



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Análisis técnico del potencial de reducción de
inquemados en la caldera 4 del sistema de generación
de la central de energía, vapor y aire de la empresa
Coltejer S.A ubicada en el municipio de Itagüí,
Antioquia.**

Diana Lucia González Argel

**Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica
Medellín, Colombia
2021**



Análisis técnico del potencial de reducción de inquemados en la caldera 4 del sistema de generación de la central de energía, vapor y aire de la empresa Coltejer S.A ubicada en el municipio de Itagüí, Antioquia.

Diana Lucia González Argel

Trabajo de semestre de industria como requisito para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Asesores (a):

Julián Esteban Obando Arbeláez
Ingeniero Mecánico

Giovanni Alberto Marín Henao
Ingeniero Industrial

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Mecánica
Medellín, Colombia
2021.

Resumen

La Central de Energía, Vapor y Aire (CEVA), perteneciente a la empresa Coltejer, es una central térmica la cual posee una capacidad instalada de 20 MW al contar con tres turbinas, dos de 4 MW y una de 12 MW, así como cuatro calderas acuotubulares con economizador y sobrecalentador operadas a carbón, tres de ellas producen 90.000 lb/h y una 200.000 lb/h de vapor respectivamente; la caldera con mayor capacidad, denominada caldera 4, ha presentado en los últimos 3 años un porcentaje superior al 7 % de inquemados en la ceniza, siendo valores indeseables dado que señalan que el proceso de combustión no es del todo eficiente y se dificulta la venta de la ceniza a la empresa cementera Ahinco debido a que esta solo admite hasta un 6 %. Por lo anterior, este trabajo se centra en la realización un análisis técnico del potencial de reducción inquemados de la caldera 4; para esto, se realizó un reconocimiento visual y verbal del proceso de generación de energía del CEVA, una revisión de históricos de inquemados y emisiones de gases de combustión, una búsqueda y evaluación del estado del arte, una recolección de diversas variables del proceso de combustión de la caldera 4 y desarrollo de la estequiometría del proceso. Se encontró que los parámetros como el tiempo de residencia, el tamaño de partícula, la humedad y el flujo de aire son importantes para que la presencia de inquemados sea baja; por lo tanto, el análisis se encaminó a estos factores, evaluándose técnica y económicamente las opciones como: la implementación de un sistema de requemado de carbón y puertos OFA (*Overfire air*), un secador de tubo rotatorio, un molino, simulación y análisis para zona de clasificación de los molinos y un variador de velocidad para control del flujo de aire, con el fin de reducir la presencia de inquemados en la ceniza. Además de esto, se establecieron recomendaciones que contribuirían con la mejora del proceso de combustión tales como la capacitación técnica del personal operativo de la caldera, la compra de un servidor capaz de almacenar la información almacenada en el sistema de control general de la caldera, la implementación de medidores de flujo en los ductos de aire primario y secundario, y la instalación del medidor de gases en chimenea. De este proyecto se pudo concluir que la implementación de un sistema de requemado de carbón y puertos OFA, a pesar de requerir una inversión elevada de 216'708.074 COP, se puede obtener una reducción de inquemados de hasta un 47%, siendo posible recuperar en menos de 3 años lo invertido; además, con esta mejora se puede lograr disminuir las emisiones de NOx.

Índice general

1	Introducción	7
2	Objetivos	9
	Objetivo general	9
	Objetivos específicos.....	9
3	Marco Teórico	10
3.1	Introducción al carbón	10
3.2	Ciclo Rankine para generación de energía	14
3.3	Estado del arte	18
4	Metodología	23
5	Proceso de generación de la CEVA y levantamiento de línea base	24
6	Identificación de posibles mejoras	32
6.1	Tiempo de residencia del carbón	32
6.2	Pretratamiento del carbón.....	35
6.3	Tamaño de partícula	41
6.4	Flujo de aire	42
7	Análisis técnico de las mejoras potenciales seleccionadas	45
7.1	Mejoras potenciales seleccionadas	46
7.1.1	Requemado del carbón y puestos OFA	46
7.1.2	Secador de tubo rotativo.....	49
7.1.3	Cambio molinos	50
7.1.4	Control de aire	51
7.2	Análisis técnico/económico de las mejoras	52
8	Conclusiones	56
9	Proyectos futuros.....	58
10	Referencias bibliográficas	59

