pueden efectuar separaciones con la utilización de procesos gravimétricos consagrados.

4.2.4.2 Carbonatos

Los carbonatos liberan CO_2 en la combustión, y contribuye al contenido total de carbono en el carbón. Estas reacciones son endotérmicas por lo que reducen el calor producido. El carbono útil para la combustión se obtiene restando el carbono de los carbonatos del total de carbono.

4.2.4.3 Cloro (Cl)

En la combustión en calderas produce corrosión y ensuciamiento y contribuye a la contaminación. Incluido en el análisis último y erróneamente cargado al contenido de oxígeno. La cantidad de cloro puede determinarse mediante combustión en bomba Eschka (ASTM D2361).

4.2.4.4 Viabilidad de Trituración

Define la facilidad con el que el carbón puede reducirse de tamaño por medio de la molienda.

La viabilidad de trituración del carbón mineral se determina por el "*Hardgrove Grindability Index*" – HGI (ASTM D409), que evalúa la facilidad en la continuación de la muestra probada con relación a otra muestra patrón de carbón mineral con un índice de trituración 100. El ensayo para su determinación se realiza en un molino piloto con dimensiones específicas, realizándose la estimación comparativa de los cambios en las franjas granulométricas por el filtrado de la muestra. Entonces los resultados se convierten en el equivalente HGI (40, 60, 80 y 110).

Algunos tipos de carbón mineral presentan mayores dificultades o facilidades para la pulverización, y cuanto mayor es el valor del HGI más fácil resulta la trituración del carbón mineral examinado.

La trituración de un determinado carbón resulta afectada directamente por su composición petrográfica, rango y el tipo y la cantidad de las impurezas presentes en su matriz. En el caso de las unidades de generación basadas en el carbón mineral, la

capacidad de esta unidad y el tipo de equipamiento que se utilizará en la pulverización se basa en el valor del HGI del carbón de proyecto.

Los fabricantes de molinos comerciales han determinado la correlación existente entre sus distintos diseños de molino, comparando su funcionamiento comercial con los índices de molienda Hardgrove. La capacidad del molino puede predecirse con base en índices determinados en laboratorio. Los resultados obtenidos pueden utilizarse para determinar en forma aproximada la velocidad de desgaste de los equipos para triturar y moler.

En el caso de los carbones de rango bajo (carbones subbituminosos y lignito), los índices de molienda Hardgrove cambian con el contenido de humedad. Al ser molido el lignito, el contenido de humedad puede reducirse del 39 al 25%, y el índice de molienda Hardgrove puede reducirse en 10 puntos. Por lo tanto se recomienda llevar a cabo una serie de pruebas con diferentes niveles de humedad.

4.2.4.5 Índice de Esponjamiento Libre

El índice de esponjamiento libre (IEL) se determina mediante el rápido calentamiento del carbón en un crisol no limitador de la expansión (ASTM D720). Los valores de IEL van desde 0 hasta 9. Los carbones no aglutinantes y no esponjosos se designan como cero en la escala. Cuanto más elevado es el número de IEL, mayores son las propiedades de esponjamiento del carbón.

Los resultados pueden utilizarse como indicación de las características de aglutinamiento del carbón, cuando este se utiliza como combustible. La ASTM D720 no recomienda este método para determinar la expansión del carbón en los hornos de

coque. En el caso de ciertos carbones, una reducción en los valores de IEL durante un periodo de almacenamiento del carbón, indica una oxidación relativa y un posible deterioro del carbón.

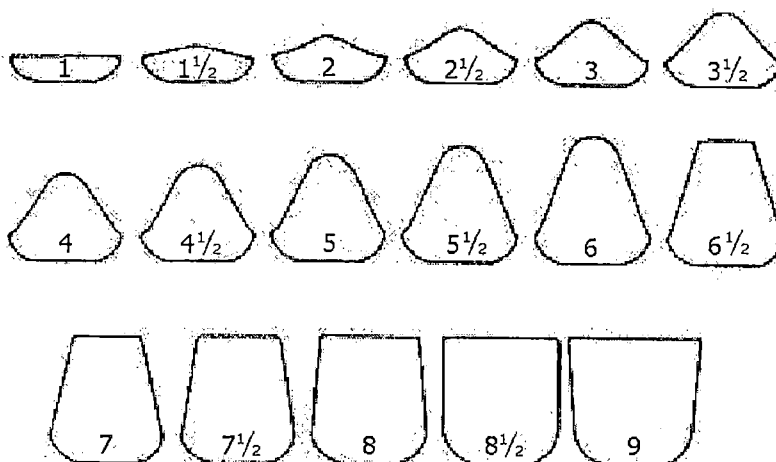


Figura 4.9. Índice de esponjamiento libre de carbones.

4.3 Propiedades de la Ceniza

Todos los carbones tienen materia mineral, principalmente óxido de sílice, óxido de aluminio y óxido férrico, con pequeñas cantidades de óxido de magnesio y óxido de calcio, y otros elementos en menor proporción. Debido a que estos componentes quedan luego de la combustión del carbón, normalmente se les llama “Ceniza” (Aunque Materia Mineral y Ceniza no son idénticas)

El efecto directo de la ceniza en la combustión es como materia diluyente que pasa a través del sistema de manejo de carbón y las etapas de combustión, para luego ser colectada sin utilización energética alguna. Desafortunadamente el impacto de la ceniza es mucho mayor, lo que requiere conocer más detalles de su composición y propiedades.

La fusibilidad de la ceniza y el análisis de la ceniza constituyen parámetros importantes al respecto. La fusibilidad de la ceniza constituye un factor importante en la elección del diseño de los hornos. El análisis del elemento ceniza puede ser usado para predecir la viscosidad de la escoria, y poder ajustar el carbón a las características operativas del equipo. El análisis de los elementos de la ceniza común también puede utilizarse para predecir las propiedades corrosivas y de obstrucción del carbón.

4.3.1 Composición Química de las Cenizas

Las cenizas existentes en el carbón provienen de los diversos componentes minerales existentes en la matriz vegetal que dio origen al carbón y/o sustancias extrañas provenientes de formaciones geológicas estratográficamente vecinas a la cuenca de formación del carbón.

Análisis de la ceniza es la expresión utilizada para designar el análisis de los elementos más importantes que habitualmente se encuentran en la ceniza de carbón y de coque (ASTM D2795). Los elementos, expresados como óxidos son SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , y SO_3 . El fósforo, trazas de este elemento, ha sido incluido históricamente por razón de su importancia en los procesos subsiguientes de producción del acero, la suma de estos óxidos es generalmente superior al 99%. Los diversos minerales encontrados están divididos de acuerdo a su participación porcentual en elementos principales y elementos secundarios.

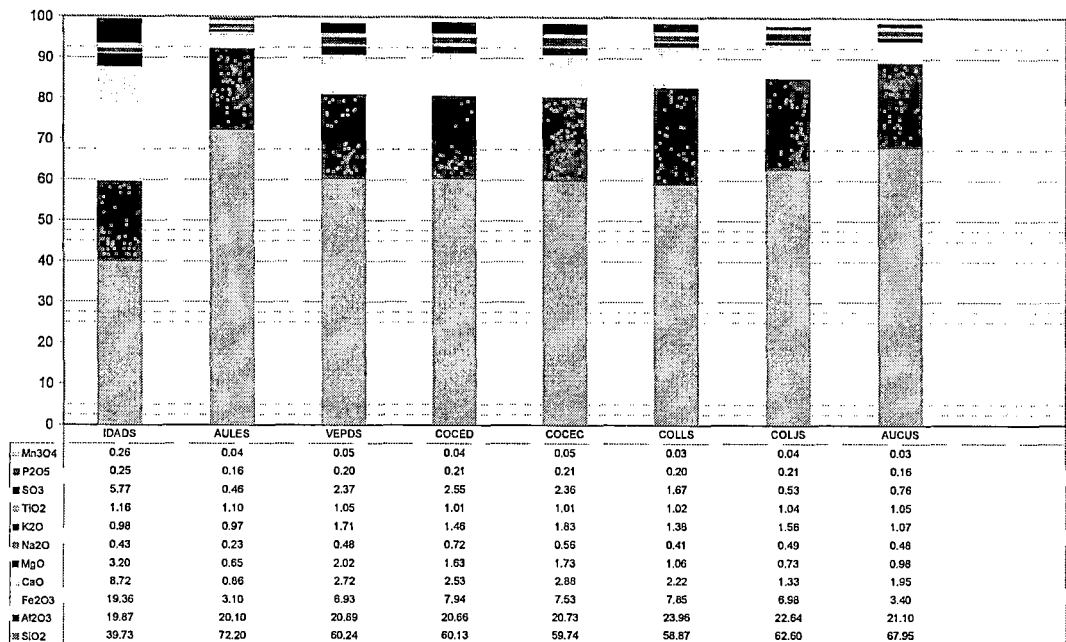


Figura 4.10. Composición Química de la Ceniza del Carbón Utilizado en la C.T. ILO21

Las formas de evaluación de las cenizas engloban la realización de procedimientos de análisis instrumentales vía espectrofotometría.

Tabla 4.6. Componentes de las cenizas en muestras de carbón mineral

Elementos Principales		
Óxido de Silicio (SiO ₂)	Óxido de Calcio (CaO)	Óxido de Potasio (K ₂ O)
Óxido Férrico (Fe ₂ O ₃)	Óxido de Magnesio (MgO)	Óxido Sulfuroso (SO ₂)
Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	Óxido Fosfórico (P ₂ O ₅)	Óxido Sulfúrico (SO ₃)
Óxido de Titanio (TiO ₂)	Óxido de Sodio (Na ₂ O)	
Elementos Secundarios		
Manganeso (Mn)	Zinc (Zn)	Estaño (Sn)
Litio (Li)	Gálio (Ga)	Antimonio (Sb)
Escandio (Sc)	Estroncio (Sr)	Bario (Ba)
Vanadio (V)	Itrium (Y)	Lantanium (La)
Cromo (Cr)	Circonio (Zr)	Wolframio (W)
Cobalto (Co)	Niobio (Nb)	Plomo (Pb)
Níquel (Ni)	Molibdeno (Mo)	Arsénico (As)
Cobre (Cu)	Cadmio (Cd)	

Los componentes de las cenizas influyen en el desempeño de un sistema de generación basado en la combustión del carbón mineral. Por eso, existe un punto

óptimo entre la composición química de las cenizas y el desempeño térmico, de manera que resulte más efectivo el intercambio de calor entre los sistemas agua/vapor.

4.3.2 Fusibilidad

Las características del contenido de cenizas a alta temperatura puede ser un factor crítico en la selección del carbón para aplicaciones de combustión. La característica de fusibilidad principalmente depende de la composición química de la ceniza. Ceniza, rica en fierro, tendrá una marcada baja temperatura de fusión en atmósfera reductora que en atmósfera oxidante.

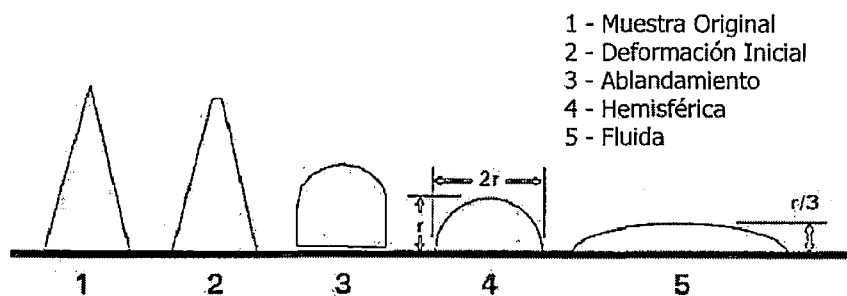


Figura 4.11. Estados de Fusión de la Muestra de Ceniza.

La fusibilidad de la ceniza puede definirse en forma amplia diciendo que es la temperatura en que la ceniza se funde. Las pequeñas pirámides triangulares (conos), formadas con cenizas de carbón, pasan por ciertas etapas definitivas de fusión, y fluyen al ser calentadas a determinada rapidez. Se requiere también una atmósfera oxidante o reductora controlada (ASTM D1857). El método de prueba es empírico, y resulta necesaria una observación estricta de las exigencias y condiciones del mismo para obtener temperaturas de fusión reproducibles. Las temperaturas de fusión en

atmósfera oxidante son generalmente más elevadas que las que se obtienen en atmósferas reductoras. La fusión o condiciones de flujo a temperaturas registradas son: deformación inicial (la punta del cono comienza a deformarse), ablandamiento (la altura del cono es igual al ancho del cono), hemisférica (la altura del cono se hace igual a la mitad de su ancho), y fluida (el cono ya fundido se extiende, formando una capa plana).

4.3.3 Características de Ensuciamiento

El principal propósito del análisis de la ceniza es proveer una aproximación a las características de ensuciamiento del carbón, principalmente en sistemas a carbón pulverizado. Cuando el carbón es pulverizado, su materia mineral es parcialmente separada del carbón puro y este proceso prácticamente se completa en el proceso de combustión. La mayoría de los minerales usualmente permanecen como sólidos y pasan a través del hogar, incluso para caer en tolvas de colección o ser atrapados en precipitadores electrostáticos o filtros al final de la caldera. Sin embargo, algunos minerales se funden y tienen la capacidad de adherirse a cualquier superficie con la que entran en contacto, o vaporizarse y luego condensar en las superficies de la caldera. Reacciones químicas complejas ocurren entre los constituyentes de la ceniza, los depósitos formados y los gases de escape.

4.3.3.1 Escoriamiento y Ensuciamiento

Los depósitos de escoria en las secciones de transferencia de calor radiante en el hogar están formados por el impacto de partículas derretidas en los tubos de agua donde son enfriadas y solidificadas. En tanto que el depósito crece y se vuelve más ancho por la continuidad del proceso, la temperatura en la superficie aumenta. Si el

rango entre la temperatura de deformación inicial y la temperatura de flujo es baja, las partículas impactantes no se solidificarán, permaneciendo derretidas y bajando a través de los tubos. Si ese rango de temperatura es alto, los depósitos crecerán hasta un punto en el que su peso los obligará a caer de los tubos. La fuerza de adherencia del depósito es función de la temperatura y la disposición física de la superficie a la cual se adhiere, la dirección y velocidad del impacto y las características de fusibilidad de la escoria. Lo último es influenciado por las proporciones de sus constituyentes.

El ensuciamiento de la zona convectiva usualmente se divide en dos áreas, depósitos de alta temperatura en sobrecalentadores y depósitos de baja temperatura en economizadores y calentadores de aire. Los depósitos de alta temperatura consisten en ceniza volante que se adhiere debido a una composición generalmente en alcalinos o otros materiales inorgánicos relativamente volátiles. El ensuciamiento a baja temperatura se produce principalmente en calderas alimentadas mecánicamente.

Es difícil poder predecir el comportamiento de un carbón en un determinado sistema de combustión, pero existen parámetros que permiten prevenirnos de algunos potenciales problemas.

La ceniza es de dos tipos: bituminoso y lignito. Es necesario enfatizar que esta definición se aplica sólo a la ceniza, y no determinan el tipo de carbón. Se define ceniza de tipo bituminoso cuando el $\%Fe_2O_3$ es mayor a la suma de $\%CaO + \%MgO$; y ceniza de tipo lignito cuando sucede lo contrario.

Los constituyentes de la ceniza se pueden separar en ácidos y básicos. Los componentes básicos son Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O y K_2O . Los componentes básicos son SiO_2 , Al_2O_3 y TiO_2 . De esta división se determina la relación base/ácido:

$$\frac{B}{A} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$$

Para carbones que producen ceniza tipo bituminoso, el factor de escoriamiento es estimado con la siguiente relación:

$$Rs = \frac{B}{A} \cdot \%azufre_{base\ seca}$$

Para carbones que producen ceniza tipo lignito, el factor de escoriamiento es estimado de la siguiente manera:

$$Rs = \frac{\max(H.T.) + 4 \cdot \min(D.T.)}{5}$$

donde “max(H.T.)” es la máxima temperatura hemisférica y “min(D.T.)” es la mínima temperatura de deformación tanto para atmósfera oxidante como para atmósfera reductora.

Tabla 4.7. Evaluación de la Posibilidad de Escoriamiento

Factor de Escoriamiento (Rs)		Evaluación
Bituminoso	Lignito	
menor a 0.6	mayor a 1340°C	Bajo
0.6 - 2.0	1340 - 1230°C	Medio
2.0 - 2.6	1230 - 1150°C	Alto
mayor a 2.6	menor a 1150°C	Severo

Para carbones que producen ceniza tipo bituminoso, el factor de ensuciamiento es estimado con la siguiente relación:

$$Rf = \frac{B}{A} \cdot \%Na_2O_{en\ ceniza}$$

Para carbones que producen ceniza tipo lignito, el factor de ensuciamiento es basado en el contenido de Na_2O en la ceniza.

Tabla 4.8. Evaluación de la Posibilidad de Ensuciamiento

Factor de Ensuciamiento (Rf)		Evaluación
Bituminoso	Lignito	
menor a 0.2	menor a 2%	Bajo
0.2 - 0.5	2 - 3%	Medio
0.5 - 1.0	3 - 6%	Alto
mayor a 1.0	mayor a 6%	Severo

Debido a las diferencias en las condiciones de operación como la temperatura en la zona de combustión, el tamaño de la partícula de carbón, sistema de remoción de cenizas, etc., el mismo carbón puede mostrar diferentes características de escoriamiento y ensuciamiento dependiendo de la unidad en la que se está quemando.

4.3.3.2 Temperatura de Viscosidad Crítica

El escoriamiento de ceniza derretida no es realmente un líquido Newtoniano. A la temperatura de viscosidad crítica (T_{cv}), mientras la escoria se enfría, hay una rápida transición de flujo fluido a flujo plástico debido a un abrupto incremento de la viscosidad para un pequeño decremento de la temperatura. El valor de la temperatura de viscosidad crítica permite la predicción adecuada de la temperatura a la cual la

escoria derretida fluirá desde los tubos de agua. Es muy difıcil y costoso determinar esta propiedad, por lo que se puede estimar con la relación de Sage y McIlvay:

$$T_{cv} = \text{Temperatura Hemisférica (Atmósfera Reductora)} + 111^{\circ}\text{C}$$

Otro método para determinar esta propiedad es expresar la composición de la ceniza como el porcentaje de los principales componentes, así:

$$(\text{SiO}_2)' + (\text{Al}_2\text{O}_3)' + (\text{Fe}_2\text{O}_3)' + (\text{CaO})' + (\text{MgO})' = 100\%$$

Así se emplea la siguiente relación:

$$T_{cv} = 2990 + 1470 \cdot \frac{(\text{SiO}_2)'}{(\text{Al}_2\text{O}_3)'} + 360 \cdot \left[\frac{(\text{SiO}_2)'}{(\text{Al}_2\text{O}_3)'} \right]^2 - 14.7 \cdot [(\text{Fe}_2\text{O}_3)' + (\text{CaO})' + (\text{MgO})'] \\ + 0.15 \cdot [(\text{Fe}_2\text{O}_3)' + (\text{CaO})' + (\text{MgO})']^2 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

4.4 Importancia de las Propiedades del Carbón

Cuando se utiliza carbón para la generación de energía eléctrica, la calidad del carbón influye en el costo del carbón, adicionalmente a los costos de operación, mantenimiento y disposición de residuos. La propiedad más importante es el poder calorífico.

El contenido de ceniza es importante, a medida que aumenta, disminuye el poder calorífico. Por otra parte, la ceniza es un producto inútil que resulta necesario recoger. La eliminación de la ceniza recogida presenta otro problema, y los mercados para este producto están rara vez disponibles.

El azufre viene constituyendo una preocupación ambiental. La mitad o mayor cantidad del azufre pirítico puede ser eliminada mediante la aplicación de métodos convencionales de tratamiento físico. El azufre pirítico adicional puede ser eliminado mediante una molienda fina, y ofrecer un procedimiento para separar del carbón el azufre orgánico.

La humedad es un componente indeseable del carbón entregado. No solamente aumenta el peso del embarque, sino que crea dificultades para el manejo y muestreo de los carbones cuando estos tienen una humedad excesiva.

El índice de molienda Hardgrove ha sido relacionado con la capacidad de pulverización, la finura de la molienda, y el desgaste de los molinos. Tomando como base las características de molienda, puede planearse el mantenimiento preventivo y la reparación de los molinos.

4.4.1 Manejo de Carbón

El carbón es conducido de las canchas de almacenamiento a los silos de carbón. El impacto en la manipulación está influenciada por:

- El poder calorífico, que determina la cantidad de carbón a ser manejado (en función a los requerimientos de la caldera para una determinada carga)
- La humedad superficial determina las características de flujo.
- La distribución de tamaño por la proporción de materia fina en el flujo.
- La naturaleza de la materia mineral afecta las características de flujo.

Tabla 4.9. Efecto de las Propiedades del Carbón en el Diseño y Rendimiento de Calderas

Propiedad	Componentes Afectados	Efectos Probables
1. Poder Calorífico	<i>Silo de Carbón Alimentadores Pulverizadores Quemadores Control de Emisiones Manejo de Carbón</i>	Flujo de Carbón Capacidad de los Equipos Número de Componentes en Servicio
2. Contenido de Humedad	<i>Silo de Carbón Alimentadores Pulverizadores Aire Primario Ventilador de Tiro Inducido Manejo de Carbón</i>	Flujo de Carbón Capacidad de los Equipos Facilidad del Fluidización Temperatura de Salida del Pulverizador Flujo de Aire Primario Frío / Caliente
3. Contenido de Volátiles	<i>Quemadores Hogar Pulverizadores Encendedores</i>	Fineza Requerida Diseño del Quemador Estabilidad de Flama y Encendido Pérdidas por Carbón Inquemado Geometría del Hogar Métodos de Combustión Necesidades de Inertización del Pulverizador
4. Índice de Molienda	<i>Pulverizadores</i>	Capacidad Fineza Requerimientos de Potencia
5. Índice de Abrasión	<i>Manejo de Carbón Pulverizador Componentes Tuberías de Carbón Quemadores Zona Convectiva Placas y Sellos (Calentador de Aire)</i>	Mantenimiento de Equipos Requerimientos de Velocidad de Diseño Selección de Material Uso y Tiempo de Vida de Tuberías Rendimiento del Calentador de Aire
6. Contenido de Nitrógeno	<i>Quemadores Hogar Distribución de Aire</i>	Diseño de Quemadores Geometría del Hogar Sistema de Aire y Gases Emisiones de NOx Zona de Combustión
7. Contenido de Azufre	<i>Tina Precipitadores Calentadores de Aire</i>	Corrosión Requerimientos de Tamaño de Equipos Temperatura de Gases en la Chimenea Equipo de Control de Emisiones
8. Índice de Reactividad	<i>Quemadores Pulverizadores Inertización Encendedores</i>	Combustión Riesgo de Explosión Pérdidas por Carbón Inquemado
9. Contenido de Ceniza	<i>Manejo de Ceniza Pulverizadores Sopladores Precipitadores Zona Convectiva</i>	Capacidad Eficiencia Requerimientos de Velocidad Uso y Tiempo de Vida de Tuberías Requerimientos de Soplado
10. Fusibilidad de la Ceniza	<i>Hogar Sopladores</i>	Slagging / Temperatura de Vapor Fouling / Temperatura de Vapor Emisiones de NOx Requerimientos de Soplado
11. Análisis de Ceniza	<i>Caldera Equipo de Control de Emisiones Sopladores Manejo de Ceniza</i>	Slagging / Temperatura de Vapor Fouling / Temperatura de Vapor Eficiencia del Precipitador Requerimiento de Exceso de Aire Emisiones de NOx

4.4.2 Pulverización

El carbón es pulverizado, secado y transportado. Las propiedades más influyentes son:

- El poder calorífico determina el flujo de carbón requerido, a ser procesado por el pulverizador, para mantener la carga de la caldera. Un bajo poder calorífico determina un consumo mayor de energía eléctrica en el pulverizador por el incremento de flujo másico.
- Alto contenido de humedad requerirá de mayores temperaturas de aire primario para mantener la temperatura deseada a la salida del pulverizador.
- Alta dureza del carbón requiere de mayor capacidad y consumo de energía del pulverizador para mantener la cantidad y calidad de carbón pulverizado deseada.
- Minerales duros, por ejemplo cuarzo y pirita, en la composición de la materia mineral del carbón incrementa el desgaste y los costos de mantenimiento.

4.4.3 Caldera

Las propiedades más significativas en el rendimiento de la caldera son:

- A mayor contenido de humedad, la eficiencia de la caldera se reduce, por la utilización de la energía del carbón en la evaporación del agua, incrementando el calor latente de los gases de escape. Se reduce la temperatura del hogar, reduciendo la transferencia de calor.

- La materia volátil define la estabilidad de la flama y la eficiencia de combustión.
- La composición química de la ceniza determina la deposición en las superficies de transferencia de calor reduciendo la transferencia de calor e incrementando los costos de operación y mantenimiento.
- La presencia de minerales duros como cuarzo y pirita puede causar erosión en los tubos de la caldera, dependiendo de su naturaleza y concentración.

4.4.4 Calentador de Aire

Los problemas operativos más comunes son ensuciamiento por la ceniza, corrosión y erosión.

- El límite inferior de temperatura de los gases de escape está determinado por el punto de saturación del agua en los gases de escape, debido a la formación ácida con los óxidos de azufre (producto del contenido de azufre)
- La composición de la materia volátil determina la posibilidad de taponamiento en el calentador de aire, incrementando la indisponibilidad de la planta y los costos de operación y mantenimiento.

4.4.5 Precipitador Electrostático

- La composición y distribución de las cenizas determinan la eficiencia de colección, la carga de colección y las emisiones.

- El incremento de la humedad en el carbón, generalmente tiene un efecto positivo en la eficiencia de colección.

4.5 Carbón Utilizado en la C.T.ILO21

El carbón utilizable por la caldera de la Central Termoeléctrica ILO21 es de tipo bituminoso o sub bituminoso, siempre que sus propiedades cumplan con ciertos límites que puedan implicar capacidad del pulverizador, límites medioambientales, ensuciamiento, etc.

Las limitaciones definidas por diseño de la caldera y sus sistemas auxiliares definen un tipo de carbón que cumpla con ciertos rangos permisibles en su composición química, definidos por los análisis inmediato, elemental y el análisis de ceniza. Es posible quemar carbones que estén fuera de rango cuando estos son mezclados con otros tipos que permitan acomodar la propiedad promedio de la mezcla dentro del rango permitido.

El carbón utilizado en la Central Termoeléctrica ILO21 es sometido a una evaluación que permite calificar su comportamiento en la central, a través de criterios de operación, mantenimiento y manejo de carbón.

Los criterios de operación evalúan el comportamiento del carbón. Entre estos tenemos:

- Poder Calorífico Superior, define número de quemadores en servicio, carga mínima de la unidad, condiciones de variación de carga, etc. Un buen valor se encuentra entre 25.96 y 27.22 MJ/kg.
- Eficiencia de Planta, define el costo variable y la operatividad general de la Central. Si bien la variación depende de muchos aspectos, tanto en la caldera como en el ciclo de la turbina, es notoria la influencia del carbón utilizado. Un buen valor es mayor a 41.5% para 135 MW (mayor a 38% a 55 MW)
- Porcentaje de Inquemados en las Cenizas, pérdida energética del proceso de combustión. Un buen valor está entre 5 y 10% a 135 MW (10% de cenizas).
- Producción de Cenizas, define el ensuciamiento, incremento en la carga del sistema de recolección de ceniza (tolvines y precipitador electrostático), y el mayor costo de manejo de cenizas. La composición química de la ceniza define la probabilidad de escoriamento y ensuciamiento, y problemas de combustión.
- Variación de la Presión de Vapor Principal durante el encendido o apagado de quemadores de carbón. Un buen de la desviación está entre 0.25 y 0.40 MPa.
- Humedad Total, define la temperatura y flujo de aire primario para el secado. Un buen valor está entre 10 y 15%.
- Índice de Molienda, define las características operativas del pulverizador. Un buen valor está entre 51 y 53.

Tabla 4.10. Características del Carbón para la C.T. ILO21

		Carbón Garantizado (PT Adaro - Indonesia)	Rango de Carbón (Otros Carbones)
Análisis Global - Como Recibido			
<i>Poder calorífico alto</i>	kJ/kg	22609	21771 - 30145
<i>Poder calorífico bajo</i>	KJ/kg	21072	
<i>Humedad total</i>	%	24	10 - 26
<i>Humedad residual</i>	%	17	máximo 19
<i>Cenizas</i>	%	1.5	1-18 (base seca)
<i>Materia volátil</i>	%	37	27-50 (base seca)
<i>Índice de Hardgrove</i>	%	45	40 - 70
Análisis Específico			
		<i>Seca, Libre de Cenizas</i>	<i>Base Seca</i>
<i>Carbón</i>	%	74.3	60 - 80
<i>Hidrógeno</i>	%	5.6	3.5 - 5.8
<i>Azufre</i>	%	0.13	0.07 - 1.3
<i>Nitrógeno</i>	%	1.15	0.6 - 2
<i>Oxígeno</i>	%	19	7 - 19
Análisis de Cenizas - Base Seca			
<i>SiO₂ - Óxido de Silicio</i>	%	20	18 - 66
<i>Al₂O₃ - Óxido de Aluminio</i>	%	15	15 - 32
<i>Fe₂O₃ - Trióxido de Hierro</i>	%	11	2 - 21
<i>CaO - Óxido de Calcio</i>	%	23	0.5 - 23
<i>MgO - Óxido de Magnesio</i>	%	11.5	0.3 - 11.5
<i>Na₂O - Óxido de Sodio</i>	%	3	0.1 - 3
<i>K₂O - Óxido de Sodio</i>	%	0.6	0.3 - 2
<i>TiO₂ - Óxido de Titanio</i>	%	0.6	0.6 - 1.7
<i>P₂O₅ - Pentóxido de Fósforo</i>	%	0.08	0.05 - 1
<i>SO₃ - Trióxido de Azufre</i>	%	15	0.1 - 16
<i>Base / Acido</i>		1.44	
<i>Fe / Ca</i>		0.48	
Fusión de Cenizas - Oxidación			
<i>Deformación Inicial</i>	°C	1270	
<i>Ablandamiento</i>	°C		
<i>Hemisférico</i>	°C		

- Contenido de Azufre, influye en el control ambiental, los peligros de corrosión y mayor consumo de soda cáustica para el agua de sello de la caldera. Un buen valor está entre 0.2 y 0.4%.
- Se evalúa la tendencia a la vibración de los pulverizadores, como apreciación operativa propia de la operación con un tipo determinado de carbón.
- Rango del Carbón, define la facilidad de su combustión. Un buen valor del ratio carbón fijo / materia volátil es menor a 1.2.

El principal criterio de mantenimiento es el desgaste de las ruedas de los pulverizadores, donde se define como un buen valor entre 2 y 2.5 mm cada 10000 toneladas de procesamiento.

Los criterios de manejo de carbón evalúan parámetros que se presentan en las actividades de descarga, almacenamiento y carga de carbón:

- Cantidad de polvo que se produce durante su manipuleo, que define la frecuencia de limpieza de equipos y la necesidad de adición de agua durante su manipuleo.
- Presencia de metales en el carbón.
- Granulometría mayor a 50mm para su mejor manipuleo.
- Costos involucrados en el control de temperatura durante su periodo de almacenamiento, como rociado de agua, personal, equipos para remoción, compactación, etc.

La procedencia del carbón es diversa debido a las características del mercado del carbón. Un embarque de carbón se define principalmente por el cumplimiento de los límites permisibles definidos para la caldera, el precio del contenido energético del mismo, el costo del transporte y los costos estimados de operación y mantenimiento.

Los ocho tipos de carbón consumido en la Central (con 24 embarques desde el inicio de la operación hasta mayo de 2004) demuestran la variabilidad de sus propiedades, inclusive dentro de un mismo tipo de carbón.

Tabla 4.11. Embarques de Carbón para la C.T.ILO21 a mayo de 2004

Código	Nombre	Compañía	Mina	País	Número	Cantidad (t)
VEPDS	Paso Diablo Standard	Carbones del Guasare	Paso Diablo	Venezuela	5	194335
IDADS	Adaro	PT. Adaro Indonesia	PT. Adaro Indonesia	Indonesia	2	76260
COCEC	C	Glencore	El Cerrejon	Colombia	6	255965
COCED	D	Carbones de Colombia	El Cerrejon	Colombia	2	104120
COLLS	La Loma Steam	Drummond LTD	La Loma	Colombia	5	228287
COLJS	La Jagua	Interocean Coal Sales	La Jagua	Colombia	1	47754
AULES	Lemington	Coal And Allied Operations Pty	Lemington	Australia	1	71992
AUCUS	Cumnock	CMC	Cumnock	Australia	2	94783

Adicionalmente se han realizado mezclas entre estos carbones para mejorar sus efectos en la operación de la Caldera.

Tabla 4.12. Codificación de las Mezclas de Carbón

Código	Mezcla de Carbón
M31001	VEPDS0402+IDADS0202 50/50
M31002	VEPDS0402+IDADS0202 75/25
M31003	VEPDS0502+IDADS0202 75/25
M48001	COCED0704+AUCUS0204 70/30
M58001	COCEC0804+AUCUS0204 70/30

CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS ENERGÉTICAS

5.1 Eficiencia de Calderas

La eficiencia de una caldera es el grado de aptitud de transferir cierta proporción del calor que recibe del fogón al agua o al vapor. La eficiencia de una caldera es considerada como un total obtenido de la combinación de todos sus elementos componentes (sobrecalentador, recalentador, economizador, calentador de aire, quemadores, etc.)

La eficiencia puede expresarse en porcentaje o por el término de “evaporación” que es la proporción de vapor generado por unidad másica de combustible utilizado.

La eficiencia promedio de una caldera varía entre límites muy amplios debido a sus condiciones de fabricación y operación. La determinación de la eficiencia máxima obtenible depende de los siguientes “factores fijos”:

1. *Diseño de la Caldera*, incluyendo la disposición y efectividad de la superficie de transferencia de calor, volumen y forma del hogar, flujo de los gases producto de la combustión a través de los ductos de paso y la circulación del agua y vapor dentro de la caldera.

2. *Pérdidas internas*, tales como la transferencia de calor entre las paredes de la caldera, pérdidas de calor a través de los gases de escape y la ceniza.
3. *Equipo interno de recuperación de calor* como los sobrecalentadores, los calentadores de aire, los economizadores, etc.
4. *Tipo de combustible* empleado y sus características inherentes.
5. Proporción de la combustión en relación con el volumen del hogar y el área de transferencia de calor.
6. *Controlabilidad* de las “condiciones variables”.

Las condiciones variables definen la eficiencia en el tiempo, estas son:

1. Condiciones del combustible al momento de ser quemado.
2. El tiro, según sea afectado por la presión barométrica.
3. El ajuste de los quemadores.
4. Porcentaje de exceso de aire.
5. Estado de limpieza del área de transferencia de calor.
6. Proporción de la combustión.
7. Temperatura y humedad del aire de combustión.
8. Proporción de la combustión incompleta y carbón no quemado.
9. Tipo de operación (continuo o intermitente) y la variación de carga.

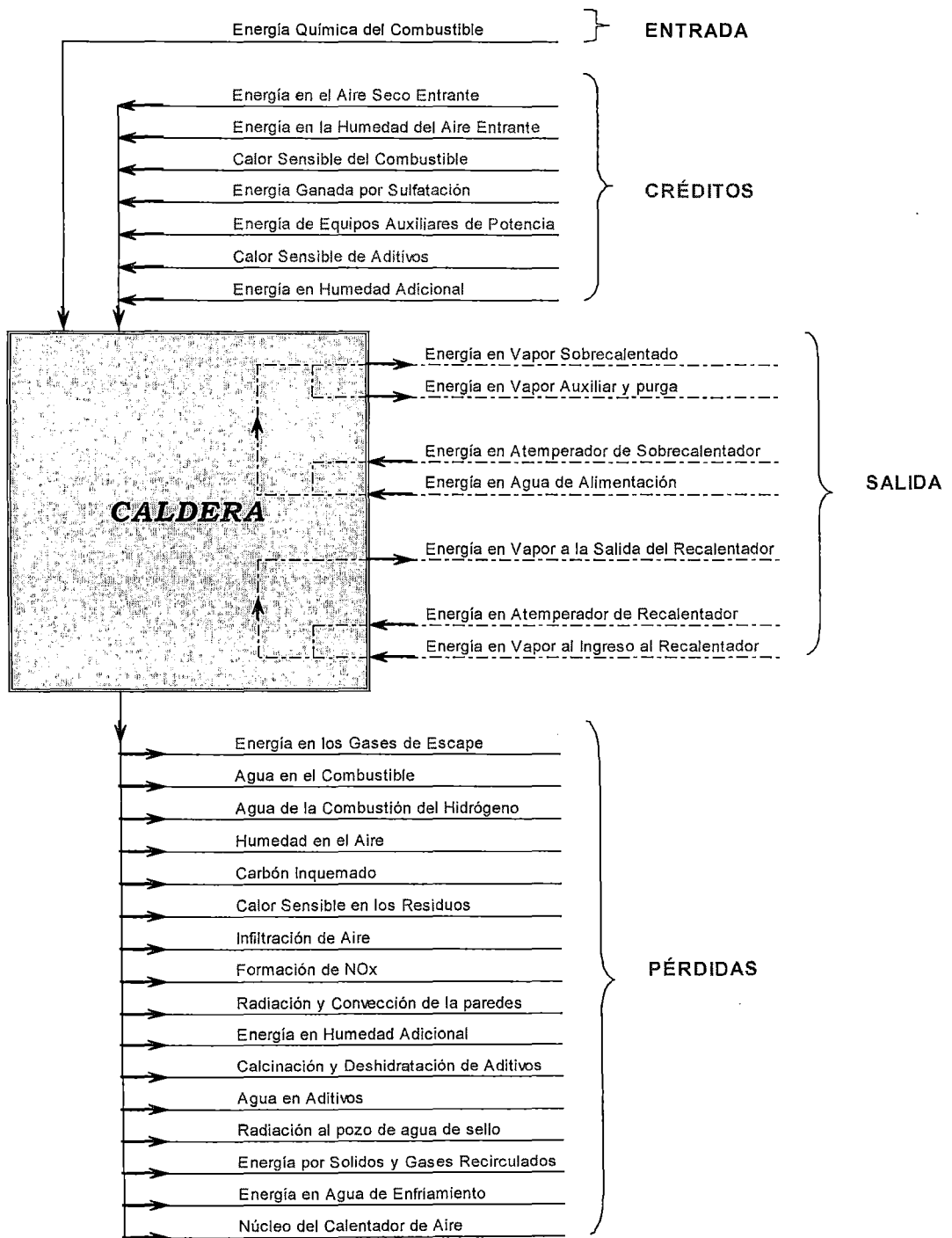


Figura 5.1. Flujos de Energía en la Caldera

La caldera puede considerarse como un sistema al cual ingresa una determinada cantidad de energía y, por la Primera Ley de la Termodinámica para condiciones estables, sale la misma cantidad de energía.

La energía de entrada es la energía asociada con el combustible utilizado (Diesel o Carbón). Es decir, el producto del flujo másico y el poder calorífico.

La energía de créditos es la energía no combustible suministrada a la caldera, principalmente energía eléctrica a motores de ventiladores y pulverizadores.

La energía de salida es la energía absorbida por el fluido. El agua en su cambio de estado de líquido sub enfriado a vapor sobrecalentado, y el posterior recalentamiento del vapor.

La energía de pérdidas es la energía que sale del sistema al medio ambiente y no es transferida al fluido.

Del balance de energía de la caldera se concluye que:

$$\textit{Entrada} + \textit{Créditos} = \textit{Salida} + \textit{Pérdidas}$$

La eficiencia de la caldera es la relación entre la energía de salida (energía útil) y la energía necesaria para producirla.

$$\textit{Eficiencia}(n) = \frac{\textit{Energía de Salida}}{\textit{Energía de Ingreso}} \cdot 100\%$$

Cuando la energía de ingreso se refiere a la energía de entrada (combustible) se define la “Eficiencia Combustible o Eficiencia” (EF); cuando se utiliza la energía

total de ingreso (combustible y créditos) se define la “Eficiencia Gruesa” (EGr). La eficiencia puede ser precisada por uno de los diferentes procedimientos existentes.

En el “método directo” o “entrada – salida”; que comprende la medición de la energía de entrada y la de la energía de salida, la eficiencia se calcula de la siguiente manera:

$$Eficiencia(n) = \frac{\sum Flujo\ de\ Vapor_i \cdot (Calor\ Entrada - Calor\ Salida)_i}{Flujo\ de\ Combustible \cdot Poder\ Calorífico} \cdot 100\%$$

Las mediciones primarias para la utilización de este método son:

- Flujo de agua de alimentación a la caldera.
- Flujo de agua para atemperación.
- Flujo de consumos auxiliares, tales como vapor auxiliar, purga, vapor de soplado, etc.
- Mediciones adicionales en la turbina para determinar el flujo de vapor recalentado.
- Flujo de combustible.
- Poder calorífico del combustible.

En el “método indirecto” o “balance de energía” se tienen que determinar las pérdidas de la caldera, calculándose la eficiencia de la caldera de la siguiente manera:

$$Eficiencia(n) = \frac{Poder\ Calorífico - \sum Pérdidas_i}{Poder\ Calorífico} \cdot 100\%$$

Las mediciones primarias necesarias para la utilización de este método son los análisis del combustible, los aditivos, los residuos y los gases de escape; adicionalmente el poder calorífico del combustible y las temperaturas de aire y gases.

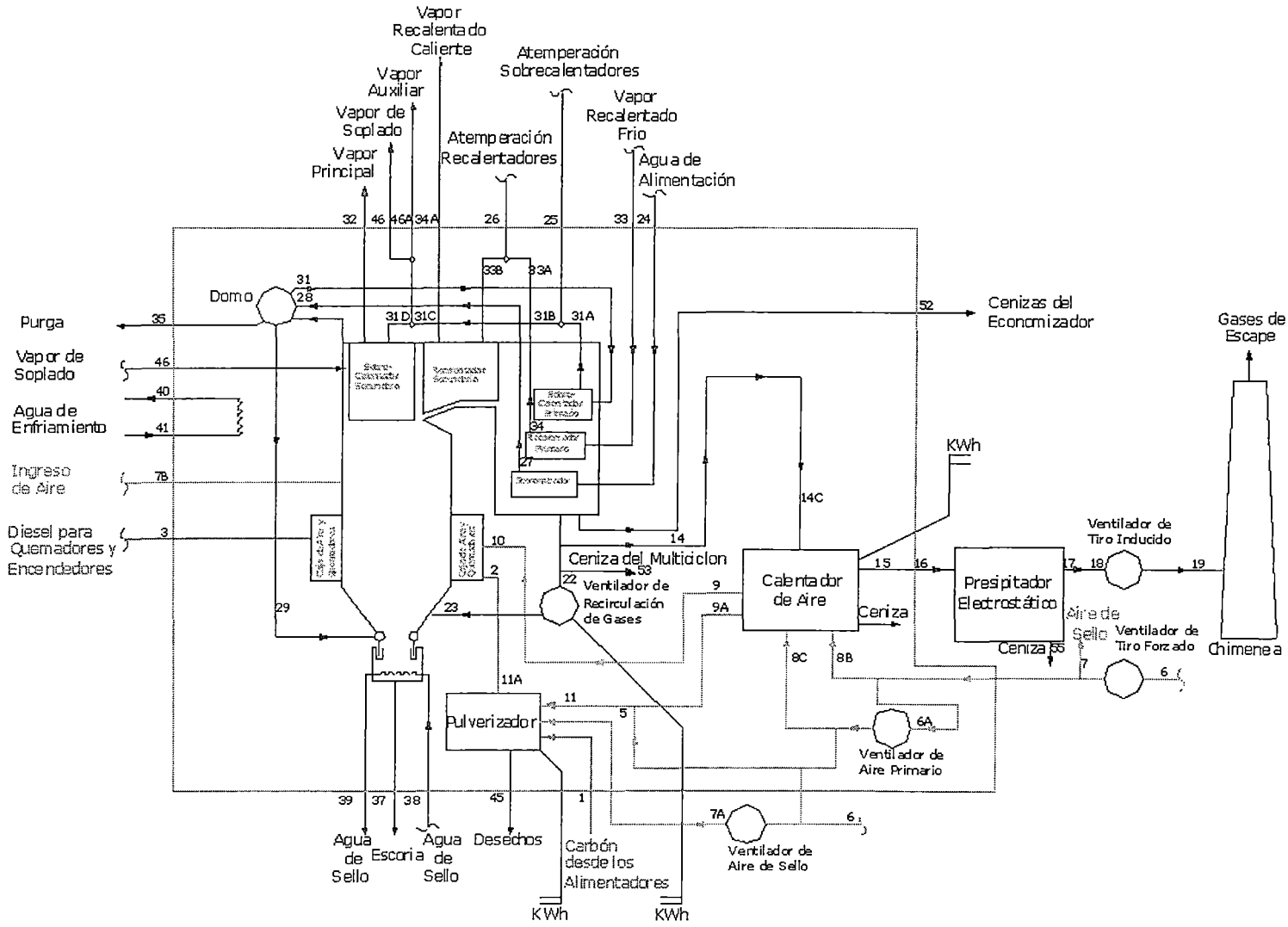
El método de pérdidas también permite conocer la “Eficiencia de Combustión” la cual considera solamente las pérdidas por carbono inquemado, pérdidas por monóxido de carbono, hidrógeno en el residuo y por hidrocarburos inquemados.

Tabla 5.1. Comparación de los Métodos para la Determinación de la Eficiencia

	Entrada / Salida Método Directo	Balance de Energía Método Indirecto
Ventajas	<p>Parámetros primarios son medidos directamente.</p> <p>Requiere menos mediciones.</p> <p>No requiere estimación de pérdidas no medibles.</p>	<p>Mediciones primarias pueden realizarse con mucha precisión.</p> <p>Permite realizar correcciones de los resultados a condiciones estándar o garantizadas.</p> <p>Presenta menor error debido al poco peso de las pérdidas.</p> <p>Los efectos de mediciones secundarias y valores estimados son secundarios.</p> <p>Se identifican pérdidas importantes.</p>
Desventajas	<p>Las mediciones primarias deben realizarse con mucha precisión.</p> <p>No permite identificar la fuente de las ineficiencias.</p> <p>Requiere del uso de método de balance de energía para correcciones a condiciones estándar.</p>	<p>Requiere de muchas mediciones.</p> <p>No muestra la capacidad del caldero directamente.</p> <p>Se estiman las pérdidas no medibles.</p>

Para la determinación de la eficiencia de la Caldera, así como los flujos energéticos, es necesario delimitar el volumen de control a utilizar. Los puntos del volumen de control definen las mediciones a tomar (figura 5.2)

Figura 5.2. Volumen de Control de la Caldera de la C.T. II.021



5.2 Metodología de Cálculo de las Pérdidas de la Caldera

Para la determinación de las pérdidas de la Caldera, es necesario conocer las propiedades del carbón quemado, principalmente los que se refieren a su poder calorífico, y los análisis próximo y último.

La evaluación de las pérdidas y eficiencia de la caldera se realiza en función del poder calorífico alto (HHVF) por ser el poder calorífico del carbón tal como es quemado.

El carbón utilizado en la Central Termoeléctrica ILO21 no utiliza aditivos, los que además de facilitar el efecto deseado en la combustión, influyen en la eficiencia del siguiente modo:

- Incrementan los residuos (pérdidas por calor sensible de residuos)
- Incremento de la humedad (pérdidas por humedad y alteración del calor específico de los gases)
- Pueden producir cambios químicos en los gases y alterar el requerimiento de aire
- Las reacciones, cuando son exotérmicas, aportan calor.

5.2.1 Composición del Carbón

Por lo visto en el capítulo anterior, el carbón se puede analizar de dos formas (análisis próximo y análisis último). En la C.T.ILO21 se realizan ambos análisis durante el proceso de descarga de carbón a toda la remesa recibida por una entidad

independiente, mientras que semanalmente el Laboratorio ILO21 toma una muestra del carbón enviado a la caldera para realizar el análisis próximo.

Se tomará como referencia el análisis del carbón en la recepción del embarque.

5.2.1.1 Pérdidas de Carbón

Ciertas propiedades físicas y químicas de los carbones son afectadas por almacenamiento por periodos largos y la intensidad de las reacciones varía con el tipo de carbón. Los efectos pueden ser diferentes, como por ejemplo: combustión espontánea, pérdida de poder calorífico, degradación de la granulometría, etc.

El fenómeno químico responsable de la combustión espontánea es la absorción de oxígeno por la superficie expuesta del carbón, la cual es acompañada por liberación de calor y aumento de la temperatura. Si las condiciones no permiten la disipación de calor y hay una corriente continua de oxígeno, la temperatura se elevará; al incrementarse esta, aumenta la velocidad de oxidación y por lo tanto favorece la liberación de calor. Luego el proceso se intensifica, si el calor generado es mayor al calor disipado, el carbón alcanzará su temperatura de ignición (produciendo la combustión espontánea). Otros elementos que producen la combustión espontánea son la presencia de finos (por desmenuzamiento, condiciones atmosféricas o contenido de azufre)

Debido a las pérdidas de la materia volátil y a la variación de la humedad del carbón durante su almacenamiento, su composición varía en el tiempo, por ende es necesario estimar sus propiedades en el instante en que se quema para la determinación de las pérdidas de la caldera.

Para la estimación de las pérdidas del carbón se asume que la masa de cenizas del carbón permanece invariable en el tiempo.

Así la variación de la masa de carbón en cada uno de sus componentes es como sigue:

- Disminución de Materia Volátil

$$\Delta VmF \downarrow = 1 - \frac{MpVmF}{MpVmF_{(REF)}} \cdot \frac{MpAsF_{(REF)}}{MpAsF} \quad \left[\frac{kg}{kg_{Vm}} \right]$$

- Disminución de la Humedad

$$\Delta WF \downarrow = 1 - \frac{MpWF}{MpWF_{(REF)}} \cdot \frac{MpAsF_{(REF)}}{MpAsF} \quad \left[\frac{kg}{kg_w} \right]$$

- Disminución del Carbono Fijo

$$\Delta FcF \downarrow = 1 - \frac{MpFcF}{MpFcF_{(REF)}} \cdot \frac{MpAsF_{(REF)}}{MpAsF} \quad \left[\frac{kg}{kg_{Fc}} \right]$$

Las pérdidas totales de masa de carbón por degradación en el tiempo serían:

$$\Delta F \downarrow = 1 - \frac{MpAsF_{(REF)}}{MpAsF} \quad \left[\frac{kg}{kg_{Carbon}} \right]$$

donde el subíndice:

REF : Análisis de Referencia o como recibido

5.2.1.2 Composición del Carbón

La composición química del carbón (determinada por el análisis último), se puede estimar de la composición y propiedades como recibido y el análisis último del carbón de referencia o como recibido.

El nitrógeno está asociado a los componentes orgánicos, por lo tanto la masa de nitrógeno se mantiene, siendo su porcentaje másico:

$$MpN2F = MpN2F_{(REF)} \cdot \frac{MpAsF}{MpAsF_{(REF)}} \quad [\% \text{ másico}]$$

El azufre es normalmente determinado también en el análisis próximo, de lo contrario se asume que no varía en el tiempo, por lo que:

$$MpSF = MpSF_{(REF)} \cdot \frac{MpAsF}{MpAsF_{(REF)}} \quad [\% \text{ másico}]$$

La determinación de los porcentajes de carbono, hidrógeno y oxígeno viene del desarrollo del siguiente sistema de ecuaciones para cada tipo de carbón (ecuaciones basadas en relaciones de Poder Calorífico y Materia Volátil)

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 146.4 & 620 & -77.5 \\ -1.24 & 10.61 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} MpCF \\ MpH2F \\ MpO2F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} MpFcF + MpVmF - MpN2F - MpSF \\ \frac{HHVF}{k_{HHVF}} - 40 \cdot MpSF \\ \frac{MpVmF}{k_{Vm}} - 84.15 \end{bmatrix}$$

k_{HHVF} : Ajuste del Poder Calorífico por tipo de carbón
 k_{Vm} : Ajuste de la Materia Volátil por tipo de carbón

Los ajustes por tipo de carbón se determinan con las ecuaciones desarrolladas con datos de los muestreos de carbón como recibido.

Tabla 5.2. Ajuste por tipo de carbón

	KHHVF	Kvm
IDADS	2.455	1.426
AULES	2.282	1.449
VEPDS	2.220	1.443
COCED	2.249	1.570
COCEC	2.303	1.522
COLLS	2.297	1.393
COLJS	2.294	1.348
AUCUS	2.271	1.559

5.2.2 Propiedades de los Residuos

Residuos son la ceniza, la escoria y el carbón inquemado que salen del volumen de control de la caldera.

5.2.2.1 Fracción Másica del Residuo – MFrRs

El residuo, producto de la ceniza contenida en el carbón, es convertido a una base de masa de residuo por masa de carbón quemado:

$$MFrRs = \frac{MpAsF}{100 - MpCRs} \quad \left[\frac{kg}{kg \text{ carbon}} \right]$$

MpAsF : Ceniza en el Carbón [%másico]
 MpCRs : Carbono Inquemado en la Ceniza [%másico]

5.2.2.2 Masa del Residuo en el Punto “z” – $MqRs_z$

La masa del residuo saliendo del volumen de control de la caldera debe ser determinado para cálculos de balance de energía y para el cálculo intermedio de residuos:

$$MqRs_z = \frac{MpRs_z}{100 \cdot HHVF} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kJ}_{\text{carbon}}} \right]$$

donde “ $MpRs_z$ ” es el porcentaje del residuo total saliendo de la caldera en el punto “z”. Es difícil medir el residuo en todos los puntos de colección, en estos casos el residuo no medido puede ser calculado por diferencia entre el residuo total y el residuo medido:

$$MpRs_z = 100 \cdot \frac{MrRs_z}{MFrRs \cdot MrF} \quad \left[\%_{\text{masico}} \right]$$

$MrRs_z$:	Flujo másico de residuo medido en el punto “z”	[kg/s]
MrF	:	Flujo másico de carbón	[kg/s]

Las cenizas volantes son los residuos más medidos, ya que se pueden determinar en los gases de escape y los sistemas de colección de ceniza volante.

Para el caso de la C.T.ILO21, la ceniza (punto 50) y la escoria (punto 37) la mediremos por diferencia de niveles en el silo de cenizas y en el silo de escorias respectivamente. Esta determinación se realiza para el total diario producido, sobre el cual se puede asumir que por cada unidad másica de escoria se produce simultáneamente 20 unidades de ceniza volante.

5.2.2.3 Carbono Inquemado en el Residuo – MpCRs

Se refiere al carbono libre en la ceniza y escoria y se usa para determinar el carbono inquemado del carbón. Dependiendo del método de determinación se pueden realizar correcciones por la presencia de carbonatos en el residuo.

Esta normalmente representado por el porcentaje másico del Carbono Inquemado en la Ceniza.

5.2.2.4 Carbono Inquemado en el Carbón – MpUbC

El carbono inquemado en el residuo se utiliza para determinar el porcentaje de carbono en el carbón que no se va ha quemado.

$$MpUbC = MpCRs \cdot MFrRs \quad \left[\%_{\text{masico}} \right]$$

Tabla 5.3. Resumen de las Propiedades de los Residuos

Carbón	Medición		Resultados		
	MpAsF %	MpCRs %	MFrRs kg/kgc	MpUbC %másico	MpCb %másico
IDADS	0.96	2.65	0.01	0.03	54.70
VEPDS	6.64	20.51	0.08	1.71	69.64
COCED	8.04	12.27	0.09	1.11	62.37
COCEC	6.93	14.06	0.08	1.12	64.32
COLLS	5.79	4.79	0.06	0.29	65.47
COLJS	6.60	16.18	0.08	1.31	68.24
AUCUS	13.85	8.99	0.15	1.38	64.82
M3100	5.39	20.35	0.07	1.38	69.13
M4800	11.28	10.59	0.13	1.34	62.78
M5800	10.84	12.60	0.12	1.55	65.56

5.2.2.5 Carbono Quemado – MpCb

El carbono que combustiona en la caldera es la diferencia entre el porcentaje de carbono en el carbón (análisis último) y el Carbono Inquemado. Este carbono quemado es utilizado para las ecuaciones estequiométricas en lugar del carbono total.

$$MpCb = MpCF - MpUbC \quad \left[\%_{\text{máscico}} \right]$$

MpCF : Porcentaje de carbono en el carbón -- Análisis [%máscico]
Último

5.2.3 Propiedades del Aire

5.2.3.1 Propiedades Físicas

Se considera una composición volumétrica del aire de 20.95% de O₂, 78.10% de N₂, 0.92% de Ar y 0.03% de CO₂ haciendo un peso molecular promedio del aire de 28.9625. Realizando una simplificación para cálculos, el argón y otros elementos se refieren como “Nitrógeno Atmosférico: N_{2a}” con un peso molecular equivalente de 28.158.

Tabla 5.4. Composición del Aire

<i>Elemento</i>	<i>% Volumétrico</i>	<i>% Gravimétrico</i>
O ₂	20.95	23.14
N ₂	79.05	76.86

5.2.3.2 Humedad en el Aire – MFrWDA

Se determina con la medición de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo o temperatura de bulbo seco y la humedad relativa en conjunto con la carta psicométrica.

$$MFrWDA = \frac{18.02}{28.96} \cdot \frac{PpWvA}{Pa - PpWvA} \quad \left[\frac{\text{kg}_{H_2O}}{\text{kg}_{\text{aire seco}}} \right]$$

Pa : Presión Barométrica [kPa]
PpWvA : Presión Parcial del Vapor de Agua en el Aire [kPa]

La presión parcial del vapor de agua en el aire P_pW_vA se puede determinar de dos maneras en función a los datos obtenidos:

$$P_pW_vA = \begin{cases} P_sW_vTwb - \frac{(Pa - P_sW_vTwb) \cdot (Tdbz - Twbz)}{1546.62 - 1.44 \cdot Twbz} & [kPa] \\ 0.01 \cdot RHMz \cdot P_sW_vTdb & \end{cases}$$

- P_sW_vTwb : Presión de Saturación del Vapor de Agua a [kPa]
temperatura de bulbo húmedo ($Twbz$ - °C)
- P_sW_vTdb : Presión de Saturación del Vapor de Agua a [kPa]
temperatura de bulbo seco ($Tdbz$ - °C)
- $RHMz$: Humedad Relativa. [%]

Estos valores son medidos a la succión del Ventilador de Tiro Forzado y corresponden a las condiciones medioambientales del aire (punto 6)

Tabla 5.5. Resumen de las Propiedades Ambientales del Aire

Carbón	Medición		Resultados			
	Pa kPa	Tdb °C	PsWvTdb kPa	PpWvA kPa	MFRWDA kg/kg _{gas seco}	DnA kg/m ³
IDADS	101.1	18.0	2.07	1.47	0.009	1.22
VEPDS	101.2	20.7	2.46	1.62	0.010	1.21
COCED	100.9	29.5	4.18	2.45	0.015	1.18
COCEC	101.1	24.2	3.16	2.02	0.013	1.19
COLLS	101.1	21.7	2.62	1.71	0.011	1.20
COLJS	101.1	25.5	3.30	2.17	0.014	1.19
AUCUS	102.5	28.8	4.00	2.41	0.015	1.20
M3100	101.2	18.9	2.19	1.56	0.010	1.21
M4800	101.2	24.0	2.99	2.09	0.013	1.19
M5800	101.2	27.4	3.66	2.08	0.013	1.19

5.2.3.3 Aire Teórico (Corregido) – M_qThACr

Se define como el aire mínimo teóricamente requerido para lograr la combustión completa del carbón, por ejemplo carbono en CO_2 , hidrógeno en H_2O y azufre en SO_2 . En los procesos de combustión reales se producen pequeñas cantidades de CO y

NO_x. Incluso se forma SO₃ y hidrocarburos gaseosos, pero normalmente no se miden. Normalmente el impacto del CO y NO_x es irrelevante cuando su concentración en los gases de escape es menor a 1000ppm.

Para tipos combustibles fósiles es un buen indicador el aire teórico calculado en base al análisis último del carbón. Para el carbón el aire teórico puede variar entre 0.316 y 0.333 kg/MJ.

$$MqThAf = \frac{MFrThA}{HHVF} \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}} \right]$$

donde el Aire Teórico MFrThA se determina en función al análisis último de carbón en base “Como Quemado”:

$$MFrThA = 0.1151 \cdot MpCF + 0.3430 \cdot MpH2F + 0.0431 \cdot MpSF - 0.0432 \cdot MpO2F \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}} \right]$$

En aplicaciones comerciales, sobre todo con combustibles sólidos, no es posible quemar el combustible completamente. El aire teórico corregido es definido como la cantidad de aire requerido para completar la combustión de la parte gasificada del combustible sin exceso de oxígeno.

$$MqThACr = \frac{MFrThACr}{HHVF} \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}} \right]$$

Al igual que el caso anterior, el Aire teórico se determina en función al análisis último, pero considerando el carbono inquemado y la captura de azufre (que para el caso de la Caldera de la C.T. ILO21 es cero)

$$MFrThACr = 0.1151 \cdot MpCb + 0.3430 \cdot MpH2F + 0.0431 \cdot MpSF - 0.0432 \cdot MpO2F \quad \left[\frac{kg}{kg_{carbon}} \right]$$

Expresado en base molar se tiene:

$$MoThACr = \frac{MFrThACr}{28.963} \quad \left[\frac{mol}{kg_{carbon}} \right]$$

5.2.3.4 Exceso de Aire – XpA

Es la cantidad real de aire medida menos el aire teórico, dividido entre el aire teórico expresado en porcentaje. Para nuestro caso utilizaremos el aire teórico corregido.

$$XpA = \begin{cases} 100 \cdot \frac{MFrDA - MFrThACr}{MFrThACr} \\ 100 \cdot \frac{MqDA - MqThACr}{MqThACr} \end{cases} \quad [\%]$$

Para cálculos de eficiencia, el exceso de aire se debe determinar a la salida del economizador (punto 14, a la salida de la caldera); y la salida del calentador de aire (punto 16, a la salida del volumen de control) para poder estimar las fugas de aire en el calentador de aire y corregir la temperatura de salida de los gases de escape.

El exceso de aire es determinado de la composición volumétrica de los gases de escape. Puede ser calculado estequiométricamente basado en O₂ y CO₂, y analíticamente basado en CO₂ y la relación carbono quemado – azufre MpCb/S del carbón. La relación simplificada permite la determinación directa del exceso de aire:

$$XpA = \frac{VpO2 \cdot \left(\frac{MpCb}{12.01 \cdot VpCO2} \right)}{0.2095 \cdot MoThACr} \quad [\%]$$

La determinación por medición de O₂ es la más utilizada, debido que para un tipo cualquiera de combustible, el exceso de aire depende únicamente de la medición de O₂, mientras que la relación entre CO₂ y exceso de aire depende del análisis del carbón. Cuando se mide O₂ en base húmeda, se introduce la variable “humedad”.

Cuando se mide la concentración de O₂ en los gases de escape en base seca DVpO₂ (muestreo extractivo), el exceso de aire se determina empleando la siguiente relación:

$$X_{pA} = 100 \cdot \frac{DV_{pO_2} \cdot (MoDPc + 0.7905 \cdot MoThACr)}{MoThACr \cdot (20.95 - DV_{pO_2})} \quad [\%]$$

de esta relación es necesario calcular el número de moles de los productos de la combustión del carbón en base seca (CO₂ del carbón quemado, SO₂ producido, N₂ del carbón)

$$MoDPc = \frac{MpCb}{1201} + \frac{MpSF}{3206.4} + \frac{MpN2F}{2801.3} \quad \left[\frac{mol}{kg_{carbon}} \right]$$

Tabla 5.6. Resumen del Aire Teórico y Exceso de Aire.

Carbón	Medición		Resultados				
	DVpO ₂ (En)	DVpCO ₂ (En)	MFrThACr	XpA (ECO)	MqDAz (ECO)	MqWAz (ECO)	MqAz (ECO)
	%	%	kg/kgc	%	kg/kJc	kg/kJc	kg/kJc
IDADS	3.8	15.6	6.9	22.2	0.00037	0.000003	0.00038
VEPDS	5.0	14.0	9.5	30.1	0.00041	0.000004	0.00041
COCED	3.4	15.2	8.4	19.4	0.00037	0.000006	0.00037
COCEC	4.4	14.7	8.6	25.8	0.00038	0.000005	0.00039
COLLS	5.7	13.8	8.7	36.4	0.00043	0.000005	0.00044
COLJS	4.8	14.4	9.2	29.0	0.00040	0.000005	0.00041
AUCUS	4.7	14.4	8.8	28.3	0.00041	0.000006	0.00042
M3100	4.5	14.6	9.4	26.5	0.00043	0.000004	0.00043
M4800	3.8	15.4	8.4	21.1	0.00039	0.000005	0.00039
M5800	4.0	17.9	8.8	19.0	0.00038	0.000005	0.00039

Conociendo el exceso de aire, es posible determinar la composición de los gases de escape en base seca:

$$DV_{pO_2} = \frac{X_{pA} \cdot MoThACr \cdot 0.2095}{MoDFg} \quad [\%]$$

$$DV_{pCO_2} = \frac{M_{pCb}}{12.01 \cdot MoDFg} \quad [\%]$$

$$DV_{pSO_2} = \frac{M_{pSF}}{32.064 \cdot MoDFg} \quad [\%]$$

$$DV_{pN_2F} = \frac{M_{pN_2F}}{28.013 \cdot MoDFg} \quad [\%]$$

$$DV_{pN_2a} = 100 - DV_{pO_2} - DV_{pCO_2} - DV_{pSO_2} - DV_{pN_2F} \quad [\%]$$

para esto es necesario determinar el número de moles de los gases secos $MoDFg$:

$$MoDFg = MoDPc + MoThACr \cdot \left(0.7905 + \frac{X_{pA}}{100} \right) \quad \left[\frac{mol}{kg_{carbon}} \right]$$

DV_{pCO_2}	:	Dióxido de Carbono en los gases de escape (Para comparación con el análisis Orsat, es necesario añadir el DV_{pSO_2})	[%]
DV_{pSO_2}	:	Dióxido de Azufre en los gases de escape.	[%]
DV_{pN_2F}	:	Nitrógeno del carbón en los gases de escape (Normalmente insignificante comparado con el nitrógeno atmosférico)	[%]
DV_{pN_2a}	:	Nitrógeno atmosférico en los gases de escape.	[%]

Cuando se mide la concentración de O_2 en los gases de escape en base húmeda V_{pO_2} (muestreo continuo o extractivo con calentamiento), el exceso de aire se determina empleando la siguiente relación:

$$X_{pA} = 100 \cdot \frac{V_{pO_2} \cdot [MoWPc + (0.7905 + MoWA) \cdot MoThACr]}{MoThACr \cdot [20.95 - V_{pO_2} \cdot (1 + MoWA)]} \quad [\%]$$

de esta relación es necesario calcular el número de moles de los productos de la combustión del carbón en base seca más los productos húmedos y humedad adicional $MoWPc$.

$$MoWPc = MoDPc + \frac{MpH2F}{201.6} + \frac{MpWF}{1801.5} + \frac{MFrWAdz}{18.015} \quad \left[\frac{mol}{kg_{carbon}} \right]$$

Adicionalmente es necesario determinar el número de moles por humedad ambiente o del aire $MoWA$:

$$MoWA = \frac{28.96}{18.02} \cdot MFrWDA \quad \left[\frac{mol}{mol_{aire\ seco}} \right]$$

$MpWF$: H2O en el carbón [%másico]
 $MFrWAdz$: Humedad adicional en el punto “z” como
 soplado o inyección de agua al pulverizador

Tabla 5.7. Composición Volumétrica de los Gases a la Salida del Economizador (Calculados)

Carbón	Resultados				
	VpO2	VpCO2	VpSO2	VpH2O	VpN2
	%	%	%	%	%
IDADS	3.48	14.42	0.01	9.66	72.42
VEPDS	4.63	13.14	0.06	5.93	76.23
COCED	3.17	14.27	0.05	7.60	74.91
COCEC	4.06	13.64	0.05	6.92	75.33
COLLS	5.30	12.74	0.05	6.44	75.48
COLJS	4.48	13.35	0.05	6.39	75.73
AUCUS	4.35	13.35	0.05	6.40	75.86
M3100	4.17	13.41	0.06	6.63	75.72
M4800	3.44	14.12	0.05	7.33	75.06
M5800	3.19	14.45	0.04	6.96	75.36

Conociendo el exceso de aire, es posible determinar la composición de los gases de escape en base húmeda:

$$V_{pO2} = \frac{X_{pA} \cdot Mo_{ThACr} \cdot 0.2095}{MoFg} \quad [\%]$$

$$V_{pCO2} = \frac{M_{pCb}}{12.01 \cdot MoFg} \quad [\%]$$

$$V_{pSO2} = \frac{M_{pSF}}{32.064 \cdot MoFg} \quad [\%]$$

$$V_{pH2O} = \frac{\frac{M_{pH2F}}{2.016} + \frac{M_{pH2OF}}{18.015} + \frac{M_{FrWAdz}}{0.18015} + (100 + X_{pA}) \cdot Mo_{ThACr} \cdot Mo_{WA}}{MoFg} \quad [\%]$$

$$V_{pN2F} = \frac{M_{pN2F}}{28.013 \cdot MoFg} \quad [\%]$$

$$DV_{pN2a} = 100 - V_{pO2} - V_{pCO2} - V_{pSO2} - V_{pH2O} - DV_{pN2F} \quad [\%]$$

para esto es necesario determinar el número de moles de los gases húmedos MoFg:

$$MoFg = Mo_{WPC} + Mo_{ThACr} \cdot \left[0.7905 + Mo_{WA} + \frac{X_{pA}}{100} \cdot (1 + Mo_{WA}) \right] \quad \left[\frac{mol}{kg_{carbon}} \right]$$

5.2.3.5 Aire Seco – MqDAz

La cantidad de aire seco entrando a la caldera se determina del exceso de aire y el aire teórico:

$$M_{qDAz} = M_{qThACr} \cdot \left(1 + \frac{X_{pA}}{100} \right) \quad \left[\frac{kg}{kg_{carbon}} \right]$$

$$M_{FrDAz} = M_{FrThACr} \cdot \left(1 + \frac{X_{pA}}{100} \right) \quad \left[\frac{kg}{kg_{carbon}} \right]$$

Es importante diferenciar que el aire seco de ingreso a la caldera para combustión se determina con el exceso de aire determinado a la salida del economizador (punto 14), mientras que el total de aire seco que introduce el ventilador de tiro forzado se determina con el exceso de aire a la salida del calentador de aire (punto 15)

5.2.3.6 Aire Humedo – MrAz

Es la suma del aire seco más la humedad en el aire:

$$MqAz = (1 + MFrDWA) \cdot MqDAz \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kJ}_{\text{carbón}}} \right]$$

$$MrAz = MqAz \cdot QrF \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$$

QrF : Ingreso energético del carbón [W]

5.2.3.7 Densidad del Aire – DnA

Se calcula utilizando las ecuaciones de gas ideal. Este valor se determina para el aire del medio ambiente (punto 6).

$$DnA = \frac{1000 \cdot (Pa + PAz)}{Ra \cdot (273.2 + TAz)} = \frac{1000 \cdot MWA \cdot (Pa + PAz)}{R \cdot (273.2 + TAz)} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Es necesario determinar el peso molecular del aire húmedo MWA:

$$MWA = \frac{1 + MFrDWA}{\frac{1}{28.963} + \frac{MFrDWA}{18.015}} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{mol}} \right]$$

R : Constante universal de los gases [J/kg·mol·K]
= 8314.5

Ra : Constante molar específica para el aire [J/kg·K]
= R/MWA

PAz : Presión estática del aire en el punto “z” [kPa]

TAz : Temperatura del aire en el punto “z” [°C]

5.2.4 Gases Productos de la Combustión del Carbón

La cantidad de gases de escape, en base húmeda, se calcula estequiométricamente a partir del análisis del carbón y el exceso de aire. Productos sólidos, como la ceniza,

escoria y carbono inquemado son considerados separadamente y no son parte de la masa de gases de escape húmedos.

La determinación de los gases de escapes húmedos es necesario para los cálculos de las fugas en el calentador de aire, pérdidas de energía en el precipitador electrostático y correcciones por pérdidas de presión en ductos. Los gases de escape secos se determinan restando a los gases de escape húmedo toda la humedad (carbón, aire y humedad adicional), su determinación resulta importante para el balance energético de la caldera.

Tabla 5.8. Resumen de las Características de los Gases a la Salida del Economizador

Carbón	Resultados				
	MoDPc mol/kgc	MqWFgz kg/kJc	MqDFgz kg/kJc	MoDFg mol/kgc	DnFg kg/m3
IDADS	0.046	0.000028	0.00039	0.29	0.87
VEPDS	0.059	0.000020	0.00042	0.42	0.87
COCED	0.053	0.000025	0.00038	0.34	0.86
COCEC	0.054	0.000023	0.00040	0.37	0.86
COLLS	0.055	0.000023	0.00045	0.40	0.87
COLJS	0.058	0.000023	0.00042	0.40	0.86
AUCUS	0.055	0.000024	0.00043	0.38	0.86
M3100	0.058	0.000023	0.00044	0.40	0.87
M4800	0.053	0.000024	0.00040	0.34	0.86
M5800	0.055	0.000023	0.00040	0.35	0.86

5.2.4.1 Gases Húmedos del Combustible – MqFgF

$$MqFgF = \frac{100 - MpAsF - MpUbC}{100 \cdot HHVF} \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}} \right]$$

MpAsF : Ceniza en el carbón [%másico]
 MpUbC : Carbono Inquemado [%másico]

5.2.4.2 Humedad por Humedad Total del Carbón – $MqWF$

$$MqWF = \frac{MpWF}{100 \cdot HHVF} \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}} \right]$$

$MpWF$: Humedad Total del Carbón (Análisis Próximo) [%másico]

5.2.4.3 Humedad por Hidrógeno en el Carbón – $MqWH2F$

$$MqWH2F = \frac{8.937 \cdot MpH2F}{100 \cdot HHVF} \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}} \right]$$

$MpH2F$: Hidrógeno en el Carbón (Análisis Último) [%másico]

5.2.4.4 Humedad en el Aire – $MqWAz$

La humedad es proporcional al exceso de aire y debe ser calculada en el punto donde este se determina.

$$MqWAz = MFrDWA \cdot MqDAz \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}} \right]$$

5.2.4.5 Humedad Adicional en los Gases de Escape – $MqWAdz$

Este punto toma en cuenta cualquier humedad adicional adicionada no tomada en cuenta anteriormente como vapor de soplado o inyección de agua a los pulverizadores. Toda la humedad debe ser convertida a porcentaje másico del carbón. La humedad por evaporación del agua en la tina de agua de sello de la caldera es insignificante comparado con los flujos de carbón y aire (de ser posible su medición debe ser incluida en este cálculo)

$$MqWAdz = \frac{MrStz}{MrF \cdot HHVF} \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}} \right]$$

- MrStz : Suma de toda la humedad adicional ingresante [kg/s]
 en el punto "z"
 MrF : Flujo de Carbón consumido [kg/s]

Para efectos de prueba, se considera sólo la inyección de agua al pulverizador.

5.2.4.6 Humedad Total en los Gases de Escape – MqWFgz

La humedad total en los gases de escape es la suma de todas las fuentes individuales.

$$MqWFgz = MqWF + MqWH2F + MqWAZ + MqWAdz \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}} \right]$$

5.2.4.7 Gases de Escape Húmedos Totales – MqFgz

Es la suma del aire seco, humedad en el aire, gases húmedos de combustión de carbón y humedad adicional.

$$MqFgz = MqDAz + MqWAZ + MqFgF + MqWAdz \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}} \right]$$

El flujo másico de los gases de escape en el punto "z" puede ser calculado de:

$$MrFgz = MqFgz \cdot MrF \cdot HHVF \quad \left[\frac{kg}{s} \right]$$

5.2.4.8 Gases Secos de Escape – MqDFgz

$$MqDFgz = MqFgz - MqWFgz \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}} \right]$$

5.2.4.9 Humedad en los Gases de Escape – $MpWFgz$

$$MpWFgz = 100 \cdot \frac{MqWFgz}{MqFgz} \quad [\%_{m\acute{a}sico}]$$

5.2.4.10 Residuos (Sólidos) en los Gases de Escape – $MpRsFgz$

Los sólidos en los gases de escape son considerados en la entalpía de los gases de escape cuando exceden los 6.45 g/MJ_{carbón}. Se determina la masa de residuo por masa de gases de escape húmedos:

$$MpRsFgz = \frac{MpRs \cdot MFrRs}{MqFgz \cdot HHVF} \quad [\%_{m\acute{a}sico}]$$

5.2.4.11 Densidad de los Gases de Escape Húmedos – $DnFgz$

Se calcula utilizando las ecuaciones de gas ideal. Como referencia el cálculo de la densidad se determina a la salida del calentador de aire (punto 15)

$$DnFgz = \frac{1000 \cdot (Pa + PFg)}{Rg \cdot (273.2 + TFg)} = \frac{1000 \cdot MwFg \cdot (Pa + PFg)}{R \cdot (273.2 + TFg)} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Cuando los constituyentes de los gases de escape han sido determinados en base húmeda, el peso molecular de los gases de escape húmedos se determina como:

$$MwFg = 0.32 \cdot VpO2 + 0.4401 \cdot VpCO2 + 0.64064 \cdot VpSO2 + 0.28013 \cdot VpN2F \\ + 0.28158 \cdot VpN2a + 0.18015 \cdot VpH2O \quad \left[\frac{kg}{mol} \right]$$

Cuando los constituyentes de los gases de escape han sido determinados en base seca, el peso molecular de los gases de escape húmedos se determina como:

$$MwFg = MwDFg \cdot \frac{MoDFg}{MoFg} \quad \left[\frac{kg}{mol} \right]$$

para lo cual debemos determinar el peso molecular de los gases en base seca:

$$MwDFg = 0.32 \cdot DVpO2 + 0.4401 \cdot DVpCO2 + 0.64064 \cdot DVpSO2 + 0.28013 \cdot DVpN2F \\ + 0.28158 \cdot DVpN2a + 0.18015 \cdot DVpH2O \quad \left[\frac{kg}{mol} \right]$$

Siendo el porcentaje de agua DVpH2O en base seca determinado como:

$$DVpH2O = 100 \cdot \frac{MoFg - MoDFg}{MoDFg} \quad \left[\%_{\text{volumétrico}} \right]$$

R	:	Constante universal de los gases = 8314.5	[J/kg·mol·K]
Rg	:	Constante molar específica para los gases = R/MwFg	[J/kg·K]
PFgz	:	Presión estática de los gases en el punto “z”	[kPa]
TFgz	:	Temperatura de los gases en el punto “z”	[°C]

5.2.5 Temperatura de Aire y Gases de Escape

5.2.5.1 Temperatura de Referencia – TRe

Es la temperatura base para la cual se comparan los ingresos a la Caldera (aire, combustible, etc.) para determinar las pérdidas y créditos por calor sensible. En pruebas de rendimiento normalmente se asume 25°C o la Temperatura Promedio de Ingreso de Aire.

5.2.5.2 Temperatura Promedio de Ingreso de Aire – $TMnAEn$

Es necesaria como temperatura de referencia o para calcular los créditos debido a la diferencia con la temperatura de referencia. Cuando hay más de una fuente de ingreso de aire, la temperatura promedio debe ser calculada. Es necesario notar que un pequeño porcentaje de aire (normalmente menor a 2 o 3% a máxima carga) ingresa a la caldera como fuga, normalmente se considera que ingresa a la temperatura promedio de aire.

Cuando las temperaturas a promediar no tienen demasiada diferencia entre ellas, se puede emplear un promedio ponderado en función a los flujos de aire, de lo contrario es preferible realizar un promedio ponderado en función de la energía de los flujos (entalpía por flujo másico)

Para la Caldera de la C.T.ILO21, el volumen de control limita el ingreso de aire en la descarga del Ventilador de Tiro Forzado, por lo que esta será la temperatura de ingreso de aire (punto 7)

5.2.5.3 Temperatura Corregida de Gases (Sin Fugas) – $TFgLvCr$

En unidades con calentadores de aire, las fugas de aire a través del calentador de aire disminuyen la temperatura de los gases de escape sin realizar ningún trabajo útil. Es por esto que para la evaluación de la eficiencia la temperatura debe ser corregida a un valor que representa a gases de escape de no existir fugas de aire en el calentador.

$$TFgLvCr = TFgLv + \frac{MnCpA}{MnCpFg} \cdot \left(\frac{MqFgLv}{MqFgEn} - 1 \right) \cdot (TFgLv - TAEn) \quad [^{\circ}C]$$

MnCpA	:	Calor Específico del aire húmedo entre TAEn y TFgLv.	[kJ/kg·K]
MnCpFg	:	Calor Específico de los Gases Húmedos de Escape entre TFgLv y TFgLvCr	[kJ/kg·K]
TAEn	:	Temperatura del Aire al ingreso del Calentador de Aire. Para calentadores con dos ingresos de aire y uno de gases (tres sectores) este valor es un promedio ponderado de la temperatura de fuga en base a la masa de fuga de cada sector. Se recomienda utilizar datos del fabricante.	[°C]
TFgLv	:	Temperatura de los Gases de Escape a la salida del Calentador de Aire	[°C]
MqFgEn	:	Peso de los gases de escape húmedos ingresando al calentador de aire (en su determinación se emplea el exceso de aire al ingreso del Calentador)	[kg/kJ _{carbon}]
MqFgLv	:	Peso de los gases de escape húmedos saliendo del calentador de aire (en su determinación se emplea el exceso de aire a la salida del Calentador)	[kg/kJ _{carbon}]

Tabla 5.9. Resumen de la Temperatura de Aire y Gases

Carbón	Resultados			
	TMnAEn °C	TFgLv °C	TFgLvCr °C	AL %
IDADS	23.6	129.3	138.0	8.5
VEPDS	26.3	135.1	145.8	10.0
COCED	28.8	134.0	145.9	11.7
COCEC	26.8	135.6	147.1	10.9
COLLS	25.3	133.0	138.0	5.0
COLJS	27.1	135.0	151.3	15.5
AUCUS	29.3	140.6	152.8	11.3
M3100	25.0	133.2	144.5	10.7
M4800	25.9	137.2	152.8	14.3
M5800	25.7	137.8	146.9	8.4

El Calor Específico del Aire se determina en función de las entalpías del aire a temperatura de gases y temperatura de aire.

$$MnCpA = \frac{HATFgLv - HATAEn}{TFgLv - TAEn} \quad \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right]$$

Las fugas en el calentador de aire se pueden estimar empleando la relación entre los flujos de gases al ingreso (punto 14) y salida (punto 15).

$$AL = \frac{MqFg15 - MqFg14}{MqFg14} \cdot 100 \quad [\%]$$

5.2.6 Entalpía del Aire, Gases de Escape y otras sustancias

5.2.6.1 Entalpía del Aire – HA

Es función de la relación existente entre la humedad del aire y el aire seco.

$$HA = \frac{1}{1 + MFrWDA} \cdot HDA + \frac{MFrWDA}{1 + MFrWDA} \cdot HWv \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

HDA	:	Entalpía del aire seco.	[kJ/kg]
HWv	:	Entalpía del vapor de agua.	[kJ/kg]

5.2.6.2 Entalpía de los Gases de Escape – HFg

La entalpía de los gases de escape húmedos contabiliza la influencia de los gases secos productos de la combustión y el vapor de agua (pueden incluirse residuos sólidos).

$$HFg = (1 - MFrWFG) \cdot HDFg + MFrWFG \cdot HWv + MFrRsFG \cdot HRs \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

HDFg	:	Entalpía de los gases de escape secos.	[kJ/kg]
HRs	:	Entalpía del residuo.	[kJ/kg]
MFrWFG	:	Fracción másica del agua en los gases de escape húmedos.	[kg/kg _{gas h}]
MFrRsFG	:	Fracción másica de los residuos en los gases de escape húmedos. Este valor puede ser omitido si la ceniza en el combustibles es menor a 6.45 gr/MJ (15lbm/MBtu)	[kg/kg _{gas h}]

5.2.6.3 Entalpía del Residuo Seco – HRs

El residuo está compuesto de varios componentes (especialmente con el uso de aditivos). Una aproximación para determinar la entalpía del residuo sólido sería determinar o estimar la composición del mismo; considerando la insignificancia en la precisión de los cálculos se puede ajustar la entalpía del SiO₂ entre -20 y 1100°C.

5.2.6.4 Entalpía del Agua y Vapor

Para la determinación de la entalpía y propiedades de saturación del agua y vapor se puede emplear la formulación industrial de 1997 del IAPWS (International Association for the Properties of Water and Steam).

5.2.6.5 Entalpía del Carbón - HCoal

La relación para estimar la entalpía del carbón se basa en el análisis próximo o inmediato, desarrollada por N.Y.Kirov, estas relaciones están integradas para obtener la entalpía a la temperatura de referencia de 25°C. La entalpía de la ceniza fue desarrollada para el SiO₂ para consistencia con la entalpía del residuo.

$$H_{Coal} = MFr_{Fc} \cdot H_{Fc} + MFr_{Vm1} \cdot HV_{m1} + MFr_{Vm2} \cdot HV_{m2} + MFr_{WF} \cdot HW + MFr_{AsF} \cdot HR \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

La determinación de las entalpías de los componentes se realiza con las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}
 HFc &= 2.326 \cdot [0.296 \cdot T + 6.32 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 7.796] \\
 HVm1 &= 2.326 \cdot [0.710 \cdot T + 7.29 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 18.204] \\
 HVm2 &= 2.326 \cdot [1.280 \cdot T + 5.51 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 32.334] \\
 HRs &= 2.326 \cdot [0.315 \cdot T + 2.59 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 8.042] \\
 HW &= 1.8 \cdot T - 45
 \end{aligned}
 \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

MFrFc	: Fracción másica del carbono fijo.	[kg/kg _{carbón}]
MFrAsF	: Fracción másica de la ceniza.	[kg/kg _{carbón}]
MFrWF	: Fracción másica del agua.	[kg/kg _{carbón}]
MFrVm	: Fracción másica de la materia volátil.	[kg/kg _{carbón}]
MFrVm1	: Fracción másica de la materia volátil primaria.	[kg/kg _{carbón}]
MFrVm2	: Fracción másica de la materia volátil secundaria.	[kg/kg _{carbón}]
MFrVmCr	: Fracción másica de la materia volátil en base seca y libre de cenizas	[kg/kg _{carbón}]
T	: Temperatura.	[°C]

La determinación de los tipos de materia volátil se realiza siguiendo lo siguiente:

$$MFrVm = MFrVm1 + MFrVm2 \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}_{\text{carbón}}} \right]$$

$$MFrVmCr = \frac{MFrVm}{1 - MFrAsF - MFrWF} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kg}_{\text{carbón}} \text{ base sec } \alpha\text{-libre de ceniza}} \right]$$

$$\text{Si } MFrVmCr \leq 0.1, \text{ luego } \begin{cases} MFrVm2 = MFrVm \\ MFrVm1 = 0.0 \end{cases}$$

$$\text{Si } MFrVmCr > 0.1, \text{ luego } \begin{cases} MFrVm2 = 0.1 \cdot (1 - MFrAsF - MFrWF) \\ MFrVm1 = MFrVm - MFrVm2 \end{cases}$$

5.2.6.6 Coeficientes de Entalpía

La relación entalpía temperatura de las sustancias arriba mencionadas se pueden ajustar a curvas de quinto orden, siendo la temperatura de referencia 25°C.

$$Hk = 2.326 \cdot [C0 + C1 \cdot TK + C2 \cdot TK^2 + C3 \cdot TK^3 + C4 \cdot TK^4 + C5 \cdot TK^5] \quad \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

TK : Temperatura absoluta. [K]

Tabla 5.10. Resumen de la Entalpía de Sub Productos (Referencia: 25°C)

Carbón	Resultados			
	HATEn kJ/kg	HFgTFgLv kJ/kg	HCoal kJ/kg	HRsTFgLv kJ/kg
IDADS	-1.4	109.9	-2.0	86.6
VEPDS	1.3	114.6	1.6	91.8
COCED	3.8	114.8	4.9	90.8
COCEC	1.8	115.9	2.3	92.2
COLLS	0.3	112.7	0.4	89.9
COLJS	2.1	114.8	2.7	91.7
AUCUS	4.4	121.6	5.3	96.8
M3100	0.0	112.9	0.0	90.1
M4800	0.9	118.1	1.1	93.7
M5800	0.7	118.7	0.9	94.2

La tabla 5.11 muestra estos coeficientes con las restricciones de temperatura especificadas. Los coeficientes para el aire se establecen para la composición del aire atmosférico definida. Los coeficientes para gases Secos están basados en un gas de la siguiente composición volumétrica: 15.3% de CO₂, 3.5% de O₂, 0.1% de SO₂ y 81.1% de N₂ atmosférico; La entalpía de los gases de escape secos no varía significativamente con combustibles fósiles debido a la predominancia del nitrógeno atmosférico en su composición (entre 80% con carbón a 88% con gas natural).

Tabla 5.11. Coeficientes de Entalpía (temperatura entre 255 a 1000 K y más de 1000 K)

	Aire Seco - HDA		Vapor de Agua - HWv		Gases Secos - HDFg		Residuo - HRs	
	255 a 1000 K	> 1000 K	255 a 1000 K	> 1000 K	255 a 1000 K	> 1000 K	255 a 1000 K	> 1000 K
C0	-1.3107E+02	-1.1777E+02	-2.3940E+02	-1.5735E+02	-1.2319E+02	-1.1801E+02	-3.2303E+01	1.8226E+01
C1	4.5813E-01	3.7168E-01	8.2746E-01	5.2299E-01	4.0656E-01	3.6351E-01	-2.4314E-01	3.6062E-02
C2	-1.0750E-04	8.7019E-05	-1.7975E-04	3.0896E-04	5.7951E-06	1.0392E-04	1.7877E-03	4.3257E-04
C3	1.7788E-07	-2.1962E-08	3.9346E-07	-5.9749E-08	6.3311E-08	-2.7218E-08	-2.5982E-06	-1.9841E-07
C4	-9.2487E-11	2.9796E-12	-2.4159E-10	6.2905E-12	-2.9244E-11	3.7183E-12	2.0549E-09	4.8395E-11
C5	1.6820E-14	-1.6308E-16	6.0693E-14	-2.7465E-16	2.4910E-15	-2.0306E-16	-6.3669E-13	-4.6141E-15

5.2.7 Pérdidas de Energía

El cálculo de las pérdidas se realiza en dos categorías dependiendo del método de medición y cálculo. En primer lugar están las pérdidas que son función del ingreso de energía del carbón y puede ser expresado en términos de pérdidas por unidad de energía del carbón (las pérdidas por productos de la combustión pertenecen a este grupo). En segundo lugar están las pérdidas no relacionadas al carbón que se determinan como pérdida energética en el tiempo (por ejemplo las pérdidas por radiación y convección)

5.2.7.1 Pérdidas por Gases de Escape – Q_{pLDFg}

$$Q_{pLDFg} = 100 \cdot M_{qDFg} \cdot H_{DFgLvCr} \quad [\%]$$

- M_{qDFg} : Flujo de gases secos saliendo del volumen de control. [kg/kJ_{carbon}]
- $H_{DFgLvCr}$: Entalpía de los gases secos a la temperatura de salida del volumen de control. En caso de tomarla antes del límite de control es necesario corregir el M_{qDFg} a ese punto. [kJ/kg]

5.2.7.2 Pérdidas por Humedad de la Combustión de H₂ – Q_{pLH2F}

$$Q_{pLH2F} = 100 \cdot M_{qWH2F} \cdot H_{StLvCr} \quad [\%]$$

5.2.7.3 Pérdidas por Humedad del Carbón – Q_{pLWF}

$$Q_{pLWF} = 100 \cdot M_{qWF} \cdot H_{StLvCr} \quad [\%]$$

5.2.7.4 Pérdidas por Humedad en el Aire – QpLWA

$$Q_{pLWA} = 100 \cdot M_{FrWDA} \cdot M_{qDA} \cdot H_{StLvCr} \quad [\%]$$

5.2.7.5 Pérdidas por Carbono Inquemado en el Residuo – QpLUbC

$$Q_{pLUbC} = M_{pUbC} \cdot \frac{HHVCRs}{HHVF} \quad [\%]$$

donde HHVCRs es el poder calorífico del carbono como se encuentra en el residuo. Cuando el hidrógeno quemado en el residuo es considerado insignificante (caso usual) se asume un valor de 33 700 kJ/kg. Cuando se puede determinar la presencia de hidrógeno quemado en el residuo, este se considera por separado, y se asume un poder calorífico del carbono de 32 800 kJ/kg (Calor de formación de CO₂)

5.2.7.6 Pérdidas por Hidrógeno Inquemado – QpLH2Rs

$$Q_{pLH2Rs} = \frac{M_{rRs} \cdot M_{pH2Rs} \cdot HHVH2}{M_{rF} \cdot HHVF} \quad [\%]$$

donde M_{pH2Rs} es la masa de hidrógeno quemado en el residuo y HHVH2 es el poder calorífico del hidrógeno con un valor de 142 120 kJ/kg.

5.2.7.7 Pérdidas por Monóxido de Carbono en los Gases – QpLCO

$$Q_{pLCO} = DV_{pCO} \cdot M_{oDFg} \cdot M_{wCO} \cdot \frac{HHVCO}{HHVF} \quad [\%]$$

$$Q_{pLCO} = V_{pCO} \cdot M_{oFg} \cdot M_{wCO} \cdot \frac{HHVCO}{HHVF}$$

DV_{pCO} : Porcentaje volumétrico de CO en base seca. [%volumetrico]
 V_{pCO} : Porcentaje volumétrico de CO en base húmeda. [%volumetrico]

MoDFg	:	Moles de gas seco con exceso de aire medido en el mismo punto que el CO	[mol/kg]
MoFg	:	Moles de gas húmedo con exceso de aire medido en el mismo punto que el CO	[mol/kg]
MwCO	:	Peso molecular del CO = 28.01	[kg/mol]
HHVCO	:	Poder calorífico del CO = 10 111	[kJ/kg]

5.2.7.8 Pérdidas por Rechazos del Pulverizador – QpLPr

Incluye la pérdidas por energía química y calor sensible del rechazo del pulverizador.

$$Q_{pLPr} = 100 \cdot \frac{Mr_{Pr}}{Mr_F \cdot HHV_F} \cdot (HHV_{Pr} + H_{Pr}) \quad [\%]$$

MrPr	:	Flujo másico de los rechazos del pulverizador.	[kg/s]
HHVPr	:	Poder calorífico alto de los rechazos obtenido del análisis de laboratorio.	[kJ/kg]
HPr	:	Calor sensible, utilizar la entalpía de la ceniza a temperatura de salida del pulverizador.	[kJ/kg]

5.2.7.9 Pérdidas por Calor Sensible de las Cenizas – QpLRs

$$Q_{pLRs} = 100 \cdot \sum M_{qRs} \cdot HR_{sz} \quad [\%]$$

MqRs	:	Flujo másico de ceniza en el punto “z”	[kg/kJ]
HRsz	:	Entalpía de la ceniza en el punto “z”. Se asume la ceniza a temperatura de los gases.	[kJ/kg]

5.2.7.10 Pérdidas por Formación de NOx – QpLNOx

Se refiere a las pérdidas por la formación de NOx durante el proceso de combustión.

Esta pérdida es normalmente pequeña (0.04% para 335ppm de NOx). Este procedimiento de cálculo asume que el analizador convierte en NO2 de la muestra de gas en NO y muestra una lectura total de NOx como NO.

$$Q_{pLNOx} = \begin{cases} DV_{pNOx} \cdot MoDFg \cdot \frac{HrNOx}{HHVF} \\ V_{pNOx} \cdot MoFg \cdot \frac{HrNOx}{HHVF} \\ 100 \cdot MqNOx \cdot \frac{HrNOx}{MwNOx} \end{cases} \quad [\%]$$

DV _{pNOx}	:	Cantidad de NO _x como NO en base seca (normalmente se mide en “ppm”, por lo que se debe dividir entre 10000 para obtener el porcentaje)	[%volumétrico]
V _{pNOx}	:	Cantidad de NO _x como NO en base húmeda.	[%volumétrico]
MqNO _x	:	Cantidad de NO _x expresada en base energética.	[kg/J]
HrNO _x	:	Calor de formación del NO = 89 850	[kJ/kmol]
MwNO _x	:	Peso molecular del NO = 30.006	[kg/mol]

Es práctica expresar el contenido de NO_x en los gases de escape en términos de masa por unidad de volumen, por lo que la transformación a base energética emplea la siguiente relación:

$$MqNOx = mNOx \cdot \frac{MqFgz}{DnFg(N)} \cdot 10^{-9} \quad \left[\frac{kg}{J} \right]$$

mNO _x	:	Cantidad de NO _x medida en base húmeda a condiciones normales.	[mg/m ³ _N]
DnFg(N)	:	Densidad de los Gases de Escape a condiciones normales.	[kg/m ³ _N]

5.2.7.11 Pérdidas por Radiación y Convección Superficial – Q_{rLSrc}

La estimación utilizada para pérdidas por calor radiante se detalla en la norma ASME PTC4.1 de 1969, que incluye una gráfica que relaciona la producción de calor de la

caldera y características constructivas. Para el caso de la Caldera ILO21, la generación de energía térmica va entre 330 y 390 MW, lo que significa una pérdida de 2.25%.

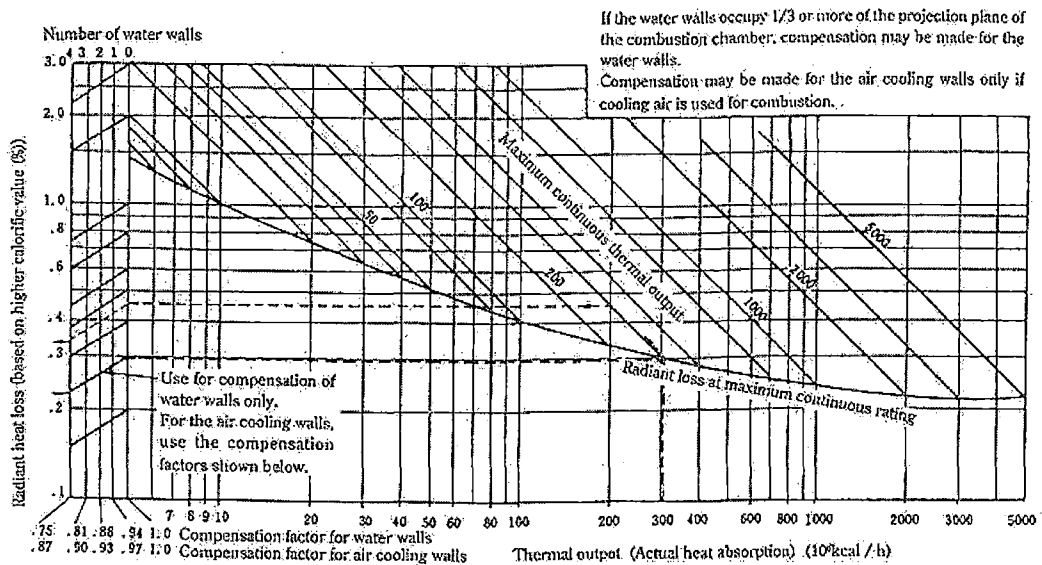


Figura 5.3. Pérdidas por Calor Radiante (Fuente: ASME PTC 4.1-1969)

5.2.7.12 Pérdidas por Humedad Adicional – Q_{rLWAd}

Humedad Adicional es el agua o vapor inyectado al lado gases de la caldera, normalmente se encuentra el vapor de atomización o soplado.

$$Q_{rLWAd} = \sum MrWAdz \cdot (H_{StLvCr} - H_{WRe}) \quad [W]$$

- $MrWAdz$: Flujo másico de humedad adicional en la ubicación "z" [kg/s]
- H_{StLvCr} : Entalpía del vapor en los gases a la salida del volumen de control (excluyendo fugas de aire) [kJ/kg]
- H_{WRe} : Entalpía del agua a la temperatura de referencia. [kJ/kg]

Tabla 5.12. Resumen de Pérdidas por Tipo de Carbón

Carbón	Resultados					
	QpLDFg	QpLUbc	QpLW(*)	QrLSrc	QpLx (**)	QpL
	%	%	%	%	%	%
IDADS	4.45	0.04	0.60	0.23	0.02	5.34
VEPDS	5.09	1.91	0.45	0.23	0.03	7.71
COCED	4.63	1.37	0.55	0.23	0.06	6.84
COCEC	4.87	1.34	0.52	0.23	0.04	6.99
COLLS	5.07	0.36	0.49	0.23	0.09	6.23
COLJS	5.24	1.50	0.54	0.23	0.06	7.56
AUCUS	5.43	1.71	0.57	0.23	0.13	8.06
M3100	5.32	1.67	0.52	0.23	0.08	7.81
M4800	5.13	1.71	0.57	0.23	0.09	7.72
M5800	4.83	1.92	0.51	0.23	0.09	7.58

(*) Incluye todas las pérdidas por humedad (aire, carbón, etc.)

(**) Incluye pérdidas por CO, Nox, rechazos, etc.

5.2.7.13 Pérdidas por la Tina de Agua de Sello – QrLAp

En la tina de agua de sello de la caldera se tienen pérdidas por la absorción de calor por radiación hacia el agua y pérdidas por el calor sensible de la escoria. Por balance de energía la pérdida por la tina de agua de sello es la suma de la energía ganada por el agua a la salida de la tina, energía perdida por la evaporación del agua de la tina y el calor sensible de la mezcla agua escoria que sale de la tina.

$$QrLAp = QrApW + QrApEv + QrRsWLv \quad [W]$$

La energía ganada por el agua de sello QrApW se determina de la siguiente manera:

$$QrApW = MrW39 \cdot (HW39 - HW38) \quad [W]$$

Las pérdidas por la evaporación del agua de sello QrApEv

$$QrApEv = \left(MrW38 - MrW39 + MrRsW37 \cdot \frac{MFrWRs}{1 + MFrWRs} \right) \cdot (HStLvCr - HW38) \quad [W]$$

Las pérdidas por calor sensible de la mezcla agua escoria Q_{rRsWLv}

$$Q_{rApEv} = \frac{MrRsW37}{1 + MFrWRs} \cdot (HRs37 + MFrWsR \cdot (HW31 - HW38)) \quad [W]$$

$MrRsW37$:	Flujo másico de la mezcla agua escoria saliendo de la tina de agua de sello.	[kg/s]
$MFrWRs$:	Fracción másica del agua contenida en la mezcla agua escoria saliendo de la tina.	[kg/kg]
$HRs37$:	Entalpía de la escoria seca a la salida de la tina.	[kJ/kg]
HWz	:	Entalpía del agua en el punto "z"	[kJ/kg]

5.2.8 Créditos de Energía

Al igual que las pérdidas, los créditos se pueden catalogar en dos grupos: el primer grupo que se puede expresar como un porcentaje del ingreso energético del carbón, como el ingreso de aire; y el segundo grupo, que se expresa en términos de energía por unidad de tiempo como la potencia entregada por los ventiladores.

5.2.8.1 Créditos por Ingreso de Aire Seco – Q_{pBDA}

$$Q_{pBDA} = 100 \cdot MqDA \cdot HDAEn \quad [%]$$

$MqDA$:	Flujo de aire seco ingresando al volumen de control.	[kg/kJ _{carbon}]
$HDAEn$:	Entalpía del aire seco a la temperatura promedio del aire al ingreso al volumen de control ($TMnAEn$)	[kJ/kg]

5.2.8.2 Créditos por Humedad del Aire – Q_{pBWA}

$$Q_{pBWA} = 100 \cdot MFrWDA \cdot MqDA \cdot HWvEn \quad [%]$$

$HWvEn$:	Entalpía del vapor de agua a la temperatura de	[kJ/kg]
---------	---	--	---------

ingreso de aire al volumen de control de la caldera.

5.2.8.3 Créditos por Calor Sensible en el Carbón – QpBF

$$Q_{pBDA} = 100 \cdot \frac{HFEn}{HHVF} \quad [\%]$$

HFEn : Entalpía del carbón a la temperatura de ingreso [kJ/kg]
al volumen de control de la caldera.

5.2.8.4 Créditos por Potencia de Equipos Auxiliares – QrBX

Incluye equipos auxiliares tales como pulverizadores, ventilador de recirculación de gases y ventilador de aire primario. No se incluyen los ventiladores de tiro forzado y tiro inducido debido a que la energía que suministran se incluyen en las propiedades del aire y gases.

$$Q_{pBX} = P_x \cdot \frac{Ex}{100} \quad [W]$$

Px : Potencia eléctrica consumida por el equipo “X” [W]
Ex : Eficiencia global del equipo, incluyendo la eficiencia del motor, acoplamiento, reductor, etc. [%]

5.2.8.5 Créditos por Humedad Adicional – QrBWAd

$$Q_{rBWAd} = \sum MrStz \cdot (HStEnz - HWRe) \quad [W]$$

MrStz : Flujo másico de humedad adicional en la ubicación “z” [kg/s]
HStEnz : Entalpía de la humedad adicional a la [kJ/kg]

HWR_e : temperatura de ingreso al volumen de control.
 : Entalpía del agua a la temperatura de [kJ/kg]
 referencia.

Tabla 5.13. Resumen de Créditos por Tipo de Carbón

Carbón	Resultados				
	QpBDA %	QpBF %	QpBW(*) %	QpBM(**) %	QpB %
IDADS	-0.058	-0.009	-0.001	0.004	-0.064
VEPDS	0.057	0.005	0.001	0.004	0.067
COCED	0.160	0.018	0.005	0.004	0.187
COCEC	0.076	0.008	0.002	0.004	0.091
COLLS	0.010	0.001	0.000	0.004	0.016
COLJS	0.098	0.009	0.003	0.004	0.114
AUCUS	0.197	0.019	0.006	0.004	0.227
M3100	0.002	0.000	0.000	0.004	0.006
M4800	0.039	0.004	0.001	0.004	0.048
M5800	0.027	0.003	0.001	0.004	0.034

(*) Incluye todos los créditos por humedad (aire y adicional)

(**) Incluye créditos por ventiladores y pulverizadores.

CAPÍTULO 6

DATOS Y PRUEBAS

6.1 Fuentes de Información

La determinación de las pérdidas energéticas y la eficiencia de la caldera requieren de la recopilación de datos de los principales parámetros de operación en un tiempo determinado llamado “tiempo de muestreo” (2 horas con la caldera en operación estable). La recopilación de los datos se realiza de tres maneras: un sistema de adquisición de datos (inherente al Sistema de Control e Información Distribuido de la C.T. ILO21), datos de campo y análisis físicos y químicos realizados por la sección de Laboratorio ILO21.

Es importante distinguir dos tipos de parámetros empleados: de referencia y de cálculo. Los parámetros de referencia nos sirven para determinar las condiciones de prueba y el modo de operación de la Unidad, como por ejemplo la demanda de generación eléctrica, los principales controles de la caldera, etc. Los parámetros de cálculo intervienen directamente en la determinación de las pérdidas energéticas de la caldera.

6.2 Adquisición de Datos del SCID

El SCID realiza la adquisición de datos de las señales analógicas, digitales y de pulsos procedentes de los elementos del proceso (transmisores, interruptores, contactores, finales de carrera, etc.) de los sistemas de la unidad. La adquisición de datos se realiza en los módulos de entrada/salida, donde las señales se convierten en señales digitales adecuadas para el manejo por los controladores del sistema.

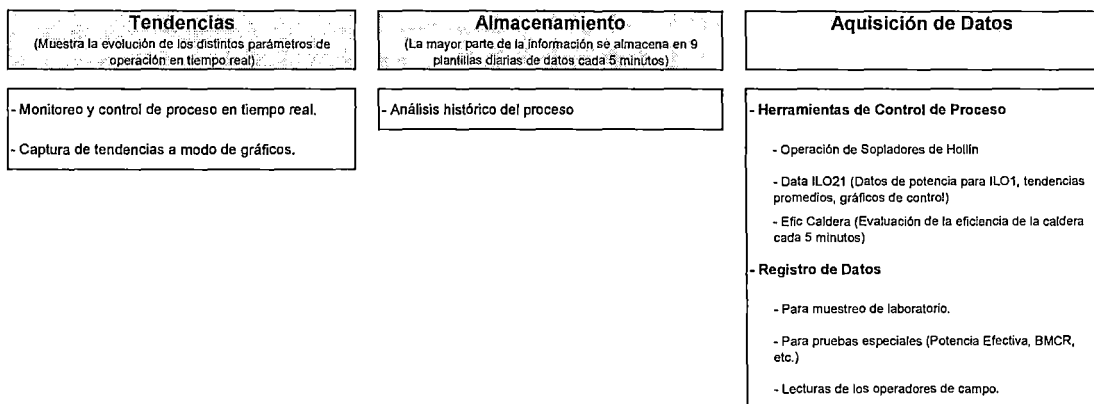


Figura 6.1. Estrategia de Manejo de la Información Reportada por el SCID

Los datos adquiridos por el SCID tiene distintos usos en las diversas escalas de almacenamiento, ya que estos se muestran en tiempo real en las pantallas de control (gráficos de proceso), tendencias de la evolución de diversos parámetros en el tiempo (tendencias definidas por el usuario) y finalmente el almacenamiento de todos los parámetros tomados cada intervalo de tiempo (desde datos cada minuto a datos cada 5 minutos), siendo la estrategia de almacenamiento diferente para cada caso (datos puntuales o datos promedios cada 5 minutos).

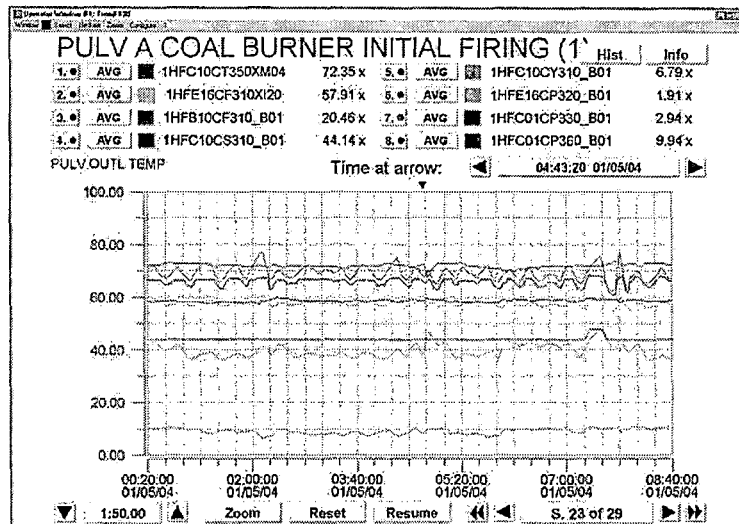


Figura 6.2. Tendencia de parámetros del Pulverizador A

6.2.1 Parámetros de Cálculo

6.2.1.1 Flujo de Carbón

Es un parámetro necesario en la determinación de los créditos de la caldera, como se mencionó, este es dosificado al pulverizador mediante un alimentador gravimétrico el cual mide el flujo de carbón a través de celdas de carga.

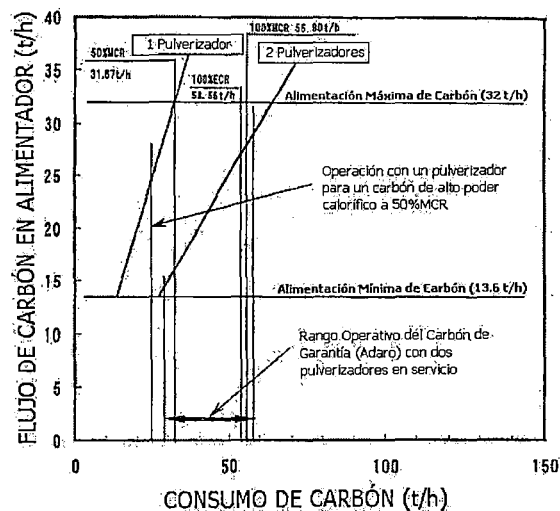


Figura 6.3. Variación del flujo de carbón en el alimentador.

El flujo de carbón varía inversamente proporcional al poder calorífico para una misma carga, el flujo variará también en función del número de pulverizadores en servicio.

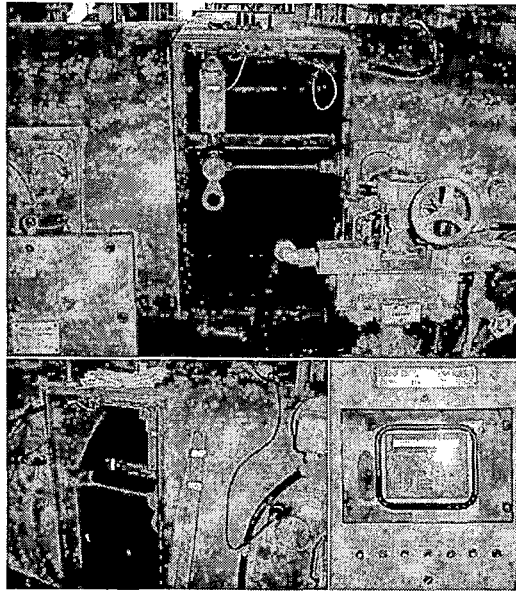


Figura 6.4. Transductor de flujo de carbón a través del alimentador.

6.2.1.2 Gases al Ingreso de la Chimenea

El muestreo de gases realizado por Laboratorio (con el Orsat) sólo incluye la determinación de oxígeno y dióxido de carbono, mientras que para el monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (referenciados como SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x) son monitoreados por un analizador marca CODEL en tiempo real y reportado al SCID.

El analizador de gases, marca CODEL de la serie 3000 usa un sistema estándar montado en un tubo que cruza el ducto de gases, este analizador es capaz de medir simultáneamente hasta 3 diferentes gases (más el vapor de agua si es requerida).

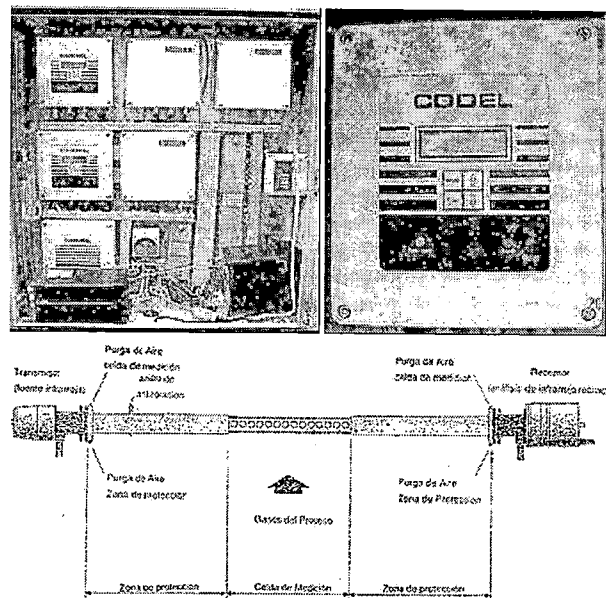


Figura 6.5. Analizador de Gases al Ingreso de la Chimenea

Esta configuración no requiere la extracción de una muestra de la corriente del gas y hace su medición analizando la forma en la que la radiación infrarroja transmitida a través de la celda de medición, es modificada por los gases presentes. A medida que la celda de medición cubra la mayor parte del ancho del ducto o chimenea, se obtiene un resultado promedio de la medición.

Este analizador también muestra el valor del oxígeno y material particulado ingresando a la chimenea.

Tabla 6.1. Resumen de los Parámetros de Cálculo por Tipo de Carbón

Carbón	Flujo			Temperaturas			Motores Eléctricos					
	MrF t/h	mCO mg/m3N	mNOx mg/m3N	TMnAEn °C	TFgLv-1 °C	TFgLv-2 °C	Tensión kV	I-VAP A	I-Pulv.A A	I-Pulv.B A	I-Pulv.C A	I-VRG A
IDADS	54.5	39	0	24	129	129	6.60	62.2	45.6	(*)	45.8	31.6
VEPDS	43.6	17	509	26	143	128	6.76	55.5	47.7	45.5	46.7	27.3
COCED	50.4	82	434	29	142	126	6.75	59.9	44.5	46.5	45.4	36.8
COCEC	46.9	48	365	27	143	128	6.75	57.3	45.5	45.8	46.0	30.5
COLLS	46.6	143	417	25	141	125	6.77	57.6	48.2	46.1	46.1	31.0
COLJS	44.1	89	454	27	142	127	6.79	55.9	49.1	46.7	46.0	34.1
AUCUS	46.9	173	437	29	149	133	6.78	57.2	50.7	49.0	46.8	32.0
M3100	46.2	117	216	25	141	126	6.75	58.2	46.3	45.2	46.0	25.7
M4800	49.1	90	449	26	145	129	6.71	58.4	44.6	46.0	45.4	28.7
M5800	47.7	128	458	26	146	130	6.75	56.9	44.3	(*)	45.5	29.0

(*) No se cuenta con los datos necesarios.

6.2.1.3 Temperaturas de Aire y Gases

Las temperaturas del sistema de aire y gases son tomadas en diversos puntos del proceso mediante termocuplas que reportan su señal al SCID. Las más importantes en la determinación de las pérdidas energéticas son:

- Aire a la salida del Ventilador de Tiro Forzado
- Gases a la salida del Calentador de Aire (2 termocuplas situadas transversalmente al ducto de gases). También se tienen termocuplas de indicación local para el sistema contra incendio del calentador de aire.



Figura 6.6. Medición de temperatura para los gases a la salida del calentador de aire.

Adicionalmente se monitorean y registran, como referencia del análisis, las siguientes temperaturas:

- Gases a la salida del economizador
- Aire Primario al ingreso del pulverizador
- Mezcla Aire Primario / Carbón a la salida del pulverizador

6.2.1.4 Energía Eléctrica de Auxiliares de Caldera

Determinar el consumo de energía eléctrica de cada equipo auxiliar de la caldera resulta un trabajo que toma mucho tiempo por la cantidad de motores existentes de pequeño consumo. Por esto se ha priorizado la determinación del consumo de los siguientes equipos por estar dentro del volumen de control: Ventilador de Aire Primario, Ventilador de Recirculación de Gases, y Pulverizadores A, B o C.

La medición del consumo se realiza de forma indirecta a través de la medición de la corriente de cada motor (mediante transformadores de corriente) y la tensión en la barra de alimentación, nominalmente 6.9 kV (mediante un transformador de tensión)

Adicionalmente, como referencia se toma registro de las corrientes del Ventilador de Tiro Forzado y de Tiro Inducido, no incluidos en el cálculo por estar fuera del volumen de control.

Tabla 6.2. Cuadro de Eficiencia y Factor de Potencia de Motores de 6.9 kV

VAP			Pulverizador			VRG		
Corriente (A)	Eficiencia (%)	fdp (%)	Corriente (A)	Eficiencia (%)	fdp (%)	Corriente (A)	Eficiencia (%)	fdp (%)
27.2	92.6	69.8	37.8	89.2	36.3	16.1	92.3	63.3
42.9	95.4	85.5	45.3	93.4	57.9	24.4	95.1	81.3
61	96.1	89.6	55.7	94.5	69.9	34.2	95.6	86.4
80.5	96.2	90.4	67.9	94.7	76.1	45	95.5	87.6
101.4	96	89.9	81.8	94.5	79.2	56.9	95	87

6.2.2 Parámetros de Referencia

De todo el universo de variables reportadas al SCID del proceso de combustión y transformación de agua en vapor de la caldera, se han escogido las más relevantes para el control de la eficiencia de la Caldera.

Tabla 6.3. Resumen de los Parámetros de Referencia (Aire, Oxígeno y Control)

Carbón	Aire	Oxígeno			Estaciones de Control			
	MrA tn/h	O2 Eco-A %	O2 Eco-B %	O2 AH %	BM %	TM %	BTU MJ/kg	O2 %
IDADS	(*)	3.4	3.6	4.9	(*)	(*)	(*)	(*)
VEPDS	457	3.8	3.6	5.1	86	94	28	53
COCED	446	3.9	3.7	5.2	86	94	24	47
COCEC	448	3.6	3.4	5.2	84	95	26	51
COLLS	458	4.2	3.9	5.3	86	95	26	53
COLJS	452	4.3	4.1	5.2	84	94	28	53
AUCUS	456	4.2	3.8	5.3	84	94	26	55
M3100	459	4.1	3.7	5.3	86	94	27	54
M4800	441	3.3	3.5	5.2	85	94	25	47
M5800	449	4.6	4.2	5.3	85	95	25	52

(*) No se cuenta con los datos necesarios.