Índice de figuras

Figura 1. Etapas de combustión del carbón. [12]	12
Figura 2. Análisis del carbón del CEVA.	14
Figura 3. Aplicación según la clase de carbón [9].	14
Figura 4. Representación esquemática de un ciclo Rankine [4].	15
Figura 5. Esquema de caldera acuotubular [17].	16
Figura 6. Esquema del flujo de gases de combustión en una caldera de carbón pulverizado [20].	17
Figura 7. Esquema del equipo experimental DTF de dos etapas [23].	19
Figura 8. Ubicación de las muestras [24].	19
Figura 9. Diagrama esquemático del volumen de control. a) Dimensiones del volumen de control, b) Distribución del aire y carbón en el volumen de control [20].	20
Figura 10. Distribución de las secciones en el molino [26].	21
Figura 11. Esquema general de producción de energía y vapor del CEVA.	24
Figura 12. Tiempo de residencia del carbón en calderas [29].	32
Figura 13. Configuración inicial de los quemadores, inyectores y OFA en la caldera con porcentajes de inquemados bases [31].	34
Figura 14. Curva de secado del carbón [33].	36
Figura 15. Esquema típico de un secador rotativo [33].	37
Figura 16. Esquema general de secador de tubo rotativo [32].	38
Figura 17. Esquema general de secador neumático [32].	39
Figura 18. Combustión del carbón[39].	43
Figura 19. Configuración del requemado en caldera [40].	46
Figura 20. Accesos frontales de la caldera 4.	47
Figura 21. Secador de tubo rotativo JIUTIAN [46].	49
Figura 22. Molino XZM236 seleccionado [47].	50
Figura 23. Porcentaje de inquemados según el porcentaje O ₂ Caldera.	54
Figura 24. Medidor de flujo sugerido.	55

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación del carbón [7].	10
Tabla 2. Reservas de carbón en Colombia [7].	10
Tabla 3. Calidad del carbón en Antioquia [7].	11
Tabla 4. Exceso de aire según combustible [21].	17
Tabla 5. Relación aire/combustible según el combustible [21].	18
Tabla 6. Condiciones de operación para simulación [22].	22
Tabla 7. Cantidad de vapor de extracciones y energía eléctrica obtenida según la capacidad total producida de vapor.	25
Tabla 8. Especificaciones técnicas de las calderas 1,3 y 4 del CEVA.	26
Tabla 9. Variables destacadas en el sistema de operación de la caldera.	27
Tabla 10. Composición del carbón del CEVA.	27
Tabla 11. Densidades y volúmenes de los productos de combustión estequiométricos.	29
Tabla 12. Resultados de inquemados del CEVA.	30
Tabla 13. Composición del carbón para simulación [31].	34
Tabla 14. Contenido de humedad admisible en diferentes procesos industriales [32].	35
Tabla 15. Potencia del motor según la longitud y diámetro del secador [32].	37
Tabla 16. Parámetros del secador rotativo según el tipo de carbón [32].	37
Tabla 17. Datos técnicos generales del secador de tubo rotatorio [32].	38
Tabla 18. Capacidad del secador según el diámetro. [32].	40
Tabla 19. Estudios sobre la aplicación de aditivos inorgánicos en los parámetros de combustión del carbón sub-bituminoso [34].	40
Tabla 20. Cálculo de pérdidas económicas por inquemados.	45
Tabla 21. Parámetros a considerar en planteamiento de simulación.	47
Tabla 22. Costos de la implementación de un sistema de quemado de carbón y sistema OFA.	48
Tabla 23. Ficha técnica del secador rotativo seleccionado [46].	49
Tabla 24. Ficha técnica del molino XZM236 Zenith [47].	50
Tabla 25. Datos técnicos y precios de variador de velocidad.	51
Tabla 26. Comparativa de posibles mejoras.	52