6.2.2.1 Oxígeno a la Salida del Economizador

Para el control continuo de las pérdidas energéticas en la Caldera se tiene analizadores de oxígeno en tiempo real. El SCID cuenta con dos analizadores en el ducto de salida del economizador, los cuales sirven para el lazo de control del exceso de aire, y uno al ingreso de la chimenea.

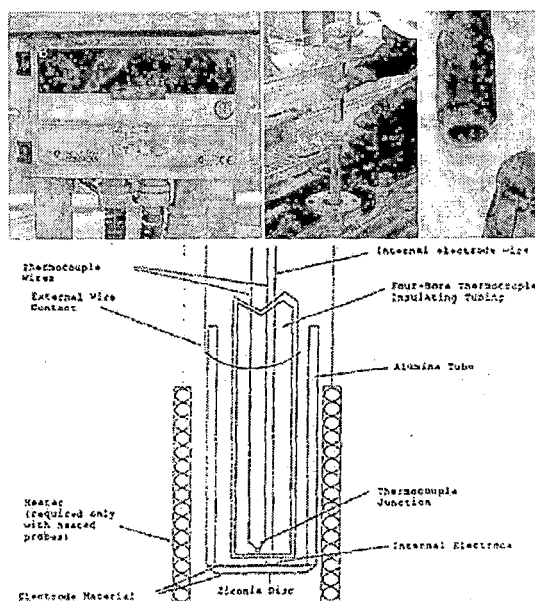


Figura 6.7. Analizador de Oxígeno a la Salida del Economizador

El analizador reporta el porcentaje de oxígeno (O_2) al SCID medido en base seca. La señal de salida del analizador es suministrada por una sonda de oxígeno de electrolito sólido que contiene un elemento de zirconio y un termopar.

6.2.2.2 Flujos de Aire

La medición de los flujos de aire primario (para cada pulverizador) y aire secundario se realiza mediante alerones que permiten medir la presión total y estática del flujo. Esta es enviada a un transmisor de presión diferencial que lo reporta al SCID. Este transforma la presión diferencial en flujo de aire (corregida por temperatura).

6.2.2.3 Parámetros de Agua y Vapor

Se toman lecturas de temperatura y presión en los distintos puntos del sistema de agua y vapor de la caldera, siendo los puntos más importantes para el control de la eficiencia de la caldera:

- Agua de alimentación a la caldera (AAI)
- Vapor Sobrecalentado (SC)
- Vapor Recalentado Frío (RCf)
- Vapor Recalentado Caliente (RCc)

Adicionalmente se toman lecturas de los flujos de agua ingresando a la caldera:

- Agua de alimentación (AAI)
- Atemperación del vapor sobrecalentado (At-SC)

- Atemperación del Vapor recalentado (At-RC)

Tabla 6.4. Resumen de los Parámetros de Agua y Vapor

Carbón	Flujo			Temperatura				Presión			
	AAI tn/h	At-SC tn/h	At-RC tn/h	AAL °C	SC °C	RCf °C	RCc °C	AAI MPa	SC MPa	RCf MPa	RCc MPa
IDADS	366	17	(*)	272	539	333	539	17.72	16.82	3.73	3.57
VEPDS	390	38	0	271	539	338	540	17.70	16.79	3.76	3.61
COCED	400	38	1	267	539	320	537	17.73	16.86	3.80	3.64
COCEC	399	38	1	269	539	327	539	17.72	16.84	3.81	3.64
COLLS	401	36	1	269	539	330	540	17.71	16.83	3.79	3.63
COLJS	394	38	1	268	539	322	539	17.70	16.85	3.81	3.65
AUCUS	392	40	2	268	539	321	540	17.73	16.89	3.81	3.64
M3100	364	38	1	271	539	339	540	17.69	16.81	3.81	3.61
M4800	393	40	5	266	539	338	542	17.67	16.84	3.79	3.62
M5800	397	40	5	266	539	338	541	17.70	16.85	3.78	3.62

(*) No se cuenta con los datos necesarios.

6.2.2.4 Parámetros de Pulverización

El rendimiento del pulverizador es muchas veces la causa del incremento de las pérdidas de la caldera, por lo que el monitoreo y regulación de sus parámetros operativos es una tarea muy importante en el control de la eficiencia.

Entre los principales parámetros de control del pulverizador, registramos:

- Velocidad del Clasificador Rotativo (CR)
- Presión Hidráulica lado vástago y lado émbolo ($Ph_{(V/E)}$)
- Temperatura de salida de mezcla aire/carbón y de ingreso de aire ($T_{(S/E)}$)
- Presión de salida de la mezcla Aire Primario / Carbón (Ps)
- Ratio, relación entre la caída de presión del aire antes y después de la cama de carbón y el flujo de aire primario (R)
- Flujo de Aire Primario (Ap)

Tabla 6.5. Resumen de los Parámetros de Pulverizadores A y C

Carbón	Pulverizador A						Pulverizador C					
	CR	Ph(V/E)	T(S/E)	Ps	R	Ap	CR	Ph(V/E)	T(S/E)	Ps	R	Ap
	rpm	MPa	°C	kPa	-	t/h	rpm	MPa	°C	kPa	-	t/h
IDADS	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)
VEPDS	46	10/3	75/166	2.1	2.5	59	48	10.1/3.2	75/159	2.2	2.5	61
COCED	49	11.5/3	74/217	2.5	2.6	63	50	11.7/3.1	75/211	2.6	2.4	63
COCEC	48	11.2/3	73/190	2.3	2.5	61	49	10.9/3.1	75/191	2.4	2.4	62
COLLS	48	10.3/3	73/206	2.3	2.5	61	51	11.9/3.1	77/203	2.3	2.6	61
COLJS	45	10/3.1	72/177	2.2	2.5	59	50	12.5/3.1	78/162	2.2	2.5	60
AUCUS	48	10.3/3	72/187	2.3	2.9	61	50	12.6/3.1	78/177	2.4	2.7	62
M3100	48	11.3/3	71/191	2.3	2.6	60	49	10.5/3.2	75/189	2.2	2.7	61
M4800	49	11.5/3	75/203	2.4	2.5	62	50	11.5/3.1	75/198	2.6	2.4	63
M5800	50	11.6/3	75/194	2.2	2.4	61	50	11.5/3.1	75/178	2.4	2.3	62

(*) No se cuenta con los datos necesarios.

6.2.2.5 Estaciones de Control

Las estaciones de control son puntos en los lazos de control automático que nos permiten ejercer control manual sobre uno o varios puntos del proceso. Estas estaciones de control finalmente envían la orden análoga a los actuadores u otras estaciones (sean dampers de aire o gases, velocidad de motores, etc.)

Se ha seleccionado como referencia las siguientes estaciones:

- Boiler Master ó Maestro de Caldera, que se encarga de demandar el flujo de combustible y aire en función de la carga y la desviación de presión de vapor principal.
- Estación de O₂, que ajusta la posición del damper del ventilador de tiro forzado para regular el exceso de aire controlando el porcentaje de oxígeno en los gases de escape a la salida del calentador de aire.
- BTU Correction, estación puramente manual que permite, al Operador de Control, ajustar el poder calorífico del carbón usado para evitar desviaciones

en los lazos de control de la caldera al disminuir o aumentar el flujo de carbón por poder calorífico.

Adicionalmente se registra la posición de los dampers de succión de los principales ventiladores del sistema de aire y gases.

6.3 Lecturas de Campo

Son lecturas tomadas por el operador de caldera debido a que no son reportadas al SCID. Estas se toman al inicio y fin del muestreo de la caldera.

6.3.1 Parámetros Ambientales

Los parámetros ambientales son muy importantes, sobre todo al momento de corregir los cálculos de eficiencia a condiciones normalizadas.

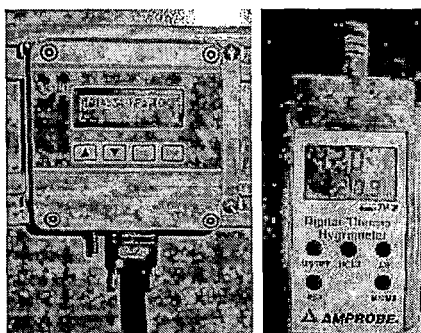


Figura 6.8. Barómetro y Indicador de temperatura y humedad relativa

Adicionalmente intervienen en el cálculo. Los parámetros tomados son:

- Temperatura ambiente (succión del Ventilador de Tiro Forzado)
- Humedad Relativa (succión del Ventilador de Tiro Forzado)

- Presión atmosférica (barómetro digital instalado en el edificio de turbina)

6.3.2 Temperatura a la Salida del Hogar

Esta temperatura se toma a los gases producto de la combustión a la salida del hogar (ingreso a los primeros serpentines de tubos del sobre calentador secundario). La lectura es local debido al limitado tiempo que puede estar expuesta la termocupla a la temperatura de proceso (aproximadamente 1000°C)



Figura 6.9. Termocupla para temperatura de gases a la salida del hogar

6.3.3 Inyección de Agua al Pulverizador

Es práctica usual solicitar al operador de caldera regular la inyección de agua al pulverizador, principalmente por control de la vibración del pulverizador, por pulverización de carbones secos o duros; también influye el desgaste de las ruedas del pulverizador y la fuerza de molienda (presión hidráulica).

Este parámetro sólo tiene indicación local, por lo que el operador de caldera toma la lectura de flujo cada dos horas de manera continua.

6.4 Muestras de Laboratorio ILO21

Son actividades realizadas por personal de la sección de Laboratorio ILO21, con el objetivo de obtener una muestra representativa del carbón a los silos, como los productos intermedios del proceso de combustión de carbón. Esta muestra les permitirá realizar un análisis cuyos resultados se emplean en la determinación de las pérdidas energéticas de la Caldera.

6.4.1 Carbón a los Silos

El carbón proveniente de las canchas de carbón a los silos de la caldera emplea un sistema de fajas transportadoras para ser transportado.

El transporte de carbón tiene instalados en las torres de transferencia 2 y 5 (para descarga de carbón a canchas y carga de carbón a silos respectivamente) sistemas de toma de muestras, que automáticamente con el arranque de la faja recoge una muestra de 20-25 kg por cada 10000 t de carbón, con un tamaño de grano menor que 10 mm.

Cada estación consiste principalmente en recogedor de muestras de tipo martillo, cinta de alimentación, trituradora de rodillos gemelos, separador de muestras rotativo, recogedor de la muestra final y canaletas de descarga.

Laboratoristas retiran diariamente la muestra final y el rechazo.

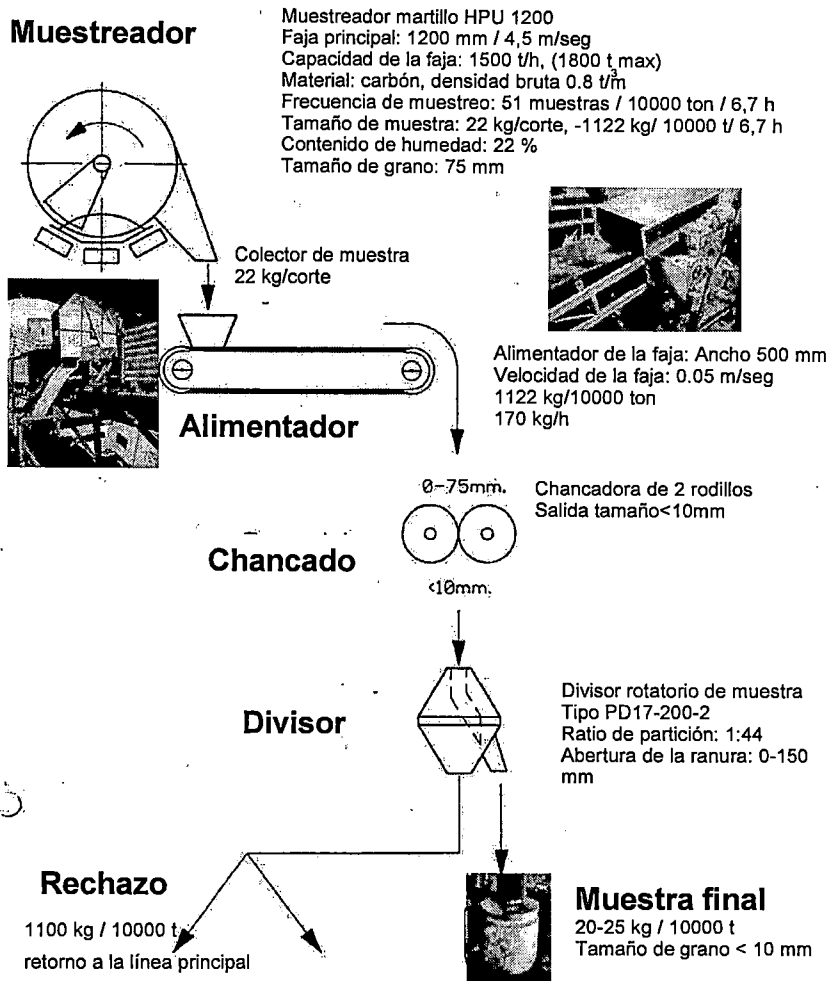


Figura 6.10. Sistema de Muestreo de Carbón

6.4.2 Carbón Pulverizado

Obtener una muestra representativa de carbón pulverizado en la cual se evaluará el porcentaje de fineza del carbón y la humedad del pulverizado. Indirectamente ayuda a determinar la distribución del flujo de carbón en los ductos a los quemadores.

El procedimiento se enmarca en las normas ASTM D-197-82 e ISO 9931. Se emplean los siguientes equipos principales:

- Muestreador de pulverizado PFS (consta entre otros de una lanza de muestreo radial con 4 orificios en 2 tubos paralelos por donde se colecta la muestra). El cabezal es la parte extrema de la lanza en la cual están montados los orificios colectores de muestra, de movimiento axial, ubicados a diferentes radios (86.3, 149.8, 192.76 y 228.38 mm)
- Manguera para alimentación de aire de servicio al supresor de polvo y para suministro de aire de alimentación al equipo muestreador.
- Balanza.
- Cronómetro

Es necesario determinar el peso de muestra requerido, para esto se emplea la siguiente relación:

$$\frac{w}{W \cdot 10^6} = \frac{4 \cdot a \cdot n \cdot t}{\pi \cdot D^2 \cdot 3600 \cdot N}$$

w	:	Masa de carbón pulverizado muestreado	[g]
W	:	Flujo de carbón por el alimentador	[t/h]
a	:	Área de la tubería de muestreo (19.63 mm ² por hoyo)	[mm ²]
D	:	Diámetro del ducto de carbón pulverizado a quemadores (488 mm)	[mm]
N	:	Número de ductos por pulverizador (4)	
n	:	Puntos de muestreo (16)	
t	:	Tiempo de muestreo (4 minutos)	[min]

La preparación del equipo de muestreo se realiza siguiendo los siguientes pasos:

- Montar el muestreador (lanza, mangueras) y el equipo auxiliar incluyendo la botella en el ciclón, energizar el equipo.
- Habilitar el suministro de aire mediante al apertura de la válvula de control del equipo (1/8 de vuelta)
- Poner el equipo en modo de calentamiento.
- Ajustar el valor de consigna de la temperatura (debe de ser igual a la temperatura del carbón dentro de la tubería)
- Habilitar el suministro de aire de servicio (6 bar) hacia el conector rápido del supresor de polvo o sello de aire del punto de muestreo.
- Sacar el tapón del punto de muestreo usando la llave francesa (ser cuidadoso)
- Antes de insertar la lanza de muestreo, verificar que la temperatura del calentador de aire haya alcanzado el punto de consigna, antes de la inserción.
- Insertar, en el ducto de carbón, la lanza de muestreo a través del punto de muestreo con el cabezal totalmente extendido (el indicador de alineamiento paralelo al eje de la tubería, en sentido contrario al flujo de carbón) y asegurar la lanza con el ducto)
- Verificar que el giro del muestreador sea libre dentro de la tubería de carbón y que el indicador de alineamiento concuerde con la posición “cero” del rodillo de giro.
- Cerrar el suministro de aire del sello de aire o supresor de polvo.

- Girar conjuntamente, el indicador de alineamiento con el rodillo hasta que el indicador de flujo este en el mismo sentido que el flujo del carbón dentro de la tubería.

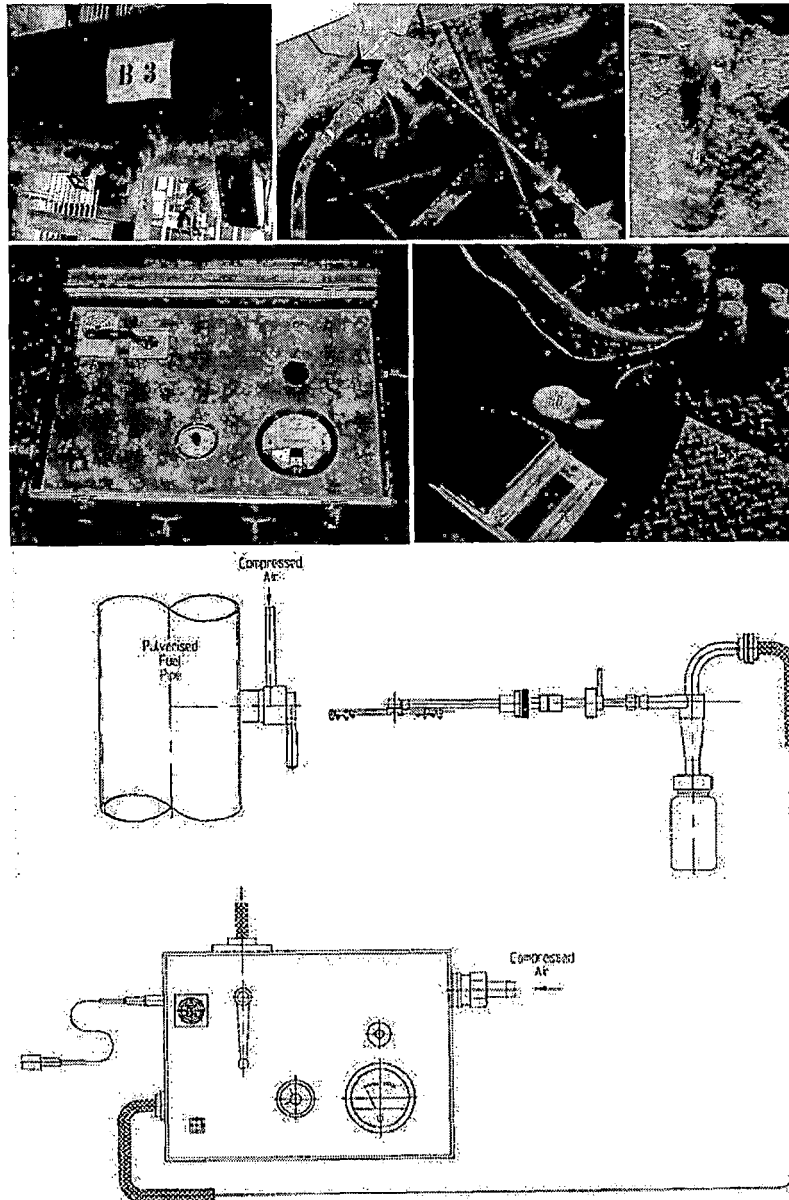


Figura 6.11. Muestreo de Carbón Pulverizado en el Ducto de Salida B3

La secuencia de acciones para la toma de la muestra es:

- Cambiar el modo del equipo (de calentamiento a muestreo), inmediatamente presionar el botón del temporizador
- Regular la presión diferencial del equipo muestreador (11 a 12 $\text{cm}_{\text{H}_2\text{O}}$) y mantenerla constante.
- El temporizador emitirá un sonido y el encendido del botón cada 15 segundos, lo cual indica que el rodillo debe de ser virado a la siguiente muesca.
- Repita hasta llegar a las 16 posiciones del plan de muestreo.
- Para finalizar el muestreo, poner el equipo en modo calentamiento simultáneamente con el giro del indicador de alineamiento en sentido del flujo del carbón, cerrar parcialmente la válvula de control de diferencial de presión a 1/8 de vuelta de apertura.

Finalmente se debe remover la lanza y la muestra:

- Con el rodillo y el indicador de alineamiento en posición “cero”, abrir el suministro de aire al supresor de polvo o sello de aire del punto de muestreo.
- Desenroscar la unión entre la lanza y el punto de muestreo.
- Extraer la lanza de muestreo.
- Reponer el tapón del punto de muestreo y cerrar el suministro de aire del supresor de polvo.

- Desmontar la botella colectora de muestra del ciclón y luego pesarla, tapar y rotular la botella.
- Limpiar cuidadosamente las entradas al sistema de vacío (cada 2 tuberías muestreadas y al final el muestreo general)

En el muestreo de carbón pulverizado es importante que la velocidad en el equipo muestreador sea la misma que en el ducto.

Si el peso de muestra se encuentra entre el 90 y 110% del peso calculado se considera un muestreo y ratio de colección satisfactorio. Si el peso de la muestra se encuentra fuera del rango, tomar 1 o 2 muestras más y pesarlas, ajustando la presión diferencial, de repetirse el peso, se considera tomada la muestra.

6.4.3 Oxígeno y Dióxido de Carbono en los Gases de Escape

Se busca obtener una muestra representativa de la distribución de oxígeno y dióxido de carbono en los gases de escape a la salida del economizador y salida del calentador de aire, mediante el Orsat.

Se emplean los siguientes equipos:

- Lanza muestreadora
- Tobera de succión de gases
- Manguera de jebe
- Bomba de succión

- Papel filtro Watman 25 mm x 90 mm Silica Glass
- Globos colectoras de muestra (gases)

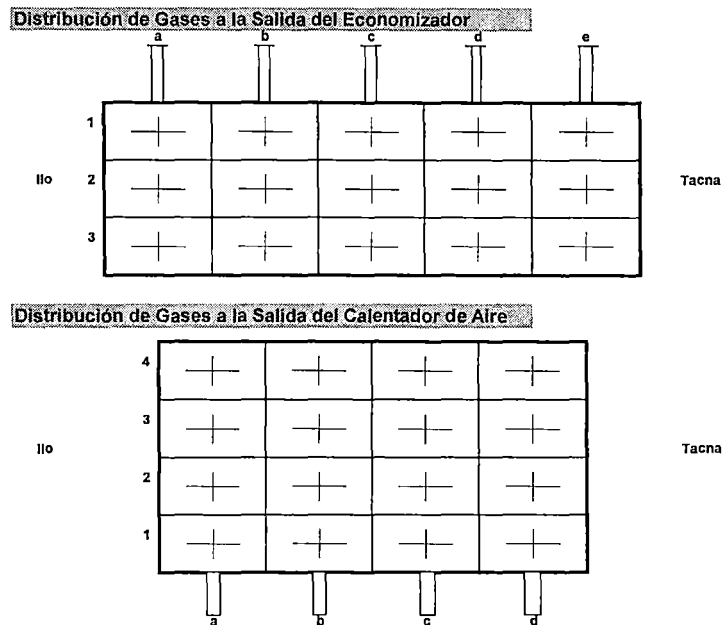


Figura 6.12. Distribución de los Ductos de Gases para la Toma de Muestras

El muestreo se realiza mediante las siguientes actividades:

- Asegurar el papel filtro y la tobera de succión a la lanza.
- Conectar las mangueras de las lanzas a la succión de las bombas.
- Ubicar los puntos de muestreo y retirar las tapas de seguridad.
- Introducir las lanzas de muestreo y asegurarlas.
- Encender las bombas de vacío.
- Tomar la muestra en cada sección marcada en la lanza de muestreo:

- Purgar la lanza de muestreo por unos minutos.
 - Purgar el globo colector de gases tres veces.
 - Tomar la muestra en el punto seleccionado evitando el ingreso de aire al globo.
 - Asegurar el globo para evitar fuga de gases.
- Apagar la bomba de vacío.
 - Tapar el punto de muestreo.

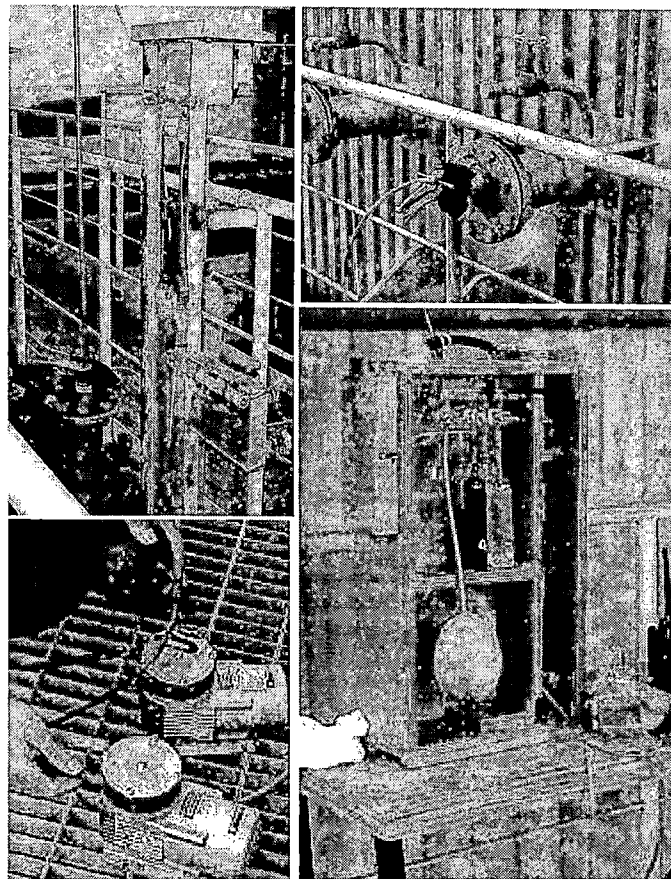


Figura 6.13. Muestreo de Gases a la Salida del Economizador

6.4.4 Ceniza en los Gases de Escape

El muestreo de la ceniza en los gases de escape se realiza con la finalidad de determinar posteriormente el porcentaje de carbono inquemado.

Este muestreo se realiza en la salida del economizador en 5 puntos de muestreo transversales al ducto de salida.

Se emplean los siguientes equipos:

- Lanza de muestreo (tubo de acero inoxidable que sirve para coleccionar la muestra de ceniza volante por filtración)
- Tobera de succión (tobera que se usa para la succión de cenizas y que se inserta dentro del ducto para tomar muestra)
- Manguera de jebe
- Medidor de flujo de gases
- Solución de peróxido de hidrógeno 3%
- Cronómetro
- Botella de absorción de SO₂
- Botella separadora de humedad
- Bomba de succión
- Filtro Watman 25 mm x 90 mm Silica Glass

- Porta muestras

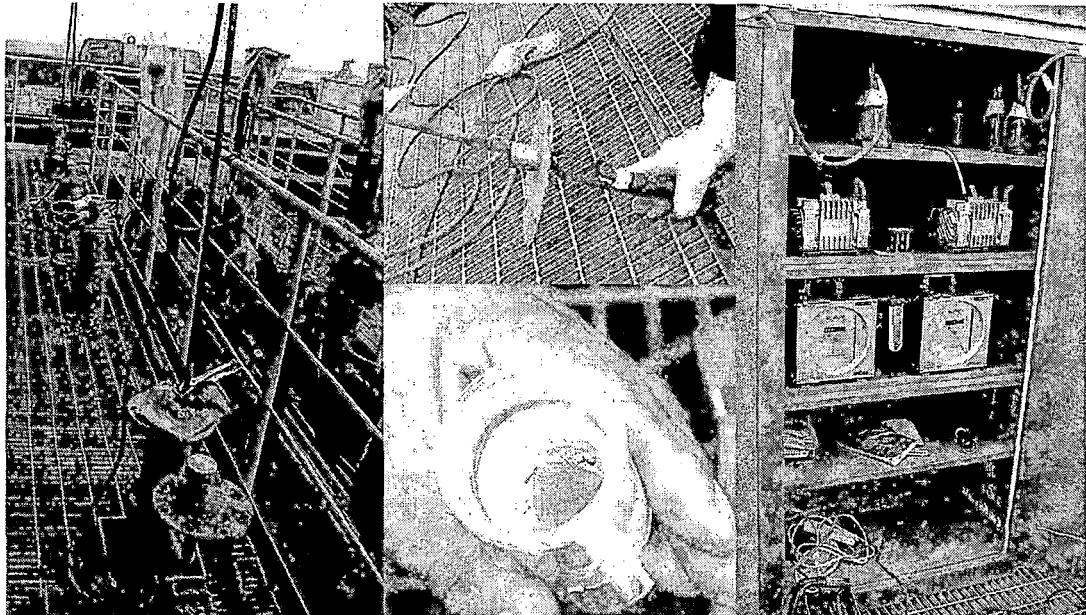


Figura 6.14. Etapas del Muestreo de Ceniza a la Salida del Economizador

La secuencia de tareas de muestreo es la siguiente:

- Acondicionar las lanzas de muestreo y los filtros Watman.
- Asegurar el papel filtro en el cilindro metálico.
- Verificar la instalación de los equipos de acuerdo al siguiente orden:
 - o La manguera de salida de la lanza conectada a las botellas de peróxido de hidrógeno.
 - o Las mangueras de las botellas de peróxido conectadas a las botellas de retención de humedad.

- Las mangueras de las botellas de retención de humedad conectadas al ingreso de la bomba de vacío.
 - Las salidas de las bombas de vacío conectadas a los ingreso de los flujómetros.
- Regular el flujo de trabajo antes de introducir las lanzas, esto flujos deben de ser los mismos en ambos flujómetros.
 - Ubicar los puntos de muestreo.
 - Retirar las tapas de seguridad de los puntos a muestrear.
 - Introducir las lanzas de muestreo y asegurarlas con alicate de presión en el punto pre-establecido con la dirección del pitot en el sentido del flujo de gases.
 - Encender las bombas de vacío y cambiar la dirección del pitot en sentido contrario al flujo de gases, momento en el cual se inicia el conteo del tiempo de muestreo.
 - Tomar la muestra en cada sección establecida en la lanza de muestreo, tres secciones de acuerdo a:
 - Para carbones con menos de 5% de cenizas 20 min. por sección, aprox.
 - Para carbones con más de 5% de cenizas 10 min. por sección, aprox.

- Apagar la bomba de vacío y retirar la lanza.
- Retirar el Filtro Watman, revisar que la cantidad de ceniza sea suficiente (de lo contrario volver a tomar las muestras) y depositarlo dentro de porta muestras utilizando los guantes para superficies calientes.
- Tapar el punto de muestreo.

Tabla 6.6. Resumen de los Muestreos de Gases e Inquemados en la Ceniza.

Carbón	Análisis de Gases (Base Seca)				Inquemados en la Ceniza					
	O2 Eco	CO2 Eco	O2 AH	CO2 AH	a	b	c	d	e	Total
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
IDADS	3.8	15.6	5.3	14.5	(*)	(*)	(*)	(*)	(*)	3
VEPDS	5.0	14.0	6.4	12.6	24	20	17	20	28	21
COCED	3.4	15.2	5.3	13.2	18	12	10	10	19	12
COCEC	4.4	14.7	6.1	13.1	17	13	12	14	20	14
COLLS	5.7	13.8	6.5	13.1	6	4	4	5	9	5
COLJS	4.8	14.4	7.2	12.3	23	15	13	15	25	16
AUCUS	4.7	14.4	6.5	12.7	13	8	8	8	12	9
M3100	4.5	14.6	6.2	13.1	23	19	18	21	28	20
M4800	3.8	15.4	6.1	13.2	15	12	9	7	15	11
M5800	4.0	17.9	5.0	14.6	21	12	10	10	23	13

(*) No se cuenta con los datos necesarios.

6.5 Análisis de Muestras

El objetivo de los muestreos de Laboratorio es tener información del comportamiento de la Caldera y poder ejercer un control de la calidad de los subproductos (carbón pulverizado, cenizas) y rechazos.

6.5.1 Análisis Inmediato del Carbón como Quemado

El análisis inmediato del carbón se realiza en diferentes etapas, tomando la muestra de carbón de la torre 5 de la línea de carga de carbón a silos. Este análisis incluye finalmente la determinación de los componentes del carbón y su poder calorífico.

6.5.1.1 Preparación de las Muestras para Determinar la Humedad

La preparación de las muestras busca tener una porción representativa del carbón enviado a los silos de carbón durante la semana. Se toma como referencia la norma ASTM – D 2013-86 (Método Arbitral)

Para realizar esta actividad se requieren los siguientes materiales: Plancha de acero inoxidable o lona plástica, Pala para homogenización, 02 Bandejas, Chancadora de quijadas, Molino de rodillos, Pulverizador, Rifle (divisor de muestra), Horno para secado al aire, Horno de circulación natural de aire

Las tareas a realizar se resumen en:

- Pesar la muestra obtenida del muestreador automático o sumar el total de muestras obtenidas durante la semana.
- Expandir la muestra en una plancha de acero.
- Conear (formar conos con una pala para homogenizar muestras de grano grueso, mayor a 4.75mm, y peso total mayor de 10 kg) como mínimo dos veces para obtener una buena homogenización, sin eliminar partículas de carbón.
- Cuartear o dividir la muestra para obtener un peso aproximado de 10 kg.
- Colocar la muestra en una bandeja de acero inoxidable.
- Pesar la muestra más la bandeja y anotar este peso inicial.

- Llevar al horno de secado al aire a 30°C, con la finalidad de acondicionar la muestra a temperatura y humedad del ambiente de trabajo.
- Secar la muestra hasta obtener una pérdida de peso de 0.1% por hora entre dos pesadas continuas, el tiempo de secado no deberá de exceder las 18 horas.
- Obtener la diferencia de peso entre el peso inicial y el final (Para cálculo de humedad seco al aire "A")

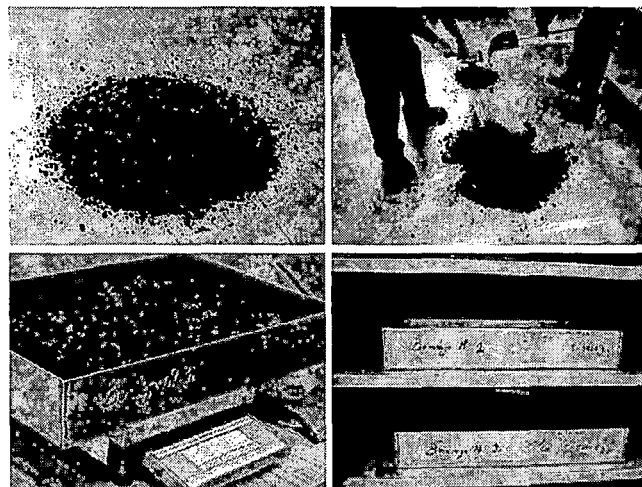


Figura 6.15. Preparación inicial de las muestras de carbón

- Reducir toda la muestra anterior en una chancadora de quijadas, hasta obtener un tamaño de muestra de 4.75 mm, si es posible pasar nuevamente toda la muestra para asegurar el tamaño de muestra.
- Dividir la muestra la muestra en un rifle, hasta obtener entre 2.0 y 2.5 kg. (ésta es la muestra de laboratorio que debe de ser guardado en un recipiente sellado, en caso no se pueda continuar con el proceso de secado)

- Pesar y registrar las bandejas pequeñas de secado y luego distribuir la muestra en forma homogénea a una altura no mayor a 25 mm. (anotar el peso).
- Llevar al horno de secado al aire a 30°C y secar la muestra hasta obtener una pérdida de peso de 0.1 % por hora entre dos pesadas continuas.
- Calcular la pérdida de peso entre el peso inicial y final (porcentaje de pérdida denominado “A”)
- Dividir la muestra en un rifle hasta obtener 2 muestras de 500 gr.
- Una de las muestras de 500 gr. dividir hasta llegar 50gr. (ASTM 3173)
 - Pulverizar el 100% de la muestra bajo malla 60.
 - Homogenizar la muestra del frasco
 - Pesar 1g de muestra en cápsulas de porcelana (3 muestras)
 - Colocar en una estufa a 107°C por el tiempo de 1 hora.
 - Sacar las cápsulas y pasar a un desecador, hasta que la temperatura se estabilice con la medio ambiente (aproximadamente 30min.)
 - Pesar la muestra y la pérdida de peso se denomina humedad residual “R1”
- La otra muestra de 500 gr. pulverizar bajo malla 60. (ASTM 3302)

- Dividir la muestra en un equipo divisor (rifle u otro equipo), hasta obtener 250 gr. de muestra aproximadamente y colocar en un frasco de vidrio cerrado herméticamente.
 - Homogenizar la muestra del frasco
 - Pesar 1 g de muestra en cápsulas de porcelana (3 muestras)
 - Colocar en una estufa a 105°C por el tiempo de 1 hora.
 - Sacar las cápsulas y pasar a un desecador, hasta que la temperatura se estabilice con la medio ambiente (aproximadamente 30min.)
 - Pesar la muestra y la pérdida de peso se denomina humedad residual “R2”.
- Sacar un promedio de las dos humedades R1 y R2

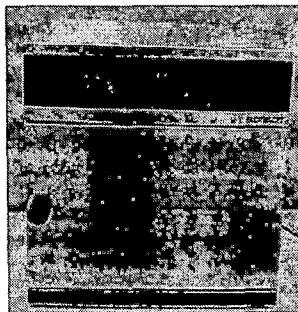


Figura 6.16. Estufa para determinación de Humedad

Esta actividad tendrá una frecuencia semanal (normalmente realizada los días miércoles).

6.5.1.2 Determinación de la Materia Volátil

Este análisis determina el contenido de materia volátil en una pastilla de carbón pulverizado (pasante malla 60).

Los materiales empleados son:

- Horno eléctrico vertical (tubo) de $950\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura.
- Crisol de platino de 10–20mm de capacidad, 25–35mm de diámetro, 30–35mm de altura, o similar.
- Balanza de 0.1 mg de sensibilidad.
- Cronómetro
- Tenazas
- Espátula

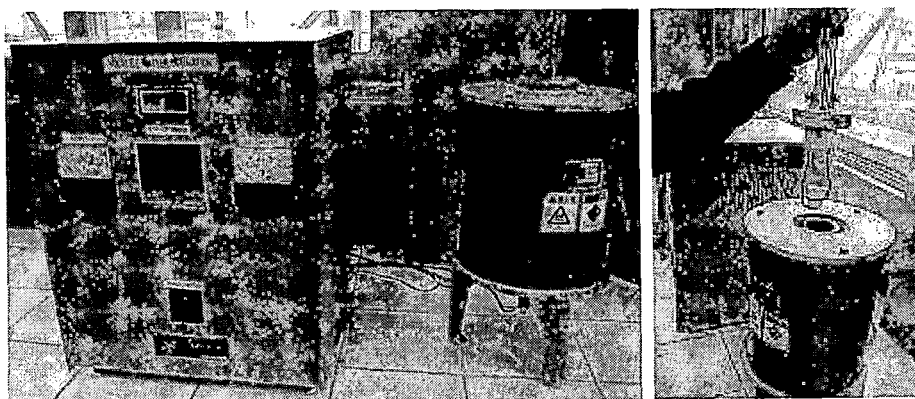


Figura 6.17. Horno Vertical para Determinación de la Materia Volátil

Las actividades realizadas son:

- Elevar la temperatura del horno hasta 950 °C.
- Pesar un crisol con su respectiva cubierta, anotar este peso.
- Transferir al crisol una muestra de aproximadamente 1 g, +/- 0.1 mg y cubrirla rápidamente, anotar el peso de la muestra.
- Introducir crisol en el interior del horno y confirmar la recuperación de temperatura a 950 ±20°C.
- Esperar dos a tres minutos e inspeccionar inmediatamente el crisol sacando rápidamente del horno y colocar nuevamente en el interior del horno.
- Alcanzada los 950°C quemar la muestra por 7 minutos.
- Pasado los 7 minutos, retire el crisol utilizando una pinza de metal y guantes de cuero.
- Dejar enfriar el crisol en un lugar seguro y luego transferir al desecador por 20 minutos.
- Pesar y calcular la pérdida de peso.

Estos pasos permiten determinar la pérdida en peso por la vaporización de la humedad y la materia volátil:

$$Pérdida en Peso [C] = \frac{A - B}{A} \cdot 100\% \quad [\%]$$

$$Materia Volátil = C - D \quad [\%]$$

A : Peso del crisol más cubierta más muestra [g]

B	:	Peso del crisol más cubierta más residuo	[g]
C	:	Pérdida en peso de la muestra	[%]
D	:	Humedad Total del Carbón	[%]

Este análisis tiene una frecuencia semanal (normalmente los viernes), aprovechando las muestras preparadas para la determinación de la humedad.

6.5.1.3 Determinación de la Ceniza

Este análisis determina el contenido de ceniza en una pastilla de carbón pulverizado (pasante malla 60).

Los materiales empleados son:

- Mufla eléctrica para carbón o coke.
- Cápsula de porcelana de 22 mm de profundidad y 44 mm de diámetro, o similar.
- Balanza de 0.1 mg de sensibilidad.
- Cubierta de crisol de porcelana o similar
- Tenazas
- Espátula

Las actividades realizadas son:

- Pesar una cápsula limpia y seca con su respectiva cubierta y anotar el peso respectivo

- Transferir a la cápsula una muestra de aproximadamente $1\text{g} \pm 0.1\text{mg}$, anotar el peso de la muestra.
- Colocar la cápsula conteniendo la muestra en la mufla fría (quitar la cubierta), y calentar gradualmente hasta que la temperatura alcance 450 a 500°C en una hora.
- Continuar el calentamiento hasta alcanzar la temperatura de 700 a 750°C en la segunda hora.
- Continuar quemando a 700 ó 750°C por dos horas adicionales.
- Luego de cumplida las siguientes dos horas, remover la cápsula de la mufla, coloque la cubierta sobre la cápsula y dejar enfriar bajo mínimas condiciones de humedad.
- Pesar.

Estos pasos permiten determinar la pérdida en peso por la combustión del carbón y vaporización de la humedad:

$$\text{Ceniza} = \frac{A - B}{C} \cdot 100\% \quad [\%]$$

A	:	Peso de la cápsula más cubierta más residuo	[g]
B	:	Peso de la cápsula más cubierta	[g]
C	:	Peso de la muestra de carbón empleada	[g]

Este análisis tiene una frecuencia semanal (normalmente los viernes), aprovechando las muestras preparadas para la determinación de la humedad.

6.5.1.4 Determinación del Poder Calorífico

Este análisis determina el poder calorífico en base “como determinado” de una pastilla de carbón pulverizado (pasante malla 60). Se toma de base la norma ASTM-D 5865, 1999.

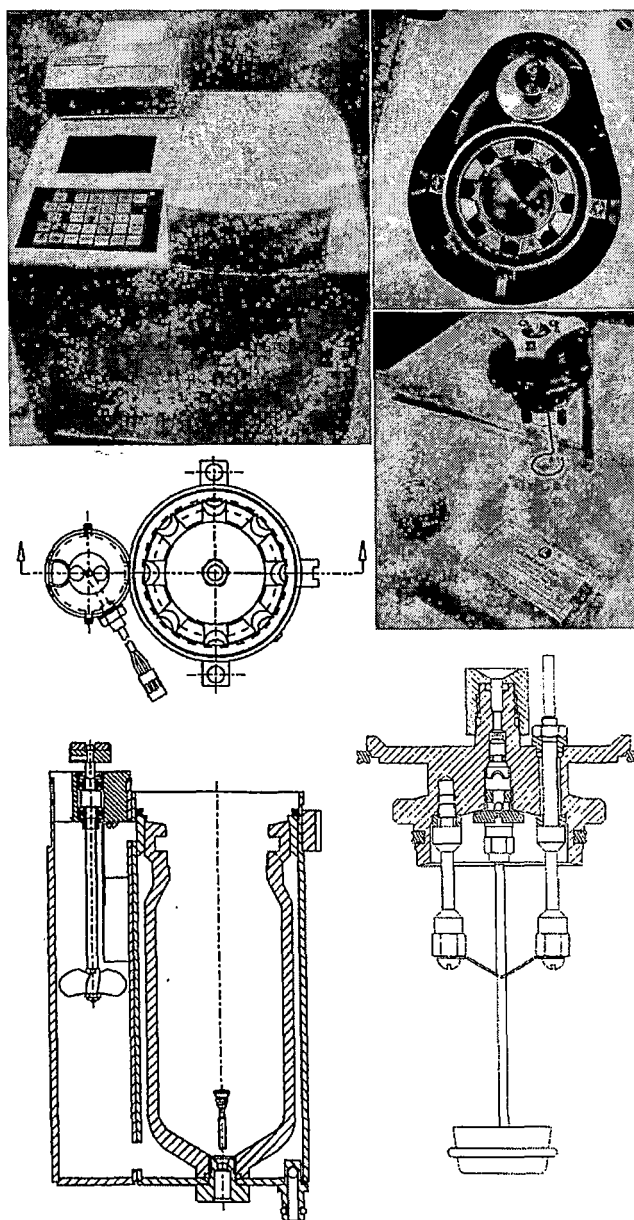


Figura 6.18. Calorímetro Parr

Los materiales empleados son:

- Calorímetro Parr.
- Oxígeno (2500 PSI)
- Nitrógeno (2500 PSI)
- Peletizador
- Balanza de precisión
- Agua destilada
- Ácido benzoico (pastillas)
- Carbonato de sodio en solución
- Erlenmeyer 250 ml.
- Probeta de 100 ml.
- Bureta.
- Papel secador

Las actividades realizadas son:

- Revisar la presión de las botellas de nitrógeno y oxígeno. La presión de salida de la botella de oxígeno no debe ser menor a 440 PSI y la del nitrógeno no debe ser menor a 80 PSI.

- Instalar las mangueras de escape de agua a la botella receptora del lavado (muestra que debe ser analizada) y la manguera de escape de gases conectada al recipiente de expansión.
- Energizar el calorímetro y el enfriador de agua en el tomacorriente que tiene alimentación estabilizada (UPS)
- Encender el calorímetro y la impresora. Esperar a que el equipo se resetee automáticamente
- Verificar que la bomba de circulación de agua esté accionada, caso contrario accionar desde el panel de control.
- Esperar por lo menos 45 min. antes de iniciar el paso siguiente.
- Realizar cuatro prelavados al sistema de combustión, mensaje que aparece en la pantalla.
- Pesar una pastilla de ácido benzoico y colocar en la cápsula de metal previamente tarada.
- Cortar 10 cm. de pabilo (mecha)
- Colocar el pabilo y la cápsula con muestra en el sistema del cabezal de la bomba, de tal forma que el pabilo haga contacto con el fusible y la muestra.
- Llevar todo este sistema hacia la bomba del calorímetro.

- Humedecer los anillos de jebes de la bomba antes de colocar el sistema del cabezal.
- Cerrar cuidadosamente y en el sentido de las agujas del reloj.
- Cerrar la tapa del calorímetro.
- Iniciar la combustión en modo de estandarización presionando “start” en la pantalla.
- Colocar el número de la muestra en el display.
- Colocar el peso de la muestra en el display.
- Iniciar la secuencia de combustión presionando “Enter”.
- Esperar 8 min. para obtener el resultado.
- Al finalizar la combustión, el resultado se imprime automáticamente.
- Verificar el nuevo valor de la capacidad calorífica (EE) y comparar con el valor actual siguiendo los siguientes pasos.
 - o El nuevo valor obtenido de EE no debe de exceder el 0.17% del valor actual.
 - o Si no se cumple el punto anterior, quemar una pastilla más de ácido benzoico y la diferencia entre los dos últimos valores de EE no debe de exceder el 0.21% del valor actual. El promedio de los dos nuevos valores de EE debe estar en +/- 0.13% del valor actual.

- Si no se cumple el punto anterior, quemar dos pastillas más de ácido benzoico, el rango de los cuatro nuevos valores no debe de exceder el 0.33% del valor actual de EE. El promedio de los cuatro nuevos valores de EE debe estar en $\pm 0.08\%$ del valor actual.
 - Si no se cumple el punto anterior quemar dos pastillas más de ácido benzoico, el rango de los seis nuevos valores no debe de exceder el 0.42% del valor actual de EE. El promedio de los seis nuevos valores de EE debe estar en $\pm 0.08\%$ del valor actual.
 - Si no se cumple el punto anterior quemar cuatro pastillas más de ácido benzoico, el rango de los diez nuevos valores no debe de exceder el 0.5% del valor actual de EE. El promedio de los diez nuevos valores de EE debe estar en $\pm 0.04\%$ del valor actual.
 - Si no se cumple el punto anterior, el promedio de los diez últimos valores debe ser usado para la estandarización nueva y el valor que se obtenga no debe de exceder 0.15% del valor actual de EE.
 - Luego de la comprobación de la desviación estándar se procede a quemar la muestra.
- Preparación de la muestra de carbón:
- Pesar aprox. 1 gramo de muestra de carbón bajo malla 60
 - Peletizar esta muestra de carbón.

- Repetir la secuencia desde el 10mo al 21vo paso

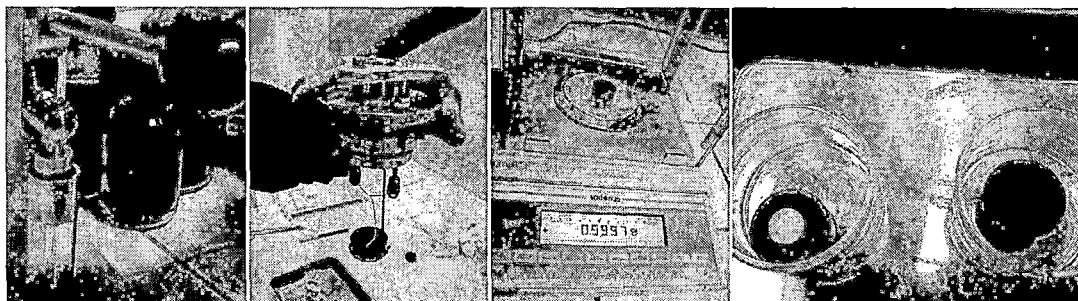


Figura 6.19. Preparación de la Muestra de Carbón

- Repetir la prueba con 2 muestras más.
- La repetibilidad de la prueba entre dos valores, realizado por la misma persona y en el mismo laboratorio no deberá tener un valor superior a 28 cal/gr (Norma ASTM 3286)
- Para finalizar el trabajo con el calorímetro seguir esta secuencia:
 - Apagar el calorímetro.
 - Desconectar de la fuente de alimentación el calorímetro y el enfriador de agua.
 - Cerrar las válvulas de los botellones de oxígeno y nitrógeno.
 - Dejar limpia y ordenada la zona de trabajo

Este análisis tiene una frecuencia semanal (normalmente los viernes), aprovechando las muestras preparadas para la determinación de la humedad.

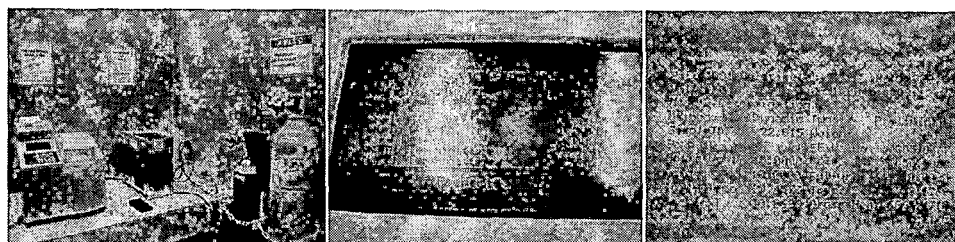


Figura 6.20. Finalización del Trabajo con el Calorímetro Parr.

6.5.2 Determinación de la Fineza de Carbón Pulverizado

Determinar la fineza del carbón pulverizado mediante el análisis granulométrico, para determinar el rendimiento de la molienda del pulverizador. Este análisis es referencial al momento de determinar las Pérdidas Energéticas de la Caldera, pero nos permiten realizar las regulaciones adecuadas para mantener la fineza del carbón dentro de los límites de diseño.

Granulometría es la determinación de los tamaños de grano que se tiene en una muestra, a través de mallas que discriminan el tamaño de las partículas (siendo retenido el peso que queda en la parte superior de la malla, mientras el pasante es el peso que pasa a través de la malla)

Para este análisis se emplean los siguientes equipos:

- Malla # 50 (300um)
- Malla # 100 (150um)
- Malla # 140 (106um)
- Malla # 200 (75 um)

- Vibrador marca Retch o ROTUP
- Balanza de 2200 g. de capacidad ($p=0.001g$)
- Cuarteador y complementos
- Manta para el roleado 0.60m x 0.60m

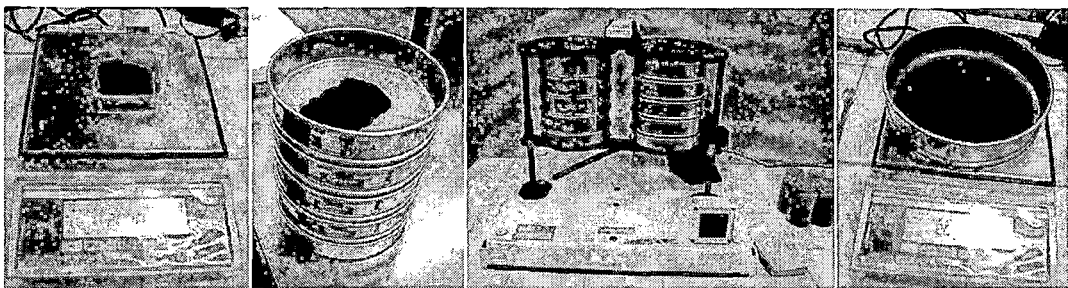
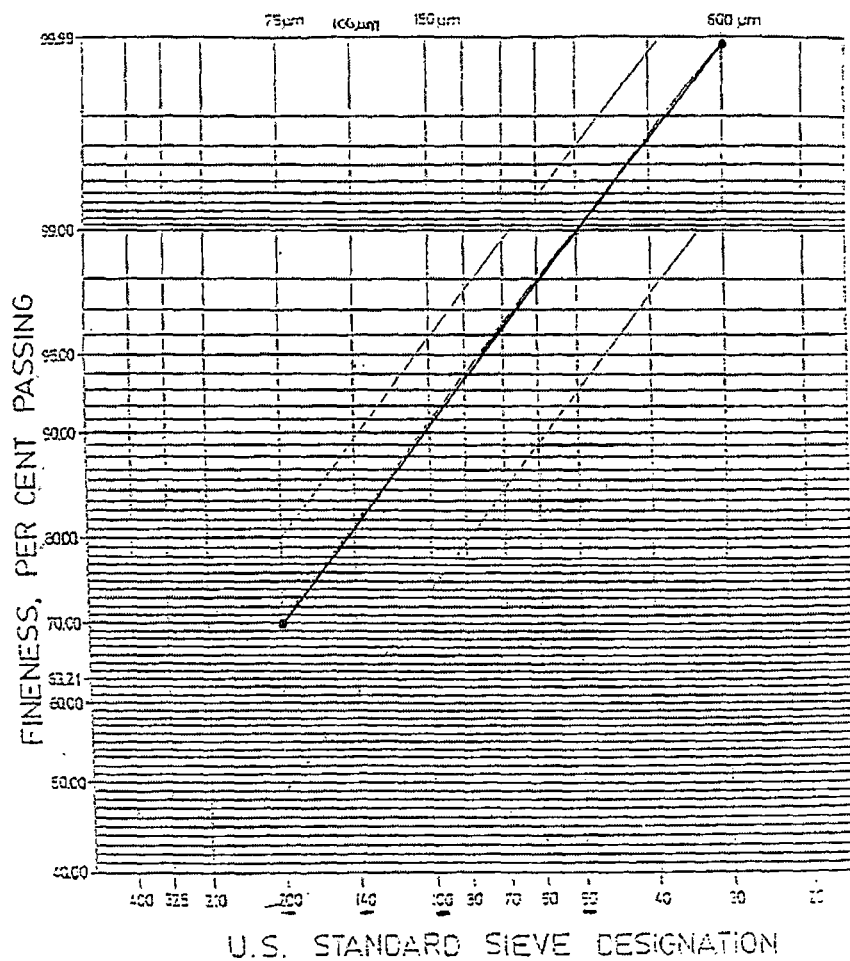


Figura 6.21. Determinación de la Granulometría del Carbón Pulverizado

Las tareas a realizar se resumen en:

- Medir el flujo de carbón en el alimentador.
- Determinar el peso de muestra, según el muestreo de carbón pulverizado.
- Homogenizar la muestra mediante el roleado de 100 veces y luego pasarla a una bandeja.
- Tomar la mitad muestra y pasarla por el cuarteador Jones. Obtener una primera reducción.
- Homogenizar nuevamente en bandeja.
- Reducir por segunda vez la muestra en el cuarteador.

- Guardar la muestra en una bolsa rotulada o frasco de vidrio (muestra testigo)
- Colocar las mallas en el siguiente orden (de arriba hacia abajo): tapa, 50, 100, 140, 200 y base.
- Adicionare 20g de muestra, de la segunda reducción, y poner en servicio el vibrador por 40 minutos
- Luego pesar cada tamiz para obtener el peso de muestra retenido (+) y el pasante (-) de cada malla.



U.S. STANDARD SIEVE DESIGNATION
 Figura 6.22. Carta de Rosin y Rammles

Es muy importante limpiar cuidadosamente la parte inferior de cada malla para quitar las partículas que puedan haberse quedado adheridas antes de pesar las mallas; y, se debe evitar las pérdidas de muestra durante el análisis.

Finalmente se determina el porcentaje, del peso total de la muestra (20g.), que queda retenido y pasante por cada malla. Estos resultados servirán para validar el análisis empleando la carta de Rosin y Rammles, en la cual los resultados deben reflejar una línea recta en la carta.

Tabla 6.7. Resumen del Análisis Inmediato y la Fineza del Carbón Pulverizado.

Carbón	Análisis Inmediato					Fineza (Malla 200)		
	HHVF kJ/kg	MpWF %	MpAsF %	MpVm %	MpFc %	Pulv. A %	Pulv. B %	Pulv. C %
IDADS	22348	23.0	1.0	38.1	38.0	(*)	(*)	(*)
VEPDS	30329	3.7	6.6	37.0	52.6	66	64	65
COCED	27267	10.1	8.0	33.4	48.3	73	72	73
COCEC	28264	8.2	6.9	36.7	48.2	71	70	72
COLLS	27349	9.3	5.8	36.4	48.5	69	68	72
COLJS	29489	6.1	6.6	36.2	51.5	71	73	76
AUCUS	27380	6.0	13.9	31.3	48.8	73	74	74
M3100	27753	7.9	5.4	43.8	42.9	69	70	68
M4800	26321	10.2	11.3	28.8	46.0	78	75	76
M5800	27327	8.5	10.8	29.9	50.8	78	(*)	77

(*) No se cuenta con los datos necesarios.

6.5.3 Determinación de Inquemados en la Ceniza

Este análisis busca conocer el porcentaje de carbono no quemado partir de las muestras de cenizas resultantes de la combustión en el caldero.

Se emplean, entre otros, los siguientes equipos:

- Bolsas de plástico selladas
- Crisoles de porcelana y de vidrio.
- Balanza analítica

- Mufla 815°C
- Bandeja de metal
- Desecador

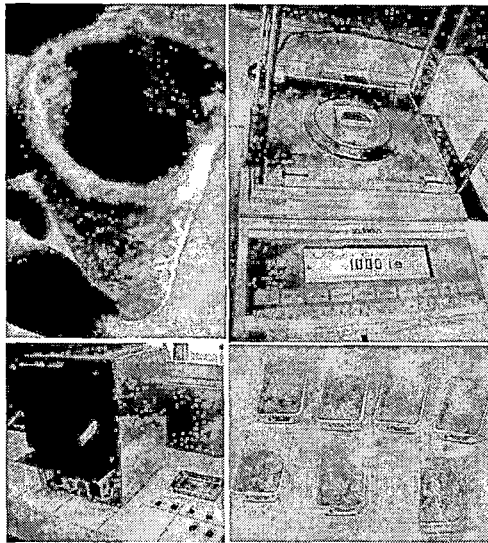


Figura 6.23. Determinación de Inquemados en la Ceniza

Es muy importante el enfriamiento de la muestra en el desecador (30 minutos)

Para determinar el carbono no quemado en la salida del economizador, se realiza lo siguiente:

- Tomar un crisol limpio y seco, pesarlo en la balanza analítica. Anotar el peso del crisol.
- Adicionar al crisol 01 gramo de muestra de cenizas y anotar el peso inicial.
- Homogenizar la muestra en el crisol

- Introducir el crisol, conteniendo la muestra, a la mufla y calcinar la muestra a 815°C por una hora y media.
- Retirar el crisol de la mufla y dejar enfriar unos minutos en el desecador.
- Pesar el crisol con los residuos finales y anotar el peso final.
- Calcular el porcentaje de carbono no quemado de acuerdo a la siguiente relación:

$$\% \text{Carbono no quemado} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \cdot 100\%$$

CAPÍTULO 7

CONTROL DE LA EFICIENCIA

El Control de la Eficiencia de la Caldera ILO21 se inscribe dentro del Control de la Eficiencia de la Unidad ILO21 que tiene el siguiente alcance:

- Eficiencia de Planta.