1 Introducción

A través de la historia, el ser humano ha utilizado diversos medios para generar energía, siendo esta un recurso cada vez más importante al ser utilizada en los diversos sectores de la economía, como lo son el residencial, comercial e industrial, los cuales presentan el mayor consumo eléctrico en Colombia al utilizar el 39 %, 21 % y 23 % respectivamente de la demanda de energía eléctrica [1]. Por lo anterior, es vital la generación de energía, la cual se puede obtener por medio de fuentes renovables y no renovables; a nivel mundial, en el 2019 los más grandes productores de energía fueron China, Estados Unidos, India y Rusia; donde la energía proveniente de fuentes renovables o térmicas ha aumentado. Además, en Europa hubo una disminución en la generación de energía eléctrica, principalmente en Alemania, donde se presentó una reducción del uso de fuentes fósiles como el carbón; en Francia también se presentó este descenso en la producción de energía por la menor disponibilidad de fuentes nucleares e hidroeléctricas; sin embargo, en Bélgica se presentó un aumento del 25 % en la generación de energía eléctrica dado que poseen mayor disponibilidad de las fuentes nucleares y eólicas [2].

En cuanto a Colombia, la matriz energética está liderada por las centrales hidroeléctricas, encargadas del 67 % de la generación, seguidas por las centrales térmicas con un 32 %, y centrales eólicas con un 0.1 % [1]. No obstante, el fenómeno del Niño y otras épocas de sequía que se pueden presentar en el país afectan en gran medida la generación de energía proveniente de centrales hidroeléctricas debido a que el cauce del agua disminuye, otorgándole a las centrales térmicas más cabida en la producción [3].

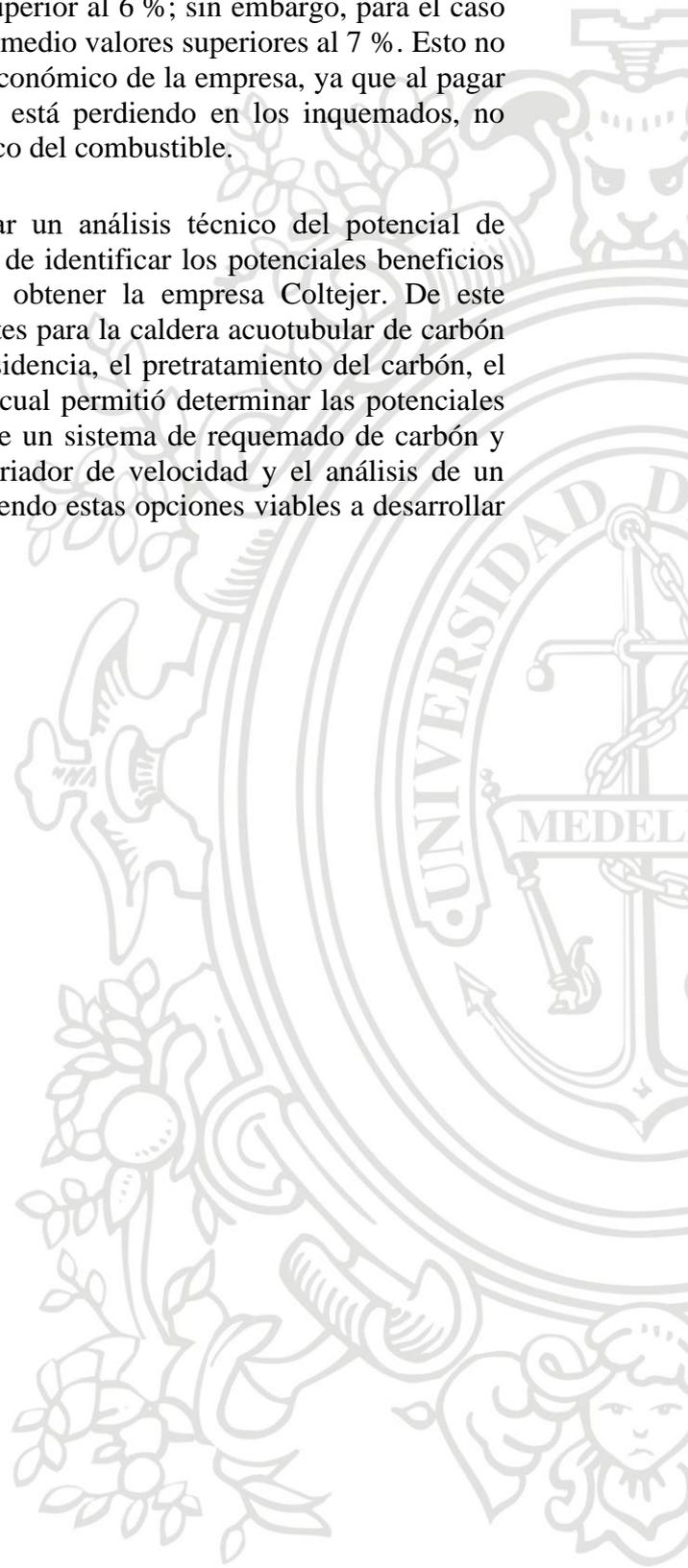
Las centrales termoeléctricas o térmicas son instalaciones utilizadas para la generación de energía eléctrica a partir de calor, el cual puede obtenerse mediante combustibles fósiles como el petróleo, el gas natural o el carbón. En la actualidad, sigue presente la utilización de carbón como combustible para la generación de vapor en dichas centrales, utilizando el ciclo Rankine para este fin; generalmente, los elementos relevantes en este ciclo son una bomba, una caldera, una turbina y un condensador. El ciclo se caracteriza por utilizar el agua como fluido de trabajo, la cual llega a una bomba como líquido saturado y es presurizada para entrar a la caldera como líquido comprimido; en la caldera se lleva a cabo una transferencia de calor entre los gases de combustión y el agua para convertirla en vapor sobrecalentado. El vapor, que debe ser sobrecalentado, es dirigido a una turbina para provocar su movimiento, donde se transforma la energía mecánica del eje en energía eléctrica por medio del alternador o generador [4].

La empresa Coltejer S.A cuenta con una central térmica llamada Central de Energía, Vapor y Aire (CEVA), actualmente ubicada en la sede de Itagüí de la empresa, se encarga de producir energía y vapor para los procesos internos de la planta de Coltejer y del CEVA, y a su vez vende energía a EPM; esta central cuenta con 4 calderas, de las cuales solo se encuentra en funcionamiento la número 4 debido a la poca demanda que presenta en estos momentos la empresa dado que se ha trasladado parte de la planta a una sede ubicada en el municipio de Rionegro.

Debido a que la central se encuentra ubicada en una zona urbana del municipio de Itagüí, se realiza un seguimiento riguroso de las emisiones que se puedan producir, en especial la relacionada a los inquemados; para el caso de las emisiones se tiene en cuenta lo establecido por la Norma 0912 del 2017 del Área Metropolitana [5], donde se plasma que los

componentes a evaluar son el %CO₂, %O₂, CO ppm, % exceso de aire, entre otros; a su vez, en la Resolución 909 del 2008 [6], define la frecuencia con la que se debe realizar pruebas según la capacidad de la fuente fija y los valores admisibles de estos. En cuanto a los inquemados, se tiene establecido que no deben ser superior al 6 %; sin embargo, para el caso de la caldera 4, desde el 2018 se ha presentado en promedio valores superiores al 7 %. Esto no solo repercute en el ámbito ambiental sino también económico de la empresa, ya que al pagar 150.000 COP/ton de carbón, parte de este valor se está perdiendo en los inquemados, no aprovechándose en gran medida el potencial energético del combustible.

Por lo anterior, en este estudio se pretende realizar un análisis técnico del potencial de reducción de inquemados en la caldera 4, con el fin de identificar los potenciales beneficios económicos, energéticos y ambientales que puede obtener la empresa Coltejer. De este estudio se identificó que los potenciales más relevantes para la caldera acuotubular de carbón utilizada en el CEVA se centran en el tiempo de residencia, el pretratamiento del carbón, el tamaño de partícula de carbón y el flujo de aire, lo cual permitió determinar las potenciales mejoras a implementar como lo son la instalación de un sistema de requemado de carbón y puertos OFA, un secador de tubos rotativos, un variador de velocidad y el análisis de un cambio en la zona de clasificación de los molinos, siendo estas opciones viables a desarrollar dentro de la empresa.