- Eficiencia de Caldera:
 - Pérdidas Energéticas

 - Pulverización de Carbón

 - Ensuciamiento

 - Relación de Aire Primario/Secundario

 - Exceso de Oxígeno

 - Temperatura de Carbón Pulverizado

 - Eficiencia del Calentador de Aire

- Eficiencia del Ciclo Agua – Vapor:
 - Pérdidas de Agua o Vapor

- Operación del Condensador y Calentadores

7.1 Control de la Eficiencia de Planta

Para el control de la eficiencia de planta se ha desarrollado un diagrama de cálculo configurado en el SCID para su evaluación en tiempo real. En función a la eficiencia de planta se realizan los ajustes necesarios para mantenerla dentro de los límites establecidos para control normal. Adicionalmente se tiene como referencia las pruebas anuales de potencia efectiva y rendimiento de la Unidad solicitadas por el COES.

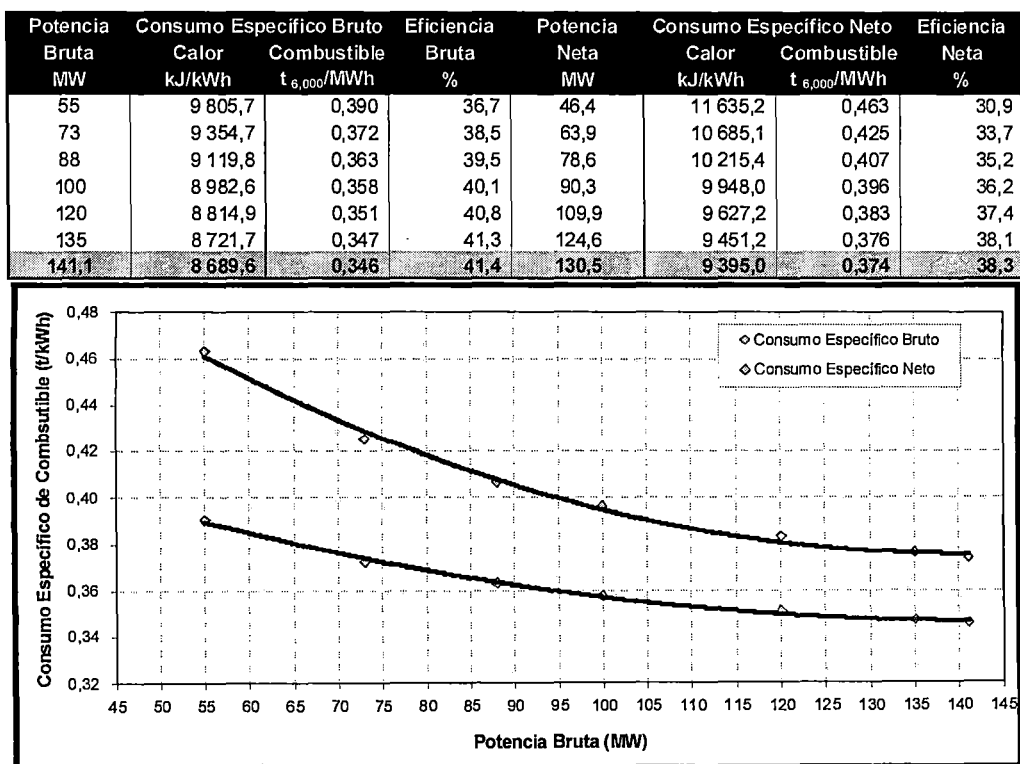


Figura 7.1. Resultados de la Prueba de Potencia Efectiva y Rendimiento – CENERGÍA 2003

Es muy importante el control de los consumos de equipos auxiliares, principalmente energía eléctrica para motores y vapor auxiliar para la planta de agua destilada.

Se han diseñado dos reportes semanales que describen el comportamiento energético de la caldera y de la turbina:

- Reporte de Pérdidas Energéticas de la Caldera
- Reporte de Consumo de Calor de la Turbina

Se ha definido un grupo de parámetros que representan el estado del proceso, a los cuales se les ha asignado un rango de control normal en función de un análisis estadístico en variable discreta de datos del año 2003 (a 135MW). Estos valores de control normal se actualizarán anualmente o teniendo en cuenta mantenimientos mayores de la Unidad ILO21. En algunos casos los rangos de control se han tomado de criterios o valores de diseño.

Tabla 7.1. Parámetros de Control Normal de Tipo Discreto.

Descripción	Unidad	min	max	Descripción	Unidad	min	max
Indicadores de Eficiencia				Consumo de Diesel			
Eficiencia Bruta de Planta (@135MW)	%	39.8		Consumo de Diesel	m3/día		1.3
Eficiencia de Caldera (Entrada - Salida) (@135MW)	%	89.2		Consumo de Agua			
Consumo de Calor Bruto de la Turbina (@135MW)	kJ/kWh		7773	Consumo Total de Agua Destilada	m3/día		338
Pérdidas Energéticas de la Caldera				Consumo Agua de Servicio	m3/día		269
Por Carbono Inquemado	%		1.5	Relación Destilado / Vapor	m3/tn	4.5	7.9
Por Gases de Escape Secos (@135MW)	%	4.7	5.2	Consumo Total de Agua Desmineralizada			
Inquemados en la Ceniza (Salida del Economizador)	%		9.3	Consumo Soplado del Caldero	tn/día		111
Consumo de Auxiliares				Consumo Total de Agua Potable	m3/día		40
Consumo Total	MWh/día		220	Consumo EnerSur de Agua Potable	m3/día		35
Relación Auxiliares/Generación	-	0.077	0.081	Consumo Contratistas de Agua Potable	m3/día		5
Servicios Comunes	MWh/día		54				
Manejo de Carbón	MWh/día		2				

Para llevar a cabo el control continuo de los parámetros se ha implementado una plantilla en MS Excel que adquiere datos del SCID, los procesa en promedios horarios y los muestra para determinar si alguno está fuera de rango. Los parámetros

de control discreto se analizan diariamente con la estadística del Reporte Diario de Producción C.T. ILO21.

Tabla 7.2. Parámetros de Control Normal de Tipo Continuo.

Descripción	Unidad	min	max	Descripción	Unidad	min	max
Indicadores de Eficiencia (*)				Parámetros de Agua y Vapor en la Caldera (*)			
Eficiencia Bruta de Planta	%	39.8		Flujo Total de Agua Alimentación	tn/h		432
Eficiencia de Caldera (Entrada - Salida)	%	89.2		Flujo Agua alimentación entrada Economizador	tn/h		403
Eficiencia del Calentador de Aire	%	61		Válvula de Purga Continua	%		0
Parámetros Eléctricos (*)				Presión Agua alimentación entrada Economizador			
Potencia Activa Consumo Auxiliares	MW		10.8	Temperatura Agua alimentación entrada ECO	°C	268	
Tensión Barra Sist. 6.9 kV	V	6748		Temperatura Agua alimentación salida ECO	°C	297	
Corriente Motor BAC				Incremento de Temperatura de Agua en ECO			
Corriente Motor BAC	A		212	Presión Agua alimentación entrada Atemporador SC	tn/h	29	39
Corriente Motor BAMEA	A		14	Flujo Agua alimentación entrada Atemporador RC	tn/h		2
Corriente Motor BAE	A		18	Presión Vapor Domo			
Corriente Motor BAAL	A		364	Presión Vapor salida SCS	MPa	16.79	16.87
Corriente Motor VTF	A		91	Presión Vapor salida RCS	MPa	3.57	3.66
Corriente Motor VRG	A		33	Temperatura Vapor salida SCP			
Corriente Motor VTI	A		115	Temperatura Vapor ingreso SCS	°C	394	408
Corriente Motor VAP	A		58	Temperatura Vapor salida SCS	°C	539	539
Corriente Motor Pulverizador	A		46	Incremento de Temperatura de Vapor en SCS	°C	127	139
Parámetros de Agua y Vapor en Turbina (*)				Temperatura Vapor entrada RCP			
Flujo Vapor entrada TAP	tn/h		425	Temperatura Vapor salida RCP	°C	397	402
Presión Vapor entrada TAP				Temperatura Vapor entrada RCS			
Presión Vapor entrada TAP	MPa	16.53	16.61	Temperatura Vapor salida RCS	°C	536	540
Presión Vapor entrada TPI	MPa	3.56	3.64	Incremento de Temperatura de Vapor en RCS	°C	132	140
Temperatura Vapor entrada TAP	°C	537	538	Parámetros de Aire y Gases en la Caldera (*)			
Temperatura Vapor entrada TPI	°C	537	541	Flujo Total Aire Sistema de Control	tn/h		457
Presión Vacío Condensador				Flujo de Aire Secundario			
Presión Vacío Condensador	kPa		-97.2	Temperatura Aire entrada VTF	°C	16.6	23.6
Temperatura Condensado Condensador	°C	29		Presión Gases Hogar	kPa	-0.23	-0.14
Temperatura Vapor escape TAP	°C	336	339	Temperatura Aire primario entrada AH			
Temperatura Vapor escape TBP	°C		33	Temperatura Aire primario salida AH	°C	307	320
Temperatura Agua de mar entrada Condensador				Incremento de Temperatura de Aire Primario - AH			
Temperatura Agua de mar entrada Condensador	°C	15	17	Temperatura Aire secundario entrada AH	°C	22	29
Temperatura Agua de mar salida Condensador	°C	25	27	Temperatura Aire secundario salida AH	°C	324	
Diferencia de Temperaturas de agua de mar	°C	10.1	10.3	Incremento de Temperatura de Aire Secundario - AH	°C	299	313
Flujo Agua de reposición Condensador				Temperatura Gas entrada Calentador de Aire			
Flujo Agua de reposición Condensador	tn/h		6	Temperatura Gas salida Calentador de Aire	°C		382
Flujo Condensado entrada Desareador	tn/h		320	Temperatura Gas salida Calentador de Aire	°C		147
Flujo Condensado salida Condensador Vap. Sello	tn/h		266	Caída de Temperatura de Gases de Escape en AH	°C	232	241
Temperatura Condensado Desareador				Presión Aire secundario entrada Calentador de Aire			
Temperatura Condensado Desareador	°C	147		Presión Aire secundario salida Calentador de Aire	kPa	2.72	
Temperatura Agua Alimentación salida Calentador 5	°C	194		Caída de Presión de Aire Secundario en AH	kPa	0.73	0.79
Temperatura Agua alimentación salida Calentador 6	°C	244		Presión Gas entrada Calentador de Aire			
Temperatura Agua alimentación salida Calentador 7	°C	269		Presión Gas salida Calentador de Aire	kPa		-0.96
Temperatura Condensado entrada Calentador 1				Caída de Presión de Gases en AH			
Temperatura Condensado entrada Calentador 1	°C	31		Apertura del damper de succión del VRG	%	20	30
Temperatura Condensado salida Calentador 2	°C	94		Pulverización de Carbón			
Temperatura Condensado salida Calentador 3	°C	110		Temperatura de salida del pulverizador	°C	65	75
Temperatura Retorno condensado Calentador 5				Relación Aire Primario / Flujo de Carbón (*)			
Temperatura Retorno condensado Calentador 5	°C		156		-	2.3	
Temperatura Retorno condensado Calentador 6	°C		200	Velocidad del Clasificador Rotaño			
Temperatura Retorno condensado Calentador 7	°C		249			50	
Temperatura Vapor Extracción 1				Granulometría (Pasante malla 200)			
Temperatura Vapor Extracción 1	°C	79	79			70	
Temperatura Vapor Extracción 2	°C	97	98	Emisiones Gaseosas (*)			
Temperatura Vapor Extracción 3	°C	112	113	Concentración Exceso O2 salida Economizador	%		4.50
Temperatura Vapor Extracción 4	°C	245	248	Diferencia entre Analizadores de O2 (Salida ECO)	%		0.62
Temperatura Vapor Extracción 5	°C	392	395	Concentración Exceso O2 entrada Chimenea	%		5.35
Temperatura Vapor Extracción 7	°C	393	395	Concentración CO entrada Chimenea	mg/m3N	50	150

Notas:

(*) Sólo válidos cuando la demanda de generación esté entre 134 y 136 MW.

(1) Valores de Diseño a 135 MW.

- Rangos elaborados en función de los promedios diarios del año 2003.

7.2 Control de la Eficiencia de Caldera

La eficiencia de Caldera, determinado por el método entrada – salida se monitorea continuamente mediante una plantilla en MS Excel, que adquiere datos de parámetros de agua y vapor del SCID y realiza el cálculo de la eficiencia de caldera cada 5 minutos.

Los ajustes operativos posibles en la Caldera para la mejora de la eficiencia van desde ajustes en el control y distribución del aire de transporte y combustión, hasta la limpieza de la caldera con las operaciones de soplado.

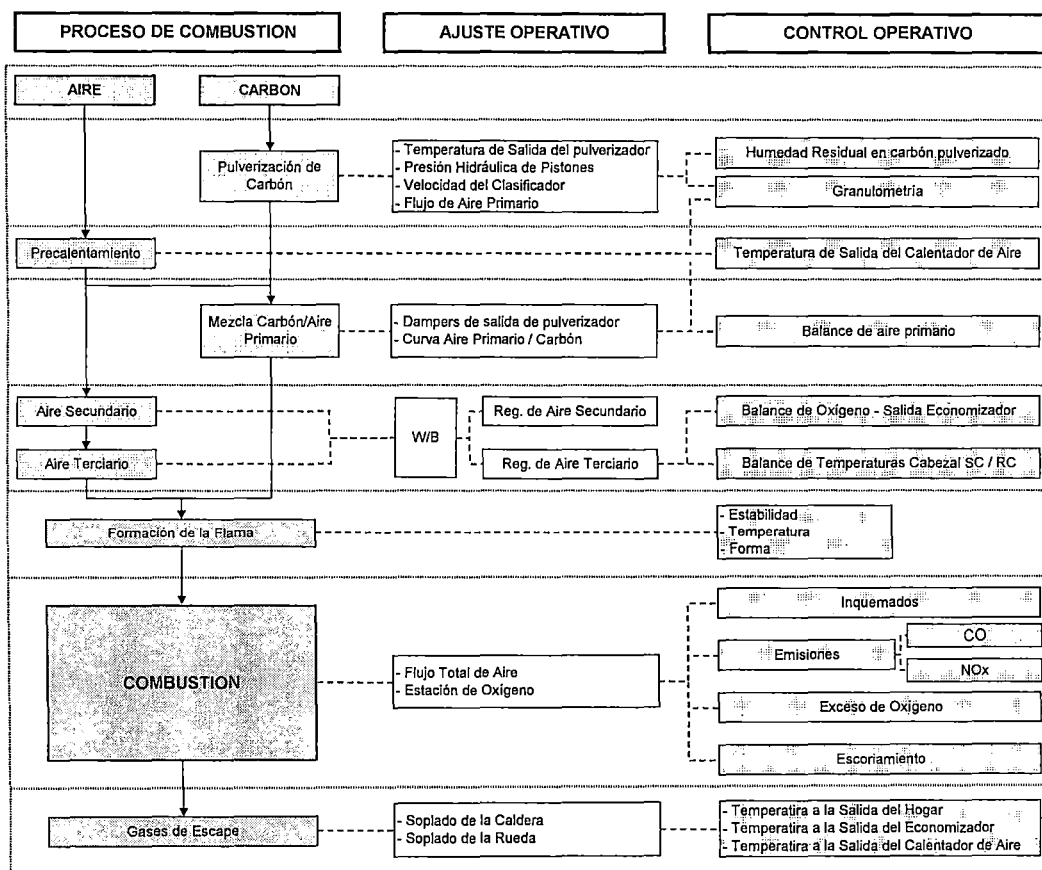


Figura 7.2. Estrategia de Control Operativo de la Combustión

7.2.1 Pérdidas Energéticas

El control de las pérdidas energéticas de la Caldera se realiza semanalmente (de preferencia a 135MW).

El periodo de prueba es de 2 horas, previo a esto los operadores deben realizar las siguientes acciones:

- Ejecuta el Soplado de la Caldera (2 horas antes)
- Verifica los parámetros de molienda del carbón
- Verifica el “BTU Correction” al Control de la Caldera para buscar la siguiente relación: $\text{Boiler Master} = 0.625 * \text{Demanda de MW}$.
- Verifica todos los controles en modo automático (en caso de no ser posible, registrar el motivo). Se tendrá señal de “ABC autostart” en el panel de alarmas.
- Verifica el valor consigna del oxígeno a la salida del economizador.
- Limpieza de los analizadores de oxígeno a la Salida del Economizador e Ingreso a la Chimenea (30 minutos antes)

Durante la prueba se verificará la operación estable de la Caldera, mientras que laboratorio realizará los siguientes muestreos:

- Gases a la salida del economizador y del calentador de aire
- Ceniza a la Salida del Economizador

- Carbón Pulverizado
- Carbón en la Torre 6 (Este muestreo se realiza de lunes a viernes con el carbón suministrado a los silos)

Adicionalmente se tomarán lecturas locales de temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura de gases a la salida del hogar. Se tomarán, del SCID, promedios de los principales parámetros de operación durante la prueba.

Con los resultados de los análisis de laboratorio, los datos de campo y del SCID; se elabora el Reporte de Pérdidas Energéticas de la Caldera que emplea la metodología de cálculo descrita en el capítulo 3.

Este reporte permitirá decidir algún ajuste operativo para disminuir las pérdidas de la caldera.

7.2.2 Pulverización de Carbón

El ajuste de la pulverización de carbón se realiza con el objetivo de que más del 70% del carbón que va a los quemadores tenga un tamaño menor o igual a $75\mu\text{m}$ (malla 200); adicionalmente se debe analizar la distribución de la fineza de carbón para mallas de 140, 100 y 50 (más del 99% pasante la malla 50).

Estos ajustes dependen principalmente de la dureza (HGI) y humedad del carbón, y flujo de carbón hacia el pulverizador.

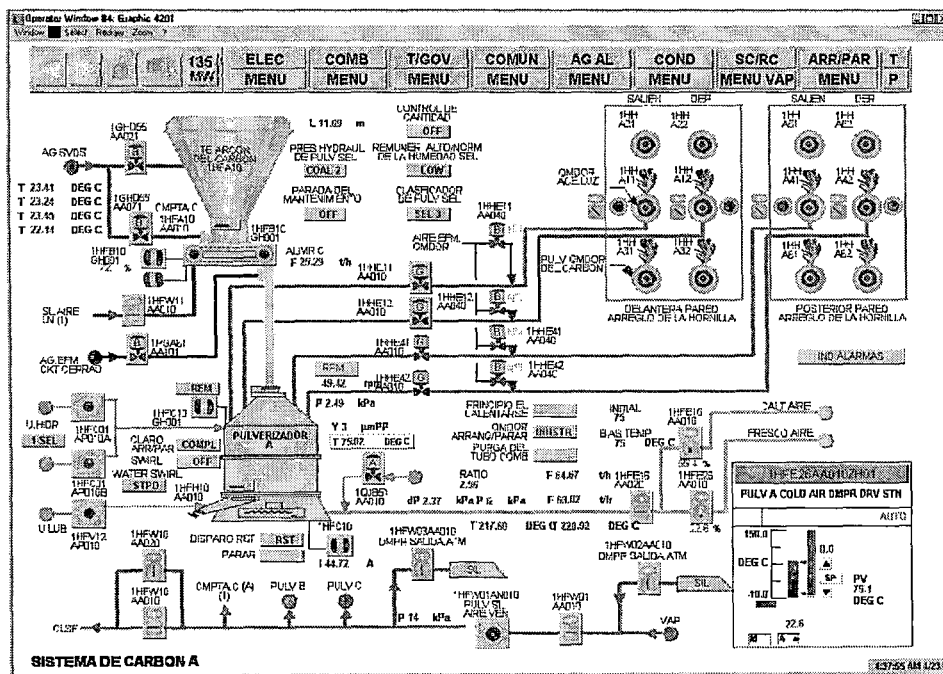


Figura 7.3. Pantalla de Control del Pulverizador A

7.2.2.1 Presión Hidráulica

La presión hidráulica del pulverizador se debe en las siguientes etapas:

- Seleccionar la curva de presión hidráulica del pulverizador (Coal 1, Coal 2 o Coal 3) en el gráfico de control del pulverizador.

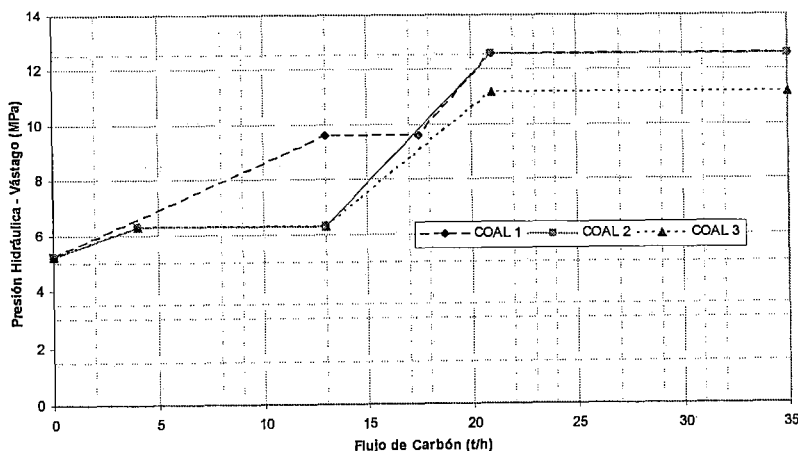


Figura 7.4. Curva de presión hidráulica del Pulverizador

- Ajustar la presión hidráulica (lado vástago) incrementando el bias en la estación de control (para mejorar la fineza incrementar la presión teniendo cuidado de no incrementar la vibración).

7.2.2.2 Velocidad del Clasificador

Se debe mantener la velocidad del clasificador rotativo de los pulverizadores en 50 rpm, pudiendo incrementarse en caso no se logre la fineza adecuada. El ajuste se realiza en la pantalla de control del pulverizador.

Normalmente la disminución de la velocidad está asociada al control de la vibración del pulverizador, por lo que se debe ajustar paralelamente la presión hidráulica en estas condiciones.

El incremento de la velocidad del clasificador significa una disminución de la capacidad del pulverizador y un incremento en el consumo de energía eléctrica por una mayor recirculación de carbón.

7.2.2.3 Flujo de Aire Primario

El flujo de aire primario es el último recurso operativo para regular la granulometría. Teniendo como referencia las desviaciones a de la fineza a la Carta de Rosin y Rammles, se puede disminuir la relación Aire Primario / Carbón hasta un mínimo de 2.3 (límite por incremento de la vibración del pulverizador), o incrementar el flujo de aire primario hasta 2 t/h.

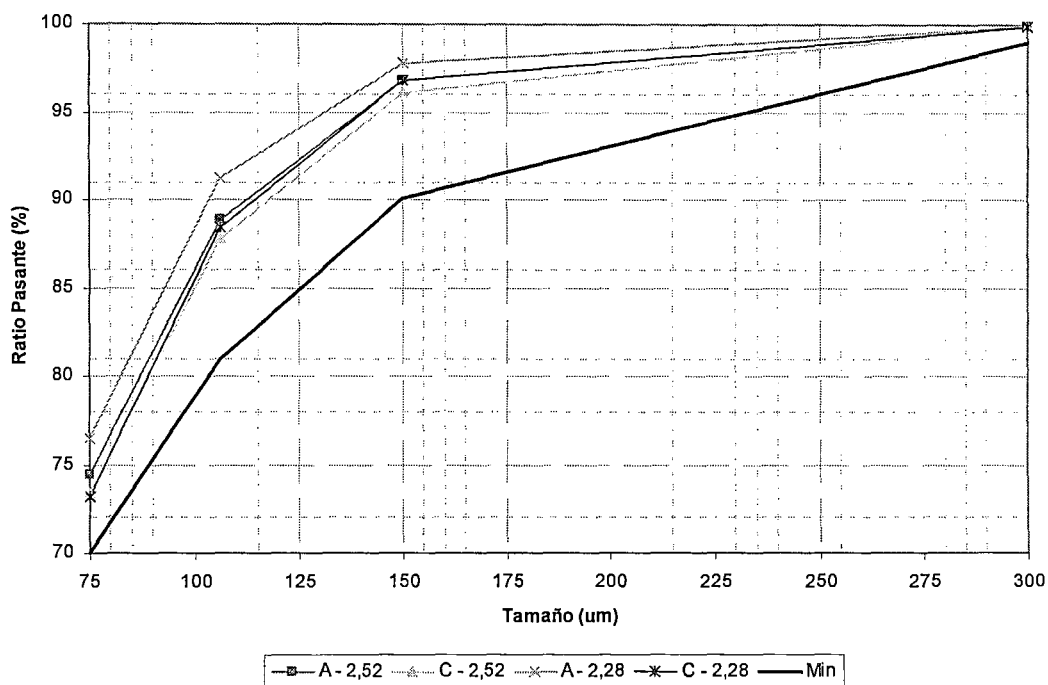


Figura 7.5. Reducción de la Relación Aire Primario/Carbón (CO.CED.07.03 – 14/04/04)

Adicionalmente el tiempo de residencia de las partículas pulverizadas en el hogar depende de la relación aire primario / carbón (a mayor flujo de aire, menor tiempo de residencia). Por lo que esta relación depende también de la materia volátil del carbón (a mayor contenido de materia volátil, menor flujo de aire primario necesario).

La relación entre el flujo de aire primario y el flujo de carbón (para un rango de 13 a 35 tn/h) está configurada en el lazo de control, y es de:

$$F_{Aire\ Primario} \approx 32.77 + 1.195 \cdot F_{Carbón}$$

La relación Aire Primario / Carbón va de 3.72 a 2.22 para 13 y 35 t/h respectivamente, siendo la fórmula asociada:

$$R_{A.P./Carbon} \approx 4.74 - 0.079 \cdot F_{Carbón}$$

El incremento de flujo de aire primario se realiza en la estación de control del pulverizador, mientras que la disminución se debe realizar en el mismo lazo de control. Siendo el elemento controlador el damper de aire primario caliente, su apertura no debe salir del rango de 10 a 80%

7.2.2.4 Temperatura de Carbón Pulverizado

Depende del contenido de humedad total y materia volátil que posee el carbón. La humedad influye en la velocidad con que se quema el carbón pulverizado ya que se desprende antes que el combustible se quemara, por esta razón se debe aumentar el tiempo de residencia del combustible en el hogar de la caldera para aquellos con alto contenido de humedad.

El contenido de materia volátil es un indicador de la reactividad del carbón. Alto contenido de materia volátil se inflama con facilidad si la temperatura de descarga del pulverizador es alta. Con bajo contenido de materia volátil se debe trabajar con temperaturas mayores.

El lazo de control del pulverizador permite los siguientes ajustes:

- Humedad Alta – HIGH (mayor a 25%) Valor Consigna = 60°C
- Humedad Media – MEDIUM (entre 16 y 24.5%) Valor Consigna = 65°C
- Humedad Baja – LOW (menor a 16%) Valor Consigna = 75°C

Se puede realizar un ajuste de +/-10°C en la estación de control del pulverizador.

Siendo el elemento controlador el damper de aire primario frío, su apertura no debe salir del rango de 10 a 80%.

7.2.3 Exceso de Oxígeno

El porcentaje de oxígeno a la salida del economizador se regula automáticamente en función de la demanda de fuego de la caldera ajustando la posición del damper del ventilador de tiro forzado. El lazo de control de aire fija un valor consigna para el exceso de oxígeno, el cual puede ser ajustado desde la pantalla de control del Sistema Aire y Gases.

El exceso de aire normalmente generalmente se encuentra alrededor de 20 a 40%, (lo que significa un 3 a 3.8% de oxígeno a la salida del economizador). Un déficit en el exceso de oxígeno requerido genera combustión incompleta (presencia de CO e inquemados en los gases de escape); una mayor cantidad de exceso de oxígeno sobre el requerido genera pérdidas de energía en la caldera por arrastre de calor en los gases de escape.

El porcentaje de oxígeno a la salida del economizador se debe incrementar con la disminución de la demanda de fuego de la caldera debido a la disminución de las velocidades de aire y carbón en el quemador reduciendo la turbulencia y la dificultad de mezclar completamente el aire con el carbón (esto es compensado con el incremento de aire).

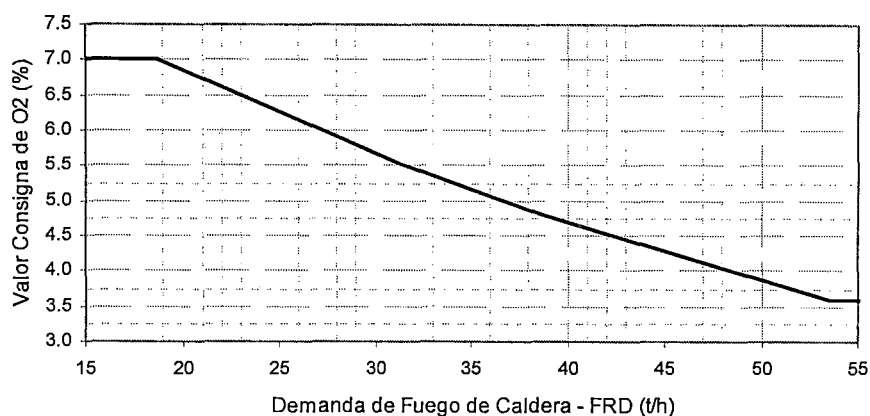


Figura 7.6. Relación entre el porcentaje de oxígeno y la demanda de fuego

Tan importante como la cantidad de aire de combustión es la distribución de este en cada uno de los quemadores en servicio (4 por pulverizador). Es por esto que la regulación del flujo de aire primario, secundario y terciario es importante ante nuevos carbones quemados. Adicionalmente el tipo de ceniza del carbón utilizado es muy importante debido a que en ocasiones produce escoriamiento en las zonas próximas al quemador (por alta temperatura) y puede distorsionar el ingreso de aire (principalmente aire terciario). El requerimiento de aire secundario y terciario es mayor para carbones de mayor poder calorífico.

Los valores de consigna se ajustan sobre la base de los resultados del Reporte de Pérdidas Energéticas de la Caldera con el objetivo de disminuirlas.

En caso la diferencia entre los analizadores de oxígeno a la salida del economizador sea mayor que el rango especificado de control normal, proceder con las siguientes acciones en orden de prioridad:

- Realizar limpieza del los analizadores de oxígeno.

- Solicitar la calibración de los analizadores.

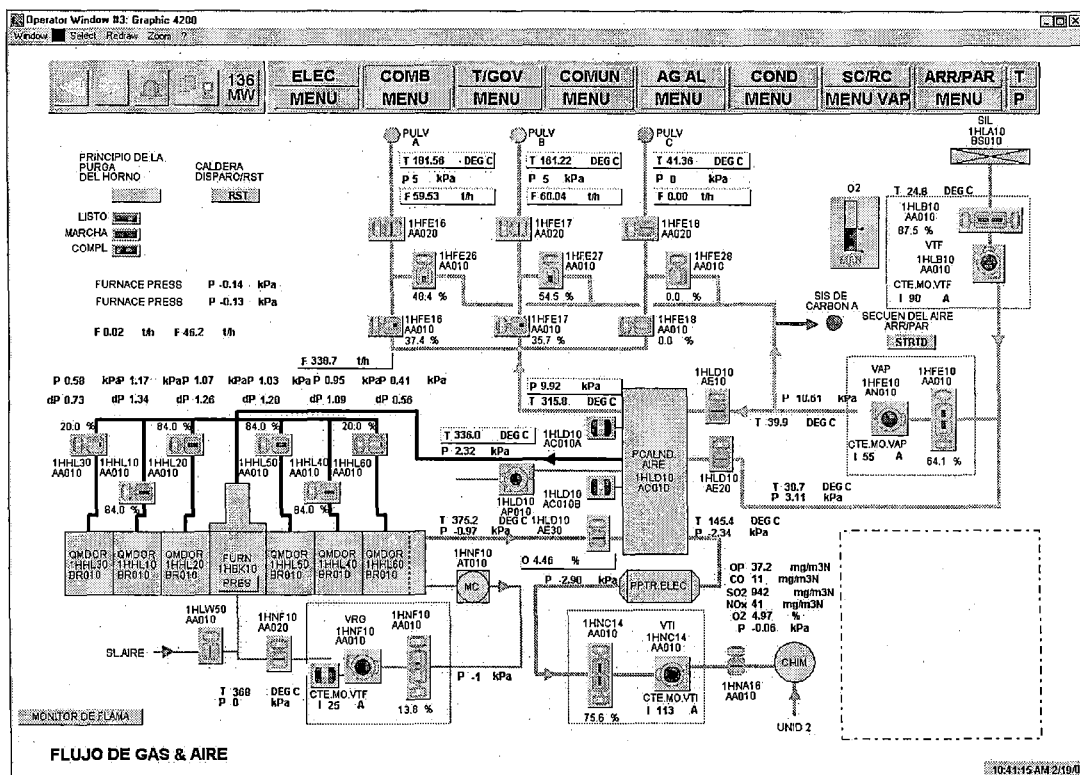


Figura 7.7. Pantalla de Control del Sistema de Aire y Gases de Combustión

Si en el reporte de pérdidas se tiene las pérdidas por gases secos y por carbono inquemado fuera de los valores normales, con altos valores de monóxido de carbono es necesario realizar lo siguiente:

- Solicitar un muestreo de la distribución de oxígeno y dióxido de carbono a la salida del economizador.
- Regular los registros de aire terciario de quemadores en función a la distribución de oxígeno y balance de temperaturas de metal de los cabezales de sobrecalentadores y recalentadores.

- Balancear las cajas de viento de los quemadores en servicio, para que la presión diferencial en los quemadores sea igual o muy cercana.
- Disminuir el flujo de aire primario.

7.2.4 Calentador de Aire

Al ser el último recuperador de calor de los gases de escape, su importancia radica en aprovechar el calor de los gases de escape para calentar el aire primario caliente y el aire secundario.

Su eficiencia depende del ensuciamiento, la temperatura de ingreso y salida de gases. En general, cuando se tengan estos parámetros fuera del rango de control normal se efectuarán las siguientes acciones:

- Soplar el lado frío del calentador de aire (de ser necesario, incrementar la frecuencia diaria)
- Soplar el lado caliente del calentador de aire (sólo a 55MW)
- Programar el lavado del calentador en la parada de planta.

El porcentaje de fugas de aire (principalmente de aire primario caliente a la zona de gases) es función de la diferencia entre los analizadores de oxígeno (entrada y salida del calentador). En caso de incrementarse se deberá ejecutar lo siguiente:

- Realizar la limpieza de los analizadores de oxígeno (salida del economizador y entrada a la chimenea)
- Verificar la correcta operación de las placas de sector del calentador de aire.

- Solicitar la inspección de las placas de sector en la siguiente parada de planta.

7.2.5 Ensuciamiento

El ensuciamiento de la caldera depende del contenido de ceniza en el carbón y de su composición, ya que de esta dependen sus características de escoriamento del hogar o ensuciamiento de la zona convectiva.

Cuando el carbón quemado tiene un índice medio o alto de escoriamento se puede mantener en el límite superior la apertura del ventilador de recirculación de gases para distribuir mejor los gases en la zona inferior de la caldera, mejorando la atmósfera oxidante o rica en oxígeno (las temperaturas de fusión de la ceniza en atmósfera oxidante son mayores a las determinadas en atmósfera reductora).

Los siguientes parámetros deben ser monitoreados continuamente para detectar oportunamente el rápido ensuciamiento de la caldera:

- Temperatura de gases de escape a la salida del calentador de aire.
- Temperatura de gases de escape a la salida del economizador.
- Apertura del damper de succión del ventilador de recirculación de gases.
- Flujo de atemperación de Vapor Sobrecalentado.

Adicionalmente la prioridad de soplado de una zona estará determinada por el tiempo de no soplado del soplador.

Para discriminar las zonas de soplado evaluar los incrementos de temperatura en cada zona de transferencia de calor. En general se puede emplear el siguiente criterio:

- Si el damper de succión del VRG se encuentra completamente abierto (50% a carga base) y la atemperación de los sobre calentadores es mínima, se tiene poco calor en la zona convectiva.
- Lo contrario puede indicar que el hogar necesite soplado.
- Se debe buscar disminuir la atemperación en los sobre calentadores y eliminar la atemperación en los recalentadores.

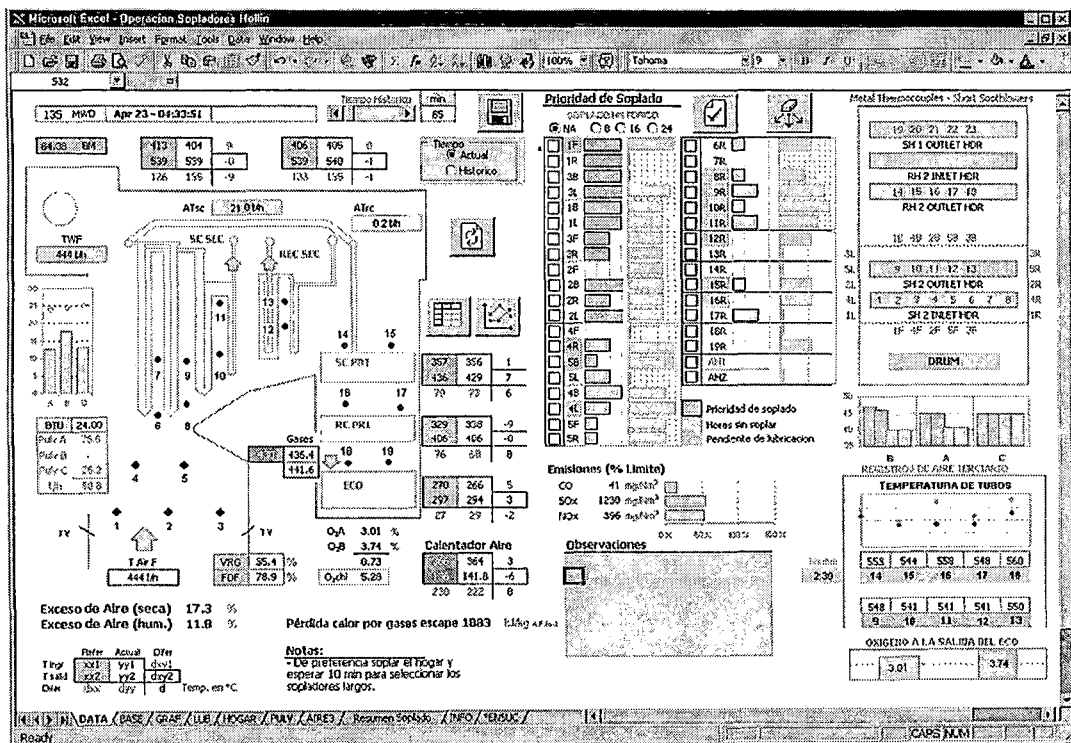


Figura 7.8. Control y registro de sopladores.

De preferencia establecer como mínimo una secuencia de soplado de la caldera por turno. Esto puede variar dependiendo de los niveles de quemadores en servicio, normalmente si se tienen los niveles superiores se tendrá mayor transferencia de calor en la zona convectiva.

7.2.6 Pérdidas de Agua o Vapor

Si bien las pérdidas de agua o vapor pueden darse en todo el ciclo (incluye turbina, calentadores y auxiliares). En la caldera principalmente se tiene a la purga continua y el calentamiento de sopladores de hollín.

La purga continua se debe al control de sólidos en el agua del domo, siendo nuestro parámetro de referencia el contenido de sílice en el agua del domo (normalmente entre 20 y 30 ppb). Laboratorio ILO21 reporta dos veces al día la calidad del agua y vapor del ciclo para determinar la necesidad de purga del agua del domo; adicionalmente el SCID cuenta con un sistema de muestreo continuo de los principales parámetros de calidad del agua y vapor.

El calentamiento de los sopladores en la secuencia de soplado es un requisito indispensable para evitar la inyección de agua con el vapor de soplado (que podría causar erosión de los tubos), en general el tiempo de calentamiento no deberá llegar a los 5 minutos por soplador, ni se deberá registrar un consumo de vapor mayor al especificado dentro de los parámetros de control normal.

Adicionalmente los operadores reportarán cualquier indicio de fugas de agua o vapor por válvulas de drenaje, válvulas de seguridad u otro elemento de su área;

inspeccionará mensualmente la temperatura de las trampas de vapor y trimestralmente la temperatura de las válvulas de drenaje instaladas en su área.

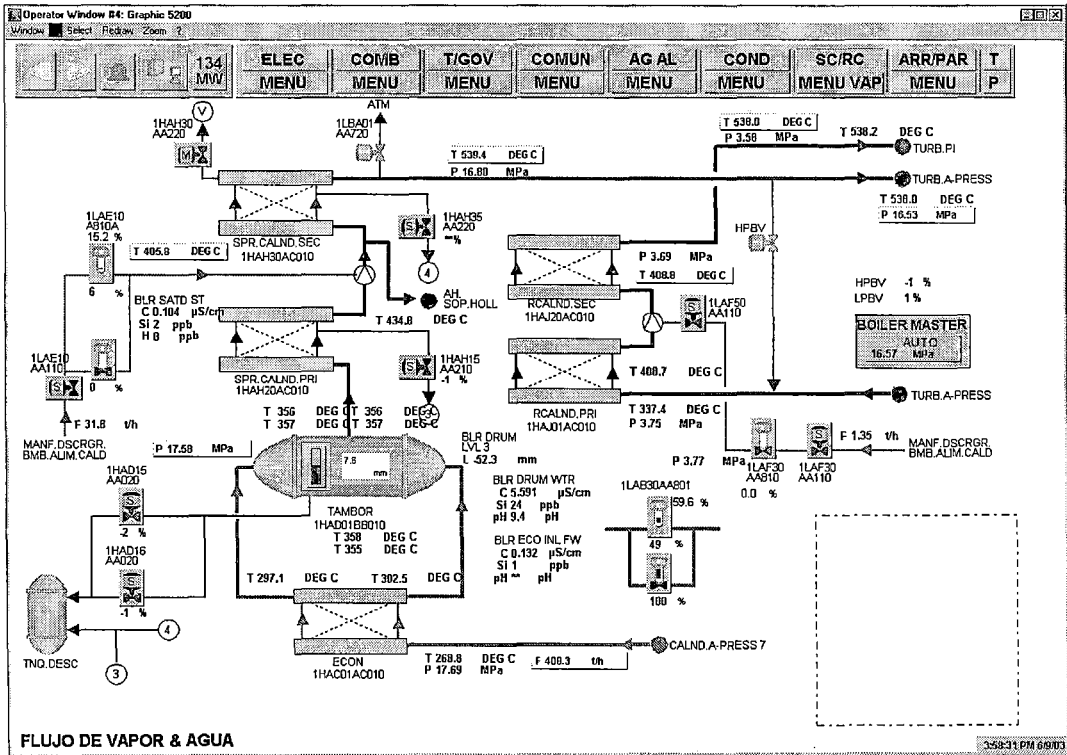


Figura 7.9. Pantalla de Control del Sistema de Agua y Vapor de Caldera

CAPÍTULO 8

MODELO ENERGÉTICO

8.1 Influencia de los Lazos de Control

El control de la caldera se realiza mediante diversos lazos de control, de los cuales el más importante energéticamente es el control de combustible y el control de aire. Ambos lazos de control tiene como valor de consigna una función de la Demanda de Fuego de Caldera (Firing Rate Demand – FRD). Esta Demanda de Fuego es resultado de una función de transferencia del Maestro de Caldera. Adicionalmente se puede asumir que la demanda de fuego de caldera es igual al flujo de carbón de diseño demandado por la caldera (carbón adaro, poder calorífico de 22.6 MJ/kg).

El control principal de la caldera lo ejerce el Maestro de Caldera (Boiler Master – BM), que inicialmente es función proporcional de la demanda de generación de la Unidad, con una constante de 0.625 (es decir una demanda de 135 MW le corresponde un valor inicial de Maestro de Caldera de 84.38%). Este valor inicial es corregido por la desviación en la presión de vapor principal (valor consigna de 16.57 MPa) que puede ser ocasionada por la turbina (oscilaciones de generación por problemas del sistema eléctrico, consumo adicional de vapor en alguno de sus sistemas auxiliares, etc.) o la caldera (variación de la calidad del carbón, ensuciamiento de la caldera, etc.); esto significa que si la presión de vapor principal

disminuye, el Maestro de Caldera se verá incrementado en algún porcentaje que depende de un control proporcional–integral, y viceversa.

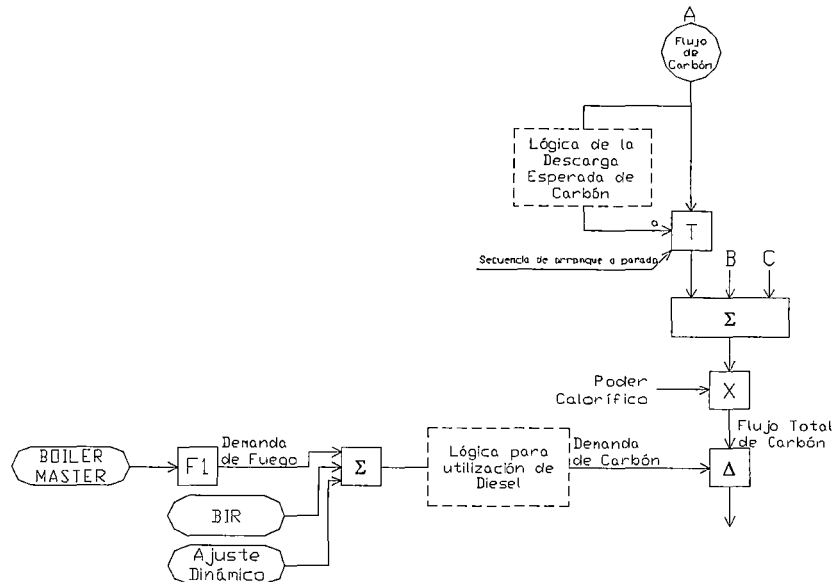


Figura 8.1. Diagrama de Control Simplificado del Control de Combustible

La relación entre la demanda de aire total (suma del aire primario de cada pulverizador y el aire secundario) y la demanda de fuego de caldera tiene una función de transferencia no lineal que se incrementa a bajas cargas. Es claro que la relación Aire / Carbón variará no sólo con la carga sino con el tipo de carbón empleado (según lo configurado en el sistema de control) siendo mayor cuando se incrementa el poder calorífico del carbón. Es importante en este lazo el Ajuste por Oxígeno que corrige la demanda de aire total final en función del porcentaje de oxígeno en los gases a la salida del economizador en un máximo de $\pm 25\%$.

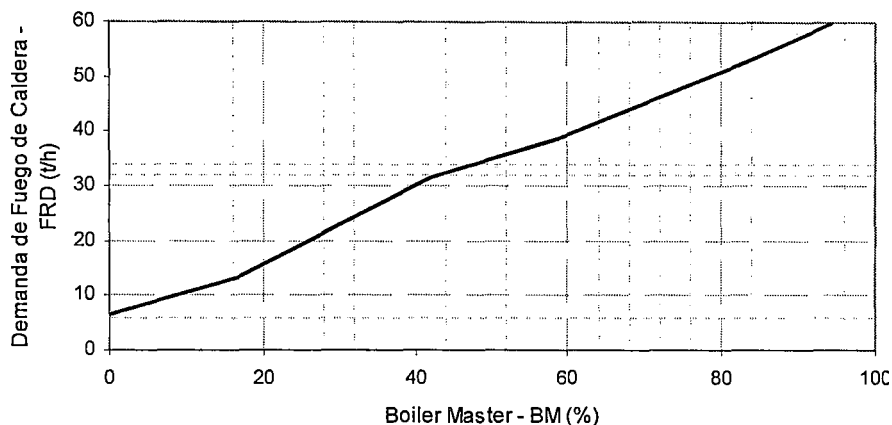


Figura 8.2. Relación entre la Demanda de Fuego de Caldera y el Maestro de Caldera

Una manera de ajustar el sistema de control de la Caldera es con la señal de Ajuste de Calorías (BTU Correction) que transforma el flujo de carbón medido a un flujo de carbón de diseño, pudiendo este ser comparado con la Demanda de Fuego de la Caldera. Este ajuste resulta muy importante en el control del flujo de aire y combustible.

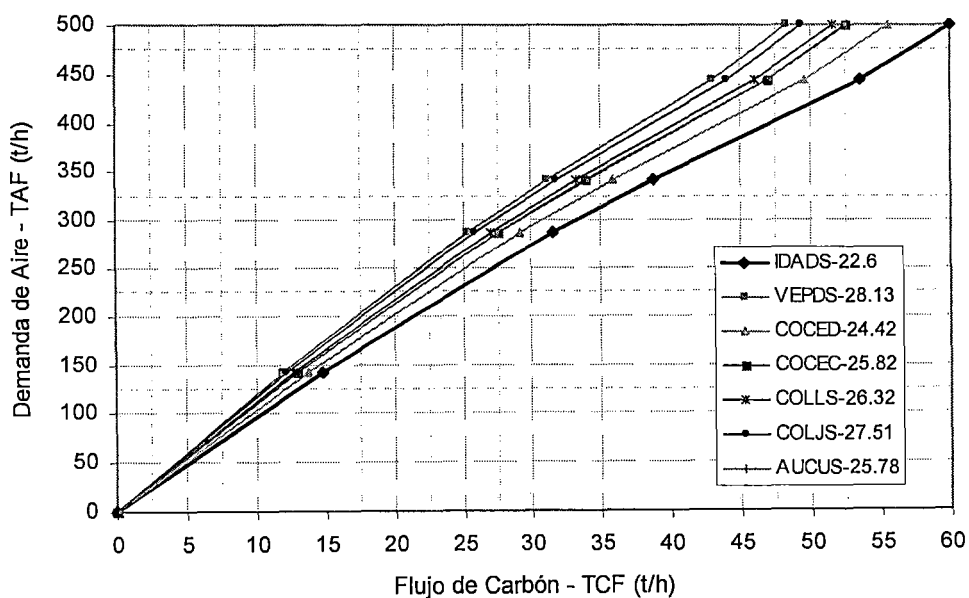


Figura 8.3. Variación de la Demanda de Aire con el Flujo de Carbón Utilizado

Se ha encontrado que la relación entre la Demanda de Fuego de la Caldera (FRD) y el Flujo Total de Carbón medido (TCF) son directamente proporcionales en operación estable.

$$FRD = \frac{BTU \text{ Correction}}{22.6} \cdot TCF \quad \left[\frac{1}{h} \right]$$

Esta relación nos permite estimar el flujo de carbón en operación estable teniendo en cuenta la relación entre las señales del Maestro de Caldera y el Ajuste de Calorías.

$$TCF_{(e)} = \frac{22.6}{BTU \text{ Correction}} \cdot f(BM) \quad \left[\frac{1}{h} \right]$$

Tabla 8.1. Comparación entre el flujo de carbón medido y estimado.

Muestras	Carga [MW]	Carbón	Poder Calorífico Bruto [MJ/kg]			Flujo de Carbón [t/h]		
			Medido	Ajuste de Calorías	Diferencia	Medido	Estimado	Diferencia
			HHVF	BTU	d HHVF	MrF	MrFCNT	d MrF
2	135.0	IDADS	22.35	(*)	-	54.5	(*)	-
7	136.1	VEPDS	30.33	28.13	2.20	43.6	43.6	-0.03
5	135.6	COCED	27.27	24.42	2.84	50.4	50.4	0.01
17	136.1	COCEC	28.26	25.82	2.44	46.9	46.9	-0.03
28	136.1	COLLS	27.35	26.32	1.03	46.6	46.6	-0.04
6	135.5	COLJS	29.49	27.51	1.98	44.1	44.1	0.02
6	135.1	AUCUS	27.38	25.78	1.60	46.9	46.9	0.02
6	136.0	M3100	27.75	26.73	1.02	46.2	45.9	0.26
2	135.5	M4800	26.32	24.75	1.57	49.1	49.1	-0.01
2	135.5	M5800	27.33	25.45	1.88	47.7	47.7	-0.01

(*) No se cuenta con todos los datos necesarios del carbón ADARO, al no tener implementado el Sistema de Adquisición de Datos al inicio de la operación de la Central.

La relación entre el ajuste de calorías y el poder calorífico es directamente proporcional con cierto grado de dispersión.

$$BTU_{\left[\frac{MJ}{kg} \right]} = 0.8569 \cdot HHVF_{\left[\frac{MJ}{kg} \right]} + 2.1575 \quad (R^2 = 0.769)$$

8.2 Influencia de las Propiedades del Carbón

Las propiedades del carbón influyen directa o indirectamente en casi todas las pérdidas de la caldera y su evaluación es muy compleja, ya que dependen en gran medida de los parámetros operativos de los equipos auxiliares (como el pulverizador). Adicionalmente la diversidad de propiedades del carbón, e incluso de la ceniza, ejercen distintos efectos en el rendimiento de la caldera. Los resultados del análisis inmediato reflejan de una manera muy adecuada los resultados del comportamiento energético de la caldera.

El poder calorífico es la propiedad más representativa de la influencia del carbón en el rendimiento de la caldera, disminuyendo cuando esta propiedad se incrementa. De los resultados obtenidos se puede realizar una regresión, obteniendo una función de segundo orden.

$$\eta [\%] = 0.0534 \cdot HHVF^2 [\text{MJ/kg}] - 3.1957 \cdot HHVF [\text{MJ/kg}] + 139.32 \quad (R^2 = 0.6944)$$

Tabla 8.2. Influencia del Poder Calorífico en las Pérdidas y Eficiencia de la Caldera

Carbón	Poder Calorífico [MJ/kg]		Pérdidas de la Caldera [%]				Eficiencia [%]	
	Medido	Ajuste de Calorías	Gases Secos	Humedad de Carbón	Carbono Inq.	NOx	Caldera	Comb.
	HHVF	BTU	QpLDFg	QpLWF	QpLUbc	10 ³ ·QpLNOx	n	nc
IDADS	22.35	(*)	4.45	0.22	0.04	(*)	94.7	99.9
VEPDS	30.33	28.13	5.09	0.03	1.91	0.077	91.2	98.1
COCED	27.27	24.42	4.63	0.08	1.37	0.062	92.3	98.6
COCEC	28.26	25.82	4.87	0.07	1.34	0.053	92.3	98.6
COLLS	27.35	26.32	5.07	0.07	0.36	0.064	92.9	99.6
COLJS	29.49	27.51	5.24	0.05	1.50	0.071	91.5	98.5
AUCUS	27.38	25.78	5.43	0.05	1.71	0.067	91.0	98.2
M3100	27.75	26.73	5.32	0.06	1.67	0.035	91.7	98.3
M4800	26.32	24.75	5.13	0.09	1.71	0.068	91.3	98.2
M5800	27.33	25.45	4.83	0.07	1.92	0.064	91.5	98.0

(*) No se cuenta con todos los datos necesarios del carbón ADARO.

El incremento del poder calorífico muestra un incremento en la pérdida por gases secos, aunque este no pueda representarse por un ajuste lineal al depender en gran medida del flujo de aire empleado. Se observa la misma tendencia con las pérdidas por carbono inquemado y formación de NOx debido también a consideraciones operativas.

Adicionalmente un incremento del poder calorífico produce una disminución en las pérdidas por humedad del carbón en una relación inversa, pudiendo ser ajustada a una función de segundo grado.

$$Q_{pLWF}[\%] = 0.0021 \cdot HHVF_{[MJ/kg]}^2 - 0.1318 \cdot HHVF_{[MJ/kg]} + 2.132 \quad (R^2 = 0.972)$$

La materia volátil refleja un ligero incremento en la eficiencia de combustión, adicionalmente se observa que se ha tenido menor fineza de carbón pulverizado con carbones de mayor contenido de materia volátil. El contenido de ceniza en el carbón define muchas consideraciones operativas, donde también influye la calidad de la ceniza (composición). No se puede establecer una relación directa con las pérdidas por carbono inquemado, ya que aquí intervienen otras propiedades, así como ajustes operativos, pero en general se observa un incremento con el incremento del contenido de ceniza en el carbón. Se puede observar también la disminución de la eficiencia de la caldera con el incremento del contenido de ceniza.

$$\eta_{[\%]} = 0.0265 \cdot MpAsF_{[\%]}^2 - 0.6386 \cdot MpAsF_{[\%]} + 95.056 \quad (R^2 = 0.7619)$$

Tabla 8.3. Influencia del Contenido de Ceniza y la Materia Volátil

Carbón	Composición [%]		Pérdida [%]	Eficiencia [%]	
	Ceniza	Materia Volátil	Carbono Inquemado	Caldera	Combustión
	MpAsF	MpVm	QpLUbc	n	nc
IDADS	0.96	38.05	0.04	94.66	99.94
VEPDS	6.64	37.03	1.91	91.22	98.09
COCED	8.04	33.40	1.37	92.31	98.60
COCEC	6.93	36.74	1.34	92.27	98.64
COLLS	5.79	36.36	0.36	92.87	99.57
COLJS	6.60	36.22	1.50	91.45	98.46
AUCUS	13.85	31.34	1.71	91.02	98.21
M3100	5.39	43.78	1.67	91.71	98.27
M4800	11.28	28.75	1.71	91.33	98.25
M5800	10.84	29.87	1.92	91.52	98.03

El contenido de humedad total influye directamente en las pérdidas por humedad del combustible, claro que afectada por la temperatura de salida de gases.

$$QpLWF_{[\%]} = 0.1 \cdot MpWF_{[\%]} - 0.0124 \quad (R^2 = 0.9935)$$

Tabla 8.4. Influencia del Contenido de Humedad Total.

Carbón	Eficiencia [%]	Inyección de Agua [t/min]	Análisis Inmediato		Pérdidas [%]	
			Poder Calorífico [MJ/kg]	Humedad Total [%]	Humedad de Carbón	Gases Secos
			HHVF	MpWF	QpLWF	QpLDFg
IDADS	95	0	22.35	23.0	0.22	4.45
VEPDS	91	7	30.33	3.7	0.03	5.09
COCED	92	1	27.27	10.1	0.08	4.63
COCEC	92	4	28.26	8.2	0.07	4.87
COLLS	93	5	27.35	9.3	0.07	5.07
COLJS	91	11	29.49	6.1	0.05	5.24
AUCUS	91	6	27.38	6.0	0.05	5.43
M3100	92	5	27.75	7.9	0.06	5.32
M4800	91	0	26.32	10.2	0.09	5.13
M5800	92	0	27.33	8.5	0.07	4.83

Se observa que también las pérdidas por gases secos disminuyen con el incremento de la humedad en el carbón, lo que significa un incremento en la eficiencia con el incremento de la humedad del carbón.

$$\eta_{[\%]} = 0.1878 \cdot MpWF_{[\%]} + 90.29 \quad (R^2 = 0.811)$$

Es notoria la relación existente entre el poder calorífico bruto y el contenido de humedad, pudiendo establecer una relación bastante aproximada entre ambos.

$$HHVF_{\left[\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}\right]} = 0.008 \cdot MpWF_{[\%]}^2 - 0.6101 \cdot MpWF_{[\%]} + 32.1726 \quad (R^2 = 0.9135)$$

Los efectos operativos de la humedad del carbón se ven reflejados también en la necesidad de aire primario más caliente para calentar el carbón pulverizado, los resultados permiten establecer una relación entre la humedad del carbón y la diferencia de temperaturas entre el ingreso de aire primario y la salida de la mezcla aire/carbón. Adicionalmente se observa una disminución de la temperatura de salida de gases con el incremento del contenido de humedad del carbón.

$$\Delta T - Pulv_{[^\circ\text{C}]} = 7.7686 \cdot MpWF_{[\%]} + 50.333 \quad (R^2 = 0.912)$$

Tabla 8.5. Influencia de la Humedad en la Diferencia de Temperaturas del Pulverizador.