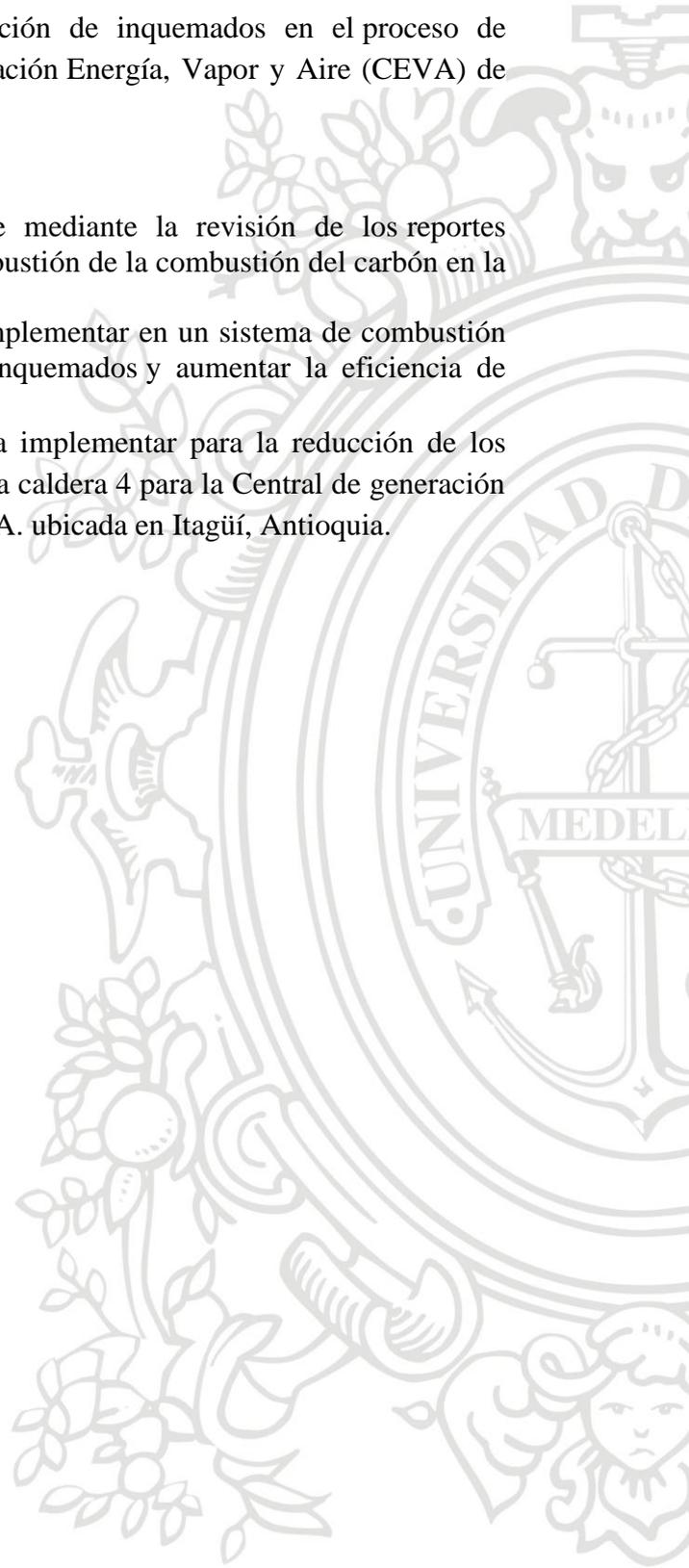
2 Objetivos

Objetivo general.

Realizar un análisis técnico del potencial de reducción de inquemados en el proceso de combustión de la caldera 4 para la Central de generación Energía, Vapor y Aire (CEVA) de Coltejer S.A. ubicada en Itagüí, Antioquia.

Objetivos específicos.