Carbón	Humedad Total [%] MpWF	TFgLv °C	Diferencia de Temperaturas		
			Pulv. A °C	Pulv. B °C	Pulv. C °C
IDADS	23.0	129	(*)	(*)	(*)
VEPDS	3.7	135	91	64	84
COCED	10.1	134	143	135	136
COCEC	8.2	136	117	116	116
COLLS	9.3	133	133	110	126
COLJS	6.1	135	105	90	84
AUCUS	6.0	141	115	94	99
M3100	7.9	133	120	97	114
M4800	10.2	137	128	118	123
M5800	8.5	138	119	(*)	103

(*) No se cuenta con todos los datos necesarios.

Aunque no se pueda determinar ninguna relación entre el índice de molienda y las propiedades por la dispersión de datos, se observa que con su incremento la necesidad de inyección de agua disminuye, incrementando la fineza del carbón pulverizado. Las pérdidas por carbono quemado tienden a disminuir con el

incremento del índice de molienda, aunque la proporción es diferente para carbones de bajo poder calorífico.

Tabla 8.6. Influencia del Índice de Molienda en las condiciones de pulverización.

Carbón	Índice de Molienda	Inyección de Agua [lt/min]	Carbón	Fineza (Pasante Malla 200) [%]		
			Carbono Inquemado [%]	Pulv. A	Pulv. B	Pulv. C
			MpUbc	f200-A	f200-B	f200-C
IDADS	48	0	0.03	(*)	(*)	(*)
VEPDS	47	7	1.71	66	64	65
COCED	52	1	1.11	73	72	73
COCEC	50	4	1.12	71	70	72
COLLS	44	5	0.29	69	68	72
COLJS	47	11	1.31	71	73	76
AUCUS	51	6	1.38	73	74	74
M3100	48	5	1.38	69	70	68
M4800	52	0	1.34	78	75	76
M5800	50	0	1.55	78	(*)	77

(*) No se cuenta con todos los datos necesarios.

8.3 Influencia del Requerimiento de Aire

La evaluación del flujo de aire depende, en gran medida del ajuste de calorías y de la estación de oxígeno. Es notoria la influencia del poder calorífico en el requerimiento de aire, siendo proporcional al aire teórico y al real.

$$MFrThAC_{[V_{ic}]} = 0.3227 \cdot HHVF_{[MJ/kg]} - 0.1848 \quad (R^2 = 0.8595)$$

$$MFrAz_{[V_{ic}]} = 0.5024 \cdot HHVF_{[MJ/kg]} - 2.722 \quad (R^2 = 0.7792)$$

Históricamente se puede analizar los datos en función al análisis de gases a la salida del economizador o la medición de aire primario y aire secundario. Una comparación entre estas dos mediciones de aire refleja una relación directa, siendo el valor estimado mayor que el medido por los ingresos de aire no contabilizados por los flujómetros (como aire de sello, enfriamiento de quemadores fuera de servicio, etc.)

$$mMFrAz_{[\%]} = 0.6077 \cdot MFrAz_{[\%]} + 2.7851 \quad (R^2 = 0.9107)$$

La relación entre el flujo de aire estimado y el flujo de aire teórico es directamente proporcional, por ende el exceso de aire también se ve incrementado con el incremento del aire teórico, aunque no se pueda establecer alguna relación por dispersión de datos (se observa un comportamiento distinto para el COLLS y el IDADS respecto a los demás tipos de carbón)

$$MFrAz_{[\%]} = 1.5273 \cdot MFrThACr_{[\%]} - 2.1801 \quad (R^2 = 0.8727)$$

El exceso de oxígeno determina finalmente la composición de los gases de escape, siendo directamente proporcional al porcentaje de oxígeno e inversamente proporcional al porcentaje de dióxido de carbono. El contenido de nitrógeno también se incrementa con el exceso de aire, aunque su comportamiento depende del tipo de carbón y no sólo del exceso de aire.

$$VpO2_{[\%]} = 0.1271 \cdot XpA_{[\%]} + 0.7502 \quad (R^2 = 0.994)$$

$$VpCO2_{[\%]} = -0.1039 \cdot XpA_{[\%]} + 16.365 \quad (R^2 = 0.9276)$$

Tabla 8.7. Influencia del Requerimiento de Aire en la Composición de los Gases de Escape.

Carbón	Aire [t/te]				Composición Volumétrica Base Humeda [%]					Temp. Gases TFgLv
	Teórico	Húmedo	Medido	Exceso	O2	CO2	SO2	H2O	N2	
	MFrThACr	MFrAz	mMFrAz	XpA [%]	VpO2	VpCO2	VpSO2	VpH2O	VpN2	
IDADS	6.9	8.5	(*)	22	3.5	14.4	0.0	9.7	72.4	129
VEPDS	9.5	12.5	10.5	30	4.6	13.1	0.1	5.9	76.2	135
COCED	8.4	10.2	8.8	19	3.2	14.3	0.1	7.6	74.9	134
COCEC	8.6	11.0	9.5	26	4.1	13.6	0.0	6.9	75.3	136
COLLS	8.7	12.0	9.8	36	5.3	12.7	0.1	6.4	75.5	133
COLJS	9.2	12.0	10.2	29	4.5	13.4	0.1	6.4	75.7	135
AUCUS	8.8	11.4	9.7	28	4.4	13.3	0.0	6.4	75.9	141
M3100	9.4	12.0	9.9	27	4.2	13.4	0.1	6.6	75.7	133
M4800	8.4	10.3	9.0	21	3.4	14.1	0.0	7.3	75.1	137
M5800	8.8	10.6	9.4	19	3.2	14.4	0.0	7.0	75.4	138

(*) No se cuenta con todos los datos necesarios.

El flujo de aire muestra una relación directa con el contenido de SO₂ y N₂, e inversamente proporcional al contenido de CO₂ y H₂O.

$$V_{pH_2O}[\%] = -0.8261 \cdot MFrAz_{[v/c]} + 16.143 \quad (R^2 = 0.9055)$$

El incremento del flujo de aire provoca un incremento en la pérdida por gases secos y una disminución en las pérdidas por Humedad del Carbón; siendo mayor el impacto en los gases secos. Se observa la disminución de la eficiencia de la caldera con el incremento del flujo de aire.

$$Q_{pLDFg}[\%] = 0.2 \cdot MFrAz_{[v/c]} + 2.7968 \quad (R^2 = 0.6221)$$

$$Q_{pLWF}[\%] = -0.0384 \cdot MFrAz_{[v/c]} + 0.5044 \quad (R^2 = 0.7926)$$

Tabla 8.8. Influencia del Requerimiento de Aire en las Pérdidas y Eficiencia de la Caldera

Carbón	Aire [t/tC]			Pérdidas de la Caldera [%]			Eficiencia [%]	
	Teórico	Húmedo	Exceso	Gases Secos	Hum. Carbón	Total	Caldera	Comb.
	MFrThACr	MFrAz	XpA [%]	QpLDFg	QpLWF	QpL	n	nc
IDADS	6.9	8.5	22	4.45	0.22	5.3	94.7	99.9
VEPDS	9.5	12.5	30	5.09	0.03	7.7	92.3	98.1
COCED	8.4	10.2	19	4.63	0.08	6.8	93.2	98.6
COCEC	8.6	11.0	26	4.87	0.07	7.0	93.0	98.6
COLLS	8.7	12.0	36	5.07	0.07	6.2	93.8	99.6
COLJS	9.2	12.0	29	5.24	0.05	7.6	92.4	98.5
AUCUS	8.8	11.4	28	5.43	0.05	8.1	92.0	98.2
M3100	9.4	12.0	27	5.32	0.06	7.8	92.2	98.3
M4800	8.4	10.3	21	5.13	0.09	7.7	92.3	98.2
M5800	8.8	10.6	19	4.83	0.07	7.6	92.4	98.0

El requerimiento de aire (teórico y real) es inversamente proporcional al contenido de humedad del carbón. Adicionalmente se observa que se incrementa con el aumento del contenido de carbono fijo.

$$MFrThACr_{[v/c]} = -0.134 \cdot MpWF_{[\%]} + 9.899 \quad (R^2 = 0.8946)$$

$$MFrAz_{[v/c]} = -0.2037 \cdot MpWF_{[\%]} + 12.93 \quad (R^2 = 0.7735)$$

Se observa que el incremento de la temperatura de gases de escape incrementa las pérdidas en general, disminuyendo la eficiencia de la caldera. Este factor depende, adicionalmente a las propiedades del carbón y el requerimiento de aire, del ensuciamiento de la caldera, siendo el factor más importante para el incremento de esta temperatura.

Tabla 8.9. Influencia de las Propiedades del Carbón en el Requerimiento de Aire.

Carbón	Análisis Inmediato [%]					Aire [t/tc]		
	P.Cal. [kJ/kg]	Humedad Total	Cenizas MpAsF	Materia Volátil	Carbón Fijo	Teórico	Húmedo	Exceso
	HHVF	MpWF	MpAsF	MpVm	MpFc	MFrThACr	MFrAz	XpA [%]
IDADS	22348	23	1	38	38	6.9	8.5	22
VEPDS	30329	4	7	37	53	9.5	12.5	30
COCED	27267	10	8	33	48	8.4	10.2	19
COCEC	28264	8	7	37	48	8.6	11.0	26
COLLS	27349	9	6	36	48	8.7	12.0	36
COLJS	29489	6	7	36	51	9.2	12.0	29
AUCUS	27380	6	14	31	49	8.8	11.4	28
M3100	27753	8	5	44	43	9.4	12.0	27
M4800	26321	10	11	29	46	8.4	10.3	21
M5800	27327	8	11	30	51	8.8	10.6	19

Tabla 8.10. Influencia de la Temperatura de Gases en las Pérdidas y Eficiencia de la Caldera

Carbón	TFgLv °C	Pérdidas de la Caldera [%]					Eficiencia [%]		
		Gases Secos	Comb. H2	Hum. Aire	Residuos Sólidos	NOx	Totales	Caldera	Comb.
		QpLDFg	QpLH2F	QpLWA	QpLRs	QpLNOx	QpL	n	nc
IDADS	129	4.45	0.30	0.07	0.00	(*)	5.34	94.7	99.9
VEPDS	135	5.09	0.33	0.09	0.02	0.00008	7.71	92.3	98.1
COCED	134	4.63	0.33	0.13	0.03	0.00006	6.84	93.2	98.6
COCEC	136	4.87	0.33	0.11	0.02	0.00005	6.99	93.0	98.6
COLLS	133	5.07	0.31	0.10	0.02	0.00006	6.23	93.8	99.6
COLJS	135	5.24	0.35	0.13	0.02	0.00007	7.56	92.4	98.5
AUCUS	141	5.43	0.36	0.15	0.05	0.00007	8.06	92.0	98.2
M3100	133	5.32	0.35	0.09	0.02	0.00003	7.81	92.2	98.3
M4800	137	5.13	0.36	0.12	0.04	0.00007	7.72	92.3	98.2
M5800	138	4.83	0.33	0.11	0.04	0.00006	7.58	92.4	98.0

(*) No se cuenta con todos los datos necesarios.

CONCLUSIONES

Se ha demostrado la importancia de las características del carbón, discriminando las más relevantes, en el comportamiento energético de la caldera. Adicionalmente los ajustes en los lazos de control y la determinación del requerimiento de aire son variables muy importantes a considerar cuando se tenga que cambiar de carbón, con el objetivo de mejorar la eficiencia de la caldera.

Se ha planteado una estrategia de control de la eficiencia de la caldera, en función a los datos históricos de parámetros operativos, muestreos y análisis, con el objetivo de mantener y mejorar la eficiencia discriminando los parámetros que se encuentren fuera de los límites de control normal.

Es posible afirmar que:

- El contexto energético nos obliga a quemar los combustibles fósiles de la forma más eficiente posible debido a restricciones económicas y medio ambientales.
- La Caldera ILO21 ha sido implementada con un sistema de control y monitoreo que permite realizar ajustes y seguimiento a los principales parámetros de control de eficiencia.

- El poder calorífico es la propiedad más importante del carbón y puede ser caracterizado en función a la composición del carbón, mediante el análisis inmediato o el análisis último; se ha encontrado una relación muy estrecha con la humedad total. El análisis inmediato refleja de una manera rápida y sencilla las características de combustión del carbón.
- El análisis de la composición de la ceniza sirve para determinar los posibles problemas de ensuciamiento y escoriamento, lo que define la frecuencia de soplado de la caldera.
- Es preferible contar con un solo tipo de carbón por un periodo mayor a 3 meses para poder optimizar su operación, evitando realizar mezclas.
- No se ha podido notar mayor variación entre los resultados obtenidos tomando como referencia a los gases de escape a la salida del economizador y los obtenidos tomando como referencia la salida del calentador de aire, lo que demuestra la ventaja del método de pérdidas al tener menor error debido al poco peso de las pérdidas.
- Las pérdidas no contabilizadas, por tener mínimo impacto en el total, son: rechazo de pirita, radiación al pozo de agua de sello y agua de enfriamiento.
- Es importante asegurar la confiabilidad de los datos reportados por los transmisores al SCID, para así realizar los ajustes, cálculos y evaluaciones necesarios para mantener o mejorar la eficiencia de la caldera. Adicionalmente el personal de laboratorio debe estar lo suficientemente entrenado en las normas y procedimientos de sus muestreos y análisis.

- Es importante actualizar los límites de control normal, ya que estos han sido construidos en base a datos históricos de operación. La comparación de estos límites permite evaluar la evolución de los equipos en el largo plazo.
- Es muy importante revisar los ajustes de los lazos de control de aire y combustible cuando se cambia de tipo de carbón, ya que la eficiencia depende en gran medida de los valores consigna que estos fijen. Siendo el ajuste de calorías la señal más importante a modificar.
- La determinación del flujo de carbón mediante los parámetros de control puede ser aprovechado para transitorios al ser integrado en el tiempo, como el encendido o apagado de quemadores de carbón, etc.
- En base al modelo energético se pueden plantear alternativas de optimización de parámetros operativos, principalmente en la determinación del aire requerido.

BIBLIOGRAFÍA

1. Energy for Tomorrow's World – Acting Now!, World Energy Council – 2000.
2. Survey of Energy Resources, 19th Edition, World Energy Council – 2001.
3. Coal Resources – Issues and Technological Outlook for the Future, Ando Katsuyoshi (Japan Coal Center), 18th World Energy Congress – 2001, Buenos Aires.
4. Balance Nacional de Energía 2002, Ministerio de Energía y Minas, Perú.
5. Lineamientos de Política de Largo Plazo para el Sector Energía, Ministerio de Energía y Minas, Perú.
6. Evaluation of Coal Quality Impacts On Power Plant Operation, Michael B. Doherty (AEP ProServ), Ohio.
7. Calderas – Tipos, Características y sus Funciones, Carl D. Shield, CECSA.
8. Fired Steam Generators – Performance Test Code 4, ASME – 1998.
9. The Effect of Physical and Chemical Properties of Coals on their Acceptability for Steam Generation, Coal Processing Consultants Ltd – 1980
10. BP Statistical Review of World Energy, British Petroleum, Junio de 2003.

11. Handbook for Thermal and Nuclear Power Engineers, Thermal and Nuclear Power Engineering Society, Marzo de 1994.
12. What Price Coal Quality in Electric Power Generation?, Lindsay Juniper y John Pobl, The Australian Coal Review, Junio de 1997.
13. Aprovechamiento y Gestión de la Energía, José M^a Goded Velarde, Fundación General de la Universidad Politécnica de Madrid, Octubre de 2003.
14. Tecnología del Carbón, Douglas M. Considine, Marcombo, 1986.
15. Planificación y Control para la Pulverización y Combustión de Carbón, Central Termoeléctrica Tocopilla, Julio de 1998.

APENDICE

A.1 Datos del Carbón (Como Recibido)

Carbón		Análisis Inmediato					Análisis Último					
		Poder Calorífico Bruto	Poder Calorífico Neto	Humedad Total	Ceniza	Materia Volátil	Carbón Fijo	Carbono	Hidrógeno	Nitrógeno	Azufre	Oxígeno
		KJ/kg	KJ/kg	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	VEPDS0100	28279	27048	6.91	10.20	33.19	49.70	68.98	4.95	1.33	0.87	6.73
2	VEPDS0200	27668	26420	8.40	10.85	33.50	47.25	68.14	4.85	1.29	0.88	5.56
3	COCEC0100	26830	25578	11.52	8.72	33.05	46.71	64.53	4.51	1.20	0.76	8.76
4	IDADS0100	22039	20666	24.70	0.90	38.10	36.30	55.33	3.57	0.59	0.10	14.61
5	COCEC0200	26868	25616	11.59	8.42	34.75	45.24	64.99	4.52	1.39	0.75	8.34
6	COCED0300	26085	24828	11.44	10.67	33.50	44.39	63.75	4.55	1.67	0.74	7.18
7	AULES0101	27755	26621	8.10	11.40	31.90	48.60	67.90	4.36	1.45	0.38	6.40
8	VEPDS0301	28534	27307	7.40	9.72	34.36	48.51	69.74	4.86	1.31	0.75	6.22
9	COCEC0402	26537	25276	10.64	10.48	32.31	46.57	63.95	4.66	1.26	0.59	8.42
10	COCEC0502	27278	26022	10.94	8.11	34.19	46.76	65.09	4.60	1.24	0.61	9.41
11	IDADS0202	22265	20913	24.00	1.10	38.00	36.90	54.13	3.59	0.12	0.11	16.61
12	VEPDS0402	29267	28053	6.99	8.21	34.85	49.95	71.85	4.86	1.31	0.87	5.91
13	VEPDS0502	28756	27534	7.43	8.93	34.46	49.18	71.14	4.85	1.31	0.91	5.43
14	COLLS0102	26826	25611	11.43	5.82	36.91	45.84	65.90	4.61	1.29	0.65	10.30
15	COLLS0202	28905	25620	12.23	5.17	36.27	46.33	66.45	4.58	1.29	0.67	9.61
16	COLLS0303	26880	25624	12.13	5.30	36.08	46.49	66.79	4.47	1.32	0.58	9.41
17	COLLS0403	26545	25364	11.74	6.98	36.31	44.97	64.53	4.42	1.28	0.83	10.22
18	COLLS0503	26847	25653	11.53	6.37	35.97	46.13	64.93	4.51	1.28	0.70	10.68
19	COLJS0103	28689	27479	7.42	7.23	36.23	49.12	69.55	4.80	1.54	0.69	8.77
20	AUCUS0103	27085	25959	8.50	12.70	32.40	46.40	66.20	4.54	1.50	0.61	6.00
19	COCEC0603	27508	26265	11.10	7.60	34.32	46.98	65.84	4.53	1.28	0.67	8.98
20	COCED0704	25812	24556	12.41	9.79	33.99	43.81	63.48	4.44	1.20	0.63	8.05
21	AUCUS0204	26675	25641	8.80	12.90	29.40	48.90	65.60	4.08	1.40	0.37	6.90
22	COCEC0804	27345	26114	11.08	7.54	34.10	47.28	67.76	4.47	1.30	0.57	7.28

Resumen por Tipo

1	IDADS	22152	20789	24.35	1.00	38.05	36.60	54.73	3.58	0.36	0.11	15.61
2	AULES	27755	26621	8.10	11.40	31.90	48.60	67.90	4.36	1.45	0.38	6.40
3	VEPDS	28501	27272	7.43	9.58	34.07	48.92	69.97	4.87	1.31	0.86	5.97
4	COCED	25948	24692	11.93	10.23	33.75	44.10	63.62	4.50	1.44	0.69	7.62
5	COCEC	27061	25812	11.15	8.48	33.79	46.59	65.36	4.55	1.28	0.66	8.53
6	COLLS	26801	25575	11.81	5.93	36.31	45.95	65.72	4.52	1.29	0.69	10.04
7	COLJS	28689	27479	7.42	7.23	36.23	49.12	69.55	4.80	1.54	0.69	8.77
8	AUCUS	26880	25800	8.65	12.80	30.90	47.65	65.90	4.31	1.45	0.49	6.45

A.2 Datos de Cálculo

N°	Fecha	Carbón	Carga	Flujo de Carbón	Flujo Total de Aire	Inyección de Agua	Análisis Inmediato de Carbón (as fired)					
							Poder Calorífico Bruto		Humedad Total	Canizas MpAsF	Materia Volátil	Carbón Fijo
							HHVF	MpWVF	MpAsF	MpVm	MpFc	
kJ/kg	%	%	%	%								
dd/mm/aa	XX.XX.XX.XX	MW	MhF	MhA	Vst							
			tn/h	tn/h	l/min							
1	03/10/00	IDADS0100	135	55.8		0	22178	23.74	0.85	38.10	37.21	
2	01/07/02	IDADS0202	135	53.28		0	22517	22.23	0.87	38.00	38.60	
4	18/07/02	M31001	135	47.36		2.5	26784	10.23	3.96	47.45	38.36	
5	31/07/02	M31002	135	44.07		7	26010	6.82	5.76	43.56	43.84	
6	07/08/02	M31002	135	47.75		4.5	28248	7.18	5.08	44.78	42.96	
7	14/08/02	COCEC0402	135	47.7		3.5	27974	6.97	7.09	43.02	42.92	
8	21/08/02	COCEC0402	136	46.8		3	27614	7.59	7.42	44.31	40.69	
9	28/08/02	COCEC0402	135	46.72		5	28106	7.35	6.63	41.01	45.02	
10	04/09/02	COCEC0402	137	45.76		3	28058	7.26	6.66	41.64	44.44	
11	11/09/02	COCEC0502	137	47.3		3	27714	7.02	7.68	42.59	42.71	
12	18/09/02	COCEC0502	137	45.81	445.8	8	26307	6.83	10.68	41.13	41.36	
13	25/09/02	VEPDS0402	137	43.91	464.7	3	30756	3.87	4.77	40.45	50.91	
14	02/10/02	VEPDS0402	137	43.8		4	30780	3.36	5.30	41.18	50.15	
15	09/10/02	M31003	137	45.22	453.9	4	28469	7.43	5.30	46.13	41.14	
16	16/10/02	M31003	137	46.03	463.3	5	27401	7.21	6.23	45.75	40.82	
17	23/10/02	M31003	137	46.55	458.9	4	27601	8.44	6.01	35.01	50.54	
18	31/10/02	COLLS0102	136	46.8	460.6	0	26850	11.01	6.24	36.45	46.30	
21	06/11/02	VEPDS0502	136	43.16	450.0	12	31087	3.15	6.05	37.88	52.81	
22	11/11/02	VEPDS0502	136	44.28	457.6	5	31087	3.15	6.05	37.98	52.81	
23	13/11/02	VEPDS0502	135	43.53	451.2	5.7	30401	3.59	7.65	35.02	53.74	
24	20/11/02	VEPDS0502	138	43.45	458.1	12	28849	4.53	6.82	33.28	53.96	
25	27/11/02	VEPDS0502	137	43.15	462.8	8	29335	4.49	7.85	33.28	54.38	
26	04/12/02	COLLS0102	136	46.05	461.9	0	26834	8.21	5.76	37.69	48.34	
27	11/12/02	COCEC0502	136	46.09	462.4	9	26193	7.48	7.96	33.39	51.17	
28	18/12/02	COCEC0502	137	47.39	461.8	7	26217	10.07	6.65	34.41	48.87	
31	06/01/03	COLLS0102	136	46.72	457.9	0	26169	6.76	5.30	37.85	48.91	
36	19/02/03	COLLS0202	136	46.37	455.9	6	27402	6.19	5.61	38.07	48.13	
38	06/03/03	COLLS0102	135	47.78	460.4	7	27402	9.7	5.35	36.04	48.92	
39	12/03/03	COLLS0102	136	48.19	449.1	5	27727	8.44	5.05	38.49	47.02	
40	19/03/03	COLLS0202	135	47		5	27780	8.5	4.88	39.00	47.63	
43	13/05/03	COLLS0202	141	47.06	464.4	0	27625	9.1	4.37	38.51	48.02	
44	21/05/03	COLLS0202	135	46.57	463.8	0	26947	9.01	6.88	36.14	47.96	
45	28/05/03	COLLS0202	135	46.27	476.9	0	27404	8.9	6.33	34.94	49.82	
46	04/06/03	COLLS0303	135	46.43	447.7	3	27722	9.39	4.71	37.76	48.14	
47	11/06/03	COLLS0303	136	46.26	447.1	0	27458	9	5.29	36.30	49.41	
48	18/06/03	COLLS0303	135	46.00	458.1		26694	9.54	6.15	35.64	48.87	
49	25/06/03	COLLS0303	137	46.32	473.7	10	27159	10.09	4.08	36.23	49.80	
50	02/07/03	COLLS0202	135	45.33	476.7	8	26894	10.03	4.85	35.75	49.36	
51	09/07/03	COLLS0202	135	46.40	454.4	0	26896	10.27	7.25	33.61	48.66	
52	16/07/03	COLLS0303	135	45.89	445.4	6	27304	10.47	5.44	35.34	48.75	
53	23/07/03	COLLS0303	137	47.57	463.9	7	27525	10.43	5.41	35.73	46.43	
54	30/07/03	COLLS0403	135	46.15	457.7	8	27188	10.01	6.66	34.34	48.99	
55	06/08/03	COLLS0403	137	46.85	452.9	8	27314	9.61	6.66	35.97	47.76	
56	13/08/03	COLLS0403	137	46.95	450.6	0	27738	7.84	6.52	36.82	48.82	
57	20/08/03	COLLS0403	137	46.20	444.8	8	27696	9.1	5.31	36.22	49.37	
58	27/08/03	COLLS0403	136	46.43	471.7	9	27073	8.82	6.57	36.14	48.47	
59	03/09/03	COLLS0403	137	46.75	454.1	8	27102	9.28	7.09	35.97	47.66	
60	10/09/03	COLLS0403	136	47.14	458.6	8	27319	8.74	6.42	35.44	48.40	
61	17/09/03	COLLS0503	136	46.29	446.3	9	27334	9.34	6.07	36.83	47.76	
62	24/09/03	COLLS0503	137	46.78	451.5	5	27153	9.28	6.59	35.54	48.61	
63	01/10/03	COLLS0403	136	48.58	453.7	10	27460	10.21	5.38	35.31	49.09	
64	08/10/03	AUCUS0103	135	45.48	463.6	0	27142	7.2	11.77	32.22	48.60	
65	16/10/03	COLLS0103	135	43.17	442.8	10	29208	7.43	7.74	35.45	51.37	
66	22/10/03	COLLS0103	137	44.35	454.0	9	29481	5.77	6.87	35.45	51.91	
67	29/10/03	COLLS0103	136	43.31	454.5	10	29127	5.76	7.02	36.53	50.69	
68	05/11/03	COLLS0103	135	44.50	453.7	6	29852	5.24	5.44	38.24	51.08	
69	12/11/03	COLLS0103	135	45.04	461.3	16	29101	6.51	7.44	35.22	51.45	
70	19/11/03	COLLS0103	135	44.15	443.0	11	30067	6.05	5.07	36.43	52.45	
71	26/11/03	AUCUS0103	135	47.07	449.7	5	27163	5.6	14.93	30.94	48.53	
72	05/12/03	AUCUS0103	135	46.78	448.3	7	26802	6.8	15.37	29.30	48.73	
73	10/12/03	AUCUS0103	135	46.51	462.2	10	28008	4.73	14.00	32.55	48.71	
74	17/12/03	AUCUS0103	135	47.66	454.9	8	27274	5.62	14.93	31.26	48.18	
78	14/01/04	AUCUS0103	136	48.15	456.3	5	27892	6.27	12.11	31.75	49.87	
79	21/01/04	COCEC0603	137	48.08	448.9	0	26725	8.48	6.17	33.45	51.90	
80	28/01/04	COCEC0603	137	47.84	451.9	4	28523	9.02	4.64	34.26	52.07	
81	04/02/04	COCEC0603	137	47.12	438.6	5	28565	8.56	6.24	32.52	52.67	
82	11/02/04	COCEC0603	136	46.40	444.1	5	28797	8.98	5.80	34.34	50.90	
83	18/02/04	COCEC0603	135	47.10	443.7	8	28780	8.92	5.28	34.20	51.60	
84	26/02/04	COCEC0704	137	51.75	461.9	0	26581	10.17	8.06	32.08	47.94	
85	03/03/04	COCEC0603	135	47.42	449.4	0	26643	8.27	7.05	33.57	51.11	
86	10/03/04	COCEC0603	136	47.06	445.8	5	28463	8.43	7.75	34.25	49.57	
87	18/03/04	COCEC0704	135	50.71	431.6	0	27838	9.76	7.45	33.26	49.53	
89	31/03/04	COCEC0704	135	49.57	450.5	5	27322	10.12	6.47	34.31	49.10	
90	07/04/04	COCEC0704	135	50.43	445.9	0	26557	10.12	8.94	33.41	47.53	
91	23/04/04	COCEC0704	136	49.55	439.9	0	28036	10.53	8.29	33.94	47.24	
92	28/04/04	M48001	136	48.93	434.5	0	26755	8.96	11.60	30.99	48.45	
93	05/05/04	M48001	135	49.33	448.9	0	25888	11.38	10.98	26.52	45.52	
94	12/05/04	M58001	136	47.17	447.2	0	27616	8.39	10.13	30.22	51.26	
95	19/05/04	M58001	135	48.14	450.6	0	27038	8.68	11.55	29.51	50.37	
96	26/05/04	COCEC0804	136	47.02	432.1	5	28028	8.73	7.82	31.22	52.23	
97	02/06/04	COCEC0804	135	46.36	449.9	0	28577	8.62	6.35	35.27	49.76	

Valores Promedios por Tipo de Carbón (@ 135MW)

1	2	IDADS	135.0	54.5		0.0	22348	22.98	0.96	38.05	38.01
3	7	VEPDS	136.1	43.6	457.1	7.1	30329	3.73	6.84	37.03	52.59
4	5	COCEC	135.6	50.4	446.0	1.0	27267	10.14	8.04	33.40	49.27
5	17	COCEC	138.1	46.9	447.9	4.3	28264	8.15	6.93	36.74	48.18
6	28	COLLS	136.1	46.6	458.1	4.5	27349	9.33	5.79	38.36	48.47
7	6	COLLS	135.5	44.1	451.5	10.7	29489	6.13	6.60	38.22	51.49
8	6	AUCUS	135.1	46.9	455.8	5.8	27380	6.00	13.85	31.34	48.81
9	6	M3100	136.0	46.2	458.7	4.5	27753	7.89	5.39	43.78	42.95
10	2	M4800	135.5	49.1	440.7	0.0	26321	10.17	11.28	28.75	45.99
11	2	M5800	135.5	47.7	449.0	0.0	27327	8.49	10.64	29.67	50.62

N°	Fecha	Carbón	Condiciones Atmosféricas				Análisis de Gases						
			Presión Atmosférica	Temperatura de Bulbo Húmedo	Temperatura de Bulbo Seco	O2 al Ingreso de AH	CO2 al Ingreso de AH	O2 a la salida del AH	CO2 a la salida del AH	Inquemados (salida del ECO)	CO a la salida del AH	NOx a la salida del AH	
			Pa kPa	Twb °C	Tdb °C	DvpO2 (En) % volumetrico	DvpCO2 (En) % volumetrico	DvpO2 % volumetrico	DvpCO2 % volumetrico	MpCRa %	DvpCO (10 ⁴) mg/m3w	CRT mg/m3N	
1	03/10/00	IDADS0100	101.2	14.9	18.5	3.8	15.8	5.11	14.7	2.4	8.81		
2	01/07/02	IDADS0202	101.04	14.7	17.5	3.78	15.49	5.55	14.25	2.9	69.24		
4	18/07/02	M31001	101.2	14.5	17	3.66	15.59	5.63	13.82	21.78	0.81		
5	31/07/02	M31002	101.2	15	18	4.93	14.3	7.38	12.11	16.95	0.73		
6	07/08/02	M31002	101.2	14.8	17.9	4.68	14.31	5.44	13.64	19.81	167.87		
7	14/08/02	COCEC0402	101.2	15	18	4.25	14.55	6.04	12.99	11.6	118.77		
8	21/08/02	COCEC0402	101.2	15	18	2.95	14.45	4.42	13.27	11.25	1.42		
9	28/08/02	COCEC0402	101.2	15	18	4.45	14.88	5.75	13.71	8.93	7.81		
10	04/09/02	COCEC0402	101.2	15	18	5.05	14.45	8.90	12.77	13.67	13.4		
11	11/09/02	COCEC0502	101.2	16	19.5	5.3	13.9	7.11	12.29	12.81	17.4		
12	18/09/02	COCEC0502	101.6	15.5	19.15	4.18	14.85	5.69	13.52	9.81	10.54		
13	25/09/02	VEPDS0402	101.6	15.3	19.15	6.25	12.6	8.64	10.39	21.8	18.84		
14	02/10/02	VEPDS0402	101.6	15.5	19.15	4.32	13.92	6.07	12.48	18.75	0.8		
15	09/10/02	M31003	101.6	15.5	19.15	3.13	14.86	3.86	14.44	20.66	111.93		
16	16/10/02	M31003	100.83	16.57	18.3	5.85	13.85	7.08	12.73	21.25	191.458		
17	23/10/02	M31003	101.105	17.4	22	4.95	14.4	8.09	11.57	21.84	230.21		
18	31/10/02	COLLS0102	100.888	18	24	4.85	14.03	6.13	12.92	2.78	0.93		
21	06/11/02	VEPDS0502	101.41	17	21	4.65	14.48	6.82	12.71	22.13	20.86		
22	11/11/02	VEPDS0502	100.8	16	20.4	3.98	14.44	5.65	13.00	22.13	17.07		
23	13/11/02	VEPDS0502	101.14	16	20.05	5.05	14.25	5.9	12.75	17.72	7.36		
24	20/11/02	VEPDS0502	100.8	17.15	20.3	4.7	14.7	5.9	13.4	20.95	0.9		
25	27/11/02	VEPDS0502	100.76	19	24.95	5.85	13.95	5.83	13.4	20.11	50.35		
26	04/12/02	COLLS0102	100.6	17.6	21.8	4.8	14.44	6.04	12.86	3.84	436.89		
27	11/12/02	COLLS0102	101	16.75	20.1	4.95	15.13	5.13	13.5	10.81	341.04		
28	18/12/02	COCEC0502	101.291	19.7	24	5.8	13.5	5.88	13.45	13.4	419.5		
31	08/01/03	COLLS0102	100.78	19	25.39	5.87	13.73	8.05	13.56	5.11	901.88		
36	18/02/03	COLLS0202	100.848	20.05	25.5	5.2	14.1	6.15	13.25	4.86	4.19		
38	06/03/03	COLLS0102	100.93	17.9	21.3	5.9	14.2	6.25	14	4.67	280.19		
39	12/03/03	COLLS0102	100.849	18.2	23	5.9	14.2	6.25	14	4.92	43.94		
40	19/03/03	COLLS0202	100.76	16.4	20	5	13.86	5.56	13.08	7.57	82.21		
43	13/05/03	COLLS0202	101.12	16.1	20.6	3.9	15.9	5.364937239	14.51638519	4.47	4.79		
44	21/05/03	COLLS0202	101.198	17.5	21.2	4.65	14.65	6.35	13.15	3.82	42.33		
45	28/05/03	COLLS0202	101.2	14.8	18.2	5.88	13.35	6.4	13.05	6.05	162.16		
46	04/06/03	COLLS0303	101.063	15.3	18.5	6.35	13.40	6.38	13.25	2.21	54.77		
47	11/06/03	COLLS0303	101.063	14.2	18.5	4.8	14.65	6.20	13.50	8.51	126.43		
48	18/06/03	COLLS0303	100.46	14.45	19.3	6.2	13.35	5.50	14.30	4.56	187.91		
49	25/06/03	COLLS0303	101.15	17.4	21	8.1	13.80	6.45	12.70	3.57	186.08		
50	02/07/03	COLLS0202	101.11	18.05	22.5	6	13.40	8.10	11.50	4.63	227.78		
51	09/07/03	COLLS0202	101.31	18.8	24	5.1	14.35	7.10	12.55	6.42	52.18		
52	16/07/03	COLLS0303	101.325	18	23.4	5.85	14.35	8.40	13.10	4.36	101.86		
53	23/07/03	COLLS0303	101.2	17.7	21.05	5.85	13.75	5.75	12.20	4.56	113.90		
54	30/07/03	COLLS0403	101.24	16.65	19.2	6.15	13.35	6.45	13.15	4.36	185.55		
55	06/08/03	COLLS0403	101.2	17.7	22.7	6.8	12.50	7.85	12.90	4.94	218.07		
56	13/08/03	COLLS0403	101.1	18.5	24	4.95	14.05	6.20	13.40	5.27	91.72		
57	20/08/03	COLLS0403	101.2	16.9	20.5	4.7	14.75	6.35	13.35	6.41	90.83		
58	27/08/03	COLLS0403	101.27	17.75	22.1	7.4	12.00	7.30	12.20	4.14	61.86		
59	03/09/03	COLLS0403	101.2	20.2	26.3	6.25	12.85	8.35	11.50	5.99	103.10		
60	10/09/03	COLLS0403	101.3	15.8	18.3	6.3	13.25	6.25	13.15	4.36	102.47		
61	17/09/03	COLLS0503	101.2	16.5	19.2	6.9	12.50	7.10	12.60	3.82	3.07		
62	24/09/03	COLLS0503	101.2	17.8	20.2	6.33	13.33	6.87	12.73	3.81	84.01		
63	01/10/03	COLLS0403	100.89	20.95	25.3	5.9	13.60	8.15	13.10	4.91	483.52		
64	08/10/03	AUCUS0103	101.28	20.85	26.7	6.1	13.00	6.75	12.55	7.40	68.49		
65	15/10/03	COLLS0103	101.2	20.9	25.8	4.65	14.40	7.40	12.00	21.25	111.58		
66	22/10/03	COLLS0103	101.02	20.8	25.85	4.65	14.65	6.45	12.85	15.11	54.47		
67	29/10/03	COLLS0103	101.18	21.05	25.65	4.1	14.80	7.50	12.20	11.89	5.40		
68	05/11/03	COLLS0103	101.2	23.35	30.2	4.4	14.80	8.00	11.60	12.68	31.38		
69	12/11/03	COLLS0103	100.911	19.1	21.5	6.33	13.20	6.73	12.60	18.81	241.35		
70	19/11/03	COLLS0103	101.187	20	23.9	4.8	14.33	6.93	12.40	17.24	91.39		
71	26/11/03	AUCUS0103	101.2	23.45	28.5	3.87	15.00	7.17	12.27	9.31	110.91		
72	05/12/03	AUCUS0103	101.176	23.2	30	3.4	15.53	5.80	13.33	12.18	75.18		
73	10/12/03	AUCUS0103	100.92	20.7	25.4	6.27	13.07	6.53	12.53	6.13	203.29		
74	17/12/03	AUCUS0103	101.2	24.5	33	4.53	14.40	6.73	12.47	8.33	81.32		
78	14/01/04	AUCUS0103	109.14	24.70	30.15	3.80	15.20	5.90	13.30	10.56	498.58		
79	21/01/04	COCEC0603	101.33	23.50	30.24	4.00	14.70	6.50	12.60	18.28	13.24		
80	28/01/04	COCEC0603	101.15	24.85	33.50	5.20	14.10	8.80	12.50	18.87	22.36		
81	04/02/04	COCEC0603	100.50	24.80	32.40	4.50	14.60	6.20	12.90	17.77	7.62		
82	11/02/04	COCEC0603	100.70	23.45	29.27	3.50	15.80	6.40	13.10	11.75	10.27		
83	18/02/04	COCEC0603	100.80	22.90	28.45	4.60	14.70	6.85	12.60	13.13	6.30		
84	26/02/04	COCEC0704	101.04	24.00	31.95	4.70	14.60	6.30	13.20	9.36	43.64		
85	03/03/04	COCEC0603	100.56	22.20	26.87	4.10	14.80	6.80	12.50	19.55	21.55		
86	10/03/04	COCEC0603	100.95	24.85	30.52	4.10	15.30	6.50	13.00	16.02	7.31		
87	18/03/04	COCEC0704	100.52	25.80	33.62	4.20	15.00	6.40	12.80	13.17	96.17		
89	31/03/04	COCEC0704	100.80	22.50	28.48	3.40	15.40	7.09	13.50	15.39	148.75		
90	07/04/04	COCEC0704	100.80	21.60	25.58	3.30	14.80	5.30	13.00	11.74	48.00		
91	23/04/04	COCEC0704	101.29	22.40	29.81	1.40	16.20	1.70	13.30	11.69	72.89		
92	28/04/04	M48001	101.28	20.40	25.67	4.30	14.90	6.10	13.10	10.50	96.82		
93	05/05/04	M48001	101.11	19.75	22.27	3.20	15.80	6.10	13.30	10.69	82.68		
94	12/05/04	M58001	101.16	22.00	28.85	3.40	15.90	4.30	15.40	13.57	162.52		
95	19/05/04	M58001	101.30	20.10	25.90	4.50	19.80	5.70	13.80	11.62	93.14		
96	26/05/04	COCEC0804	101.24	18.30	23.40	3.60	15.30	5.60	13.70	17.28	67.43		
97	02/06/04	COCEC0804	101.17	19.93	24.30	3.60	15.30	5.60	13.70	16.19	71.76		

Valores Promedios por Tipo de Carbón (@ 135MW)

N°	Fecha	Carbón	Presión Atmosférica	Temperatura de Bulbo Húmedo	Temperatura de Bulbo Seco	O2 al Ingreso de AH	CO2 al Ingreso de AH	O2 a la salida del AH	CO2 a la salida del AH	Inquemados (salida del ECO)	CO a la salida del AH	NOx a la salida del AH
1	3	IDADS	101.1	14.8	18.0	3.78	15.65	5.33	14.48	2.65	36.03	0.80
3	7	VEPDS	101.2	16.8	20.7	4.95	14.05	6.49	12.58	2.51	16.80	509.13
4	5	COCEC	100.9	23.3	28.5	3.49	15.20	5.94	13.16	12.27	81.81	433.84
5	17	COCEC	101.1	19.6	24.2	4.37	14.67	6.12	13.06	14.06	47.73	364.82
6	28	COLLS	101.1	17.4	21.7	5.72	13.77	6.47	13.06	4.79	142.57	416.77
7	8	COLLS	101.1	20.9	25.5	4.82	14.36	7.17	12.28	16.18	68.26	453.68
8	6	AUCUS	102.5	22.9	28.8	4.68	14.37	6.48	12.74	8.99	172.96	437.15
9	6	M3100	101.2	15.6	18.9	4.53	14.56	6.21	13.05	20.35	117.13	216.36
10	2	M4800	101.2	20.1	24.0	3.75	15.40	6.10	13.20	10.59	89.75	449.15
11	2	M5800	101.2	21.1	27.4	3.95	17.85	5.00	14.60	12.60	127.63	458.31

N°	Fecha	Carbón	Parámetros de Aire y Gases				Cálculos del Caldero					
			Temperatura de Aire a la Salida del VTF	Temperatura de Gases al Ingreso del AH	Temperatura de Gases a la salida del AH (1)	Temperatura de Gases a la salida del AH (2)	Volaje de Media Tensión	Corriente del Motor del VAP	Corriente del Motor del Pulverizador A	Corriente del Motor del Pulverizador B	Corriente del Motor del Pulverizador C	Corriente del Motor del VRG
			°C	°C	°C	°C	KV	A	A	A	A	A
1	03/10/00	IDADS0100	24	368.3	129	129	6.6	62.22	44.49	0.00	44.38	33.28
2	01/07/02	IDADS0202	23.22	368.1	129.6	129.6	6.6	62.09	46.76	0.00	47.21	29.9
4	18/07/02	M31001	24.28	370	138.75	122.05	6.799	62	46.38	44.80	0.00	21.67
5	31/07/02	M31002	24.14	372.97	142	126.43	6.754	58.14	45.14	0.00	44.90	30.97
6	07/08/02	M31002	23.74	377.22	143.93	127.62	6.722	57.78	46.02	45.66	0.00	21.75
7	14/08/02	COCEC0402	24.63	368.94	140.83	124.73	6.662	57.71	0.00	46.50	46.16	22.24
8	21/08/02	COCEC0402	23.67	367	141.08	125.64	6.746	57.27	46.25	44.50	0.00	22.43
9	28/08/02	COCEC0402	23.71	368.88	139.51	124.46	6.752	57.12	47.48	0.00	45.88	29.2
10	04/09/02	COCEC0402	24.44	371.03	142.9	126.9	6.762	56.8	0.00	46.30	46.96	22.7
11	11/09/02	COCEC0502	23.98	365	139.8	124.6	6.75	57.8	46.80	46.10	0.00	22.8
12	18/09/02	COCEC0502	26	369.7	144.6	129.4	6.749	57.36	47.33	0.00	45.99	32.78
13	25/09/02	VEPDS0402	25.6	367.67	143.2	127.6	6.769	55.23	0.00	46.66	46.66	22.62
14	02/10/02	VEPDS0402	25.91	370.2	142.7	127.1	6.751	55.09	46.27	45.22	0.00	23.32
15	09/10/02	M31003	25.5	369.5	141.7	126.4	6.761	56.66	46.82	0.00	46.28	31.61
16	16/10/02	M31003	26	369	141	125.6	6.74	57.44	46.95	0.00	46.65	24.6
17	23/10/02	M31003	26.5	366.5	140.3	125.3	6.748	57.21	0.00	45.22	46.30	23.46
18	31/10/02	COLLS0102	26	367.2	136.2	123.5	6.765	57.02	47.68	45.61	0.00	23.23
21	06/11/02	VEPDS0502	26.6	369.3	145.6	130.5	6.765	56.63	47.94	0.00	45.61	34.47
22	11/11/02	VEPDS0502	26.5	369	141	126	6.75	55.71	48.20	45.00	0.00	27.9
23	13/11/02	VEPDS0502	25.6	362.8	139.8	125.3	6.772	56.41	48.01	45.35	0.00	23.58
24	20/11/02	VEPDS0502	26.8	372.4	144.1	128.7	6.773	55.36	48.11	0.00	47.87	36.81
25	27/11/02	VEPDS0502	27	365.5	142.7	127.4	6.724	55.32	0.00	45.49	46.85	22.66
26	04/12/02	COLLS0102	27	369	141.2	128.4	6.763	56.56	47.89	0.00	47.84	24.73
27	11/12/02	COCEC0502	27.2	368.3	147.6	131.5	6.759	55.95	45.91	45.25	0.00	26.97
28	18/12/02	COLLS0102	29.3	376.4	144	126.5	6.72	57.47	0.00	45.22	47.92	25.31
31	09/01/03	COLLS0102	28.7	374.2	147.7	132.4	6.751	56.68	46.06	45.06	0.00	29.49
36	19/02/03	COLLS0202	30.5	373.1	144.6	130.3	6.758	55.92	47.26	45.98	0.00	23.14
38	08/03/03	COLLS0102	28.4	361.6	142.2	127.4	6.741	58.32	0.00	45.39	46.93	31.91
39	12/03/03	COLLS0102	28.3	372.6	143.8	129.1	6.748	58.18	0.00	45.76	49.14	31.79
40	19/03/03	COLLS0202	29.44	373.22	140.6	126.38	6.6	57.67	47.24	45.50	0.00	34.72
43	13/05/03	COLLS0202	26.27	371.64	145.2	128.05	6.803	57.68	46.65	0.00	45.32	30.21
44	21/05/03	COLLS0202	27	369.9	142.6	127.3	6.758	57.55	0.00	46.01	45.68	29.78
45	28/05/03	COLLS0202	25.3	373.7	143.8	127.5	6.756	56.71	47.65	45.73	0.00	29.12
46	04/06/03	COLLS0303	25.76	372.45	142.10	126.91	6.79	57.43	47.65	45.66	0.00	29.50
47	11/06/03	COLLS0303	25.21	371.42	143.15	127.71	6.79	57.70	49.07	0.00	45.52	37.33
48	18/06/03	COLLS0303	25.10	370.73	139.73	124.36	6.80	57.39	47.42	0.00	45.93	29.99
49	25/06/03	COLLS0303	24.29	373.52	139.99	123.84	6.76	57.23	47.68	0.00	45.67	29.80
50	02/07/03	COLLS0202	25.03	371.12	139.27	123.44	6.76	56.87	46.04	0.00	45.38	29.50
51	09/07/03	COLLS0202	24.37	368.22	139.12	124.96	6.78	57.22	0.00	47.59	45.50	30.49
52	16/07/03	COLLS0303	22.26	368.07	137.26	122.30	6.80	58.04	47.99	0.00	45.48	31.36
53	23/07/03	COLLS0303	23.59	373.72	140.81	124.71	6.82	57.49	48.23	0.00	45.32	29.28
54	30/07/03	COLLS0403	21.99	370.32	139.01	123.12	6.76	58.06	49.40	0.00	45.34	32.42
55	06/08/03	COLLS0403	23.17	369.76	138.37	123.08	6.79	58.42	48.43	0.00	45.26	31.06
56	13/08/03	COLLS0403	23.89	371.42	140.04	125.06	6.80	57.55	0.00	48.26	45.62	35.36
57	20/08/03	COLLS0403	23.47	369.64	139.15	124.18	6.77	58.11	49.39	0.00	45.63	36.70
58	27/08/03	COLLS0403	23.68	369.38	138.09	122.32	6.75	57.69	46.88	0.00	45.38	32.56
59	03/09/03	COLLS0403	23.43	370.42	139.12	123.91	6.76	58.41	48.01	0.00	45.65	32.68
60	10/09/03	COLLS0403	22.25	368.87	136.56	121.40	6.76	58.47	49.22	0.00	45.24	31.58
61	17/09/03	COLLS0503	22.20	368.29	138.41	123.47	6.79	57.54	48.21	46.12	0.00	31.79
62	24/09/03	COLLS0503	24.29	369.30	137.59	122.75	6.70	57.69	47.96	45.67	0.00	32.39
63	01/10/03	COLLS0403	25.80	369.73	139.64	124.67	6.76	57.87	46.78	0.00	45.79	35.05
64	08/10/03	AUCUS0103	26.29	373.45	142.29	126.53	6.80	56.45	50.33	0.00	46.48	31.10
65	15/10/03	COLLS0103	26.70	369.08	141.08	127.41	6.75	55.69	48.75	0.00	46.08	30.91
66	22/10/03	COLLS0103	26.30	370.15	142.81	127.61	6.78	56.07	47.95	0.00	46.26	33.88
67	29/10/03	COLLS0103	27.58	367.34	142.02	126.69	6.82	55.45	48.98	0.00	46.10	34.09
68	05/11/03	COLLS0103	27.60	385.41	140.98	126.34	6.70	58.11	0.00	46.39	45.81	31.54
69	12/11/03	COLLS0103	27.50	370.20	145.00	128.20	6.80	55.70	50.31	47.02	0.00	26.63
70	19/11/03	COLLS0103	26.90	367.10	141.90	127.20	6.79	56.46	49.47	0.00	45.95	36.27
71	26/11/03	AUCUS0103	29.22	373.58	146.99	131.47	6.79	57.08	0.00	49.02	46.92	28.59
72	05/12/03	AUCUS0103	29.16	378.10	147.66	132.17	6.78	57.29	51.35	0.00	46.71	36.00
73	10/12/03	AUCUS0103	30.70	369.63	153.20	136.90	6.77	56.80	51.23	0.00	47.00	29.64
74	17/12/03	AUCUS0103	30.08	383.89	151.00	134.95	6.80	57.40	50.03	0.00	46.74	34.36
78	14/01/04	AUCUS0103	30.37	378.48	149.98	134.07	6.75	58.09	0.00	48.90	47.08	29.34
79	21/01/04	COCEC0603	29.97	374.47	146.60	131.67	6.74	58.40	0.00	48.54	45.28	35.91
80	28/01/04	COCEC0603	29.58	369.81	144.42	128.38	6.76	57.82	0.00	45.44	45.18	34.06
81	04/02/04	COCEC0603	30.87	367.20	143.69	128.42	6.79	57.99	44.83	46.34	0.00	35.80
82	11/02/04	COCEC0603	28.39	384.63	150.10	134.50	6.77	56.51	45.66	45.77	0.00	36.26
83	18/02/04	COCEC0603	29.60	387.20	148.70	133.40	6.74	57.50	44.80	45.30	0.00	36.70
84	26/02/04	COCEC0704	30.59	370.82	142.63	127.56	6.73	60.11	0.00	47.42	45.68	34.65
85	03/03/04	COCEC0603	27.86	367.49	140.74	125.81	6.73	58.03	44.30	0.00	45.09	40.96
86	10/03/04	COCEC0603	28.31	367.73	142.42	127.35	6.76	57.68	44.28	48.43	0.00	31.85
87	18/03/04	COCEC0704	29.45	365.45	141.80	127.27	6.74	62.06	44.68	0.00	45.51	41.39
88	31/03/04	COCEC0704	28.44	371.26	140.08	125.12	6.78	58.82	44.50	45.50	0.00	34.15
90	07/04/04	COCEC0704	27.69	364.21	141.02	128.02	6.65	61.07	44.09	0.00	44.63	39.69
91	23/04/04	COCEC0704	27.78	367.70	141.87	126.29	6.82	57.55	44.70	0.00	45.78	33.90
92	28/04/04	M48001	26.61	369.73	143.61	127.82	6.70	58.50	44.57	0.00	45.29	29.02
93	05/05/04	M48001	25.18	376.76	148.99	130.39	6.72	58.22	0.00	46.04	45.48	28.41
94	12/05/04	M58001	26.57	376.11	146.48	136.04	6.76	58.52	44.23	0.00	45.68	26.81
95	19/05/04	M58001	24.83	379.17	145.64	129.07	6.74	57.23	44.43	0.00	45.31	29.16
96	26/05/04	COCEC0804	23.74	370.38	140.72	125.29	6.73	56.63	44.33	45.47	0.00	29.47
97	02/06/04	COCEC0904	23.66	369.16	137.82	122.11	6.76	56.29	44.17	0.00	45.15	32.45

Valores Promedios por Tipo de Carbón (@ 135MW)

N°	Fecha	Carbón	Temperatura de Aire a la Salida del VTF	Temperatura de Gases al Ingreso del AH	Temperatura de Gases a la salida del AH (1)	Temperatura de Gases a la salida del AH (2)	Volaje de Media Tensión	Corriente del Motor del VAP	Corriente del Motor del Pulverizador A	Corriente del Motor del Pulverizador B	Corriente del Motor del Pulverizador C	Corriente del Motor del VRG
1		IDADS	23.6	368.2	129.3	129.3	6.60	62.2	45.6		45.8	31.6
3		VEPDS	26.3	367.6	142.7	127.5	6.76	55.5	47.7	45.5		27.3
4		COCEC	26.8	367.9	141.5	126.5	6.76	56.9	44.5	46.5		36.8
5		COCEC	25.8	372.4	143.3	127.9	6.76	57.3	44.5	45.8		30.5
6		COLLS	25.3	371.2	140.6	125.3	6.77	57.6	48.2	46.1		31.0
7		COLLS	27.1	368.2	142.5	127.5	6.79	55.9	49.1	48.7		34.1
8		AUCUS	29.3	379.5	148.5							

A.3 Datos de Referencia

N°	Fecha	Carbón	Pulverizadora									Inyección de Agua	
			Flujo del Alimentador	Flujo de Aire Primario	Velocidad del Clasificador	Presión Hidráulica (Vástago)	Presión Hidráulica (Cabeza)	Temperatura de Salida	Temperatura de Entrada	Presión de Salida	Ratio		
			tn/h	tn/h	rpm	MPa	MPa	°C	°C	kPa	-		
1	03/10/00	IDADS0100											
2	01/07/02	IDADS0202											
4	18/07/02	M31001	23.70	61.00	50.40	12.40	3.00	70.70				3.00	
5	31/07/02	M31002	22.20	59.40	45.00	12.40	3.00	71.30				0.00	0.00
6	07/08/02	M31002	23.90	61.30	49.30	10.50	3.00	70.90				4.50	
7	14/08/02	COCEC0402											
8	21/08/02	COCEC0402	23.30	60.90	45.90	10.10	3.00	68.60				3.00	
9	28/08/02	COCEC0402	23.60	61.00	46.10	10.10	3.00	69.90				0.00	
10	04/09/02	COCEC0402											
11	11/09/02	COCEC0502	23.60	61.10	45.40	10.40	3.00	70.00				3.00	
12	18/09/02	COCEC0802	23.14	60.42	48.90	10.12	3.01	73.11	189.25	2.27	2.60	4.00	
13	25/09/02	VEPDS0402											
14	02/10/02	VEPDS0402											
15	09/10/02	M31003	22.84	59.97	47.98	10.65	2.98	71.23	165.13	2.20	2.53	2.00	
16	16/10/02	M31003	23.43	60.72	49.20	10.67	3.01	71.88	195.63	2.32	2.68	3.00	
17	23/10/02	M31003											
18	31/10/02	COLLS0102	23.37	60.63	49.35	10.52	3.00	72.42	197.77	2.32	2.67	0.00	
21	05/11/02	VEPDS0502	21.79	58.78	48.25	9.78	3.10	74.55	166.41	2.09	2.56	6.00	
22	11/11/02	VEPDS0502	22.39	59.49	43.91	10.25	3.00	75.90	165.39	2.21	2.38	5.00	
23	13/11/02	VEPDS0502	21.62	58.81	45.34	9.62	3.01	73.50	164.23	2.12	2.46	5.70	
24	20/11/02	VEPDS0502	21.92	58.91	45.28	10.03	3.00	74.76	168.36	2.11	2.44	7.00	
25	27/11/02	VEPDS0502											
26	04/12/02	COLLS0102	23.22	60.50	50.67	10.61	2.99	73.95	191.03	2.28	2.54	0.00	
27	11/12/02	COCEC0502	23.08	60.38	40.66	9.85	3.10	73.36	177.04	2.32	2.37	9.00	
28	18/12/02	COCEC0502											
31	08/01/03	COLLS0102											
36	19/02/03	COLLS0202	23.20	60.48	49.50	10.60	2.94	74.21	185.33	2.32	2.52	6.00	
38	06/03/03	COLLS0102											
39	12/03/03	COLLS0102											
40	19/03/03	COLLS0202											
43	13/05/03	COLLS0202	23.73	61.16	49.43	10.74	2.95	70.04	187.72	2.33	2.38	0.00	
44	21/05/03	COLLS0202											
45	28/05/03	COLLS0202	23.16	60.41	49.35	10.55	3.10	70.25	191.95	2.29	2.46	3.00	
46	04/06/03	COLLS0303	23.24	60.51	49.42	10.37	2.95	69.78	196.87	2.27	2.48	0.00	
47	11/06/03	COLLS0303	23.31	60.64	49.32	10.52	2.97	75.63	206.85	2.29	2.36	0.00	
48	18/06/03	COLLS0303	23.16	60.51	49.40	10.12	2.97	74.99	210.62	2.29	2.47	0.00	
49	25/06/03	COLLS0303	23.34	60.63	49.42	10.38	2.99	73.56	205.26	2.34	2.47	5.00	
50	02/07/03	COLLS0202	21.45	58.36	46.45	10.06	3.12	73.35	203.60	2.11	2.43	8.00	
51	09/07/03	COLLS0202											
52	16/07/03	COLLS0303	23.11	60.34	46.44	10.36	2.99	74.48	210.17	2.44	2.36	6.00	
53	23/07/03	COLLS0303	23.97	61.36	49.42	10.48	2.94	73.51	220.86	2.54	2.47	7.00	
54	30/07/03	COLLS0303	23.25	60.53	46.61	10.17	2.98	73.22	214.30	2.34	2.45	8.00	
55	06/08/03	COLLS0403	23.43	60.71	44.82	9.85	2.96	73.42	215.97	2.36	2.43	8.00	
56	13/08/03	COLLS0403											
57	20/08/03	COLLS0403	23.28	60.85	49.44	10.19	3.01	73.25	212.87	2.34	2.47	8.00	
58	27/08/03	COLLS0403	23.24	60.58	45.56	10.04	2.98	73.75	210.96	2.35	2.43	8.00	
59	03/09/03	COLLS0403	23.39	60.73	45.97	10.05	3.11	71.65	212.81	2.37	2.46	8.00	
60	10/09/03	COLLS0403	23.76	61.20	49.27	10.20	3.18	72.65	217.55	2.41	2.52	8.00	
61	17/09/03	COLLS0503	22.98	60.25	45.19	10.12	3.16	73.24	204.62	2.31	2.37	6.00	
62	24/09/03	COLLS0503	23.41	60.89	45.21	10.07	3.18	73.82	210.53	2.40	2.41	5.00	
63	01/10/03	COLLS0403	23.32	60.68	44.08	10.00	3.11	71.78	207.95	2.38	2.39	10.00	
64	08/10/03	AUCUS0103	22.92	60.26	47.59	10.19	2.97	73.00	182.34	2.28	2.85	0.00	
65	16/10/03	COLLS0103	21.59	58.54	45.30	10.03	3.11	72.35	178.19	2.12	2.36	10.00	
66	22/10/03	COLLS0103	22.18	59.24	42.99	9.90	3.15	72.88	176.95	2.22	2.41	9.00	
67	29/10/03	COLLS0103	21.65	58.72	44.19	9.92	3.16	72.36	182.11	2.14	2.34	10.00	
68	05/11/03	COLLS0103											
69	12/11/03	COLLS0103	22.53	59.91	46.45	9.83	3.16	69.94	168.19	2.25	2.80	9.00	
70	19/11/03	COLLS0103	22.12	59.21	45.50	10.15	3.16	71.75	180.48	2.18	2.37	11.00	
71	26/11/03	AUCUS0103											
72	05/12/03	AUCUS0103	23.60	60.97	49.52	10.21	3.11	72.35	182.83	2.34	3.01	7.00	
73	10/12/03	AUCUS0103	23.28	60.54	49.47	10.32	2.98	71.96	189.98	2.30	2.95	10.00	
74	17/12/03	AUCUS0103	24.01	61.58	45.51	10.39	2.95	72.18	191.47	2.41	2.76	8.00	
75	14/01/04	AUCUS0103											
79	21/01/04	COCEC0603											
80	28/01/04	COCEC0603											
81	04/02/04	COCEC0603	23.55	60.94	49.46	12.58	2.93	74.47	196.59	2.31	2.51	0.00	
82	11/02/04	COCEC0603	23.21	60.33	49.45	12.41	2.96	74.41	168.08	2.23	2.51	0.00	
83	18/02/04	COCEC0603	23.60	60.90	49.40	12.50	3.00	74.30	192.30	2.30	2.50	0.00	
84	26/02/04	COCEC0704											
85	03/03/04	COCEC0603	23.91	61.27	49.42	11.59	2.95	75.08	195.46	2.36	2.56	0.00	
86	10/03/04	COCEC0603	23.59	60.83	49.44	11.84	2.94	75.07	193.93	2.33	2.48	0.90	
87	16/03/04	COCEC0704	25.56	63.18	49.48	11.50	2.99	73.16	211.55	2.57	2.60	0.00	
89	31/03/04	COCEC0704	24.81	62.34	49.43	11.51	2.97	73.93	218.07	2.53	2.56	0.00	
90	07/04/04	COCEC0704	25.43	63.08	49.44	11.47	2.98	74.22	215.95	2.58	2.55	0.00	
91	23/04/04	COCEC0704	24.85	62.46	49.46	11.52	2.97	74.79	222.16	2.45	2.56	0.00	
92	28/04/04	M48001	24.64	62.01	49.46	11.50	2.98	75.12	202.93	2.39	2.52	0.00	
93	05/05/04	M48001											
94	12/05/04	M58001	23.06	60.28	50.15	11.63	2.98	75.06	190.97	2.14	2.39	0.00	
95	19/05/04	M58001	23.53	60.84	50.13	11.50	2.99	74.76	197.10	2.21	2.46	0.00	
96	26/05/04	COCEC0804	23.70	60.99	50.05	11.51	2.99	69.86	192.72	2.23	2.44	0.00	
97	02/06/04	COCEC0804	23.37	60.52	50.10	11.54	3.00	74.61	208.98	2.23	2.50	0.00	

Valores Promedios por Tipo de Carbón

1	2	IDADS	21.98	59.00	45.70	9.97	3.03	74.68	168.10	2.13	2.46	5.93
3	7	VEPDS	21.98	59.00	45.70	9.97	3.03	74.68	168.10	2.13	2.46	5.93
4	5	COCEC	25.19	62.77	49.46	11.80	2.98	73.80	216.93	2.53	2.57	0.90
5	17	COCEC	23.47	60.80	48.02	11.20	2.99	72.73	190.46	2.29	2.60	4.75
6	28	COLLS	23.25	60.55	47.94	10.29	3.02	73.00	205.52	2.34	2.45	7.00
7	6	COLLS	22.01	59.12	44.89	9.97	3.15	71.86	177.18	2.18	2.46	9.80
8	6	AUCUS	23.45	60.84	48.02	10.28	3.00	71.86	177.18	2.18	2.46	9.80
9	6	M3100	23.21	60.48	48.36	11.32	3.00	71.16	190.88	2.26	2.61	3.13
10	2	M4800	24.04	62.01	49.46	11.80	2.98	75.12	202.93	2.39	2.52	0.00
11	2	M5800	23.28	60.56	50.14	11.57	2.99	74.91	194.04	2.18	2.43	0.00

Nº	Fecha	Carbón	Pulverizado F.C.													
			Flujo del Alimentador	Flujo de Aire Primario	Velocidad del Clasificador	Presión Hidráulica (Vástago)	Presión Hidráulica (Cabeza)	Temperatura de Salida	Temperatura de Entrada	Presión de Salida	Ratio	Inyección de Agua				
			tn/h	tn/h	rpm	MPa	MPa	°C	°C	kPa	-	l/min				
1	03/10/00	IDADS0100														
2	01/07/02	IDADS0202														
4	18/07/02	M31001														
5	31/07/02	M31002	21.90	60.40	49.70	10.50	3.10	74.30								3.00
6	07/08/02	M31002														
7	14/08/02	COCEC0402	23.70	61.60	46.50	10.50	3.10	71.50								4.00
8	21/08/02	COCEC0402														
9	28/08/02	COCEC0402	23.20	60.90	44.50	9.90	3.10	74.50								5.00
10	04/09/02	COCEC0402	22.70	62.50	50.00	10.20	3.10	74.50								3.00
11	11/09/02	COCEC0502	22.70	62.50	50.00	10.20	3.10	74.50								3.00
12	18/09/02	COCEC0502	22.77	60.35	48.18	9.89	3.17	74.23	181.25	2.23	2.63	4.00				
13	25/09/02	VEPOS0402	21.61	59.25	47.47	10.18	3.13	73.21	148.27	2.02	2.58	3.00				
14	02/10/02	VEPOS0402														
15	09/10/02	M31003	22.37	59.98	47.61	10.60	3.12	72.94	176.89	2.10	2.59	2.00				
16	16/10/02	M31003	22.55	61.16	46.82	10.46	3.23	76.13	191.77	2.26	2.65	2.00				
17	23/10/02	M31003	23.17	60.99	49.53	10.48	3.22	77.91	198.98	2.28	2.74	0.00				
18	31/10/02	COLLS0102														
21	06/11/02	VEPOS0502	21.37	66.75	47.77	9.97	3.34	78.03	157.92	2.56	2.49	6.00				
22	11/11/02	VEPOS0502														
23	13/11/02	VEPOS0502														
24	20/11/02	VEPOS0502	21.53	58.99	46.66	10.11	3.23	75.78	164.14	2.02	2.39	5.00				
25	27/11/02	VEPOS0502	21.43	58.82	49.73	10.04	3.28	74.70	165.82	2.04	2.53	6.00				
26	04/12/02	COLLS0102	22.82	60.51	51.03	10.70	3.12	75.19	185.38	2.16	2.36	0.00				
27	11/12/02	COCEC0502														
28	18/12/02	COCEC0502	23.51	61.36	49.34	10.35	3.12	75.92	199.86	2.33	2.38	7.00				
31	08/01/03	COLLS0102	23.22	60.88	52.21	10.74	3.13	76.07	182.29	2.21	2.27	0.00				
38	19/02/03	COLLS0202														
38	06/03/03	COLLS0102	23.72	61.53	49.97	10.16	3.11	75.64	214.93	2.41	2.48	0.00				
39	12/03/03	COLLS0102	23.93	61.76	48.84	10.27	3.14	75.70	206.09	2.39	2.25	5.00				
40	19/03/03	COLLS0202	22.55	60.29	49.45	10.64	3.13	76.60	189.97	2.27	2.43	0.00				
43	13/05/03	COLLS0202	23.38	63.37	55.58	10.69	3.13	77.33	204.31	2.50	2.46	0.00				
44	21/05/03	COLLS0202	23.14	61.14	55.58	10.69	3.13	77.19	200.69	2.36	2.59	0.00				
45	28/05/03	COLLS0202														
46	04/06/03	COLLS0303														
47	11/06/03	COLLS0303	22.94	61.01	49.69	12.50	3.14	77.20	204.77	2.34	2.60	0.00				
48	18/06/03	COLLS0303	22.82	60.85	55.82	12.48	3.13	77.05	210.62	2.30	2.82	0.00				
49	25/06/03	COLLS0303	22.98	61.01	55.62	12.60	3.14	77.35	224.34	2.39	2.92	5.00				
50	02/07/03	COLLS0202	23.88	62.13	54.88	12.46	3.14	77.34	202.03	2.33	2.79	0.00				
51	09/07/03	COLLS0202	23.03	61.04	49.55	12.62	3.14	77.22	197.70	2.18	2.61	0.00				
52	16/07/03	COLLS0303	22.78	60.88	49.79	12.57	3.14	77.64	204.49	2.23	2.62	0.00				
53	23/07/03	COLLS0303	23.60	61.82	49.71	12.55	3.14	77.53	208.85	2.33	2.66	0.00				
54	30/07/03	COLLS0303	22.90	61.03	49.87	12.52	3.14	78.09	200.09	2.33	2.65	0.00				
55	06/08/03	COLLS0403	23.42	61.83	48.72	12.70	3.14	77.85	210.97	2.39	2.70	0.00				
56	13/08/03	COLLS0403	23.33	61.55	49.84	12.50	3.14	77.78	201.26	2.37	2.60	0.00				
57	20/08/03	COLLS0403	22.91	60.93	50.95	12.47	3.14	78.17	201.61	2.27	2.61	0.00				
58	27/08/03	COLLS0403	23.19	61.31	50.84	12.45	3.14	78.15	204.70	2.25	2.66	0.00				
59	03/09/03	COLLS0403	23.36	61.54	50.17	12.50	3.14	77.94	205.66	2.36	2.62	0.00				
60	10/09/03	COLLS0403	23.38	61.54	50.00	12.62	3.14	78.09	209.98	2.38	2.69	0.00				
61	17/09/03	COLLS0503														
62	24/09/03	COLLS0503														
63	01/10/03	COLLS0403	23.27	61.40	50.03	12.57	3.14	78.06	202.71	2.33	2.60	0.00				
64	08/10/03	AUCUS0103	22.56	60.56	49.99	12.70	3.14	78.04	191.76	2.23	2.81	0.00				
65	16/10/03	COLLS0103	21.58	59.36	50.01	12.45	3.13	77.80	164.41	2.11	2.50	0.00				
66	22/10/03	COLLS0103	22.18	60.09	50.07	12.50	3.14	77.92	163.80	2.21	2.52	0.00				
67	29/10/03	COLLS0103	21.66	59.47	50.19	12.57	3.14	77.50	159.96	2.15	2.50	0.00				
68	05/11/03	COLLS0103	22.09	60.03	50.06	12.69	3.13	78.17	161.47	2.24	2.47	0.00				
69	12/11/03	COLLS0103														
70	19/11/03	COLLS0103	22.03	60.04	49.81	12.48	3.13	77.89	158.32	2.18	2.45	0.00				
71	26/11/03	AUCUS0103	23.32	61.55	49.80	12.44	3.14	78.44	172.51	2.34	2.68	0.00				
72	03/12/03	AUCUS0103	23.18	61.35	49.80	12.52	3.14	78.21	181.92	2.31	2.68	0.00				
73	10/12/03	AUCUS0103	23.23	61.47	49.86	12.44	3.14	77.64	171.84	2.36	2.69	0.00				
74	17/12/03	AUCUS0103	23.65	61.93	50.28	12.47	3.14	78.06	181.23	2.41	2.69	0.00				
76	14/01/04	AUCUS0103	23.92	64.07	50.11	12.81	3.14	78.05	182.68	2.52	2.44	0.00				
79	21/01/04	COCEC0603	23.86	65.06	50.17	12.61	3.13	78.00	186.03	2.54	2.36	0.00				
80	28/01/04	COCEC0603	23.64	64.77	50.16	12.59	3.14	78.18	185.34	2.51	2.36	0.00				
81	04/02/04	COCEC0603														
82	11/02/04	COCEC0603														
83	18/02/04	COCEC0603														
84	26/02/04	COCEC0704	25.72	63.95	49.94	12.34	3.13	75.44	215.46	2.62	2.42	0.00				
85	03/03/04	COCEC0603	23.51	61.37	49.46	11.70	3.14	75.70	194.63	2.34	2.43	0.00				
86	10/03/04	COCEC0603														
87	18/03/04	COCEC0704	25.15	63.21	49.71	11.70	3.13	75.62	214.02	2.56	2.45	0.00				
89	31/03/04	COCEC0704														
90	07/04/04	COCEC0704	25.00	63.14	49.44	11.67	3.14	74.71	208.99	2.59	2.41	0.00				
91	23/04/04	COCEC0704	24.81	62.50	49.92	11.20	3.14	74.51	205.73	2.47	2.46	0.00				
92	28/04/04	M48001	24.29	62.09	49.72	11.41	3.14	74.39	198.93	2.42	2.42	0.00				
93	05/05/04	M48001	25.38	63.33	49.80	11.57	3.14	74.98	198.54	2.56	2.36	0.00				
94	12/05/04	M58001	24.11	61.93	50.23	11.61	3.13	75.13	185.58	2.38	2.22	0.00				
95	19/05/04	M58001	24.61	62.47	50.20	11.62	3.13	74.72	191.06	2.45	2.30	0.00				
96	26/05/04	COCEC0804														
97	02/06/04	COCEC0804	22.99	60.58	49.67	11.12	3.14	76.16	198.54	2.28	2.40	0.00				

Valores Promedios por Tipo de Carbón

Nº	Fecha	Carbón	Flujo del Alimentador	Flujo de Aire Primario	Velocidad del Clasificador	Presión Hidráulica (Vástago)	Presión Hidráulica (Cabeza)	Temperatura de Salida	Temperatura de Entrada	Presión de Salida	Ratio	Inyección de Agua
1		IDADS	21.54	60.95	48.46	10.08	3.24	75.43	159.04	2.16	2.50	5.50
7		VEPDS	21.54	60.95	48.46	10.08	3.24	75.43	159.04	2.16	2.50	5.50
4		COCEB	25.12	63.20	49.75	11.70	3.13	75.67	211.05	2.56	2.43	0.00
5		COCEC	23.26	62.10	48.64	10.91	3.12	74.92	190.94	2.37	2.43	4.33
6		COLLS	23.21	61.33	51.33	11.91	3.13	77.20	203.32	2.33	2.59	5.00
7		COLLS	23.21	61.33	51.33	11.91	3.13	77.20	203.32	2.33	2.59	5.00
6		COLLS	23.31	59.80	50.03	12.54	3.13	77.86	161.79	2.17	2.49	0.00
6		AUCUS	23.31	61.81	49.98	12.57	3.14	77.74	176.99	2.36	2.66	0.00
6		M3100	22.50	60.60	48.61	10.51	3.17	75.07	189.21	2.21	2.66	

N°	Fecha	Carbón	Fineza Pulv. A		Fineza Pulv. B		Fineza Pulv. C		Inquemados							
			Humedad	Granulometría (Malla 200)	Humedad	Granulometría (Malla 200)	Humedad	Granulometría (Malla 200)	Punto "a"	Punto "b"	Punto "c"	Punto "d"	Punto "e"			
			%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
1	03/10/00	IDADS0100														
2	01/07/02	IDADS0202														
4	18/07/02	M31001	4.00	70.37	2.00	66.74			26.72	20.26	18.58	23.49	26.57			
5	31/07/02	M31002	1.96	65.44			1.88	70.43	17.47	15.27	15.18	17.25	25.14			
6	07/08/02	M31002	2.41	68.86	2.21				33.07	24.78	15.81	14.30	20.81			
7	14/08/02	COCEC0402			2.33	66.00	2.58	68.67	5.75	6.47	10.26	14.25	26.38			
8	21/08/02	COCEC0402	2.62	61.80	2.45	71.56			12.11	11.23	8.29	11.53	15.87			
9	28/08/02	COCEC0402		65.12					68.47	9.04	8.80	7.18	10.03	11.73		
10	04/09/02	COCEC0402			0.49	69.29	1.39	66.75	6.85	8.64	12.06	15.72	31.47			
11	11/09/02	COCEC0502	1.63	65.10	1.81	65.15			16.58	12.00	8.39	12.40	21.05			
12	18/09/02	COCEC0502	1.61	62.22			1.57	68.62	14.86	7.79	8.78	9.95	14.06			
13	25/09/02	VEPDS0402			0.81	73.07	0.75	59.65	14.27	17.98	19.27	27.27	31.52			
14	02/10/02	VEPDS0402	0.46	62.96	0.24	64.82			28.65	22.08	13.68	17.20	21.66			
15	09/10/02	M31003	2.23	65.03			1.34	71.80	26.54	19.91	16.48	19.55	31.91			
16	16/10/02	M31003	1.39	73.03			1.55	63.47	17.35	18.95	18.76	23.73	31.60			
17	23/10/02	M31003			0.54	73.55	0.50	67.98	16.20	16.73	20.56	25.17	34.45			
18	31/10/02	COLLS0102	2.69	67.33	2.65	63.39			3.65	2.49	2.16	2.73	4.56			
21	06/11/02	VEPDS0502	1.13	72.82			1.06	63.11	27.79	23.34	19.29	17.77	33.98			
22	11/11/02	VEPDS0502														
23	13/11/02	VEPDS0502	1.36	82.22	1.33	55.19	1.00		27.20	18.87	14.52	15.74	21.50			
24	20/11/02	VEPDS0502	0.97	64.89	0.00	61.61	0.99	69.04	30.96	24.60	19.09	16.29	21.20			
25	27/11/02	VEPDS0502			1.05		1.16	67.04	14.08	13.88	18.40	23.85	36.58			
26	04/12/02	COLLS0102	2.12	69.58			2.16	66.21	1.94	1.56	2.53	6.54	8.10			
27	11/12/02	COLLS0102	3.26	57.96	2.48	67.88			15.16	10.03	9.43	9.98	16.16			
28	18/12/02	COCEC0502			1.20	65.93	1.23	73.07	8.18	10.16	11.58	14.93	26.59			
31	08/01/03	COLLS0102			2.50	64.92	2.71	72.29	1.52	1.50	4.22	6.86	15.20			
36	19/02/03	COLLS0202														
38	06/03/03	COLLS0102			3.74	64.17	4.13	68.62	2.56	2.41	4.30	4.99	12.25			
39	12/03/03	COLLS0102			3.13	61.50	3.63	71.89	6.79	5.44	4.33	3.71	6.89			
40	18/03/03	COLLS0202	3.32	66.75	3.17	62.39			11.31	7.91	5.74	6.10	12.78			
43	13/05/03	COLLS0202	2.51	67.54			2.17	68.09								
44	21/05/03	COLLS0202			1.57	66.08	1.63	67.03	1.53	1.88	3.62	5.72	7.28			
45	28/05/03	COLLS0202	3.71	61.82	3.52	66.84			4.75	3.11	4.68	9.36	10.08			
46	04/06/03	COLLS0303	3.48	68.32	3.09	67.31			3.25	2.70	2.33	3.17	7.13			
47	11/06/03	COLLS0303	2.19	62.10			2.08	67.50	9.76	6.18	8.86	7.38	14.84			
48	18/06/03	COLLS0303	3.87	64.08			3.50	68.38	4.20	2.85	2.90	5.10	13.10			
49	25/06/03	COLLS0303	4.02	63.80			3.69	69.60	3.41	2.67	1.64	4.86	8.58			
50	02/07/03	COLLS0202	2.99	63.30			2.44	73.70	3.03	3.09	2.31	6.97	10.97			
51	09/07/03	COLLS0202			3.66	68.50	3.77	74.20	8.42	5.30	4.54	7.32	10.86			
52	16/07/03	COLLS0303	5.63	74.70			5.03	72.90	5.72	3.22	3.98	3.70	6.87			
53	23/07/03	COLLS0303	5.09	76.00			4.30	71.38	6.92	4.12	5.15	2.40	7.15			
54	30/07/03	COLLS0303	7.02	68.42			5.71	70.48	7.40	3.82	3.21	2.93	10.16			
55	06/08/03	COLLS0403	6.36	73.99			5.20	74.65	9.47	5.03	3.86	3.29	8.27			
56	13/08/03	COLLS0403			3.68	70.14	4.57	75.23	8.61	5.84	4.10	4.78	5.86			
57	20/08/03	COLLS0403	7.00	77.38			5.80	76.39	9.88	5.27	4.60	6.75	10.82			
58	27/08/03	COLLS0403	4.88	73.06			4.16	75.28	5.40	4.09	2.48	3.75	9.26			
59	03/09/03	COLLS0403	5.36	72.41			4.80	76.78	8.62	5.56	5.26	3.81	12.47			
60	10/09/03	COLLS0403	6.87	72.44			5.82	72.18	7.30	6.14	3.94	2.44	6.39			
61	17/09/03	COLLS0503	6.42	73.51	5.78	74.49			8.75	3.60	2.04	4.42	5.77			
62	24/09/03	COLLS0503	6.09	71.79	5.99	73.75			3.20	2.38	2.52	5.24	9.15			
63	01/10/03	COLLS0403	6.92	68.47			5.77	72.99	5.99	3.26	3.22	3.58	7.58			
64	08/10/03	AUCUS0103	3.36	75.22			3.18	74.74	12.24	7.20	5.27	6.35	12.69			
65	16/10/03	COLLS0103	3.34	71.47			2.35	76.18	29.44	18.65	17.88	19.63	34.30			
66	22/10/03	COLLS0103	3.72	69.94			2.77	74.76	24.53	15.28	11.22	14.12	20.90			
67	29/10/03	COLLS0103	2.52	71.16			1.01	76.42	18.72	11.08	10.93	8.87	19.43			
68	05/11/03	COLLS0103			2.73	75.21	2.69	76.78	9.09	10.27	8.96	15.68	21.84			
69	12/11/03	COLLS0103	4.81	70.71	4.74	71.02			34.83	22.19	12.80	14.45	25.88			
70	19/11/03	COLLS0103	4.33	72.00			2.16	77.17	22.42	14.25	14.45	16.78	29.56			
71	26/11/03	AUCUS0103			3.36	76.52	2.83	74.13	12.74	8.71	7.63	9.78	11.73			
72	05/12/03	AUCUS0103		70.99					69.65	17.01	9.62	14.60	8.53	15.90		
73	10/12/03	AUCUS0103	3.07	73.82			2.18	74.43	10.34	4.53	3.38	7.73	10.87			
74	17/12/03	AUCUS0103	3.18	71.97			2.49	75.86	16.65	8.65	6.84	4.95	13.11			
76	14/01/04	AUCUS0103			3.31	71.93	3.16	72.75	10.82	10.97	10.28	11.78	7.09			
79	21/01/04	COCEC0603			3.45	75.57	2.80	73.30	21.32	14.71	12.71	18.79	20.21			
80	28/01/04	COCEC0603			5.17	69.59	4.41	73.19	19.88	20.28	14.92	20.78	21.62			
81	04/02/04	COCEC0603	3.94	76.60	5.13	74.35			15.89	13.08	14.82	24.04	23.62			
82	11/02/04	COCEC0603	4.22	78.95	5.73	71.77			20.61	13.08	10.44	9.42	10.76			
83	18/02/04	COCEC0603	5.05	77.49	5.23	69.22			18.45	12.83	12.49	10.45	17.93			
84	26/02/04	COCEC0704			6.56	74.59	5.98	70.93	5.41	6.38	7.45	14.53	12.77			
85	03/03/04	COCEC0603	3.93	76.25			3.79	75.94	31.81	22.40	16.45	13.02	28.06			
86	10/03/04	COCEC0603	4.46	74.79	5.10	73.45			22.88	20.18	14.38	12.73	13.86			
87	18/03/04	COCEC0704	5.51	72.52			5.28	72.45	22.76	16.31	8.62	8.94	21.92			
89	31/03/04	COCEC0704	5.86	72.13	6.16	68.19			21.85	12.48	13.33	15.21	23.65			
90	07/04/04	COCEC0704	5.55	72.33			5.02	73.37	19.09	11.62	10.09	7.55	21.23			
91	23/04/04	COCEC0704	5.81	74.07			5.11	73.52	20.89	13.78	11.14	6.89	14.73			
92	28/04/04	M48001	4.41	77.85			4.54	76.81	21.87	12.23	6.84	7.52	15.34			
93	05/05/04	M48001			4.66	74.76	3.60	74.67	8.82	11.91	11.64	7.38	15.02			
94	12/05/04	M58001	4.66	78.13			3.21	77.10	24.29	13.88	10.33	9.30	24.14			
95	19/05/04	M58001							18.28	10.11	8.72	10.54	21.10			
96	26/05/04	COCEC0804							19.54	16.47	12.20	19.96	25.88			
97	02/06/04	COCEC0804							32.29	19.36	13.94	8.86	19.95			

Valores Promedios por Tipo de Carbón

N°	Fecha	Carbón	Humedad	Granulometría (Malla 200)	Humedad	Granulometría (Malla 200)	Humedad	Granulometría (Malla 200)	Punto "a"	Punto "b"	Punto "c"	Punto "d"	Punto "e"
1		IDADS	0.98	65.70	0.86	63.67	1.00	64.76	23.82	20.12	17.36	19.65	27.74
3		VEPDS	5.71	72.76	6.36	71.89	5.35	72.57	17.96	12.11	10.12	10.44	18.66
4		COCEC	3.44	69.43	3.38	70.15	2.54	71.03	17.18	13.38	11.79	13.03	20.31
5		COLLS	4.69	69.38	3.54	67.71	3.96	71.72	5.82	3.89	3.76	4.92	9.39
6		COLLS	3.75	71.06	3.74	73.12	2.20	76.26	23.17	15.29	12.89	14.99	25.32
7		AUCUS	3.20	73.00	3.33	74.23	2.77	73.61	13.30	8.28	8.02	8.19	11.90
8		M3100	2.40	68.54	1.58	70.14	1.32	68.42	22.89	19.31	17.56		

N°	Fecha	Carbón	Parámetros de Agua y Vapor										
			Flujo de Agua de Alimentación	Flujo de Atemp. al SC	Flujo de Atemp. al RO	Temp. de Agua de Alimentación	Presión de Agua de Alimentación	Temp. de Vapor Principal	Presión de Vapor Principal	Temp. de Vapor Recalentado Frio	Presión de Vapor Rec. Frio	Temp. de Vapor Rec. Caliente	Presión de Vapor Rec. Caliente
			tn/h	tn/h	tn/h	°C	MPa	°C	MPa	°C	MPa	°C	MPa
1	03/10/00	IDADS0100	401.7	13.226	0	273	17.745	538.81	16.830	330.54	3.734	538.37	3.579
2	01/07/02	IDADS0202	330.84	20.31	0	270.5	17.7	539	16.81	336	3.72	539	3.57
4	18/07/02	M31001	298.7	39.2	0.66	270.83	17.62	540.26	16.79			542	3.56
5	31/07/02	M31002	315.6	36.51		270.88	17.68	539.1	16.81			539.95	3.56
6	07/08/02	M31002											
7	14/08/02	COCEC0402											
8	21/08/02	COCEC0402											
9	28/08/02	COCEC0402											
10	04/09/02	COCEC0402	404.85	37	0	271.6	17.8	538.88	16.9	338.6	3.6	542.2	3.65
11	11/09/02	COCEC0502	398.35	40.4	0	271.5	17.7	539	16.8	338.7	3.6	541.3	3.6
12	18/09/02	VEPDS0502	412.8	34.5	0	271.3	17.75	539.1	16.81	338.7	3.79	539.3	3.64
13	25/09/02	VEPDS0402	405.3	35.8	0	271.4	17.7	539.3	16.8	338.9		541.16	3.64
14	02/10/02	VEPDS0402	301.9	45.54		271.71	17.65	539.23	16.81				
15	09/10/02	M31003	402.9	37.8	0	271.6	17.71	539.1	16.81	339.2	3.6	539.0	3.64
16	16/10/02	M31003	405.95	37.5	0	271.5	17.73	539.05	16.81	339.2	3.61	539.6	3.65
17	23/10/02	M31003	398.6	41.1	0	271.7	17.7	539.2	16.82	339.7	3.81	540.1	3.66
18	31/10/02	COLLS0102	404.4	36.8	0	270.8	17.71	539.2	16.79	338.6	3.78	541.7	3.62
21	06/11/02	VEPDS0502	396.6	38.5	0	271	17.69	539.1	16.78	338.6	3.78	539.8	3.62
22	13/11/02	VEPDS0502	413	36	0	270	17.75	539	16.8	338.3	3.72	540	3.57
23	20/11/02	VEPDS0502	405	35.3	0	270.1	17.7	539.2	16.77	338.5	3.71	538.7	3.56
24	27/11/02	VEPDS0502	405	34.9	0	270.8	17.72	539.2	16.8	339.3	3.7	540.5	3.62
25	27/11/02	VEPDS0502	400.5	38.1	0	271.3	17.85	539.2	16.76	339.3	3.81	539.5	3.65
26	04/12/02	COLLS0102	409	35	0	270.9	17.73	538.1	16.8	338.4	3.79	539.4	3.63
27	11/12/02	COCEC0502	395.2	44.5	0	271.3	17.63	539.1	16.77	334.2	3.79	540.3	3.64
28	18/12/02	COCEC0502	393.2	40.9	0	271.5	17.68	538.9	16.8	332.1	3.82	540.5	3.67
31	09/01/03	COLLS0102	392.6	39	0	270.7	17.67	539.2	16.78	327.1	3.8	539.5	3.64
36	19/02/03	COLLS0202	382.9	43.6	0	270.7	17.63	539.2	16.78	325.3	3.8	539.1	3.64
38	06/03/03	COLLS0102	384.7	51	2.5	270.1	17.56	538.7	16.77	322.2	3.76	544	3.61
39	12/03/03	COLLS0102	387.9	39.6	0	270.6	17.68	539.2	16.79	323.8	3.8	539.3	3.64
40	19/03/03	COLLS0202											
43	13/05/03	COLLS0202	423.8	32.5	1	271.4	17.83		16.86	342.2			
44	21/05/03	COLLS0202	387.8	39	3.3	268.8	17.68	538.9	16.84	338.4	3.74	541.1	3.57
45	28/05/03	COLLS0202	387.8	38.7	6.3	268.9	17.64	538.9	16.82	337	3.75	541.4	3.59
46	04/06/03	COLLS0303	393.63	39.84	2.89	269.43	17.87	538.92	16.83	338.91	3.76	541.41	3.58
47	11/06/03	COLLS0303	400.64	37.19	0.55	269.48	17.73	538.82	16.85	337.76	3.78	539.61	3.61
48	18/06/03	COLLS0303	413.02	28.92	1.08	268.52	17.73	538.99	16.82	336.70	3.74	540.90	3.58
49	25/06/03	COLLS0303	414.22	30.79	1.28	269.60	17.75	538.93	16.83	337.09	3.81	541.26	3.64
50	02/07/03	COLLS0202	407.36	30.51	0.80	268.49	17.71	538.94	16.83	332.66	3.75	539.58	3.58
51	09/07/03	COLLS0202	405.99	34.76	0.55	268.76	17.72	538.90	16.83	329.08	3.73	539.79	3.57
52	16/07/03	COLLS0303	394.35	37.34	0.63	268.63	17.69	538.88	16.85	327.51	3.77	538.33	3.60
53	23/07/03	COLLS0303	404.15	39.22	2.46	269.67	17.76	538.93	16.88	327.55	3.81	541.38	3.64
54	30/07/03	COLLS0303	398.55	34.30	0.80	268.37	17.69	538.89	16.83	325.48	3.77	539.46	3.60
55	06/08/03	COLLS0403	402.48	36.47	0.61	269.61	17.72	538.89	16.85	327.13	3.84	538.47	3.67
56	13/08/03	COLLS0403	392.70	43.07	0.58	269.73	17.68	538.73	16.83	326.65	3.84	539.52	3.67
57	20/08/03	COLLS0403	406.34	33.85	0.52	269.36	17.75	538.86	16.85	325.81	3.84	539.04	3.67
58	27/08/03	COLLS0403	409.99	31.28	0.81	269.95	17.76	538.76	16.85	324.43	3.82	537.85	3.65
59	03/09/03	COLLS0403	405.28	35.20	0.92	269.43	17.75	538.84	16.89	325.07	3.85	538.38	3.58
60	10/09/03	COLLS0403	414.21	37.81	0.65	268.78	17.78	538.93	16.87	323.28	3.81	538.08	3.64
61	17/09/03	COLLS0503	404.84	32.86	0.81	268.81	17.73	538.85	16.85	323.18	3.82	539.64	3.65
62	24/09/03	COLLS0503	405.29	34.94	0.85	269.14	17.74	538.85	16.86	324.32	3.85	539.58	3.68
63	01/10/03	COLLS0403	410.63	30.58	0.81	268.42	17.75	538.04	16.85	323.28	3.82	538.02	3.66
64	06/10/03	AUCUS0103	391.82	38.27	0.57	268.11	17.68	538.88	16.85	321.85	3.79	539.38	3.63
65	16/10/03	COLLS0103	397.88	34.26	0.59	268.08	17.71	538.95	16.85	321.47	3.79	538.81	3.63
66	22/10/03	COLLS0103	398.65	37.89	0.61	269.01	17.74	538.86	16.88	323.51	3.86	538.91	3.69
67	29/10/03	COLLS0103	402.85	33.81	0.58	268.52	17.73	538.93	16.85	322.59	3.83	537.79	3.66
68	05/11/03	COLLS0103	398.15	34.41	0.84	267.82	17.70	539.09	16.85	320.99	3.79	538.41	3.63
69	12/11/03	COLLS0103	377.70	48.30	0.70	268.10	17.64	539.00	16.88	320.70	3.80	540.50	3.83
70	19/11/03	COLLS0103	388.10	41.00	0.60	268.10	17.68	538.90	16.84	320.80	3.81	539.20	3.64
71	26/11/03	AUCUS0103	383.89	42.18	1.61	268.08	17.69	538.96	16.85	320.43	3.81	540.35	3.64
72	03/12/03	AUCUS0103	395.17	37.74	0.97	267.83	17.71	538.93	16.87	322.06	3.81	538.44	3.64
73	10/12/03	AUCUS0103	381.20	39.70	2.30	267.50	17.70	538.50	16.87	320.30	3.80	539.30	3.64
74	17/12/03	AUCUS0103	399.32	36.89	0.73	267.65	17.75	539.00	16.88	319.41	3.78	539.17	3.61
76	14/01/04	AUCUS0103	390.11	43.26	4.94	268.08	17.82	538.93	17.00	319.58	3.87	541.43	3.70
79	21/01/04	COCEC0603	395.72	39.96	0.54	267.96	17.73	538.81	16.86	320.33	3.86	539.18	3.69
80	28/01/04	COCEC0603	406.57	32.27	0.65	267.75	17.76	539.08	16.84	319.79	3.85	537.45	3.68
81	04/02/04	COCEC0603	394.77	40.10	0.72	268.17	17.71	538.84	16.85	319.31	3.86	538.19	3.69
82	11/02/04	COCEC0603	379.75	48.72	0.67	267.62	17.67	538.88	16.85	317.81	3.83	539.05	3.66
83	18/02/04	COCEC0603	398.85	33.50	0.80	268.80	17.70	539.00	16.85	318.10	3.83	537.90	3.68
84	26/02/04	COCEC0704	394.38	40.14	0.71	267.53	17.70	538.70	16.84	318.03	3.85	539.93	3.68
85	03/03/04	COCEC0603	399.80	34.88	0.64	267.00	17.73	538.90	16.85	316.40	3.81	529.09	3.64
86	10/03/04	COCEC0603	391.48	38.91	0.65	267.27	17.70	538.94	16.84	317.08	3.83	538.80	3.65
87	18/03/04	COCEC0704	404.11	32.54	0.63	268.95	17.75	539.08	16.85	316.97	3.80	525.87	3.64
89	31/03/04	COCEC0704	372.97	50.10	0.81	268.53	17.63	538.86	16.87	313.85	3.79	541.22	3.62
90	07/04/04	COCEC0704	406.34	33.74	0.75	266.54	17.77	539.05	16.88	313.89	3.77	538.59	3.60
91	23/04/04	COCEC0704	423.84	32.39	0.75	266.77	17.80	539.29	16.86	338.68	3.81	538.72	3.64
92	28/04/04	M48001	408.99	33.17	0.88	266.63	17.74	539.25	16.85	338.62	3.80	541.08	3.83
93	05/05/04	M48001	376.72	46.96	9.02	265.98	17.60	539.22	16.82	338.11	3.78	542.10	3.61
94	12/05/04	M58001	393.03	41.24	3.12	266.80	17.69	539.15	16.84	339.18	3.81	541.63	3.64
95	19/05/04	M58001	401.87	39.29	7.68	266.15	17.72	538.78	16.85	337.21	3.76	540.85	3.59
96	26/05/04	COCEC0804	401.32	38.89	1.34	266.22	17.71	539.19	16.86	338.47	3.80	541.92	3.63
97	02/06/04	COCEC0804	425.50	33.15	0.66	268.19	17.78	539.15	16.86	336.37	3.74	540.07	3.57

Valores Promedios por Tipo de Carbón

1	2	IDADS	366.27	16.77		271.75	17.72	538.91	16.82	333.27	3.73	538.69	3.57
3	7	VEPDS	389.61	37.73	0.00	270.90	17.70	539.18	16.79	337.98	3.76	539.91	3.61
4	5	COCEC	400.35	37.76	0.73	266.86	17.73	538.99	16.86	320.09	3.80	538.89	3.64
5	17	COCEC	389.02	38.26	0.74	268.73	17.72	538.99	16.84	327.41	3.81	538.85	

N°	Fecha	Carbón	Análisis de Gases en Tiempo Real				Parámetros de Control						
			O2 a la salida del ECO (A)		O2 a la salida del ECO (B)		O2 a la salida del AHI		Opacidad en Chimenea	Boiler Master	Turbine Master	BTU Correction	Estación de O2
			CRT % húmedo	CRT % húmedo	CRT % húmedo	CRT % húmedo	CRT mg/m3	BM %	TM %	BTU MJ/kg	O2 CO %		
1	03/10/00	IDADS0100	3.42		4.59								
2	01/07/02	IDADS0202	3.35	3.57	5.17								
4	18/07/02	M31001	3.85	3.84	5.91								
5	31/07/02	M31002	4.13	3.79	5.93								
6	07/08/02	M31002	4.20	4.52	5.07								
7	14/08/02	COCEC0402	4.48	3.18	5.43								
8	21/08/02	COCEC0402	3.58	3.60	5.44								
9	28/08/02	COCEC0402	3.98	3.80	5.01								
10	04/09/02	COCEC0402	4.30	3.60	5.40								
11	11/09/02	COCEC0502	3.80	3.80	5.10								
12	18/09/02	COCEC0502	3.60	3.59	4.89	1.88	86.70	95.26	27.10	45.10			
13	25/09/02	VEPDS0402	4.22	3.36	5.36	12.04	86.06	94.39	28.10	55.06			
14	02/10/02	VEPDS0402	3.50	3.90	5.20								
15	09/10/02	M31003	4.31	3.98	4.85	1.50	85.68	94.53	27.20	51.23			
16	16/10/02	M31003	4.60	3.85	5.11	0.55	85.86	94.40	26.80	54.77			
17	23/10/02	M31003	3.77	2.26	4.93	2.42	85.01	94.55	26.20	54.93			
18	31/10/02	COLLS0102	4.35	3.77	5.13	2.52	86.92	93.97	26.91	49.96			
21	08/11/02	VEPDS0502	3.29	3.68	4.88	2.08	85.41	93.63	28.40	50.04			
22	11/11/02	VEPDS0502	3.58	3.57	5.10	0.42	86.58	94.53	27.80	50.59			
23	13/11/02	VEPDS0502	3.41	3.39	4.83	1.13	84.34	93.83	27.80	53.28			
24	20/11/02	VEPDS0502	3.74	3.86	5.08	1.33	85.09	94.18	28.10	53.43			
25	27/11/02	VEPDS0502	4.67	3.58	5.12	0.54	85.96	94.26	28.60	54.20			
26	04/12/02	COLLS0102	4.81	3.68	5.02	0.27	85.35	93.83	26.60	55.15			
27	11/12/02	COCEC0502	3.71	3.52	5.20	1.88	85.08	93.93	26.50	56.21			
28	18/12/02	COCEC0502	4.37	3.32	5.07	0.33	85.85	94.24	26.00	54.16			
31	08/01/03	COLLS0102	4.64	2.93	4.80	0.36	87.56	94.33	26.90	48.05			
36	19/02/03	COLLS0202	3.84	4.05	5.04	11.23	84.95	94.16	26.30	53.39			
38	06/03/03	COLLS0102	4.95	2.86	4.10	0.68	86.52	93.55	26.00	52.13			
39	12/03/03	COLLS0102	3.87	4.22	4.97	1.04	85.65	94.12	25.50	48.80			
40	18/03/03	COLLS0202	4.25	4.25	4.88	0.55							
43	13/05/03	COLLS0202	3.35	3.82	4.95	2.28	87.90	96.67	26.80	50.08			
44	21/05/03	COLLS0202	4.78	3.65	5.54	0.37	86.61	93.91	26.68	53.00			
45	28/05/03	COLLS0202	4.42	3.58	5.93	1.44	85.40	93.69	25.80	62.00			
46	04/06/03	COLLS0303	3.64	3.30	5.11	34.25	84.48	94.24	26.10	51.00			
47	11/06/03	COLLS0303	3.22	3.59	5.05	2.34	85.69	94.61	26.60	48.03			
48	18/06/03	COLLS0303	4.21	4.59	5.40	9.02	85.23	94.95	26.60	54.00			
49	25/06/03	COLLS0303	4.69	4.23	5.55	2.58	85.54	95.54	25.90	60.00			
50	02/07/03	COLLS0202	5.51	4.29	5.89	0.66	83.68	94.46	25.90	66.72			
51	09/07/03	COLLS0202	3.67	3.31	5.02	1.99	83.03	94.53	25.70	57.00			
52	16/07/03	COLLS0303	4.35	4.16	5.05	3.82	84.91	93.98	26.55	49.00			
53	23/07/03	COLLS0303	3.60	4.41	5.06	0.37	87.43	95.68	26.40	51.00			
54	30/07/03	COLLS0303	4.54	4.55	5.57	0.16	84.60	94.29	26.30	56.00			
55	06/08/03	COLLS0403	4.69	3.70	5.22	0.14	85.90	94.41	26.30	49.99			
56	13/08/03	COLLS0403	3.98	2.81	5.12	0.13	85.40	95.22	26.10	50.00			
57	20/08/03	COLLS0403	3.27	4.01	5.09	0.13	84.70	94.79	26.31	49.00			
58	27/08/03	COLLS0403	4.68	4.51	5.83	0.34	85.21	94.63	26.35	59.99			
59	03/09/03	COLLS0403	3.60	4.33	5.35	0.47	85.69	95.10	26.30	51.00			
60	10/09/03	COLLS0403	4.35	4.74	5.19	0.11	85.46	95.12	26.00	53.50			
61	17/09/03	COLLS0503	3.61	3.67	5.19	0.15	85.23	94.14	26.40	49.43			
62	24/09/03	COLLS0503	4.55	3.30	5.09	0.13	86.28	94.99	26.45	49.82			
63	01/10/03	COLLS0403	3.68	4.34	6.78	0.14	85.22	93.97	26.25	52.00			
64	08/10/03	AUCUS0103	4.89	5.00	5.69	0.17	83.65	93.95	26.40	60.00			
65	16/10/03	COLLS0103	4.55	4.04	5.04	0.17	83.82	94.12	27.90	50.00			
66	22/10/03	COLLS0103	4.24	3.98	5.18	0.98	86.10	94.83	27.85	50.00			
67	29/10/03	COLLS0103	3.77	3.83	5.31	1.11	84.32	94.45	27.95	54.33			
68	05/11/03	COLLS0103	3.94	3.41	5.36	0.34	84.54	94.61	27.25	53.90			
69	12/11/03	COLLS0103	4.67	4.82	5.53	0.42	84.08	94.89	26.80	50.00			
70	19/11/03	COLLS0103	4.52	4.32	4.93	0.18	83.98	93.50	27.30	50.00			
71	26/11/03	AUCUS0103	4.27	3.33	5.13	0.17	83.47	94.21	25.45	54.00			
72	03/12/03	AUCUS0103	3.76	3.50	5.19	0.18	85.82	94.46	26.30	48.01			
73	10/12/03	AUCUS0103	5.08	4.37	5.51	0.19	83.68	94.49	25.85	59.48			
74	17/12/03	AUCUS0103	3.68	4.81	5.21	0.18	85.04	95.54	25.60	53.00			
78	14/01/04	AUCUS0103	3.32	1.93	5.05	0.50	83.77	93.34	25.05	56.38			
79	21/01/04	COCEC0603	3.56	3.19	5.19	3.68	85.10	94.89	25.40	50.10			
80	28/01/04	COCEC0603	3.30	3.34	5.33	1.11	84.64	94.52	25.50	52.58			
81	04/02/04	COCEC0603	3.26	2.26	5.02	1.03	82.92	95.15	25.30	50.00			
82	11/02/04	COCEC0603	3.33	3.45	5.08	0.19	82.84	94.66	25.66	52.71			
83	18/02/04	COCEC0603	3.50	2.80	5.10	0.20	83.70	94.80	25.50	50.50			
84	26/02/04	COCEC0704	4.49	3.10	5.58	0.25	88.34	94.72	24.50	48.00			
85	03/03/04	COCEC0603	3.64	4.73	5.41	0.20	86.27	93.99	25.80	50.00			
86	10/03/04	COCEC0603	3.18	3.44	5.31	0.20	83.87	94.37	25.60	51.28			
87	18/03/04	COCEC0704	3.88	4.06	4.90	0.18	87.62	93.87	24.80	36.59			
88	31/03/04	COCEC0704	4.11	2.89	5.31	0.15	85.00	93.54	24.60	51.00			
90	07/04/04	COCEC0704	3.80	4.27	5.20	0.16	84.67	94.60	24.60	50.00			
91	23/04/04	COCEC0704	3.18	3.96	5.20	0.13	83.24	95.09	24.12	50.00			
92	28/04/04	M48001	3.30	3.61	4.98	0.11	84.79	94.45	24.85	44.50			
93	05/05/04	M48001	3.24	3.33	5.35	0.14	84.75	93.72	24.85	50.01			
94	12/05/04	M58001	4.70	4.69	5.30	0.10	84.85	94.71	25.80	50.00			
95	19/05/04	M58001	4.40	3.62	5.35	1.98	84.22	94.92	25.10	53.01			
96	26/05/04	COCEC0804	2.59	2.17	4.82	29.12	84.54	94.83	25.80	43.90			
97	02/06/04	COCEC0804	3.27	4.25	5.38	33.19	82.96	95.68	25.70	55.17			

Valores Promedios por Tipo de Carbón

1	2	IDADS	3.39	3.57	4.88							
3	7	VEPDS	3.77	3.62	5.09	2.82	85.57	94.14	28.13	52.73		
4	5	COCEC	3.89	3.66	5.24	0.17	85.77	94.36	24.42	47.12		
5	17	COCEC	3.62	3.42	5.19	6.09	84.45	94.73	25.82	50.97		
6	28	COLLS	4.16	3.85	5.25	2.78	85.56	94.55	26.32	52.97		
7	6	COLLS	4.28	4.07	5.23	0.53	84.47	94.23	27.51	52.94		
8	6	AUCUS	4.16	3.82	5.30	0.23	84.24	94.33	26.76	55.14		
9	6	M3100	4.14	3.71	5.30	1.49	86.52	94.49	26.73	53.64		
10	2	M4800	3.27	3.47	5.16	0.13	84.77	94.09	24.75	47.25		
11	2	M5800	4.55	4.15	5.32	1.04	84.54	94.81	25.45	51.50		

A.4 Cálculos

Nº	Fecha	Carbón	Propiedades del Residuo				Temperatura Promedio de Ingreso de Aire	Temperatura de Gases con Fugas	Temperatura Corregida de Gases Sin Fugas
			Fración Máslea del Residuo	Masa del Residuo Ceniza Volante	Carbono Inquemado en el Carbón	Carbono Quemado			
			MFRs kg/kgpc	MpRe50 kg/kgcen	MpUbC %másico	MpCb %másico			
1	03/10/00	IDADS0100	0.01	0.95	0.02	55.3	24.0	129.0	138.2
2	01/07/02	IDADS0202	0.01	0.95	0.03	54.1	23.2	128.6	139.8
4	18/07/02	M31001	0.05	0.95	1.10	68.9	24.3	128.4	140.9
5	31/07/02	M31002	0.07	0.95	1.18	69.7	24.1	134.2	151.6
6	07/08/02	M31002	0.06	0.95	1.23	69.7	23.7	135.7	140.6
7	14/08/02	COCEC0402	0.08	0.95	0.93	63.0	24.6	132.8	144.2
8	21/08/02	COCEC0402	0.08	0.95	0.94	63.0	23.7	133.4	142.5
9	28/08/02	COCEC0402	0.07	0.95	0.85	63.3	23.7	132.0	139.9
10	04/09/02	COCEC0402	0.08	0.95	1.05	62.9	24.4	134.9	147.4
11	11/09/02	COCEC0502	0.09	0.95	1.11	64.0	24.0	132.2	144.7
12	18/09/02	COCEC0502	0.12	0.95	1.17	63.9	26.0	137.1	148.7
13	25/09/02	VEPDS0402	0.06	0.95	1.33	70.5	25.6	135.4	156.9
14	02/10/02	VEPDS0402	0.07	0.95	1.22	70.8	25.9	134.9	146.7
15	09/10/02	M31003	0.07	0.95	1.38	69.0	25.5	134.1	137.1
16	18/10/02	M31003	0.08	0.95	1.68	68.7	26.0	133.3	141.4
17	23/10/02	M31003	0.08	0.95	1.68	68.7	26.5	132.8	155.3
18	31/10/02	COLLS0102	0.08	0.95	0.18	65.7	26.0	130.9	139.0
21	06/11/02	VEPDS0502	0.08	0.95	1.72	69.4	26.6	136.1	151.5
22	11/11/02	VEPDS0502	0.08	0.95	1.72	69.4	26.5	133.5	144.2
23	13/11/02	VEPDS0502	0.09	0.95	1.65	69.5	26.6	132.6	139.4
24	20/11/02	VEPDS0502	0.11	0.95	2.34	68.8	26.6	136.4	144.4
25	27/11/02	VEPDS0502	0.10	0.95	1.98	69.2	27.0	135.1	137.4
26	04/12/02	COLLS0102	0.06	0.95	0.23	65.7	27.0	133.8	142.6
27	11/12/02	COCEC0502	0.09	0.95	0.97	64.1	27.2	139.6	141.6
28	18/12/02	COCEC0502	0.08	0.95	1.03	64.1	29.3	136.3	137.2
31	06/01/03	COLLS0102	0.06	0.95	0.29	65.8	26.7	140.1	141.2
36	19/02/03	COLLS0202	0.08	0.95	0.29	68.2	30.5	137.5	143.5
39	06/03/03	COLLS0102	0.06	0.95	0.26	65.6	28.4	134.8	136.7
39	12/03/03	COLLS0102	0.05	0.95	0.28	65.6	28.3	136.4	138.3
40	19/03/03	COLLS0202	0.05	0.95	0.40	66.1	29.4	133.5	137.6
43	13/05/03	COLLS0202	0.05	0.95	0.20	66.2	26.3	136.6	145.5
44	21/05/03	COLLS0202	0.07	0.95	0.28	66.2	27.0	135.0	144.9
45	28/05/03	COLLS0202	0.07	0.95	0.41	66.0	25.3	135.7	138.3
46	04/06/03	COLLS0303	0.05	0.95	0.11	66.7	25.8	134.5	135.0
47	11/06/03	COLLS0303	0.06	0.95	0.49	66.3	25.2	135.4	143.8
48	18/06/03	COLLS0303	0.06	0.95	0.29	66.5	26.1	132.0	127.3
49	25/06/03	COLLS0303	0.04	0.95	0.15	66.6	24.3	131.9	135.5
50	02/07/03	COLLS0202	0.05	0.95	0.24	66.2	25.0	131.4	146.8
51	09/07/03	COLLS0202	0.08	0.95	0.50	66.0	24.4	131.6	145.1
52	16/07/03	COLLS0303	0.06	0.95	0.25	66.5	22.3	129.8	134.8
53	23/07/03	COLLS0303	0.08	0.95	0.26	66.5	23.6	132.6	135.6
54	30/07/03	COLLS0403	0.07	0.95	0.30	64.2	22.0	131.1	132.9
55	06/08/03	COLLS0403	0.07	0.95	0.35	64.2	23.2	130.7	134.9
56	13/08/03	COLLS0403	0.07	0.95	0.38	64.2	24.0	132.6	139.7
57	20/08/03	COLLS0403	0.06	0.95	0.38	64.2	23.5	131.7	142.0
58	27/08/03	COLLS0403	0.07	0.95	0.28	64.2	23.7	130.2	129.2
59	03/09/03	COLLS0403	0.08	0.95	0.45	64.1	23.4	131.5	146.2
60	10/09/03	COLLS0403	0.07	0.95	0.29	64.2	22.3	129.0	129.0
61	17/09/03	COLLS0503	0.06	0.95	0.24	64.7	22.2	130.9	131.6
62	24/09/03	COLLS0503	0.07	0.95	0.27	64.7	24.3	130.2	133.1
63	01/10/03	COLLS0403	0.06	0.95	0.22	64.3	25.6	132.2	134.3
64	08/10/03	AUCUS0103	0.13	0.95	0.94	65.3	26.3	134.4	138.5
65	16/10/03	COLLS0103	0.10	0.95	2.09	67.5	26.7	134.7	154.0
66	22/10/03	COLLS0103	0.08	0.95	1.22	68.3	26.3	135.2	147.5
67	29/10/03	COLLS0103	0.08	0.95	0.96	68.6	27.6	134.5	157.2
68	05/11/03	COLLS0103	0.06	0.95	0.79	68.8	27.6	133.7	159.5
69	12/11/03	COLLS0103	0.08	0.95	1.72	67.8	27.5	137.1	140.4
70	19/11/03	COLLS0103	0.06	0.95	1.06	68.5	26.9	134.6	149.1
71	26/11/03	AUCUS0103	0.16	0.95	1.53	64.7	29.2	138.2	161.8
72	05/12/03	AUCUS0103	0.18	0.95	2.13	64.1	29.2	139.9	155.3
73	10/12/03	AUCUS0103	0.15	0.95	0.91	65.3	30.7	145.1	147.7
74	17/12/03	AUCUS0103	0.16	0.95	1.36	64.8	30.1	143.0	158.4
78	14/01/04	AUCUS0103	0.14	0.95	1.43	64.8	30.4	142.0	155.1
79	21/01/04	COCEC0603	0.07	0.95	1.20	64.6	30.0	139.2	156.0
80	28/01/04	COCEC0603	0.08	0.95	1.08	64.8	29.6	136.9	148.0
81	04/02/04	COCEC0603	0.08	0.95	1.35	64.5	31.0	136.6	147.7
82	11/02/04	COCEC0603	0.07	0.95	0.77	65.1	28.4	142.3	162.0
83	18/02/04	COCEC0603	0.06	0.95	0.80	65.0	29.6	141.1	154.6
84	26/02/04	COCEC0704	0.10	0.95	0.94	62.5	30.8	135.2	145.0
85	03/03/04	COCEC0603	0.09	0.95	1.71	64.1	27.9	133.3	151.0
86	10/03/04	COCEC0603	0.09	0.95	1.48	64.4	26.3	134.9	150.4
87	18/03/04	COCEC0704	0.09	0.95	1.13	62.4	26.5	134.5	148.9
89	31/03/04	COCEC0704	0.08	0.95	1.18	62.3	28.4	132.8	152.5
90	07/04/04	COCEC0704	0.10	0.95	1.19	62.3	27.7	133.5	146.1
91	23/04/04	COCEC0704	0.09	0.95	1.10	62.4	27.6	134.1	137.2
92	28/04/04	M48001	0.13	0.95	1.38	62.8	26.6	135.8	147.8
93	05/05/04	M48001	0.12	0.95	1.31	62.8	25.2	138.7	157.8
94	12/05/04	M58001	0.12	0.95	1.59	65.5	26.6	138.3	143.0
95	19/05/04	M58001	0.13	0.95	1.52	65.0	24.8	137.4	150.9
96	26/05/04	COCEC0804	0.09	0.95	1.63	66.1	23.7	133.0	145.2
97	02/06/04	COCEC0804	0.08	0.95	1.23	66.5	23.9	130.0	141.8

Valores Premedios por Tipo de Carbón (@ 135MW)

1	2	IDADS	0.01	0.95	0.03	54.7	23.6	129.3	138.0
3	7	VEPDS	0.08	0.95	1.71	69.6	26.3	135.1	145.6
4	5	COCEC	0.09	0.95	1.11	62.4	28.8	134.0	145.9
5	17	COCEC	0.08	0.95	1.12	64.3	26.9	135.8	147.1
6	28	COLLS	0.06	0.95	0.29	65.5	25.3	133.0	138.0
7	6	COLLS	0.08	0.95	1.31	68.2	27.1	135.0	151.3
8	6	AUCUS	0.15	0.95	1.38	64.8	29.3	140.6	152.8
9	6	M3100	0.07	0.95	1.38	69.1	25.0	133.2	144.5
10	2	M4800	0.13	0.95	1.34	62.8	25.9	137.2	152.8
11	2	M5800	0.12	0.95	1.55	65.6	25.7	137.8	146.9

N°	Fecha	Carbón	Propiedades del Aire									
			Presión de Saturación a Temp. Bulbo Húmedo	Presión de Saturación a Temp. Bulbo Seco	Presión Parcial del Vapor de Agua en el Aire	Humedad del Aire o Absoluta	Humedad Relativa	Aire Teórico (Corregido)	Exceso de Aire	Aire Seco	Aire Húmedo	Densidad del Aire Atmosférico
			P _{sW} Twb kPa	P _{sW} Tdb kPa	P _p WvA kPa	MFA/DA kg/kg _{ev}	RHmz %	MFTThAc7 kg/kgc	XpA (AH) %	MFDaz (AH) kg/kgc	MFAz (AH) kg/kgc	DnA kg/m ³
1	03/10/02	IDADS0100	1.69	2.13	1.454	0.009	68.2	7.0	31.7	9.2	9.3	1.22
2	01/07/02	IDADS0202	1.67	2.00	1.489	0.009	74.3	6.7	36.0	9.2	9.3	1.22
4	18/07/02	M31001	1.65	1.94	1.484	0.009	76.6	9.4	34.4	12.6	12.7	1.22
5	31/07/02	M31002	1.71	2.06	1.505	0.009	72.0	9.5	51.6	14.4	14.5	1.22
6	07/08/02	M31002	1.68	2.05	1.476	0.009	72.0	9.5	33.8	12.7	12.8	1.22
7	14/08/02	COCEC0402	1.71	2.09	1.505	0.009	72.9	8.5	39.6	11.9	12.0	1.22
8	21/08/02	COCEC0402	1.71	2.06	1.505	0.009	72.9	8.5	28.4	10.9	11.0	1.22
9	28/08/02	COCEC0402	1.71	2.06	1.505	0.009	72.9	8.5	35.7	11.6	11.7	1.22
10	04/09/02	COCEC0402	1.71	2.06	1.505	0.009	72.9	8.5	46.1	12.4	12.5	1.22
11	11/09/02	COCEC0502	1.82	2.27	1.584	0.010	69.9	8.6	49.8	12.8	13.0	1.21
12	18/09/02	COCEC0502	1.76	2.22	1.518	0.009	68.3	8.6	39.2	11.6	11.8	1.22
13	25/09/02	VEPDS0402	1.76	2.22	1.516	0.009	68.3	9.6	72.2	16.5	16.8	1.22
14	02/10/02	VEPDS0402	1.76	2.22	1.516	0.009	68.3	9.6	41.4	13.5	13.7	1.22
15	09/10/02	M31003	1.76	2.22	1.516	0.009	68.3	9.4	21.4	11.4	11.5	1.22
16	18/10/02	M31003	1.89	2.24	1.704	0.011	76.1	9.4	48.9	13.8	13.9	1.20
17	23/10/02	M31003	1.99	2.65	1.880	0.011	83.5	9.4	59.0	14.9	15.1	1.20
18	31/10/02	COLLS0102	2.08	2.99	1.684	0.010	55.7	8.7	41.1	12.3	12.4	1.20
21	06/11/02	VEPDS0502	1.94	2.49	1.870	0.010	67.1	9.5	45.3	13.7	13.9	1.21
22	11/11/02	VEPDS0502	1.82	2.40	1.525	0.010	63.6	9.5	36.7	12.9	13.1	1.21
23	13/11/02	VEPDS0502	1.82	2.35	1.548	0.010	66.0	9.5	39.1	13.2	13.3	1.21
24	20/11/02	VEPDS0502	1.96	2.38	1.747	0.011	73.3	9.4	37.1	12.8	13.0	1.20
25	27/11/02	VEPDS0502	2.20	3.16	1.801	0.011	57.0	9.4	36.7	12.9	13.0	1.19
26	04/12/02	COLLS0102	2.01	2.58	1.747	0.011	67.7	8.7	40.6	12.3	12.4	1.20
27	11/12/02	COCEC0502	1.91	2.35	1.684	0.011	71.5	8.6	32.7	11.4	11.5	1.21
28	18/12/02	COCEC0502	2.30	2.99	2.008	0.013	67.2	8.6	36.3	11.8	12.0	1.20
31	05/01/03	COLLS0102	2.20	3.24	1.772	0.011	54.8	8.7	45.7	12.1	12.2	1.20
38	19/03/03	COLLS0202	2.35	3.27	1.683	0.012	60.7	8.9	40.2	12.3	12.5	1.19
39	05/03/03	COLLS0102	2.05	2.53	1.825	0.011	72.0	8.7	38.7	12.1	12.2	1.20
39	12/03/03	COLLS0102	2.09	2.81	1.771	0.011	63.0	8.7	38.7	12.1	12.2	1.20
40	19/03/03	COLLS0202	1.87	2.34	1.626	0.010	69.5	8.8	36.8	12.0	12.1	1.20
43	13/05/03	COLLS0202	1.83	2.43	1.529	0.010	63.0	8.8	32.1	11.6	11.7	1.21
44	21/05/03	COLLS0202	2.00	2.52	1.753	0.011	69.8	8.8	41.8	12.5	12.6	1.20
45	28/05/03	COLLS0202	1.88	2.09	1.456	0.009	68.6	8.8	42.4	12.5	12.6	1.22
46	04/06/03	COLLS0303	1.74	2.13	1.525	0.010	71.8	8.8	41.8	12.5	12.6	1.21
47	11/06/03	COLLS0303	1.62	2.13	1.332	0.008	62.5	8.8	39.9	12.3	12.4	1.22
48	18/06/03	COLLS0303	1.65	2.24	1.324	0.008	59.1	8.8	33.4	11.7	11.8	1.21
49	25/06/03	COLLS0303	1.99	2.49	1.747	0.011	70.2	8.8	44.2	12.7	12.9	1.20
50	02/07/03	COLLS0202	2.07	2.73	1.773	0.011	65.0	8.8	61.0	14.3	14.3	1.20
51	09/07/03	COLLS0202	2.14	2.99	1.782	0.011	59.7	8.9	48.9	13.1	13.2	1.20
52	16/07/03	COLLS0303	2.06	2.88	1.702	0.011	59.1	8.9	42.5	12.6	12.7	1.20
53	23/07/03	COLLS0303	2.03	2.50	1.802	0.011	72.2	8.8	41.0	12.4	12.6	1.20
54	30/07/03	COLLS0403	1.90	2.23	1.725	0.011	77.5	8.5	42.6	12.1	12.3	1.21
55	06/08/03	COLLS0403	2.03	2.76	1.691	0.011	81.3	8.5	53.6	13.1	13.2	1.20
56	13/08/03	COLLS0403	2.13	2.99	1.762	0.011	59.0	8.5	40.2	11.9	12.0	1.20
57	20/08/03	COLLS0403	1.93	2.41	1.685	0.011	69.8	8.5	41.4	12.0	12.1	1.21
58	27/08/03	COLLS0403	2.03	2.68	1.741	0.011	65.4	8.5	52.0	12.9	13.1	1.20
59	03/09/03	COLLS0403	2.37	3.42	1.960	0.012	57.2	8.5	63.1	13.8	14.0	1.19
60	10/09/03	COLLS0403	1.80	2.10	1.628	0.010	77.4	8.5	41.3	12.0	12.1	1.21
61	17/09/03	COLLS0503	1.88	2.23	1.697	0.011	76.2	8.6	49.0	12.8	12.9	1.21
62	24/09/03	COLLS0503	2.04	2.37	1.878	0.012	79.3	8.6	45.6	12.5	12.6	1.20
63	01/10/03	COLLS0403	2.35	3.23	1.995	0.013	61.8	8.5	40.9	12.0	12.1	1.18
64	08/10/03	AUCUS0103	2.47	3.30	2.140	0.013	64.8	8.6	45.7	12.9	13.0	1.18
65	15/10/03	COLLS0103	2.47	3.32	2.145	0.013	64.5	9.1	52.8	13.9	14.0	1.19
66	22/10/03	COLLS0103	2.46	3.33	2.120	0.013	63.6	9.2	43.1	13.1	13.3	1.19
67	29/10/03	COLLS0103	2.50	3.29	2.188	0.014	66.4	9.2	52.8	14.0	14.2	1.19
68	05/11/03	COLLS0103	2.87	4.30	2.412	0.015	58.2	9.2	59.3	14.7	14.9	1.18
69	12/11/03	COLLS0103	2.21	2.57	2.052	0.013	60.0	9.1	45.8	13.3	13.4	1.19
70	19/11/03	COLLS0103	2.34	2.97	2.078	0.013	70.0	9.2	48.0	13.6	13.8	1.19
71	26/11/03	AUCUS0103	2.89	3.89	2.550	0.016	65.5	8.8	49.6	13.1	13.3	1.18
72	05/12/03	AUCUS0103	2.85	4.25	2.390	0.015	56.3	8.7	36.9	11.9	12.1	1.18
73	10/12/03	AUCUS0103	2.44	3.25	2.129	0.013	65.6	8.8	44.3	12.8	12.9	1.19
74	17/12/03	AUCUS0103	3.08	5.04	2.507	0.016	49.8	8.8	45.8	12.8	13.0	1.17
78	14/01/04	AUCUS0103	3.11	4.28	2.720	0.016	63.5	8.8	37.7	12.1	12.3	1.26
79	21/01/04	COCEC0603	2.90	4.31	2.445	0.015	58.8	8.8	44.5	12.5	12.7	1.18
80	28/01/04	COCEC0603	3.10	5.19	2.512	0.016	48.5	8.6	48.9	12.7	12.9	1.17
81	04/02/04	COCEC0603	3.13	4.87	2.627	0.017	54.0	8.6	41.4	12.2	12.4	1.16
82	11/02/04	COCEC0603	2.89	4.07	2.500	0.016	61.4	8.7	42.1	12.3	12.5	1.17
83	18/02/04	COCEC0603	2.79	3.45	2.557	0.016	74.0	8.7	45.5	12.6	12.8	1.18
84	26/02/04	COCEC0704	2.99	4.75	2.454	0.015	51.7	8.4	40.9	11.8	12.0	1.17
85	03/03/04	COCEC0603	2.68	3.50	2.380	0.015	68.0	8.6	46.8	12.6	12.8	1.16
86	10/03/04	COCEC0603	3.16	4.37	2.788	0.018	63.8	8.6	43.1	12.3	12.5	1.17
87	18/03/04	COCEC0704	3.32	5.21	2.804	0.018	53.8	8.4	42.8	12.0	12.2	1.16
89	31/03/04	COCEC0704	2.73	3.46	2.482	0.018	71.2	8.4	44.4	12.1	12.3	1.18
90	07/04/04	COCEC0704	2.58	3.28	2.316	0.015	70.8	8.4	34.9	11.3	11.5	1.19
91	23/04/04	COCEC0704	2.71	4.20	2.214	0.014	52.7	8.4	10.9	9.3	9.4	1.18
92	28/04/04	M48001	2.40	3.30	2.045	0.013	62.0	8.4	40.0	11.8	11.9	1.19
93	05/05/04	M48001	2.30	2.69	2.135	0.013	78.4	8.4	39.4	11.7	11.8	1.19
94	12/05/04	M58001	2.65	3.98	2.186	0.014	55.0	8.7	24.1	10.9	11.0	1.18
95	19/05/04	M58001	2.35	3.34	1.965	0.012	58.8	8.8	35.6	11.9	12.0	1.19
96	26/05/04	COCEC0804	2.10	2.88	1.782	0.011	61.2	8.9	35.1	12.0	12.1	1.20
97	02/06/04	COCEC0804	2.33	3.04	2.035	0.013	67.0	8.9	35.2	12.0	12.2	1.19

Valores Promedios por Tipo de Carbón (@ 135MW)

N°	Fecha	Carbón	P _{sW} Twb kPa	P _{sW} Tdb kPa	P _p WvA kPa	MFA/DA kg/kg _{ev}	RHmz %	MFTThAc7 kg/kgc	XpA (AH) %	MFDaz (AH) kg/kgc	MFAz (AH) kg/kgc	DnA kg/m ³
1	3	IDADS	1.68	2.07	1.470	0.009	71.2	6.9	33.8	9.2	9.3	1.22
4	7	VEPDS	1.89	2.46	1.617	0.010	68.2	9.5	44.1	13.7	13.8	1.21
5	5	COCEC	2.87	4.16	2.450	0.015	60.0	8.4	34.6	11.3	11.5	1.16
6	28	COCEC	2.33	3.16	2.025	0.013	66.1	8.6	40.4	12.3	12.3	1.19
7	6	COLLS	2.00	2.62	1.710	0.011	66.1	8.7	43.3	12.4	12.6	1.20
8	6	COLLS	2.47	3.30	2.166	0.014	66.8	9.2	50.3	13.8	13.9	1.19
9	6	AUCUS	2.81	4.00	2.408	0.015	60.9	8.8	43.3	12.6	12.8	1.20
10	6	M3100	1.78	2.19	1.581	0.010	71.6	9.4	41.2	13.3	13.4	1.21
11	2	M4800	2.35	2.99	2.080	0.013	70.7	8.4	39.7	11.7	11.9	1.19
10	2	M5800	2.50	3.68	2.076	0.013	59.9	8.8	29.8	11.4	11.5	1.19

N°	Fecha	Carbón	Propiedades de los Productos de la Combustión																			
			Moles de los Productos de Combustión (Base Seca)		Moles de los Gases Secos (AH)		Moles de los Gases Húmedos (AH)		Gases Húmedos del Combustible		Humedad por Humedad del Carbón		Humedad por Hidrógeno en el Carbón		Humedad en el Aire		Humedad Adicional		Humedad Total en los Gases de Escape		Gases de Escape Húmedos Totales	
			MoDPe	MoDFg (AH)	MoDFg (AH)	MoFg (AH)	MoFg (AH)	MoFg (AH)	MoFg (AH)	MoFg (AH)	MoFg (AH)	MoFg (AH)	MoFg (AH)	MoFg (AH)	MoFg (AH)	MoFg (AH)	MoFg (AH)	MoFg (AH)	MoFg (AH)	MoFg (AH)	MoFg (AH)	MoFg (AH)
dd/mm/aa	xx/xx/xx		mol/kgc	mol/kgc	mol/kgc	mol/kgc	mol/kgc	mol/kgc	mol/kgc	mol/kgc	mol/kgc	mol/kgc	mol/kgc	mol/kgc	mol/kgc	mol/kgc	mol/kgc	mol/kgc	mol/kgc	mol/kgc	mol/kgc	
1	03/10/00	IDADS0100	0.048	0.313	0.343	0.00045	0.00011	0.00014	0.000037	0.00000	0.00029	0.00482										
2	01/07/02	IDADS0202	0.045	0.313	0.343	0.00044	0.00010	0.00014	0.000038	0.00000	0.00028	0.00455										
4	15/07/02	M31001	0.058	0.428	0.455	0.00036	0.00004	0.00016	0.000044	0.00000	0.00024	0.00511										
5	31/07/02	M31002	0.059	0.486	0.514	0.00033	0.00002	0.00015	0.000048	0.00000	0.00023	0.00551										
6	07/08/02	M31002	0.059	0.428	0.456	0.00033	0.00003	0.00015	0.000041	0.00000	0.00022	0.00486										
7	14/08/02	COCEC0402	0.053	0.402	0.429	0.00033	0.00002	0.00015	0.000040	0.00000	0.00022	0.00462										
8	21/08/02	COCEC0402	0.053	0.369	0.396	0.00033	0.00003	0.00015	0.000037	0.00000	0.00022	0.00430										
9	28/08/02	COCEC0402	0.053	0.392	0.419	0.00033	0.00003	0.00015	0.000039	0.00000	0.00022	0.00450										
10	04/09/02	COCEC0402	0.053	0.420	0.447	0.00033	0.00003	0.00015	0.000042	0.00000	0.00022	0.00480										
11	11/09/02	COCEC0502	0.054	0.435	0.461	0.00033	0.00003	0.00015	0.000046	0.00000	0.00022	0.00500										
12	18/09/02	COCEC0502	0.054	0.394	0.421	0.00034	0.00003	0.00018	0.000042	0.00000	0.00023	0.00481										
13	25/09/02	VEPDS0402	0.059	0.559	0.586	0.00031	0.00001	0.00014	0.000050	0.00000	0.00021	0.00571										
14	02/10/02	VEPDS0402	0.060	0.458	0.484	0.00030	0.00001	0.00014	0.000041	0.00000	0.00020	0.00474										
15	09/10/02	M31003	0.058	0.385	0.413	0.00033	0.00003	0.00015	0.000038	0.00000	0.00022	0.00438										
16	16/10/02	M31003	0.058	0.468	0.494	0.00034	0.00003	0.00016	0.000054	0.00000	0.00024	0.00542										
17	23/10/02	M31003	0.058	0.505	0.534	0.00033	0.00003	0.00016	0.000057	0.00000	0.00025	0.00579										
18	31/10/02	COLLS0102	0.055	0.410	0.447	0.00035	0.00004	0.00015	0.000048	0.00000	0.00024	0.00498										
21	06/11/02	VEPDS0502	0.059	0.485	0.491	0.00030	0.00001	0.00014	0.000046	0.00001	0.00020	0.00477										
22	11/11/02	VEPDS0502	0.059	0.437	0.462	0.00030	0.00001	0.00014	0.000040	0.00000	0.00019	0.00450										
23	13/11/02	VEPDS0502	0.059	0.445	0.471	0.00030	0.00001	0.00014	0.000042	0.00000	0.00020	0.00467										
24	20/11/02	VEPDS0502	0.058	0.435	0.461	0.00031	0.00002	0.00015	0.000049	0.00001	0.00022	0.00483										
25	27/11/02	VEPDS0502	0.058	0.435	0.462	0.00031	0.00002	0.00015	0.000050	0.00000	0.00022	0.00476										
26	04/12/02	COLLS0102	0.055	0.418	0.443	0.00035	0.00003	0.00015	0.000050	0.00000	0.00023	0.00497										
27	11/12/02	COCEC0502	0.054	0.385	0.412	0.00032	0.00003	0.00015	0.000043	0.00000	0.00022	0.00481										
28	18/12/02	COLLS0102	0.055	0.404	0.430	0.00034	0.00004	0.00015	0.000048	0.00000	0.00024	0.00488										
31	08/01/03	COLLS0102	0.054	0.410	0.438	0.00034	0.00002	0.00015	0.000048	0.00000	0.00022	0.00487										
36	19/02/03	COLLS0202	0.056	0.418	0.445	0.00034	0.00003	0.00015	0.000058	0.00000	0.00024	0.00487										
38	06/03/03	COLLS0102	0.055	0.410	0.438	0.00034	0.00004	0.00015	0.000051	0.00000	0.00024	0.00481										
39	12/03/03	COLLS0102	0.055	0.410	0.438	0.00034	0.00003	0.00015	0.000049	0.00000	0.00023	0.00475										
40	19/03/03	COLLS0202	0.056	0.407	0.435	0.00034	0.00003	0.00015	0.000044	0.00000	0.00022	0.00471										
43	13/05/03	COLLS0202	0.056	0.394	0.422	0.00034	0.00003	0.00015	0.000040	0.00000	0.00022	0.00457										
44	21/05/03	COLLS0202	0.056	0.423	0.451	0.00035	0.00003	0.00015	0.000051	0.00000	0.00024	0.00504										
45	28/05/03	COLLS0202	0.056	0.424	0.452	0.00034	0.00003	0.00015	0.000041	0.00000	0.00022	0.00495										
46	04/06/03	COLLS0303	0.058	0.425	0.452	0.00034	0.00003	0.00014	0.000043	0.00000	0.00022	0.00490										
47	11/06/03	COLLS0303	0.056	0.417	0.444	0.00034	0.00003	0.00015	0.000037	0.00000	0.00022	0.00486										
48	18/06/03	COLLS0303	0.056	0.398	0.425	0.00035	0.00004	0.00015	0.000037	0.00000	0.00022	0.00479										
49	25/06/03	COLLS0303	0.056	0.431	0.459	0.00035	0.00004	0.00015	0.000051	0.00000	0.00024	0.00509										
50	02/07/03	COLLS0202	0.056	0.482	0.510	0.00035	0.00004	0.00015	0.000054	0.00000	0.00024	0.00528										
51	09/07/03	COLLS0202	0.056	0.443	0.472	0.00034	0.00004	0.00015	0.000054	0.00000	0.00024	0.00528										
52	16/07/03	COLLS0303	0.056	0.426	0.454	0.00035	0.00004	0.00015	0.000049	0.00000	0.00024	0.00499										
53	23/07/03	COLLS0303	0.056	0.421	0.449	0.00034	0.00004	0.00015	0.000051	0.00000	0.00024	0.00491										
54	30/07/03	COLLS0403	0.054	0.411	0.439	0.00034	0.00004	0.00015	0.000048	0.00000	0.00023	0.00486										
55	06/08/03	COLLS0403	0.054	0.443	0.471	0.00034	0.00004	0.00014	0.000051	0.00000	0.00023	0.00517										
56	13/08/03	COLLS0403	0.054	0.404	0.430	0.00034	0.00003	0.00014	0.000047	0.00000	0.00022	0.00468										
57	20/08/03	COLLS0403	0.054	0.407	0.434	0.00034	0.00003	0.00014	0.000045	0.00000	0.00022	0.00469										
58	27/08/03	COLLS0403	0.054	0.439	0.468	0.00034	0.00003	0.00015	0.000052	0.00000	0.00023	0.00518										
59	03/09/03	COLLS0403	0.054	0.471	0.498	0.00034	0.00003	0.00015	0.000053	0.00000	0.00025	0.00551										
60	10/09/03	COLLS0403	0.054	0.408	0.435	0.00034	0.00004	0.00014	0.000045	0.00000	0.00023	0.00479										
61	17/09/03	COLLS0503	0.055	0.433	0.461	0.00034	0.00003	0.00015	0.000050	0.00000	0.00023	0.00506										
62	24/09/03	COLLS0503	0.055	0.423	0.450	0.00034	0.00003	0.00015	0.000054	0.00000	0.00024	0.00499										
63	01/10/03	COLLS0403	0.054	0.407	0.434	0.00034	0.00004	0.00014	0.000055	0.00000	0.00024	0.00477										
64	08/10/03	AUCUS0103	0.057	0.436	0.462	0.00032	0.00003	0.00015	0.000058	0.00000	0.00024	0.00513										
65	15/10/03	COLLS0103	0.057	0.470	0.498	0.00031	0.00003	0.00015	0.000054	0.00000	0.00024	0.00512										
66	22/10/03	COLLS0103	0.058	0.440	0.471	0.00031	0.00002	0.00015	0.000059	0.00000	0.00023	0.00482										
67	29/10/03	COLLS0103	0.058	0.476	0.503	0.00032	0.00002	0.00015	0.000066	0.00000	0.00024	0.00521										
68	05/11/03	COLLS0103	0.058	0.498	0.525	0.00031	0.00002	0.00014	0.000074	0.00000	0.00024	0.00529										
69	12/11/03	COLLS0103	0.057	0.450	0.477	0.00031	0.00002	0.00015	0.000059	0.00001	0.00024	0.00494										
70	19/11/03	COLLS0103	0.058	0.461	0.488	0.00031	0.00002	0.00014	0.000059	0.00000	0.00023	0.00490										
71	26/11/03	AUCUS0103	0.055	0.444	0.470	0.00031	0.00002	0.00015	0.000078	0.00000	0.00025	0.00522										
72	05/12/03	AUCUS0103	0.054	0.402	0.428	0.00031	0.00002	0.00015	0.000067	0.00000	0.00025	0.00482										
73	10/12/03	AUCUS0103	0.055	0.432	0.457	0.00030	0.00002	0.00014	0.000061	0.00000	0.00023	0.00482										
74	17/12/03	AUCUS0103	0.055	0.434	0.459	0.00031	0.00002	0.00015	0.000074	0.00000	0.00025	0.00508										
78	14/01/04	AUCUS0103	0.055	0.408	0.434	0.00031	0.00002	0.00015	0.000069	0.00000	0.00025	0.00508										
79	21/01/04	COCEC0803	0.054	0.423	0.450	0.00032	0.00003	0.00014	0.000069	0.00000	0.00024	0.00471										
80	28/01/04	COCEC0803	0.055	0.431	0.458	0.00032	0.00003	0.00014	0.000067	0.00000	0.00024	0.00473										
81	04/02/04	COCEC0603	0.054	0.413	0.440	0.00032	0.00003	0.00014	0.000069	0.00000	0.00024	0.00489										
82	11/02/04	COCEC0603	0.055	0.418	0.446	0.00032	0.00003	0.00014	0.000071	0.00000	0.00025	0.00486										
83	18/02/04	COCEC0903	0.055	0.428	0.458	0.00033	0.00003	0.00014	0.000071	0.00000	0.00025	0.00479										
84	26/02/04	COCEC0704	0.053	0.401	0.428	0.00034	0.00004	0.00015	0.000069	0.00000	0.00026	0.00486										
85	03/03/04	COCEC0603	0.054	0.427	0.454	0.00032	0.00003	0.00014	0.000068	0.00000	0.00024	0.00478										
86	10/03/04	COCEC0603	0.054	0.417	0.444	0.00032	0.00003	0.00014	0.000076	0.00000	0.00025	0.00472										
87	18/03/04	COCEC0704	0.053	0.405	0.433	0.00033	0.00004	0.00014	0.000077	0.00000	0.00025	0.00470										
89	31/03/04	COCEC0704	0.053	0.409	0.437	0.00034	0.00004	0.00015	0.000069	0.00000	0.00025	0.00483										
90	07/04/04	COCEC0704	0.052	0.382	0.410	0.00034	0.00004	0.00015	0.000062	0.00000	0.00025	0.00485										
91	23/04/04	COCEC0704	0.053	0.313	0.341	0.00032	0.00004	0.00014	0.000056	0.00000	0.00023	0.00459										
92	28/04/04	M48001	0.053	0.398	0.425	0.00033	0.00003	0.00014	0.000046	0.00000	0.00023	0.00466										
93	05/05/04	M48001	0.053	0.387	0.425	0.00033	0.00003	0.00014	0.000046	0.0000												

N°	Fecha	Carbón	Características de la Rubrica																			
			Gases de Escape Secos		Residuos Sólidos en Gases de Escape		Densidad de Gases de Escape Húmedos		Densidad de Gases de Escape Húmedos		Exceso de Aire (ECO)		Aire Seco (ECO)		Humedad en el Aire (ECO)		Aire Húmedo (ECO)		Gases de Escape Húmedos Totales (ECO)		Gases Secos de Escape (ECO)	
			MqDFgz	MqDFgz	MqDFgz	MqDFgz	DnFg	DnFg (N)	XpA (ECO)	MqDaz (ECO)	MqWaz (ECO)	MqAz (ECO)	MqAz (ECO)	MqFaz (ECO)	MqFaz (ECO)	MqFaz (ECO)	MqFaz (ECO)	MqFaz (ECO)	MqDFgz (ECO)	MqDFgz (ECO)		
kg/kJc	%másclo	kg/m3	kg/m3N	%	kg/kJc	kg/kJc	%	kg/kJc	kg/kJc	kg/kJc	kg/kJc	kg/kJc	kg/kJc	kg/kJc	kg/kJc	kg/kJc	kg/kJc	kg/kJc				
1	03/10/00	IDADS0100	0.000433	0.000906	0.87	0.96	22.0	0.00038	0.000035	0.000386	0.000431	0.000431	0.000431	0.000431	0.000431	0.000431	0.000431	0.000431	0.000431	0.000431	0.000431	
2	01/07/02	IDADS0202	0.000427	0.000529	0.87	0.96	22.4	0.00037	0.000034	0.000370	0.000414	0.000414	0.000414	0.000414	0.000414	0.000414	0.000414	0.000414	0.000414	0.000414	0.000414	
4	18/07/02	M31001	0.000488	0.000527	0.88	0.97	19.8	0.00042	0.000039	0.000424	0.000459	0.000459	0.000459	0.000459	0.000459	0.000459	0.000459	0.000459	0.000459	0.000459	0.000459	
5	31/07/02	M31002	0.000526	0.000429	0.87	0.97	29.2	0.00044	0.000041	0.000441	0.000475	0.000475	0.000475	0.000475	0.000475	0.000475	0.000475	0.000475	0.000475	0.000475	0.000475	
6	07/08/02	M31002	0.000464	0.000436	0.87	0.97	27.7	0.00043	0.000039	0.000432	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	
7	14/08/02	COCEC0402	0.000440	0.000517	0.87	0.97	24.9	0.00038	0.000036	0.000384	0.000417	0.000417	0.000417	0.000417	0.000417	0.000417	0.000417	0.000417	0.000417	0.000417	0.000417	
8	21/08/02	COCEC0402	0.000409	0.000689	0.87	0.97	17.4	0.00036	0.000034	0.000363	0.000396	0.000396	0.000396	0.000396	0.000396	0.000396	0.000396	0.000396	0.000396	0.000396	0.000396	
9	28/08/02	COCEC0402	0.000428	0.000490	0.87	0.97	25.5	0.00038	0.000036	0.000384	0.000418	0.000418	0.000418	0.000418	0.000418	0.000418	0.000418	0.000418	0.000418	0.000418	0.000418	
10	04/09/02	COCEC0402	0.000458	0.000465	0.86	0.96	29.8	0.00039	0.000037	0.000397	0.000430	0.000430	0.000430	0.000430	0.000430	0.000430	0.000430	0.000430	0.000430	0.000430	0.000430	
11	11/09/02	COCEC0502	0.000478	0.000642	0.87	0.96	32.8	0.00041	0.000041	0.000414	0.000447	0.000447	0.000447	0.000447	0.000447	0.000447	0.000447	0.000447	0.000447	0.000447	0.000447	
12	18/09/02	COCEC0502	0.000458	0.000834	0.87	0.97	24.2	0.00040	0.000038	0.000408	0.000442	0.000442	0.000442	0.000442	0.000442	0.000442	0.000442	0.000442	0.000442	0.000442	0.000442	
13	25/09/02	VEPDS0402	0.000551	0.000309	0.87	0.96	42.1	0.00044	0.000042	0.000446	0.000477	0.000477	0.000477	0.000477	0.000477	0.000477	0.000477	0.000477	0.000477	0.000477	0.000477	
14	02/10/02	VEPDS0402	0.000455	0.000425	0.87	0.97	28.3	0.00039	0.000037	0.000397	0.000427	0.000427	0.000427	0.000427	0.000427	0.000427	0.000427	0.000427	0.000427	0.000427	0.000427	
15	09/10/02	M31003	0.000416	0.000510	0.87	0.97	17.8	0.00039	0.000037	0.000393	0.000426	0.000426	0.000426	0.000426	0.000426	0.000426	0.000426	0.000426	0.000426	0.000426	0.000426	
16	18/10/02	M31003	0.000518	0.000580	0.86	0.97	35.6	0.00046	0.000050	0.000469	0.000503	0.000503	0.000503	0.000503	0.000503	0.000503	0.000503	0.000503	0.000503	0.000503	0.000503	
17	23/10/02	M31003	0.000559	0.000484	0.87	0.96	29.0	0.00044	0.000046	0.000448	0.000481	0.000481	0.000481	0.000481	0.000481	0.000481	0.000481	0.000481	0.000481	0.000481	0.000481	
18	31/10/02	COLLS0102	0.000474	0.000457	0.87	0.97	30.0	0.00042	0.000044	0.000427	0.000462	0.000462	0.000462	0.000462	0.000462	0.000462	0.000462	0.000462	0.000462	0.000462	0.000462	
21	09/11/02	VEPDS0502	0.000496	0.000496	0.86	0.96	38.3	0.00043	0.000044	0.000437	0.000471	0.000471	0.000471	0.000471	0.000471	0.000471	0.000471	0.000471	0.000471	0.000471	0.000471	
22	11/11/02	VEPDS0502	0.000431	0.000526	0.87	0.97	23.2	0.00037	0.000036	0.000378	0.000408	0.000408	0.000408	0.000408	0.000408	0.000408	0.000408	0.000408	0.000408	0.000408	0.000408	
23	13/11/02	VEPDS0502	0.000448	0.000623	0.87	0.97	29.9	0.00040	0.000039	0.000409	0.000439	0.000439	0.000439	0.000439	0.000439	0.000439	0.000439	0.000439	0.000439	0.000439	0.000439	
24	20/11/02	VEPDS0502	0.000460	0.000761	0.86	0.97	27.0	0.00041	0.000045	0.000418	0.000448	0.000448	0.000448	0.000448	0.000448	0.000448	0.000448	0.000448	0.000448	0.000448	0.000448	
25	27/11/02	VEPDS0502	0.000454	0.000714	0.86	0.97	33.6	0.00043	0.000049	0.000434	0.000465	0.000465	0.000465	0.000465	0.000465	0.000465	0.000465	0.000465	0.000465	0.000465	0.000465	
26	04/12/02	COLLS0102	0.000474	0.000428	0.86	0.97	28.8	0.00042	0.000046	0.000423	0.000458	0.000458	0.000458	0.000458	0.000458	0.000458	0.000458	0.000458	0.000458	0.000458	0.000458	
27	11/12/02	COCEC0502	0.000418	0.000656	0.85	0.97	30.0	0.00040	0.000042	0.000400	0.000433	0.000433	0.000433	0.000433	0.000433	0.000433	0.000433	0.000433	0.000433	0.000433	0.000433	
28	18/12/02	COCEC0502	0.000435	0.000562	0.86	0.97	37.0	0.00042	0.000052	0.000421	0.000454	0.000454	0.000454	0.000454	0.000454	0.000454	0.000454	0.000454	0.000454	0.000454	0.000454	
31	08/01/03	COLLS0102	0.000446	0.000444	0.85	0.97	37.0	0.00042	0.000047	0.000429	0.000462	0.000462	0.000462	0.000462	0.000462	0.000462	0.000462	0.000462	0.000462	0.000462	0.000462	
36	18/02/03	COLLS0202	0.000463	0.000413	0.86	0.97	31.9	0.00042	0.000052	0.000426	0.000460	0.000460	0.000460	0.000460	0.000460	0.000460	0.000460	0.000460	0.000460	0.000460	0.000460	
38	06/03/03	COLLS0102	0.000477	0.000459	0.86	0.97	36.0	0.00043	0.000050	0.000438	0.000472	0.000472	0.000472	0.000472	0.000472	0.000472	0.000472	0.000472	0.000472	0.000472	0.000472	
39	12/03/03	COLLS0102	0.000452	0.000424	0.86	0.97	36.0	0.00043	0.000048	0.000432	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	
40	19/03/03	COLLS0202	0.000449	0.000384	0.86	0.97	31.0	0.00041	0.000042	0.000419	0.000453	0.000453	0.000453	0.000453	0.000453	0.000453	0.000453	0.000453	0.000453	0.000453	0.000453	
43	13/05/03	COLLS0202	0.000435	0.000433	0.86	0.97	21.2	0.00038	0.000037	0.000387	0.000422	0.000422	0.000422	0.000422	0.000422	0.000422	0.000422	0.000422	0.000422	0.000422	0.000422	
44	21/05/03	COLLS0202	0.000481	0.000540	0.86	0.97	28.7	0.00042	0.000048	0.000426	0.000461	0.000461	0.000461	0.000461	0.000461	0.000461	0.000461	0.000461	0.000461	0.000461	0.000461	
45	28/05/03	COLLS0202	0.000473	0.000435	0.86	0.97	38.8	0.00044	0.000040	0.000449	0.000483	0.000483	0.000483	0.000483	0.000483	0.000483	0.000483	0.000483	0.000483	0.000483	0.000483	
46	04/06/03	COLLS0303	0.000468	0.000378	0.87	0.97	41.2	0.00045	0.000043	0.000454	0.000488	0.000488	0.000488	0.000488	0.000488	0.000488	0.000488	0.000488	0.000488	0.000488	0.000488	
47	11/06/03	COLLS0303	0.000464	0.000435	0.86	0.97	28.1	0.00041	0.000034	0.000416	0.000451	0.000451	0.000451	0.000451	0.000451	0.000451	0.000451	0.000451	0.000451	0.000451	0.000451	
48	18/06/03	COLLS0303	0.000457	0.000480	0.87	0.97	40.4	0.00046	0.000038	0.000467	0.000502	0.000502	0.000502	0.000502	0.000502	0.000502	0.000502	0.000502	0.000502	0.000502	0.000502	
49	25/06/03	COLLS0303	0.000485	0.000291	0.86	0.97	39.0	0.00045	0.000049	0.000456	0.000492	0.000492	0.000492	0.000492	0.000492	0.000492	0.000492	0.000492	0.000492	0.000492	0.000492	
50	02/07/03	COLLS0202	0.000451	0.000370	0.87	0.96	38.8	0.00045	0.000050	0.000458	0.000493	0.000493	0.000493	0.000493	0.000493	0.000493	0.000493	0.000493	0.000493	0.000493	0.000493	
51	09/07/03	COLLS0202	0.000501	0.000524	0.87	0.96	36.7	0.00043	0.000044	0.000431	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	0.000466	
52	16/07/03	COLLS0202	0.000476	0.000378	0.86	0.97	35.4	0.00043	0.000046	0.000432	0.000467	0.000467	0.000467	0.000467	0.000467	0.000467	0.000467	0.000467	0.000467	0.000467	0.000467	
53	23/07/03	COLLS0303	0.000467	0.000400	0.86	0.97	37.0	0.00044	0.000049	0.000443	0.000478	0.000478	0.000478	0.000478	0.000478	0.000478	0.000478	0.000478	0.000478	0.000478	0.000478	
54	30/07/03	COLLS0403	0.000462	0.000502	0.87	0.97	40.1	0.00044	0.000047	0.000443	0.000477	0.000477	0.000477	0.000477	0.000477	0.000477	0.000477	0.000477	0.000477	0.000477	0.000477	
55	06/08/03	COLLS0403	0.000494	0.000472	0.87	0.96	47.3	0.00046	0.000048	0.000463	0.000498	0.000498	0.000498	0.000498	0.000498	0.000498	0.000498	0.000498	0.000498	0.000498	0.000498	
56	13/08/03	COLLS0403	0.000446	0.000465	0.87																	

N°	Fecha	Carbón	Grupos												
			Fugas en la Rueda		Moles de los Gases Secos (ECO)		Moles de los Gases Húmedos (ECO)		Aire Seco	Vapor de Agua a TFGlvCr	Aire Húmedo	Gases Secos a TFGlvCr	Residuos a TFGlvCr	Gases de Escape a TFGlvCr	Carbón Quemado
			AL %	MoFg (ECO) mol/kgc	MoFg (ECO) mol/kgc	HDAEn J/kg	HWTFGLvCr J/kg	HATEn J/kg	HDFTFGlvCr J/kg	HRaTFGLvCr J/kg	HFaTFGLvCr J/kg	HCoal J/kg			
1	03/10/00	IDADS0100	7.2	0.289	0.320	-1.0	209.7	-1.0	111.1	82.8	117.4	-1.5			
2	01/07/02	IDADS0202	9.9	0.281	0.312	-1.8	216.4	-1.8	114.7	96.0	121.0	-2.6			
4	18/07/02	M31001	11.2	0.379	0.408	-0.7	218.5	-0.7	115.8	97.0	121.1	-1.0			
5	31/07/02	M31002	16.1	0.413	0.441	-0.9	239.0	-0.9	126.7	106.8	131.9	-1.2			
6	07/08/02	M31002	4.4	0.408	0.436	-1.3	217.9	-1.3	115.5	86.7	120.6	-1.7			
7	14/08/02	COCEC0402	10.9	0.359	0.386	-0.4	224.9	-0.4	119.2	100.1	124.8	-0.5			
8	21/08/02	COCEC0402	8.6	0.337	0.364	-1.4	221.8	-1.4	117.5	98.5	123.4	-1.8			
9	28/08/02	COCEC0402	7.5	0.362	0.389	-1.3	216.6	-1.3	114.8	98.1	120.2	-1.7			
10	04/09/02	COCEC0402	11.6	0.372	0.399	-0.8	230.9	-0.8	122.4	103.0	127.9	-0.8			
11	11/09/02	COCEC0502	11.8	0.385	0.411	-1.0	225.8	-1.1	119.7	106.5	125.0	-1.4			
12	18/09/02	COCEC0502	8.9	0.359	0.385	1.0	229.8	1.0	121.7	102.3	127.8	1.3			
13	25/09/02	VEPDS0402	19.9	0.460	0.486	0.6	248.1	0.6	132.1	111.7	136.7	1.8			
14	02/10/02	VEPDS0402	11.0	0.408	0.434	0.9	229.6	0.9	121.7	102.3	126.3	0.2			
15	09/10/02	M31003	2.9	0.373	0.401	0.5	211.2	0.5	112.0	83.6	117.4	0.7			
16	16/10/02	M31003	7.0	0.429	0.457	1.0	219.5	1.0	116.4	97.5	121.5	1.4			
17	23/10/02	M31003	21.6	0.408	0.436	1.5	246.1	1.5	130.5	110.2	135.9	2.0			
18	31/10/02	COLLS0102	7.9	0.384	0.413	1.0	214.8	1.0	113.9	95.3	119.2	1.3			
21	08/11/02	VEPDS0502	12.3	0.409	0.435	1.8	238.8	1.8	126.6	106.7	131.9	2.1			
22	11/11/02	VEPDS0502	10.2	0.392	0.418	1.5	224.8	1.5	119.2	100.0	124.2	1.9			
23	13/11/02	VEPDS0502	6.6	0.415	0.441	0.6	215.7	0.6	114.3	95.7	119.3	0.8			
24	20/11/02	VEPDS0502	7.5	0.402	0.428	1.8	225.1	1.8	119.3	100.2	125.0	2.2			
25	27/11/02	VEPDS0502	2.2	0.425	0.452	2.0	211.8	2.0	112.3	93.6	117.5	2.5			
26	04/12/02	COLLS0102	6.5	0.380	0.406	2.0	221.9	2.0	117.6	96.6	123.0	2.7			
27	11/12/02	COLLS0102	2.7	0.371	0.404	2.2	219.9	2.2	116.9	97.7	122.4	2.8			
28	18/12/02	COCEC0502	0.9	0.397	0.426	4.3	211.4	4.4	112.0	93.6	117.8	5.2			
31	08/01/03	COLLS0102	1.1	0.405	0.431	4.7	219.2	4.8	116.2	97.4	121.4	6.7			
39	19/02/03	COLLS0202	5.8	0.393	0.420	5.5	223.5	5.9	118.5	99.4	124.0	7.4			
38	06/03/03	COLLS0102	1.8	0.402	0.430	3.4	210.5	3.4	111.6	93.2	116.8	4.5			
39	12/03/03	COLLS0102	1.8	0.402	0.430	3.3	213.5	3.3	113.2	94.7	118.5	4.5			
40	19/03/03	COLLS0202	4.1	0.390	0.417	4.4	212.3	4.5	112.5	94.1	117.7	6.0			
43	13/05/03	COLLS0202	8.2	0.361	0.389	1.3	227.3	1.3	120.5	101.2	126.0	1.7			
44	21/05/03	COLLS0202	9.4	0.383	0.411	2.0	226.2	2.0	119.9	100.7	125.4	2.6			
45	28/05/03	COLLS0202	2.5	0.413	0.441	0.3	213.6	0.3	113.2	94.7	118.2	0.4			
46	04/06/03	COLLS0303	0.4	0.423	0.450	0.7	207.2	0.7	109.8	91.7	114.6	1.0			
47	11/06/03	COLLS0303	7.8	0.384	0.411	0.2	224.0	0.2	118.8	99.7	123.9	0.3			
48	18/06/03	COLLS0303	0.0	0.419	0.447	0.1	192.5	0.1	102.0	84.7	106.7	0.1			
49	25/06/03	COLLS0303	3.4	0.416	0.443	-0.7	208.3	-0.7	114.4	92.2	116.3	-0.9			
50	02/07/03	COLLS0202	14.9	0.414	0.442	0.0	229.9	0.0	121.9	102.4	127.0	0.0			
51	09/07/03	COLLS0202	12.9	0.388	0.417	-0.8	226.6	-0.7	120.1	100.9	125.6	-0.8			
52	16/07/03	COLLS0303	4.8	0.404	0.432	-2.8	207.0	-2.8	109.7	91.5	114.7	-3.8			
53	23/07/03	COLLS0303	2.7	0.409	0.437	-1.4	208.5	-1.4	110.5	92.3	115.6	-1.9			
54	30/07/03	COLLS0403	1.7	0.404	0.431	-3.0	203.2	-3.1	107.7	89.8	112.8	-3.9			
55	06/08/03	COLLS0403	4.0	0.425	0.452	-1.9	207.1	-1.9	109.8	91.6	114.6	-2.4			
56	13/08/03	COLLS0403	6.8	0.376	0.402	-1.0	216.3	-1.0	114.7	96.0	119.9	-1.3			
57	20/08/03	COLLS0403	9.6	0.367	0.394	-1.6	220.7	-1.6	117.0	98.1	122.4	-2.0			
58	27/08/03	COLLS0403	0.0	0.444	0.471	-1.3	198.2	-1.4	104.0	86.5	108.6	-1.7			
59	03/09/03	COLLS0403	13.8	0.409	0.436	-1.8	228.6	-1.8	121.2	101.8	126.5	-2.1			
60	10/09/03	COLLS0403	0.0	0.408	0.435	-2.8	195.8	-2.8	103.8	86.3	108.6	-3.6			
61	17/09/03	COLLS0503	0.6	0.430	0.458	-2.8	200.8	-2.9	106.4	88.6	111.2	-3.7			
62	24/09/03	COLLS0503	2.8	0.410	0.438	-0.7	203.6	-0.7	107.9	90.0	112.9	-0.9			
63	01/10/03	COLLS0403	2.1	0.397	0.425	0.6	206.0	0.6	109.2	91.1	114.4	0.6			
64	08/10/03	AUCUS0103	3.9	0.418	0.444	1.3	214.0	1.3	113.4	94.9	119.0	1.8			
65	15/10/03	COLLS0103	18.3	0.391	0.419	1.7	243.6	1.7	129.1	109.0	135.2	2.2			
66	22/10/03	COLLS0103	11.5	0.394	0.421	1.3	231.1	1.3	122.5	103.0	128.3	1.7			
67	29/10/03	COLLS0103	21.7	0.384	0.411	2.6	249.7	2.6	132.4	112.0	138.4	3.4			
68	05/11/03	COLLS0103	24.9	0.391	0.417	2.6	254.2	2.6	134.8	114.2	140.6	3.3			
69	12/11/03	COLLS0103	3.1	0.435	0.462	2.5	217.6	2.5	115.3	96.6	120.9	3.2			
70	19/11/03	COLLS0103	13.8	0.400	0.427	1.9	234.3	1.9	124.2	104.5	129.7	2.5			
71	26/11/03	AUCUS0103	21.1	0.360	0.388	4.2	258.6	4.3	137.1	116.3	144.3	5.2			
72	03/12/03	AUCUS0103	14.3	0.347	0.373	4.2	245.1	4.2	130.5	110.2	137.8	5.1			
73	10/12/03	AUCUS0103	2.3	0.421	0.448	5.7	231.5	5.8	122.7	103.2	128.9	7.1			
74	17/12/03	AUCUS0103	14.0	0.376	0.401	5.1	252.0	5.2	133.6	113.1	140.7	6.9			
78	14/01/04	AUCUS0103	12.1	0.380	0.398	5.4	245.8	5.5	130.3	110.1	137.3	6.7			
79	21/01/04	COCEC0603	15.7	0.380	0.397	5.0	247.4	5.0	131.1	110.8	137.6	6.4			
80	28/01/04	COCEC0603	10.6	0.388	0.413	4.6	232.1	4.7	123.1	103.5	129.0	6.0			
81	04/02/04	COCEC0603	10.8	0.369	0.396	6.0	231.6	6.1	122.7	103.2	129.1	7.7			
82	11/02/04	COCEC0603	17.7	0.349	0.377	3.4	259.0	3.4	137.3	116.5	144.2	4.4			
83	18/02/04	COCEC0603	12.5	0.376	0.404	4.8	244.8	4.7	129.8	109.6	136.2	6.0			
84	26/02/04	COCEC0704	9.6	0.362	0.390	5.6	226.4	5.7	120.0	100.8	126.4	7.2			
85	03/03/04	COCEC0603	17.2	0.358	0.385	2.9	237.9	2.9	126.1	106.3	132.3	3.7			
86	10/03/04	COCEC0603	15.0	0.358	0.385	3.3	236.6	3.4	125.5	105.7	132.1	4.3			
87	16/03/04	COCEC0704	14.0	0.351	0.378	4.5	233.8	4.5	123.9	104.3	130.5	5.8			
89	31/03/04	COCEC0704	19.6	0.336	0.363	3.4	240.8	3.9	127.7	107.7	134.2	4.5			
90	07/04/04	COCEC0704	12.2	0.336	0.364	2.7	228.4	2.7	121.1	101.7	127.7	3.5			
91	23/04/04	COCEC0704	3.0	0.363	0.391	2.8	211.4	2.8	112.0	93.9	119.0	3.0			
92	28/04/04	M48001	11.3	0.354	0.381	1.6	231.7	1.6	122.8	103.3	128.2	2.6			
93	05/05/04	M48001	17.3	0.333	0.360	0.2	250.6	0.2	133.0	112.5	140.2	0.2			
94	12/05/04	M56001	4.4	0.350	0.376	1.6	222.6	1.6	118.0	99.0	124.4	2.0			
95	19/05/04	M56001	12.4	0.353	0.380	-0.2	237.6	-0.2	126.0	106.2	132.4	-0.2			
96	26/05/04	COCEC0804	11.4	0.359	0.386	-1.3	226.7	-1.3	120.2	100.9	126.0	-1.6			
97	02/06/04	COCEC0804	11.4	0.361	0.388	-1.2	220.3	-1.2	116.8	97.8	122.4	-1.5			

Valores Promedios por Tipo de Carbón (@ 135MW)

N°	Fecha	Carbón	AL %	MoFg (ECO) mol/kgc	MoFg (ECO) mol/kgc	HDAEn J/kg	HWTFGLvCr J/kg	HATEn J/kg	HDFTFGlvCr J/kg	HRaTFGLvCr J/kg	HFaTFGLvCr J/kg	HCoal J/kg
1	2	IDADS	8.3	0.285	0.316	-1.4	213.0	-1.4	112.9	94.4	119.2	-2.0
3	7	VEPOS	10.0	0.416	0.442	1.3	227.9	1.3	120.8	101.5	125.9	1.6
4	5	COCEC	11.7	0.337	0.365	3.8	228.1	3.8	120.9	101.8	127.8	4.9
5	17	COCEC	10.9	0.385	0.393	1.8	230.4	1.8	122.2	102.7	128.1	2.3
6	28	COLLS	5.0	0.401	0.429	0.3	213.0	0.3	112.9	94.4	118.1	0.4
7	6	COLLS	15.5	0.399	0.428	2.1	238.4	2.1	126.4	106.6	132.2	2.7
8	6	AUCUS	11.3	0.380	0.406	4.3	241.3	4.4	127.9	108.0	134.7	5.3
9	6	M3100	10.7	0.402	0.430	0.0	225.4	0.0	119.5	100.3	124.7	0.0
10	2	M4800	14.3	0.343	0.370	0.9	241.3	0.9	127.9	107.9	134.7	1.1
11	2	M5600	8.4	0.352	0.378	0.7	230.1	0.7	122.0	102.6	128.4	0.9

N°	Fecha	Carbón	Composición Volumétrica Base Húmeda (ECO)					Composición Volumétrica Base Húmeda (AH)				
			VpO2 (ECO)	VpCO2 (ECO)	VpSO2 (ECO)	VpH2O (ECO)	VpN2 (ECO)	VpO2 (AH)	VpCO2 (AH)	VpSO2 (AH)	VpH2O (AH)	VpN2 (AH)
			%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1	03/10/00	IDADS100	3.48	14.39	0.01	9.65	72.50	4.65	13.41	0.01	8.99	72.94
2	14/07/02	IDADS202	3.51	14.46	0.01	9.68	72.35	5.11	13.13	0.01	8.70	72.96
4	18/07/02	M31001	3.30	14.05	0.07	7.29	75.30	5.13	12.59	0.06	6.53	75.68
5	31/07/02	M31002	4.54	13.17	0.08	6.32	75.91	6.88	11.29	0.05	5.42	76.38
6	07/08/02	M31002	4.35	13.31	0.08	6.44	75.84	5.08	12.73	0.06	6.16	75.98
7	14/08/02	COCEC0402	3.97	13.61	0.05	7.00	75.37	5.69	12.23	0.04	6.29	75.74
8	21/08/02	COCEC0402	2.94	14.42	0.05	7.51	75.08	4.41	13.24	0.05	6.90	75.40
8	28/08/02	COCEC0402	4.05	13.55	0.05	6.99	75.98	5.27	12.57	0.04	6.49	75.63
10	04/09/02	COCEC0402	4.58	13.11	0.05	6.80	75.47	6.33	11.71	0.04	6.07	75.85
11	11/09/02	COCEC0502	4.94	12.85	0.05	6.50	75.57	6.68	11.54	0.04	5.79	75.84
12	18/09/02	COCEC0502	3.89	13.81	0.05	6.90	75.35	5.32	12.65	0.05	6.32	75.66
13	25/09/02	VEPDS0402	6.00	12.09	0.06	5.40	76.48	6.54	10.03	0.05	4.49	76.80
14	02/10/02	VEPDS0402	4.20	13.55	0.06	5.88	76.20	5.93	12.18	0.06	5.37	76.49
15	09/10/02	M31003	3.01	14.33	0.07	7.03	75.55	3.53	13.62	0.07	6.83	75.65
16	16/10/02	M31003	5.28	12.51	0.06	6.14	76.00	6.44	11.59	0.05	5.68	76.23
17	23/10/02	M31003	4.51	13.11	0.08	6.59	75.74	7.50	10.72	0.05	5.39	76.34
18	31/10/02	COLLS0102	4.58	13.25	0.05	7.02	75.10	5.81	12.26	0.05	6.49	75.40
21	08/11/02	VEPDS0502	4.45	13.29	0.07	5.93	76.26	6.32	11.78	0.06	5.26	76.58
22	11/11/02	VEPDS0502	3.79	13.82	0.07	6.17	76.15	5.43	12.50	0.06	5.58	76.43
23	13/11/02	VEPDS0502	4.65	13.12	0.06	5.91	76.25	5.69	12.29	0.06	5.53	76.43
24	20/11/02	VEPDS0502	4.28	13.38	0.07	6.20	76.07	5.47	12.42	0.06	5.70	76.29
25	27/11/02	VEPDS0502	5.07	12.75	0.06	5.88	76.23	5.43	12.47	0.06	5.75	76.30
26	04/12/02	COLLS0102	4.48	13.41	0.05	6.73	75.35	5.79	12.34	0.05	6.19	75.65
27	11/12/02	COCEC0502	4.51	13.21	0.05	6.67	75.45	4.92	12.08	0.05	6.55	75.62
28	18/12/02	COCEC0502	5.38	12.53	0.04	6.67	75.37	5.52	12.42	0.04	6.81	75.40
31	08/01/03	COLLS0102	5.42	12.67	0.05	6.17	75.70	5.58	12.52	0.05	6.10	75.74
36	18/02/03	COLLS0202	4.94	13.11	0.05	6.49	75.52	5.74	12.37	0.05	6.12	75.71
38	06/03/03	COLLS0102	5.28	12.71	0.05	6.57	75.39	5.57	12.48	0.05	6.45	75.46
39	12/03/03	COLLS0102	5.28	12.72	0.05	6.54	75.41	5.57	12.48	0.05	6.42	75.48
40	19/03/03	COLLS0202	4.72	13.19	0.05	6.58	75.46	5.38	12.66	0.05	6.31	75.60
43	13/05/03	COLLS0202	3.48	14.19	0.05	7.15	75.13	4.85	13.08	0.05	6.59	75.43
44	21/05/03	COLLS0202	4.44	13.41	0.05	6.75	75.35	5.90	12.22	0.05	6.15	75.67
45	28/05/03	COLLS0202	5.59	12.48	0.05	6.28	75.61	5.97	12.17	0.05	6.12	75.69
46	04/06/03	COLLS0303	5.85	12.34	0.04	6.08	75.69	5.91	12.28	0.04	6.06	75.71
47	11/06/03	COLLS0303	4.49	13.44	0.04	6.61	75.41	5.71	12.44	0.04	6.12	75.68
48	18/06/03	COLLS0303	5.76	12.40	0.04	6.15	75.69	5.01	13.01	0.04	6.48	75.48
49	25/06/03	COLLS0303	5.84	12.30	0.05	6.28	75.52	6.27	11.96	0.05	6.11	75.62
50	02/07/03	COLLS0202	5.58	12.47	0.05	6.40	75.51	7.62	10.81	0.04	5.55	75.98
51	09/07/03	COLLS0202	4.68	13.16	0.05	6.82	75.27	6.58	11.64	0.04	6.02	75.71
52	16/07/03	COLLS0303	5.22	12.82	0.04	6.47	75.45	5.97	12.21	0.04	6.17	75.82
53	23/07/03	COLLS0303	5.39	12.68	0.04	6.40	75.49	5.81	12.34	0.04	6.23	75.58
54	30/07/03	COLLS0403	5.71	12.40	0.06	6.37	75.46	5.98	12.18	0.08	6.26	75.52
55	06/08/03	COLLS0403	6.43	11.82	0.06	6.03	75.66	7.00	11.38	0.06	5.79	75.80
56	13/08/03	COLLS0403	4.68	13.29	0.06	6.53	75.44	5.74	12.42	0.06	6.11	75.67
57	20/08/03	COLLS0403	4.32	13.55	0.07	6.84	75.22	5.85	12.30	0.06	6.21	75.58
58	27/08/03	COLLS0403	7.01	11.37	0.09	5.70	75.87	6.87	11.48	0.08	5.76	75.84
59	03/09/03	COLLS0403	5.91	12.25	0.06	6.21	75.57	7.78	10.72	0.05	5.44	76.00
60	10/09/03	COLLS0403	5.85	12.29	0.06	6.28	75.52	5.84	12.30	0.06	6.28	75.52
61	17/09/03	COLLS0503	6.50	11.77	0.05	6.02	75.67	6.59	11.69	0.05	5.98	75.69
62	24/09/03	COLLS0503	5.84	12.30	0.05	6.28	75.52	6.27	11.96	0.05	6.11	75.62
63	01/10/03	COLLS0403	5.48	12.60	0.06	6.48	75.39	5.79	12.33	0.06	6.36	75.46
64	08/10/03	AUCUS0103	5.74	12.23	0.04	5.97	76.03	6.32	11.76	0.04	5.74	76.14
65	16/10/03	COLLS0103	4.33	13.41	0.05	6.67	75.53	6.98	11.29	0.04	5.61	76.09
66	22/10/03	COLLS0103	4.29	13.52	0.05	6.42	75.73	6.06	12.08	0.05	5.73	76.08
67	29/10/03	COLLS0103	3.85	13.89	0.05	6.57	75.65	6.98	11.35	0.04	5.37	76.27
68	05/11/03	COLLS0103	4.08	13.72	0.05	6.40	75.75	7.53	10.91	0.04	5.09	76.43
69	12/11/03	COLLS0103	5.88	12.21	0.05	5.93	75.95	6.32	11.84	0.05	5.75	76.05
70	19/11/03	COLLS0103	4.48	13.36	0.05	6.37	75.74	6.54	11.69	0.04	5.57	76.16
71	26/11/03	AUCUS0103	3.60	13.98	0.05	6.64	75.75	6.70	11.46	0.04	5.46	76.34
72	05/12/03	AUCUS0103	3.13	14.29	0.05	7.01	75.52	5.42	12.45	0.04	6.11	75.98
73	10/12/03	AUCUS0103	5.85	12.19	0.04	5.64	76.28	6.20	11.90	0.04	5.51	76.35
74	17/12/03	AUCUS0103	4.23	13.45	0.05	6.39	75.68	6.34	11.76	0.04	5.98	76.28
78	14/01/04	AUCUS0103	3.58	13.98	0.05	6.73	75.68	5.51	12.41	0.04	5.98	76.05
79	21/01/04	COCEC0603	3.78	13.90	0.05	7.02	75.25	6.17	11.96	0.05	6.04	75.78
80	28/01/04	COCEC0603	4.81	13.05	0.05	6.65	75.43	6.40	11.77	0.05	6.00	75.78
81	04/02/04	COCEC0603	4.18	13.57	0.05	6.88	75.32	5.87	12.20	0.05	6.19	75.70
82	11/02/04	COCEC0603	3.19	14.39	0.08	7.29	75.08	5.94	12.16	0.05	6.19	75.70
83	18/02/04	COCEC0603	4.38	13.42	0.05	6.78	75.35	6.27	11.89	0.05	6.02	75.78
84	26/02/04	COCEC0704	4.30	13.38	0.05	7.10	75.18	5.80	12.16	0.05	6.46	75.53
85	03/03/04	COCEC0603	3.81	13.86	0.05	7.02	75.25	6.40	11.77	0.05	5.98	75.83
86	10/03/04	COCEC0603	3.73	13.93	0.05	7.06	75.23	6.03	12.07	0.05	6.11	75.74
87	18/03/04	COCEC0704	3.85	13.73	0.05	7.26	75.11	6.00	12.00	0.05	6.34	75.61
88	31/03/04	COCEC0704	3.15	14.28	0.05	7.81	74.91	6.15	11.87	0.04	6.32	75.61
90	07/04/04	COCEC0704	3.18	14.28	0.05	7.60	74.91	5.16	12.66	0.05	6.75	75.38
91	23/04/04	COCEC0704	1.36	15.71	0.06	8.43	74.45	1.95	15.24	0.08	8.17	74.58
92	28/04/04	M48001	3.96	13.73	0.05	6.85	75.31	5.73	12.30	0.04	6.23	75.70
93	05/05/04	M48001	2.92	14.51	0.05	7.72	74.81	5.65	12.32	0.04	6.55	75.45
94	12/05/04	M58001	3.10	14.51	0.04	6.98	75.36	3.88	13.89	0.04	6.68	75.52
95	19/05/04	M58001	3.27	14.38	0.04	6.94	75.37	5.27	12.75	0.04	6.15	75.79
96	26/05/04	COCEC0804	3.35	14.26	0.05	7.00	75.35	5.21	12.75	0.04	6.28	75.74
97	02/06/04	COCEC0804	3.38	14.27	0.05	6.94	75.38	5.22	12.76	0.04	6.21	75.77

Valores Promedios por Tipo de Carbón (@ 135MW)

N°	Fecha	Carbón	VpO2 (ECO)	VpCO2 (ECO)	VpSO2 (ECO)	VpH2O (ECO)	VpN2 (ECO)	VpO2 (AH)	VpCO2 (AH)	VpSO2 (AH)	VpH2O (AH)	VpN2 (AH)
1	03/10/00	IDADS	3.48	14.42	0.01	9.68	72.42	4.88	13.27	0.01	8.89	72.95
3	14/07/02	VEPDS	4.93	13.14	0.06	6.03	76.23	6.11	11.95	0.06	5.39	76.49
4	18/07/02	COCEC	3.17	14.27	0.05	7.60	74.91	5.01	12.79	0.05	6.81	75.34
5	31/07/02	COCEC	4.06	13.64	0.05	6.82	75.33	5.74	12.27	0.04	6.23	75.70
6	07/08/02	COLLS	5.30	12.74	0.05	6.44	75.48	6.02	12.15	0.05	6.14	75.64
7	14/08/02	COLLS	4.48	13.35	0.05	6.39	75.73	6.73	11.53	0.04	5.52	76.16
8	21/08/02	AUCUS	4.35	13.35	0.05	6.40	75.86	6.08	11.96	0.04	5.73	76.19
9	28/08/02	M3100	4.17	13.41	0.06	6.63	75.72	5.78	12.14	0.06	6.00	76.04
10	04/09/02	M4800	3.44	14.12	0.05	7.33	75.06	5.69	12.31	0.04	6.39	75.57
11	11/09/02	M5800	3.19	14.45	0.04	6.96	75.38	4.57	13.32	0.04	6.42	

A.5 Resultados

N°	Fecha	Carbón	Párrafos										Totales
			Gases de Escape	Humedad de Combustión de H ₂	Humedad del Carbón	Humedad en el Aire	Carbono Inquemado	Monóxido de Carbono en los Gases	Calor Sensible de las Cenizas	Formación de NOx	Radiación y Convección Superficial		
			QpLDFg %	QpLH2F %	QpLWF %	QpLWA %	QpLUbc %	QpLCO %	QpLRs %	QpLNOx %	QrLsrc %	QpL %	
1	03/10/00	IDADS0100	4.47	0.30	0.22	0.07	0.04	0.00	0.00	0.000000	0.23	5.34	
2	01/07/02	IDADS0202	4.43	0.31	0.21	0.07	0.04	0.03	0.00	0.000000	0.23	5.33	
4	18/07/02	M31001	5.04	0.35	0.08	0.08	1.39	0.00	0.01	0.000000	0.23	7.19	
5	31/07/02	M31002	5.73	0.37	0.06	0.10	1.42	0.00	0.02	0.000000	0.23	7.93	
6	07/08/02	M31002	5.12	0.33	0.08	0.09	1.47	0.08	0.02	0.000000	0.23	7.38	
7	14/08/02	COCEC0402	4.72	0.33	0.06	0.08	1.12	0.05	0.02	0.000000	0.23	6.81	
8	21/08/02	COCEC0402	4.40	0.33	0.06	0.07	1.14	0.00	0.03	0.000000	0.23	6.28	
9	28/08/02	COCEC0402	4.56	0.32	0.06	0.08	0.78	0.00	0.02	0.000000	0.23	6.05	
10	04/09/02	COCEC0402	5.00	0.34	0.06	0.09	1.27	0.08	0.02	0.000000	0.23	7.07	
11	11/09/02	COCEC0502	5.10	0.33	0.06	0.09	1.35	0.01	0.03	0.000000	0.23	7.19	
12	18/09/02	COCEC0502	5.10	0.38	0.06	0.09	1.50	0.00	0.04	0.000073	0.23	7.39	
13	25/09/02	VEPOS0402	6.04	0.35	0.03	0.10	1.48	0.01	0.02	0.000105	0.23	8.24	
14	02/10/02	VEPOS0402	4.97	0.32	0.03	0.09	1.34	0.00	0.02	0.000000	0.23	6.99	
15	09/10/02	M31003	4.53	0.32	0.08	0.08	1.63	0.05	0.02	0.000062	0.23	6.90	
16	16/10/02	M31003	5.58	0.35	0.08	0.11	2.07	0.10	0.02	0.000085	0.23	8.51	
17	23/10/02	M31003	5.81	0.39	0.08	0.11	2.05	0.11	0.02	0.000061	0.23	8.10	
18	31/10/02	COLLS0102	4.99	0.33	0.09	0.09	0.22	0.00	0.02	0.000087	0.23	5.97	
21	06/11/02	VEPOS0502	5.13	0.33	0.02	0.10	1.86	0.01	0.02	0.000079	0.23	7.71	
22	11/11/02	VEPOS0502	4.64	0.31	0.02	0.08	1.66	0.01	0.02	0.000091	0.23	7.18	
23	13/11/02	VEPOS0502	4.79	0.31	0.03	0.08	1.83	0.00	0.02	0.000085	0.23	7.29	
24	20/11/02	VEPOS0502	5.10	0.34	0.04	0.10	2.73	0.00	0.03	0.000076	0.23	8.57	
25	27/11/02	VEPOS0502	4.98	0.31	0.03	0.10	2.27	0.02	0.02	0.000088	0.23	7.98	
26	04/12/02	COLLS0102	5.12	0.34	0.07	0.10	0.29	0.20	0.02	0.000053	0.23	6.37	
27	11/12/02	COCEC0502	4.79	0.32	0.06	0.09	1.17	0.00	0.03	0.000071	0.23	6.69	
28	18/12/02	COCEC0502	4.83	0.31	0.08	0.11	1.23	0.12	0.02	0.000100	0.23	6.93	
31	08/01/03	COLLS0102	5.12	0.32	0.05	0.10	0.34	0.40	0.02	0.000069	0.23	6.58	
36	19/02/03	COLLS0202	5.17	0.33	0.07	0.12	0.35	0.00	0.02	0.000009	0.23	6.29	
38	06/03/03	COLLS0102	5.01	0.32	0.07	0.10	0.32	0.13	0.02	0.000063	0.23	6.20	
39	12/03/03	COLLS0102	5.02	0.32	0.07	0.10	0.32	0.02	0.02	0.000073	0.23	6.16	
40	19/03/03	COLLS0202	4.85	0.31	0.06	0.09	0.48	0.04	0.02	0.000074	0.23	6.08	
43	13/05/03	COLLS0202	4.82	0.33	0.07	0.08	0.25	0.00	0.02	0.000060	0.23	5.80	
44	21/05/03	COLLS0202	5.25	0.34	0.08	0.10	0.35	0.02	0.02	0.000068	0.23	6.40	
45	28/05/03	COLLS0202	5.22	0.32	0.07	0.09	0.50	0.07	0.02	0.000072	0.23	6.51	
46	04/06/03	COLLS0303	5.12	0.30	0.07	0.09	0.13	0.03	0.01	0.000069	0.23	5.97	
47	11/06/03	COLLS0303	5.10	0.33	0.07	0.08	0.80	0.06	0.02	0.000050	0.23	6.48	
48	18/06/03	COLLS0303	4.89	0.29	0.07	0.07	0.37	0.09	0.02	0.000055	0.23	6.03	
49	25/06/03	COLLS0303	5.17	0.31	0.08	0.10	0.19	0.09	0.01	0.000085	0.23	6.18	
50	02/07/03	COLLS0202	5.71	0.35	0.09	0.12	0.29	0.12	0.02	0.000080	0.23	6.93	
51	09/07/03	COLLS0202	5.31	0.34	0.09	0.11	0.62	0.03	0.03	0.000075	0.23	6.75	
52	16/07/03	COLLS0303	4.97	0.30	0.08	0.10	0.31	0.05	0.02	0.000060	0.23	6.05	
53	23/07/03	COLLS0303	5.02	0.30	0.08	0.10	0.32	0.05	0.02	0.000059	0.23	6.12	
54	30/07/03	COLLS0403	4.80	0.30	0.07	0.10	0.38	0.08	0.02	0.000065	0.23	6.07	
55	06/08/03	COLLS0403	5.21	0.30	0.07	0.10	0.43	0.11	0.02	0.000059	0.23	6.47	
56	13/08/03	COLLS0403	4.78	0.31	0.06	0.10	0.44	0.04	0.02	0.000062	0.23	5.87	
57	20/08/03	COLLS0403	4.74	0.31	0.07	0.09	0.44	0.04	0.02	0.000049	0.23	5.95	
58	27/08/03	COLLS0403	5.19	0.29	0.06	0.10	0.35	0.03	0.02	0.000072	0.23	6.28	
59	03/09/03	COLLS0403	5.58	0.33	0.08	0.12	0.56	0.05	0.03	0.000064	0.23	6.99	
60	10/09/03	COLLS0403	4.73	0.28	0.07	0.09	0.36	0.05	0.02	0.000056	0.23	5.83	
61	17/09/03	COLLS0503	5.11	0.30	0.07	0.10	0.30	0.00	0.02	0.000084	0.23	6.12	
62	24/09/03	COLLS0503	4.98	0.30	0.07	0.11	0.33	0.04	0.02	0.000075	0.23	6.08	
63	01/10/03	COLLS0403	4.84	0.30	0.08	0.11	0.28	0.01	0.02	0.000066	0.23	5.88	
64	08/10/03	AUCUS0103	5.33	0.32	0.06	0.13	1.17	0.03	0.04	0.000080	0.23	7.30	
65	16/10/03	COLLS0103	5.29	0.36	0.06	0.13	2.41	0.05	0.03	0.000064	0.23	8.57	
66	22/10/03	COLLS0103	5.02	0.34	0.05	0.12	1.40	0.02	0.02	0.000063	0.23	7.21	
67	29/10/03	COLLS0103	5.37	0.37	0.05	0.13	1.11	0.00	0.03	0.000077	0.23	7.29	
68	05/11/03	COLLS0103	5.41	0.36	0.04	0.15	0.89	0.02	0.02	0.000082	0.23	7.12	
69	12/11/03	COLLS0103	5.26	0.32	0.05	0.12	2.00	0.11	0.02	0.000074	0.23	8.12	
70	19/11/03	COLLS0103	5.07	0.33	0.05	0.12	1.16	0.04	0.02	0.000066	0.23	7.05	
71	26/11/03	AUCUS0103	5.58	0.39	0.05	0.16	1.80	0.05	0.06	0.000065	0.23	8.44	
72	03/12/03	AUCUS0103	5.19	0.37	0.06	0.14	2.68	0.03	0.06	0.000060	0.23	8.78	
73	10/12/03	AUCUS0103	5.63	0.34	0.04	0.14	1.10	0.09	0.05	0.000065	0.23	7.62	
74	17/12/03	AUCUS0103	5.64	0.37	0.05	0.16	1.68	0.04	0.06	0.000068	0.23	8.24	
78	14/01/04	AUCUS0103	5.18	0.36	0.06	0.15	1.73	0.22	0.05	0.000066	0.23	7.97	
79	21/01/04	COCEC0903	5.07	0.35	0.07	0.14	1.41	0.01	0.02	0.000071	0.23	7.29	
80	28/01/04	COCEC0903	4.94	0.32	0.07	0.14	1.23	0.01	0.02	0.000072	0.23	6.95	
81	04/02/04	COCEC0903	4.87	0.33	0.07	0.15	1.59	0.00	0.02	0.000074	0.23	7.28	
82	11/02/04	COCEC0903	5.14	0.36	0.08	0.15	0.90	0.00	0.02	0.000079	0.23	6.90	
83	18/02/04	COCEC0903	5.22	0.34	0.08	0.15	0.93	0.00	0.02	0.000072	0.23	6.98	
84	26/02/04	COCEC0704	5.02	0.34	0.09	0.14	1.19	0.02	0.03	0.000075	0.23	7.05	
85	03/03/04	COCEC0603	4.86	0.34	0.07	0.13	2.02	0.01	0.02	0.000069	0.23	7.87	
86	10/03/04	COCEC0603	4.85	0.34	0.07	0.16	1.75	0.00	0.03	0.000075	0.23	7.43	
87	18/03/04	COCEC0704	4.81	0.33	0.08	0.16	1.37	0.04	0.03	0.000057	0.23	7.04	
89	31/03/04	COCEC0704	4.85	0.35	0.09	0.14	1.45	0.07	0.02	0.000069	0.23	7.20	
90	07/04/04	COCEC0704	4.73	0.34	0.09	0.13	1.51	0.02	0.03	0.000064	0.23	7.07	
91	23/04/04	COCEC0704	3.76	0.30	0.08	0.09	1.32	0.03	0.03	0.000044	0.23	6.53	
92	28/04/04	M48001	4.99	0.34	0.08	0.12	1.71	0.04	0.04	0.000060	0.23	7.55	
93	05/05/04	M48001	5.26	0.38	0.11	0.13	1.34	0.02	0.05	0.000075	0.23	7.89	
94	12/05/04	M58001	4.60	0.31	0.07	0.11	1.84	0.07	0.03	0.000064	0.23	7.36	
95	19/05/04	M58001	5.06	0.34	0.08	0.11	1.89	0.04	0.04	0.000064	0.23	7.80	
96	26/05/04	COCEC0804	4.74	0.32	0.07	0.09	1.86	0.03	0.03	0.000072	0.23	7.48	
97	02/06/04	COCEC0804	4.55	0.31	0.07	0.11	1.45	0.03	0.02	0.000070	0.23	6.75	

Valores Promedios por Tipo de Carbón (@ 135MW)

N°	Fecha	Carbón	Gases de Escape	Humedad de Combustión de H ₂	Humedad del Carbón	Humedad en el Aire	Carbono Inquemado	Monóxido de Carbono en los Gases	Calor Sensible de las Cenizas	Formación de NOx	Radiación y Convección Superficial	Totales
1		IDADS	4.45	0.30	0.22	0.07	0.04	0.02	0.00	0.00	0.23	5.34
3		VEPOS	5.09	0.33	0.03	0.09	1.91	0.01	0.02	0.00	0.23	7.71
4		COCED	4.63	0.33	0.08	0.13	1.37	0.04	0.03	0.00	0.23	6.84
5		COCEC	4.87	0.33	0.07	0.11	1.34	0.02	0.02	0.00	0.23	6.99
6		COLLS	5.07	0.31	0.07	0.10	0.36	0.07	0.02	0.00	0.23	6.23
7		COLJS	5.24	0.35	0.05	0.13	1.50	0.04	0.02	0.00	0.23	7.56
8		AUCUS	5.43	0.35	0.06	0.09	1.71	0.08	0.05	0.00	0.23	8.06
9		M3100	5.33	0.35	0.06	0.09	1.67	0.06	0.02	0.00	0.23	7.81
10		M4800	5.13	0.36	0.09	0.12	1.71	0.04	0.04	0.00	0.23	7.72
11		M5800	4.83	0.33	0.07	0.11	1.82	0.05	0.04	0.00	0.23	7.58

N°	Fecha	Carbón	Carbón										Totales
			Aire Seco	Humedad del Aire	Calor Sensible del Carbón	Humedad Adicional	Crédito por VAP	Crédito por Pulv A	Crédito por Pulv B	Crédito por Pulv C	Crédito por VRG		
			QpBDA %	QpBWA %	QpBF %	QpBWA _d %	QpBAP %	QpBA %	QpBB %	QpBC %	QpBRG %	QpB %	
1	03/10/02	IDADS0100	-0.0423	-0.0007	-0.0067	0.0000	0.0018	0.0008	0.0000	0.0008	0.0009	-0.0054	
2	01/07/02	IDADS0202	-0.0736	-0.0013	-0.0115	0.0000	0.0018	0.0009	0.0000	0.0009	0.0008	-0.0819	
4	18/07/02	M31001	-0.0349	-0.0006	-0.0039	0.0000	0.0018	0.0009	0.0000	0.0009	0.0008	-0.0354	
5	31/07/02	M31002	-0.0452	-0.0006	-0.0042	-0.0001	0.0017	0.0008	0.0000	0.0008	0.0009	-0.0461	
6	07/08/02	M31002	-0.0576	-0.0010	-0.0062	0.0000	0.0015	0.0008	0.0000	0.0008	0.0005	-0.0612	
7	14/08/02	COCEC0402	-0.0165	-0.0003	-0.0018	0.0000	0.0015	0.0008	0.0000	0.0008	0.0005	-0.0148	
8	21/08/02	COCEC0402	-0.0532	-0.0009	-0.0066	0.0000	0.0016	0.0008	0.0000	0.0008	0.0005	-0.0570	
9	28/08/02	COCEC0402	-0.0542	-0.0009	-0.0062	-0.0001	0.0016	0.0009	0.0000	0.0008	0.0006	-0.0574	
10	04/09/02	COCEC0402	-0.0257	-0.0004	-0.0027	0.0000	0.0016	0.0000	0.0009	0.0009	0.0008	-0.0249	
11	11/09/02	COCEC0502	-0.0482	-0.0009	-0.0050	0.0000	0.0016	0.0009	0.0008	0.0000	0.0006	-0.0503	
12	18/09/02	COCEC0502	0.0438	0.0008	0.0051	0.0001	0.0017	0.0010	0.0000	0.0009	0.0009	0.0542	
13	25/09/02	VEPDS0402	0.0314	0.0005	0.0026	0.0000	0.0015	0.0000	0.0000	0.0008	0.0005	0.0382	
14	02/10/02	VEPDS0402	0.0395	0.0007	0.0039	0.0000	0.0015	0.0008	0.0000	0.0008	0.0006	0.0477	
15	09/10/02	M31003	0.0195	0.0003	0.0023	0.0000	0.0016	0.0009	0.0000	0.0008	0.0008	0.0265	
16	16/10/02	M31003	0.0427	0.0010	0.0051	0.0000	0.0016	0.0009	0.0000	0.0009	0.0005	0.0599	
17	23/10/02	M31002	0.0866	0.0016	0.0071	0.0000	0.0016	0.0000	0.0000	0.0008	0.0008	0.0931	
18	31/10/02	COLLS0102	0.0454	0.0009	0.0050	0.0000	0.0018	0.0008	0.0000	0.0008	0.0006	0.0553	
21	06/11/02	VEPDS0502	0.0704	0.0014	0.0066	0.0002	0.0015	0.0009	0.0000	0.0008	0.0009	0.0826	
22	11/11/02	VEPDS0502	0.0621	0.0011	0.0062	0.0001	0.0015	0.0009	0.0000	0.0008	0.0007	0.0732	
23	13/11/02	VEPDS0502	0.0254	0.0005	0.0025	0.0000	0.0015	0.0009	0.0008	0.0000	0.0006	0.0321	
24	20/11/02	VEPDS0502	0.0800	0.0016	0.0078	0.0002	0.0016	0.0010	0.0000	0.0009	0.0010	0.0942	
25	27/11/02	VEPDS0502	0.0877	0.0018	0.0085	0.0001	0.0016	0.0000	0.0008	0.0009	0.0006	0.1020	
28	04/12/02	COLLS0102	0.0912	0.0019	0.0099	0.0000	0.0017	0.0010	0.0000	0.0010	0.0007	0.1072	
27	11/12/02	COCEC0502	0.0888	0.0017	0.0100	0.0002	0.0016	0.0008	0.0000	0.0008	0.0007	0.1044	
28	18/12/02	COCEC0502	0.1809	0.0042	0.0201	0.0003	0.0015	0.0000	0.0000	0.0008	0.0009	0.2092	
31	06/01/03	COLLS0102	0.2021	0.0042	0.0219	0.0000	0.0016	0.0000	0.0000	0.0008	0.0009	0.2323	
35	19/01/03	COLLS0202	0.2463	0.0057	0.0269	0.0003	0.0016	0.0009	0.0000	0.0008	0.0009	0.2828	
38	06/02/03	COLLS0102	0.1502	0.0032	0.0165	0.0001	0.0016	0.0000	0.0000	0.0008	0.0008	0.1741	
39	12/03/03	COLLS0102	0.1440	0.0030	0.0161	0.0001	0.0016	0.0000	0.0000	0.0008	0.0008	0.1673	
40	19/03/03	COLLS0202	0.1925	0.0036	0.0216	0.0002	0.0016	0.0009	0.0000	0.0008	0.0009	0.2221	
43	13/05/03	COLLS0202	0.0527	0.0009	0.0061	0.0000	0.0016	0.0009	0.0000	0.0008	0.0008	0.0639	
44	21/05/03	COLLS0202	0.0927	0.0018	0.0098	0.0000	0.0017	0.0000	0.0000	0.0008	0.0008	0.1056	
45	28/05/03	COLLS0202	0.0130	0.0002	0.0014	0.0000	0.0016	0.0009	0.0008	0.0000	0.0008	0.0188	
46	04/06/03	COLLS0303	0.0335	0.0006	0.0038	0.0000	0.0016	0.0009	0.0008	0.0000	0.0006	0.0419	
47	11/06/03	COLLS0303	0.0089	0.0001	0.0010	0.0000	0.0017	0.0010	0.0000	0.0008	0.0010	0.0145	
48	18/06/03	COLLS0303	0.0036	0.0001	0.0005	0.0000	0.0017	0.0009	0.0000	0.0008	0.0009	0.0085	
49	25/06/03	COLLS0303	-0.0343	-0.0007	-0.0035	-0.0001	0.0016	0.0009	0.0000	0.0008	0.0008	-0.0343	
50	02/07/03	COLLS0202	0.0008	0.0000	0.0002	0.0000	0.0017	0.0010	0.0000	0.0008	0.0008	0.0054	
51	09/07/03	COLLS0202	-0.0316	-0.0007	-0.0030	0.0000	0.0017	0.0000	0.0009	0.0008	0.0008	-0.0310	
52	16/07/03	COLLS0303	-0.1272	-0.0025	-0.0132	-0.0001	0.0017	0.0010	0.0000	0.0008	0.0009	-0.1388	
53	23/07/03	COLLS0303	-0.0847	-0.0014	-0.0068	-0.0001	0.0016	0.0000	0.0000	0.0008	0.0008	-0.0868	
54	30/07/03	COLLS0403	-0.1357	-0.0027	-0.0144	-0.0002	0.0017	0.0010	0.0000	0.0008	0.0009	-0.1487	
55	06/08/03	COLLS0403	-0.0899	-0.0017	-0.0089	-0.0001	0.0017	0.0009	0.0000	0.0008	0.0009	-0.0953	
56	13/08/03	COLLS0403	-0.0445	-0.0009	-0.0048	0.0000	0.0016	0.0000	0.0000	0.0008	0.0010	-0.0459	
57	20/08/03	COLLS0403	-0.0670	-0.0013	-0.0072	-0.0001	0.0016	0.0010	0.0000	0.0008	0.0010	-0.0712	
58	27/08/03	COLLS0403	-0.0640	-0.0013	-0.0064	-0.0001	0.0017	0.0010	0.0000	0.0008	0.0009	-0.0674	
59	03/09/03	COLLS0403	-0.0814	-0.0019	-0.0076	-0.0001	0.0017	0.0009	0.0000	0.0008	0.0009	-0.0867	
60	10/09/03	COLLS0403	-0.1223	-0.0023	-0.0132	-0.0002	0.0016	0.0010	0.0000	0.0008	0.0008	-0.1337	
61	17/09/03	COLLS0503	-0.1322	-0.0026	-0.0138	-0.0001	0.0017	0.0010	0.0000	0.0009	0.0009	-0.1441	
62	24/09/03	COLLS0503	-0.0336	-0.0007	-0.0034	0.0000	0.0016	0.0009	0.0008	0.0000	0.0009	-0.0335	
63	01/10/03	COLLS0403	0.0256	0.0006	0.0029	0.0001	0.0016	0.0010	0.0000	0.0008	0.0010	0.0338	
64	08/10/03	AUCUS0103	0.0607	0.0015	0.0060	0.0000	0.0017	0.0011	0.0000	0.0009	0.0009	0.0727	
65	16/10/03	COLLS0103	0.0803	0.0020	0.0076	0.0001	0.0016	0.0010	0.0000	0.0009	0.0011	0.0946	
66	22/10/03	COLLS0103	0.0574	0.0014	0.0057	0.0001	0.0016	0.0009	0.0000	0.0008	0.0009	0.0687	
67	29/10/03	COLLS0103	0.1235	0.0031	0.0114	0.0002	0.0016	0.0010	0.0000	0.0009	0.0009	0.1426	
68	05/11/03	COLLS0103	0.1274	0.0036	0.0114	0.0001	0.0015	0.0000	0.0000	0.0008	0.0008	0.1464	
69	12/11/03	COLLS0103	0.1139	0.0027	0.0111	0.0004	0.0015	0.0010	0.0000	0.0009	0.0007	0.1323	
70	19/11/03	COLLS0103	0.0856	0.0021	0.0082	0.0002	0.0015	0.0010	0.0000	0.0009	0.0010	0.1004	
71	26/11/03	AUCUS0103	0.2040	0.0061	0.0191	0.0002	0.0016	0.0000	0.0000	0.0009	0.0008	0.2337	
72	05/12/03	AUCUS0103	0.1849	0.0052	0.0190	0.0003	0.0017	0.0011	0.0000	0.0009	0.0011	0.2140	
73	10/12/03	AUCUS0103	0.2603	0.0065	0.0253	0.0005	0.0016	0.0010	0.0000	0.0009	0.0008	0.2968	
74	17/12/03	AUCUS0103	0.2394	0.0070	0.0230	0.0003	0.0016	0.0010	0.0000	0.0009	0.0009	0.2742	
78	14/01/04	AUCUS0103	0.2333	0.0069	0.0241	0.0002	0.0016	0.0000	0.0000	0.0009	0.0007	0.2686	
79	21/01/04	COCEC0603	0.2165	0.0062	0.0224	0.0000	0.0015	0.0000	0.0000	0.0008	0.0007	0.2490	
80	28/01/04	COCEC0603	0.1976	0.0058	0.0203	0.0001	0.0015	0.0009	0.0007	0.0008	0.0007	0.2276	
81	04/02/04	COCEC0603	0.2554	0.0079	0.0269	0.0002	0.0016	0.0007	0.0000	0.0009	0.0009	0.2945	
82	11/02/04	COCEC0603	0.1456	0.0043	0.0154	0.0001	0.0015	0.0000	0.0000	0.0008	0.0009	0.1695	
83	18/02/04	COCEC0603	0.2023	0.0061	0.0209	0.0003	0.0015	0.0007	0.0000	0.0008	0.0009	0.2335	
84	26/02/04	COCEC0704	0.2496	0.0072	0.0271	0.0000	0.0016	0.0000	0.0000	0.0008	0.0009	0.2879	
85	03/03/04	COCEC0603	0.1259	0.0035	0.0129	0.0000	0.0015	0.0007	0.0000	0.0007	0.0011	0.1463	
86	10/03/04	COCEC0603	0.1433	0.0047	0.0151	0.0001	0.0016	0.0007	0.0000	0.0008	0.0008	0.1671	
87	18/03/04	COCEC0704	0.1918	0.0064	0.0208	0.0000	0.0016	0.0007	0.0000	0.0007	0.0010	0.2230	
89	31/03/04	COCEC0704	0.1526	0.0044	0.0168	0.0001	0.0016	0.0007	0.0000	0.0008	0.0009	0.1777	
90	07/04/04	COCEC0704	0.1143	0.0031	0.0132	0.0000	0.0016	0.0007	0.0000	0.0007	0.0010	0.1347	
91	23/04/04	COCEC0704	0.0916	0.0024	0.0129	0.0000	0.0015	0.0007	0.0000	0.0008	0.0009	0.1198	
92	28/04/04	M48001	0.0705	0.0017	0.0076	0.0000	0.0016	0.0007	0.0000	0.0009	0.0008	0.0837	
93	05/05/04	M48001	0.0073	0.0002	0.0008	0.0000	0.0016	0.0000	0.0000	0.0008	0.0008	0.0123	
94	12/05/04	M58001	0.0619	0.0016	0.0071	0.0000	0.0016	0.0007	0.0000	0.0008	0.0008	0.0739	
95	19/05/04	M58001	-0.0090	-0.0002	-0.0008	0.0000	0.0016	0.0008	0.0000	0.0008	0.0008	-0.0051	
96	26/05/04	COCEC0904	-0.0547	-0.0011	-0.0057	-0.0001	0.0015	0.0007	0.0008	0.0000	0.0008	-0.0577	
97	02/06/04	COCEC0904	-0.0490	-0.0012	-0.0052	0.0000	0.0015	0.0007	0.0000	0.0008	0.0008	-0.0515	

Valores Promedios por Tipo de Carbón (@ 135MW)

N°	Fecha	Carbón	Aire Seco	Humedad del Aire	Calor Sensible del Carbón</
----	-------	--------	-----------	------------------	-----------------------------

N°	Fecha	Carbón	169		171	
			Caldera (ECO)		Combustión	
			n (ECO)	%	nc	%
dd/mm/aa	xx.yyy.z.z.z					
1	03/10/00	IDADS0100	94.66	92.66		
2	01/07/02	IDADS0202	94.66	99.03		
4	16/07/02	M31001	92.80	98.81		
5	31/07/02	M31002	92.06	98.58		
6	07/08/02	M31002	92.60	98.45		
7	14/08/02	COCEC0402	93.39	98.83		
8	21/08/02	COCEC0402	93.74	98.86		
9	28/08/02	COCEC0402	93.95	99.22		
10	04/09/02	COCEC0402	92.93	98.67		
11	11/09/02	COCEC0502	92.80	98.64		
12	18/09/02	COCEC0502	92.91	98.49		
13	25/09/02	VEPDS0402	91.77	98.53		
14	02/10/02	VEPDS0402	93.02	98.66		
15	09/10/02	M31003	93.10	98.32		
16	16/10/02	M31003	91.50	97.83		
17	23/10/02	M31003	91.10	97.82		
18	31/10/02	COLLS0102	94.04	99.78		
21	06/11/02	VEPDS0502	92.29	98.13		
22	11/11/02	VEPDS0502	92.83	98.13		
23	13/11/02	VEPDS0502	92.71	98.17		
24	20/11/02	VEPDS0502	91.43	97.27		
25	27/11/02	VEPDS0502	92.03	97.71		
26	04/12/02	COLLS0102	93.64	99.51		
27	11/12/02	COCEC0502	93.32	98.83		
28	18/12/02	COCEC0502	93.09	98.65		
31	08/01/03	COLLS0102	93.44	99.26		
36	19/02/03	COLLS0202	93.73	99.65		
38	06/03/03	COLLS0102	93.81	99.55		
39	12/03/03	COLLS0102	93.91	99.66		
40	19/03/03	COLLS0202	93.93	99.48		
43	13/05/03	COLLS0202	94.20	99.75		
44	21/05/03	COLLS0202	93.61	99.63		
45	28/05/03	COLLS0202	93.49	99.43		
46	04/06/03	COLLS0303	94.03	99.85		
47	11/06/03	COLLS0303	93.52	99.34		
48	18/06/03	COLLS0303	93.97	99.54		
49	25/06/03	COLLS0303	93.82	99.72		
50	02/07/03	COLLS0202	93.07	99.58		
51	09/07/03	COLLS0202	93.25	99.35		
52	16/07/03	COLLS0303	93.94	99.65		
53	23/07/03	COLLS0303	93.87	99.63		
54	30/07/03	COLLS0403	93.92	99.54		
55	06/08/03	COLLS0403	93.53	99.47		
56	13/08/03	COLLS0403	94.03	99.52		
57	20/08/03	COLLS0403	94.05	99.52		
58	27/08/03	COLLS0403	93.71	99.62		
59	03/09/03	COLLS0403	93.00	99.38		
60	10/09/03	COLLS0403	94.16	99.59		
61	17/09/03	COLLS0503	93.87	99.70		
62	24/09/03	COLLS0503	93.92	99.63		
63	01/10/03	COLLS0403	94.14	99.71		
64	08/10/03	AUCUS0103	92.70	98.80		
65	16/10/03	COLJS0103	91.44	97.54		
66	22/10/03	COLJS0103	92.80	98.58		
67	29/10/03	COLJS0103	92.72	98.89		
68	05/11/03	COLJS0103	92.89	99.10		
69	12/11/03	COLJS0103	91.89	97.89		
70	19/11/03	COLJS0103	92.96	98.77		
71	26/11/03	AUCUS0103	91.58	98.04		
72	03/12/03	AUCUS0103	91.24	97.28		
73	10/12/03	AUCUS0103	92.41	98.81		
74	17/12/03	AUCUS0103	91.78	98.28		
78	14/01/04	AUCUS0103	92.06	98.05		
79	21/01/04	COCEC0603	92.73	98.59		
80	28/01/04	COCEC0603	93.06	98.76		
81	04/02/04	COCEC0603	92.76	98.41		
82	11/02/04	COCEC0603	93.12	99.09		
83	18/02/04	COCEC0603	93.03	99.06		
84	28/02/04	COCED0704	92.97	98.79		
85	03/03/04	COCEC0603	92.34	97.97		
86	10/03/04	COCEC0603	92.59	98.25		
87	16/03/04	COCED0704	92.97	98.59		
89	31/03/04	COCED0704	92.81	98.48		
90	07/04/04	COCED0704	92.94	98.47		
91	23/04/04	COCED0704	94.18	98.66		
92	28/04/04	M48001	92.46	98.24		
93	05/05/04	M48001	92.11	98.25		
94	12/05/04	M58001	92.64	97.89		
95	19/05/04	M58001	92.20	98.06		
96	26/05/04	COCEC0804	92.52	98.01		
97	02/06/04	COCEC0804	93.24	98.52		

Valores Promedios por Tipo de Carbón (@ 135MW)

N°	Fecha	Carbón	Caldera (ECO)	Combustión
1	2	IDADS	94.66	99.84
3	7	VEPDS	92.30	98.06
4	5	COCED	93.17	98.60
5	17	COCEC	93.01	98.64
6	28	COLLS	93.77	99.57
7	6	COLJS	92.45	98.46
8	6	AUCUS	91.96	98.21
9	6	M3100	92.19	98.27
10	2	M4800	92.29	98.25
11	2	M5800	92.42	98.03

A.6 Ejemplo de Cálculo

A modo de ejercicio se establece la secuencia de pasos para la determinación de las pérdidas energéticas de la Caldera para el día 15 de setiembre de 2004, cuando se generaba 136 MW quemando carbón COCEC1004 en los niveles A y C de quemadores

A.6.1 Composición del Carbón

Del análisis inmediato entregado por SGS durante la descarga de este carbón, se resume la composición en:

Carbono	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre
MpCF	MpH2F	MpO2F	MpN2F	MpSF
%	%	%	%	%
65.72	4.44	9.25	1.36	0.63

El análisis último realizado por Laboratorio ILO21 el 17 de septiembre de 2004 arroja los siguientes resultados:

Poder Calorífico Bruto	Humedad Total	Cenizas	Materia Volátil	Carbón Fijo
HHVF	MpWF	MpAsF	MpVm	MpFc
kJ/kg	%	%	%	%
28075	9.79	6.92	32.98	50.30

A.6.2 Propiedades de los Residuos

A.6.2.1 Fracción Másica del Residuo – MFrRs

El contenido de Carbono Inquemado en la Ceniza, medido por Laboratorio durante el muestreo es de $MpCRs=12.34\%$, por lo que:

$$MFrRs = \frac{MpAsF}{100 - MpCRs} = \frac{6.92}{100 - 12.34} = 0.079 \quad \left[\frac{kg}{kg_{carbon}} \right]$$

A.6.2.2 Masa del Residuo en el Punto “50” – $MqRs_{50}$

La masa del residuo saliendo del volumen de control de la caldera debe ser determinado para cálculos de balance de energía y para el cálculo intermedio de residuos:

$$MqRs_z = \frac{MpRs_z \cdot MpAsF}{100^2 \cdot HHVF} = \frac{95 \cdot 6.92}{100^2 \cdot 28075} = 2.34 \cdot 10^{-6} \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}} \right]$$

donde “ $MpRs_{50}$ ” es el porcentaje del residuo total saliendo de la caldera en el punto “50”. Por experiencia operativa tenemos que la producción de ceniza es 20 veces la producción de escoria, lo que significa un $MpRs_{50}=95\%$

A.6.2.3 Carbono Inquemado en el Carbón – $MpUbc$

Porcentaje de carbono en el carbón que no se ha quemado.

$$MpUbc = MpCRs \cdot MFrRs = 12.34 \cdot 0.079 = 0.975 \quad \left[\%_{masico} \right]$$

A.6.2.5 Carbono Quemado – $MpCb$

Este carbono quemado es utilizado para las ecuaciones estequiométricas en lugar del carbono total.

$$MpCb = MpCF - MpUbc = 65.72 - 0.975 = 64.75 \quad \left[\%_{masico} \right]$$

A.6.3 Propiedades del Aire

A.6.3.1 Propiedades Físicas

Se considera una composición volumétrica del aire de 20.95% de O₂, 79.05% de N₂, haciendo un peso molecular promedio del aire de 28.158.

A.6.3.2 Humedad en el Aire – MFrWDA

Las condiciones de prueba medidas en la succión del ventilador de tiro forzado (punto 6) son:

Presión Atmosférica	Humedad Relativa	Temperatura de Bulbo Seco
Pa	RHMz	Tdb
kPa	%	°C
101.95	63.0	19.00

La presión parcial del vapor de agua en el aire $PpWvA$ se puede determinar de dos maneras en función a los datos obtenidos, para este caso la presión de saturación del vapor de agua a temperatura de bulbo seco “ $PsWvTdb$ ” es 2.2kPa.

$$PpWvA = 0.01 \cdot RHMz \cdot PsWvTdb = 0.01 \cdot 63 \cdot 2.2 = 1.386 \quad [kPa]$$

La humedad del aire la obtenemos de la siguiente expresión.

$$MFrWDA = \frac{18.02}{28.96} \cdot \frac{PpWvA}{Pa - PpWvA} = \frac{18.02}{28.96} \cdot \frac{1.386}{101.95 - 1.386} = 0.0138 \quad \left[\frac{kg_{H_2O}}{kg_{aire\ seco}} \right]$$

A.6.3.3 Aire Teórico (Corregido) – MqThACr

El Aire teórico se determina en función al análisis último, pero considerando el carbono inquemado

$$MFrThACr = \begin{cases} 0.1151 \cdot MpCb + 0.3430 \cdot MpH2F + 0.0431 \cdot MpSF - 0.0432 \cdot MpO2F \\ 0.1151 \cdot 64.75 + 0.3430 \cdot 4.44 + 0.0431 \cdot 0.63 - 0.0432 \cdot 9.25 \\ 8.6 \end{cases} \quad \left[\frac{kg}{kg_{carbon}} \right]$$

Expresado en base energética:

$$MqThACr = \frac{MFrThACr}{HHVF} = \frac{8.6}{28075} = 0.0003 \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}} \right]$$

Expresado en base molar:

$$MoThACr = \frac{MFrThACr}{28.963} = \frac{8.6}{28.963} = 0.297 \quad \left[\frac{mol}{kg_{carbon}} \right]$$

A.6.3.4 Exceso de Aire – XpA

Para este ejemplo, el exceso de aire se debe calculará a la salida del calentador de aire (punto 16, a la salida del volumen de control); en base a las mediciones, mediante Orsat, de Laboratorio ILO21.

O2 a la salida del AH	CO2 a la salida del AH
DVpO2	DVpCO2
% volumétrica	% volumétrico
6.30	13.20

Es necesario calcular el número de moles de los productos de la combustión del carbón en base seca (CO₂ del carbón quemado, SO₂ producido, N₂ del carbón)

$$MoDPc = \frac{MpCb}{1201} + \frac{MpSF}{3206.4} + \frac{MpN2F}{2801.3} = \frac{64.75}{1201} + \frac{0.63}{3206.4} + \frac{1.36}{2801.3} = 0.0546 \quad \left[\frac{mol}{kg_{carbon}} \right]$$

Cuando se mide la concentración de O_2 en los gases de escape en base seca DV_{pO_2} (muestreo extractivo), el exceso de aire se determina empleando la siguiente relación:

$$X_{pA} = \begin{cases} 100 \cdot \frac{DV_{pO_2} \cdot (MoDP_c + 0.7905 \cdot MoThACr)}{MoThACr \cdot (20.95 - DV_{pO_2})} \\ 100 \cdot \frac{6.3 \cdot (0.0546 + 0.7905 \cdot 0.297)}{0.297 \cdot (20.95 - 6.3)} = 41.9 \end{cases} \quad [\%]$$

Podemos determinar el número de moles de los gases secos $MoDFg$:

$$MoDFg = \begin{cases} MoDP_c + MoThACr \cdot \left(0.7905 + \frac{X_{pA}}{100} \right) \\ 0.0546 + 0.297 \cdot \left(0.7905 + \frac{41.9}{100} \right) = 0.414 \end{cases} \quad \left[\frac{mol}{kg_{carbon}} \right]$$

Conociendo el exceso de aire, es posible determinar la composición de los gases de escape en base seca:

$$DV_{pCO_2} = \frac{M_{pCb}}{12.01 \cdot MoDFg} = \frac{64.75}{12.01 \cdot 0.414} = 13.02 \quad [\%]$$

$$DV_{pSO_2} = \frac{M_{pSF}}{32.064 \cdot MoDFg} = \frac{0.63}{32.064 \cdot 0.414} = 0.0475 \quad [\%]$$

$$DV_{pN_2F} = \frac{M_{pN_2F}}{28.013 \cdot MoDFg} = \frac{1.36}{28.013 \cdot 0.414} = 0.117 \quad [\%]$$

$$DV_{pN_2a} = 100 - 6.3 - 13.02 - 0.0475 - 0.117 = 80.51 \quad [\%]$$

A.6.3.5 Aire Seco – M_{qDAz}

El total de aire seco que introduce el ventilador de tiro forzado se determina con el exceso de aire a la salida del calentador de aire (punto 15)

$$MqDAz = MqThACr \cdot \left(1 + \frac{XpA}{100}\right) = 0.0003 \cdot \left(1 + \frac{41.9}{100}\right) = 0.000426 \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}}\right]$$

$$MFrDAz = MFrThACr \cdot \left(1 + \frac{XpA}{100}\right) = 8.6 \cdot \left(1 + \frac{41.9}{100}\right) = 12.2 \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}}\right]$$

A.6.3.6 Aire Humedo – MrAz

$$MqAz = (1 + MFrDWA) \cdot MqDAz = (1 + 0.0138) \cdot 0.000426 = 0.000432 \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}}\right]$$

A.6.3.7 Densidad del Aire – DnA

Es necesario determinar el peso molecular del aire húmedo M_{wA}:

$$M_{wA} = \frac{1 + MFrDWA}{\frac{1}{28.963} + \frac{MFrDWA}{18.015}} = \frac{1 + 0.0138}{\frac{1}{28.963} + \frac{0.0138}{18.015}} = 28.73 \quad \left[\frac{kg}{mol}\right]$$

Utilizando las ecuaciones de gas ideal. Este valor se determina para el aire del medio ambiente (punto 6).

$$D_{nA} = \frac{1000 \cdot M_{wA} \cdot (P_a + P_{Az})}{R \cdot (273.2 + T_{Az})} = \frac{1000 \cdot 28.73 \cdot (101.95)}{8314.5 \cdot (273.2 + 19)} = 1.21 \quad \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

A.6.4 Gases Productos de la Combustión del Carbón

A.6.4.1 Gases Húmedos del Combustible – MqFgF

$$MqFgF = \frac{100 - MpAsF - MpUbC}{100 \cdot HHVF} = \frac{100 - 6.92 - 0.975}{100 \cdot 28075} = 0.0000328 \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}}\right]$$

A.6.4.2 Humedad por Humedad Total del Carbón – MqWF

$$MqWF = \frac{MpWF}{100 \cdot HHVF} = \frac{9.79}{100 \cdot 28075} = 3.487 \cdot 10^{-6} \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}}\right]$$

A.6.4.3 Humedad por Hidrógeno en el Carbón – $MqWH2F$

$$MqWH2F = \frac{8.937 \cdot MpH2F}{100 \cdot HHVF} = \frac{8.937 \cdot 4.44}{100 \cdot 28075} = 1.41 \cdot 10^{-5} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kJ}_{\text{carbon}}} \right]$$

A.6.4.4 Humedad en el Aire – $MqWAz$

$$MqWAz = MFrDWA \cdot MqDAz = 0.0138 \cdot 0.000426 = 0.00000588 \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kJ}_{\text{carbon}}} \right]$$

A.6.4.5 Humedad Adicional en los Gases de Escape – $MqWAdz$

$$MqWAdz = \frac{MrStz}{MrF \cdot HHVF} = \frac{0.083}{13.175 \cdot 28075} = 2.244 \cdot 10^{-7} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kJ}_{\text{carbon}}} \right]$$

$MrStz$:	Agua ingresante al pulverizador = 5lt/min	$[\text{kg/s}]$
MrF	:	Flujo de Carbón consumido = 47.43 tn/h	$[\text{kg/s}]$

A.6.4.6 Humedad Total en los Gases de Escape – $MqWFgz$

La humedad total en los gases de escape es la suma de todas las fuentes individuales.

$$MqWFgz = \left\{ \begin{array}{l} MqWF + MqWH2F + MqWAz + MqWAdz \\ 3.487 \cdot 10^{-6} + 1.41 \cdot 10^{-5} + 5.88 \cdot 10^{-6} + 2.244 \cdot 10^{-7} = 2.37 \cdot 10^{-5} \end{array} \right. \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kJ}_{\text{carbon}}} \right]$$

A.6.4.7 Gases de Escape Húmedos Totales – $MqFgz$

Suma del aire seco, humedad en el aire, gases húmedos de combustión de carbón y humedad adicional.

$$MqFgz = \left\{ \begin{array}{l} MqDAz + MqWAz + MqFgF + MqWAdz \\ 0.000426 + 0.00000588 + 0.0000328 + 2.244 \cdot 10^{-7} = 0.000465 \end{array} \right. \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{kJ}_{\text{carbon}}} \right]$$

El flujo másico de los gases de escape puede ser calculado de:

$$MrFgz = MqFgz \cdot MrF \cdot HHVF = 0.000465 \cdot 13.175 \cdot 28075 = 171.96 \quad \left[\frac{kg}{s} \right]$$

A.6.4.8 Gases Secos de Escape – MqDFgz

$$MqDFgz = MqFgz - MqWFgz = 0.000465 - 2.37 \cdot 10^{-5} = 0.000441 \quad \left[\frac{kg}{kJ_{carbon}} \right]$$

A.6.4.9 Humedad en los Gases de Escape – MpWFgz

$$MpWFgz = 100 \cdot \frac{MqWFgz}{MqFgz} = 100 \cdot \frac{2.37 \cdot 10^{-5}}{0.000465} = 5.1 \quad \left[\%_{másico} \right]$$

A.6.4.10 Residuos (Sólidos) en los Gases de Escape – MpRsFg

$$MpRsFgz = \frac{MpRsz \cdot MFrRs}{MqFgz \cdot HHVF} = \frac{95 \cdot 0.079}{0.000465 \cdot 28075} = 0.575 \quad \left[\%_{másico} \right]$$

A.6.5 Temperatura de Aire y Gases de Escape

La de aire es la medida a la salida del ventilador de tiro forzado, para este caso es 24.09°C; para los gases de escape se tiene una temperatura medida de 133.3°C.

A.6.6 Entalpía del Aire, Gases de Escape y otras sustancias

La relación entalpía-temperatura absoluta se puede ajustar a curvas de quinto orden, siendo la temperatura de referencia 25°C.

$$Hk = 2.326 \cdot [C0 + C1 \cdot TK + C2 \cdot TK^2 + C3 \cdot TK^3 + C4 \cdot TK^4 + C5 \cdot TK^5] \quad \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

La tabla 4.11 muestra estos coeficientes con restricciones de temperatura.

Resultados para Aire y Agua:

Aire Seco	Aire Seco a T _{FgLv}	Vapor de Agua a T _{AEn}	Vapor de Agua a T _{FgLv}	Aire Húmedo	Aire Húmedo a T _{FgLv}
HDATE _n	HDATE _{FgLv}	HWVTA _{En}	HWVTF _{FgLv}	HATE _n	HATF _{FgLv}
kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
-0.9	109.3	-1.7	204.0	-0.9	110.1

Resultados para Gases y Residuos:

Gases Secos	Residuos a T _{FgLv}	Gases de Escape
HDFgT _{FgLv}	HRsT _{FgLv}	HFgT _{FgLv}
kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
108.1	90.1	113.1

Resultados para el carbón:

Carbono Fijo a T _{AEn}	Materia Volatil Primaria a T _{AEn}	Materia Volatil Secundaria a T _{AEn}	Ceniza a T _{AEn}	Humedad Total a T _{AEn}	Carbón Quemado
HFc T _{AEn}	HVm1 T _{AEn}	HVm2 T _{AEn}	HRs T _{AEn}	HW T _{AEn}	HCoal
kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg
-0.7	-1.6	-2.8	-0.7	-1.6	-1.2

A.6.7 Pérdidas de Energía

A.6.7.1 Pérdidas por Gases de Escape – Q_{pLDFg}

$$Q_{pLDFg} = 100 \cdot M_{qDFg} \cdot HDFgLvCr = 100 \cdot 0.000441 \cdot 108.1 = 4.77 \quad [\%]$$

A.6.7.2 Pérdidas por Humedad de la Combustión de H₂ – Q_{pLH2F}

$$Q_{pLH2F} = 100 \cdot M_{qWH2F} \cdot HStLvCr = 100 \cdot 1.41 \cdot 10^{-5} \cdot 204 = 0.288 \quad [\%]$$

A.6.7.3 Pérdidas por Humedad del Carbón – QpLWF

$$Q_{pLWF} = 100 \cdot M_{qWF} \cdot H_{StLvCr} = 100 \cdot 3.487 \cdot 10^{-6} \cdot 204 = 0.071 \quad [\%]$$

A.6.7.4 Pérdidas por Humedad en el Aire – QpLWA

$$Q_{pLWA} = 100 \cdot M_{FrWDA} \cdot M_{qDA} \cdot H_{StLvCr} = 100 \cdot 0.0138 \cdot 0.000426 \cdot 204 = 0.12 \quad [\%]$$

A.6.7.5 Pérdidas por Carbono Inquemado en el Residuo – QpLUbC

$$Q_{pLUbC} = M_{pUbC} \cdot \frac{HHVCRs}{HHVF} = 0.975 \cdot \frac{33700}{28075} = 1.17 \quad [\%]$$

A.6.7.6 Pérdidas por Monóxido de Carbono en los Gases – QpLCO

$$Q_{pLCO} = DV_{pCO} \cdot M_{oDFg} \cdot M_{wCO} \cdot \frac{HHVCO}{HHVF} = \frac{18.87}{10000} \cdot 0.414 \cdot 28.01 \cdot \frac{10111}{28075} = 0.008 \quad [\%]$$

VpCO	:	Porcentaje volumétrico estimado en base al analizador CODEL: 18.87 mg/m ³ N	[%volumetrico]
MwCO	:	Peso molecular del CO = 28.01	[kg/mol]
HHVCO	:	Poder calorífico del CO = 10 111	[kJ/kg]

A.6.7.8 Pérdidas por Calor Sensible de las Cenizas – QpLRs

$$Q_{pLRs} = 100 \cdot \sum M_{qRsz} \cdot H_{Rsz} = 100 \cdot 2.34 \cdot 10^{-6} \cdot 90.1 = 0.021 \quad [\%]$$

A.6.7.9 Pérdidas por Radiación y Convección Superficial – QpLsrc

La estimación utilizada para pérdidas por calor radiante se detalla en la norma ASME PTC4.1 de 1969, que incluye una gráfica que relaciona la producción de calor de la caldera y características constructivas. Para el caso de la Caldera ILO21, la

generación de energía térmica es de 309MW (265×10^6 kcal/h), lo que significa una pérdida de 2.25%.

A.6.7.10 Pérdidas por Humedad Adicional – Q_{pLWAd}

$$Q_{pLWAd} = 100 \cdot M_{qWAdz} \cdot H_{StLvCr} = 100 \cdot 2.244 \cdot 10^{-7} \cdot 243 = 0.005 \quad [\%]$$

A.6.8 Créditos de Energía

A.6.8.1 Créditos por Ingreso de Aire Seco – Q_{pBDA}

$$Q_{pBDA} = 100 \cdot M_{qDA} \cdot H_{DAEn} = 100 \cdot 0.000426 \cdot -0.9 = -0.038 \quad [\%]$$

A.6.8.2 Créditos por Humedad del Aire – Q_{pBWA}

$$Q_{pBWA} = 100 \cdot M_{FrWDA} \cdot M_{qDA} \cdot H_{WvEn} = 100 \cdot 0.0138 \cdot 0.000426 \cdot -1.7 = -0.001 \quad [\%]$$

A.6.8.3 Créditos por Calor Sensible en el Carbón – Q_{pBF}

$$Q_{pBDA} = 100 \cdot \frac{H_{FEn}}{HHVF} = 100 \cdot \frac{-1.2}{28075} = 0.0043 \quad [\%]$$

A.6.8.4 Créditos por Potencia de Equipos Auxiliares – Q_{pBX}

Se estiman en función a la lectura de corriente eléctrica consumida por el motor, empleando valores de eficiencia del fabricante:

Voltaje de Media Tensión	Corriente del Motor del VAP	Corriente del Motor del Pulverizador A	Corriente del Motor del Pulverizador B	Corriente del Motor del Pulverizador C	Corriente del Motor del VRG
kV	A	A	A	A	A
6.76	59.63	44.89	0.00	45.67	34.09

$$Q_{pBX} = \sum \frac{P_x \cdot E_x}{M_{rF} \cdot HHVF} \quad [\%]$$

- Px : Potencia eléctrica consumida por el equipo "X" [kW]
 Ex : Eficiencia global del equipo, incluyendo la eficiencia del motor; acoplamiento, reductor, etc. [%]

Los resultados obtenidos son:

Potencia del Motor del VAP	Crédito por VAP	Potencia del Motor del Pulv A	Crédito por Pulv A	Potencia del Motor del Pulv C	Crédito por Pulv C	Potencia del Motor del VRG	Crédito por VRG
MVAP	QpBAP	MPulvA	QpBpA	MPulvC	QpBpC	MVRG	QpBRG
kW	%	kW	%	kW	%	kW	%
625.230	0.002	300.103	0.001	313.206	0.001	344.829	0.001

A.6.8.5 Créditos por Humedad Adicional – QrBWAd

$$Q_{pLWAd} = 100 \cdot M_{qWAdz} \cdot HStEn = 100 \cdot 2.244 \cdot 10^{-7} \cdot -1.7 = -0.00004 \quad [\%]$$

A.6.9 Balance de Energía

A.6.9.1 Pérdidas Totales – QpL

Es la suma de todas las pérdidas contabilizadas igual a 6.68%

Gases de Escape	Humedad de Combustión de H2	Humedad del Carbón	Humedad en el Aire	Carbono Inquemado	Monóxido de Carbono en los Gases	Calor Sensible de las Cenizas	Radiación y Convección Superficial	Humedad Adicional	Totales
QpLDFg	QpLH2F	QpLWF	QpLWA	QpLUbc	QpLCO	QpLRs	QrLSrc	QpLWAd	QpL
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
4.770	0.288	0.071	0.120	1.169	0.008	0.021	0.225	0.005	6.68

A.6.9.2 Créditos Totales – QpB

Es la suma de todas las pérdidas contabilizadas igual a -0.04%

Aire Seco	Humedad del Aire	Calor Sensible del Carbón	Humedad Adicional	Crédito por VAP	Crédito por Pulv A	Crédito por Pulv C	Crédito por VRG	Totales
QpBDA	QpBWA	QpBF	QpBWAd	QpBAP	QpBpA	QpBpC	QpBRG	QpB
%	%	%	%	%	%	%	%	%
-0.0380	-0.001	-0.0043	-0.00004	0.002	0.001	0.001	0.001	-0.039

A.6.9.3 Eficiencia de la Caldera – η

Es la relación existente entre la energía aprovechable y el ingreso total empleado:

$$\eta = 100 \cdot \left[1 - \frac{QpL}{100 + QpB} \right] = 100 \cdot \left[1 - \frac{6.68}{100 - 0.039} \right] = 93.3\%$$

A.6.10 Reporte de Pérdidas

La figura muestra el reporte de pérdidas de la caldera desarrollado en base a esta tesis y sirve como control semanal de la eficiencia. Esta herramienta informática se desarrolló en Ms Excel.

COPIA NO CONTROLADA

TRACTEBEL		REPORTE DE EFICIENCIA DE LA CALDERA	P1100 - F538	
PERU			V01 / 07-10-2004	
TBL - Pe			GNLC	
EnerSur	X	TIS-Pe		

Prueba		
Carga	MW	136
Fecha		15-09-04
Pulverizadores		A-C
Carbón		COCEC1004
Flujo	tn/h	47.4

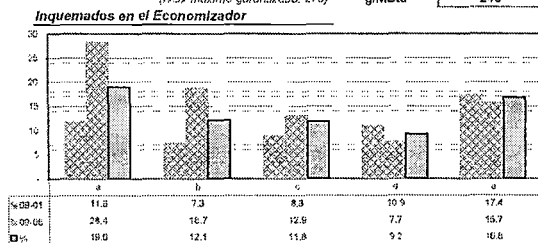
Eficiencia		
Combustión (Carbón-CO-Inq.)	%	98.8
Método de Pérdidas	%	93.3
Método Entrada/Salida	%	90.2
Consumo Específico	tn/MWh	0.35

Ambiente		
Presión	kPa	102
Temperatura	°C	19
Humedad Relativa	%	63

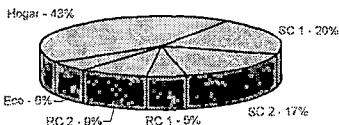
Carbón Quemado		
Poder Calorífico Bruto	kJ/kg	28075
Poder Calorífico Neto	kJ/kg	27118
Humedad Total	%	9.8
Cenizas	%	6.9

Emisiones		
Flujo de Gases	t/h	626
Temperatura	°C	133
O2	%v	5.9
CO2	%v	12.3
N2	%v	75.6
H2O	%v	6.2
CO	mg/m3N	19
Opacidad		0
SO2	mg/m3N	1185
NOx	mg/m3N	484
	g/MBtu	249

(NOx máximo garantizado: 270)

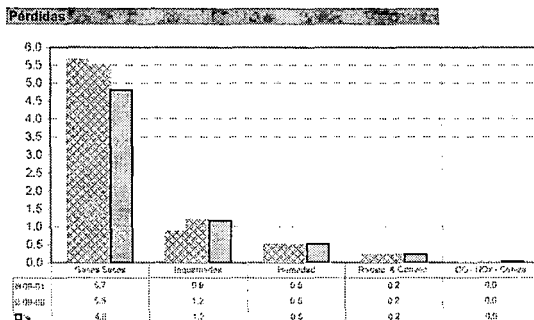


Circuito de Agua y Vapor		
Flujo de Vapor Principal	tn/h	420
Flujo de Vapor Recalentado	tn/h	338
Flujo de Atemperación al SC	tn/h	22
Flujo de Atemperación al RC	tn/h	0
Generación de Calor	MW(t)	309



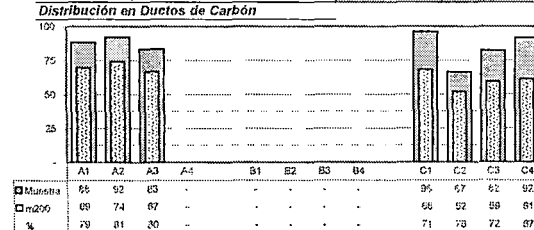
Notas

- Muestreo a la Salida del Economizador y el AH
- Se asume análisis último del carbón.



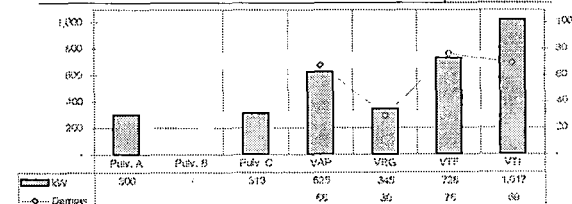
Aire		
Flujo de Aire	tn/h	481
Aire Teórico	tn/h	408
Exceso de Aire	%	17
Aire Secundario / Aire Primario		2.5

Pulverizadores		
	A	C
Relación Aire Primario / Carbón	2.57	2.58
Mill Ratio	2.5	2.6
Relación Aire Caliente / Frío	1.34	1.57
Presión Hidráulica: Vástago / Embolo (MPa)	11.99 / 2.99	10.00 / 3.12
Clasificador Rotativo (rpm)	50	47
Temperatura de Salida (°C)	74	74
Humedad (%)	5.0	5.9
Granulometría: pasante malla 200 (%)	79.8	71.4



Calentador de Aire (lado gases)		
Eficiencia	%	63
Fugas	%	19
Caída de presión	kPa	1.2

Parámetros de Control		
Boiler Master	%	85.8
BTU Corrección	MJ/kg	25.9
Estación de O2	%	40.1
Consumo Eléctrico de Auxiliares	MW	3.33



Revisión y aprobación del Procedimiento, Instructivo o Formato					
Autor	Revisión	Revisión	Revisión	Aprobación	Aprobación
César Cornejo	N.A.	José Villanueva	N.A.	Víctor Tejada	N.A.
Operador de Control ILO21	N.A.	Jefe de Central ILO21	N.A.	Gerente de Operaciones	N.A.