1. Realizar el levantamiento de la línea base mediante la revisión de los reportes históricos de los diferentes productos de combustión de la combustión del carbón en la empresa, en especial los inquemados.
2. Identificar posibles mejoras que se puedan implementar en un sistema de combustión con combustible sólido para disminuir los inquemados y aumentar la eficiencia de combustión.
3. Analizar técnicamente las posibles mejoras a implementar para la reducción de los inquemados en el proceso de combustión de la caldera 4 para la Central de generación Energía, Vapor y Aire (CEVA) de Coltejer S.A. ubicada en Itagüí, Antioquia.



3 Marco Teórico

3.1 Introducción al carbón

Uno de los recursos fósiles utilizado en diversos procesos energéticos es el carbón, el cual se origina de las transformaciones de plantas acumuladas y depositadas en palustres, lagunares o deltaicos, compuesto así por carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre. Según la *American Society for Testing and Materials* (ASTMD), este se puede clasificar en cuatro tipos como se muestra en la Tabla 1 [7].

Tabla 1. Clasificación del carbón [7].

Tipo	Carbono Fijo [%]	Material Volátil [%]	Contenido Humedad [%]	Poder Calorífico [Btu/lb]	Poder Calorífico [MJ/kg]	Poder Calorífico [kcal/kg]
Antracita	86-98	1	< 15	> 14.000	> 32,6	> 7.780
Bituminoso	45-86	32	15 -20	10.500 - 14.000	24,5 – 32,6	5.800 - 7.780
Sub-bituminoso	35-45	50	20 - 30	7.800 - 10.500	18,2 – 24,5	4.300 - 7.780
Lignito y Turba	25-35	96	> 30	4.000 - 7.800	9,3 – 18,2	2.200 - 4.300

La Antracita o carbón duro, siendo el que requiere mayor tiempo de formación, es un carbón de alta calidad el cual presenta un alto porcentaje de carbono y bajo material volátil; la hulla, que puede ser bituminoso o sub-bituminoso, se forma cerca del mismo nivel que la antracita y posee un porcentaje más bajo, pero aun así es de calidad [7]. El lignito, característico por su color negro mate que mancha al tocarlo, produce mucha ceniza al quemarlo, y la Turba, que tiene un tiempo menor de formación en comparación con los demás, es poroso, esponjoso y ligero, con alto porcentaje de humedad y produce mucha ceniza [8].

El carbón es de los combustibles fósiles más utilizados debido a su poder calorífico y bajo costo, teniendo una participación del 70 % de las reservas de combustibles fósiles en el mundo [9]. En el año 2019, Colombia produjo más de 89 Mt, por lo cual es importante destacar que es el país con mayores reservas de carbón en América Latina, asegurando la producción y comercialización de este mineral hasta por más de 120 años [7], teniendo distribuidas dichas reservas en sus diferentes departamentos como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Reservas de carbón en Colombia [7].

Departamento	Reservas Medidas Millones de Ton. 2016	Reservas Inferidas Millones de Ton. 2004	Reservas Inferidas Millones de Ton. 2004	Recursos Hipotéticos Base 2004	Potencial Millones de ton. Base 2004
Guajira	3525,5	448	127,5	27,2	4128,2
Cesar	1538,2	1564	1963,2	993,5	6058,8
Córdoba	376,4	341	0	0	717,4
Antioquia	86,3	225,8	132,4	26,5	471
Valle	40,2	92,1	97,9	11	241,2
Cundinamarca	210,6	644,9	539,2	61,8	1456,5
Boyacá	141,7	682,6	867,2	0	1691,5

Santander	146,6	552,3	569,2	0	1268,1
Norte de Santander	95	314,3	360,8	0	770,1

En esta tabla se evidencia que los departamentos con mayores reservas son la Guajira, Cesar y Córdoba, los cuales para el 2019 tuvieron una producción más de 26 Mt, 52 Mt y 336 kt respectivamente [10]. Sin embargo, la cuenca del Sinifaná es altamente importante para los municipios de Venecia, Amagá, Angelópolis, Fredonia y Titiribí, produciendo en el año 2019 501 kt y abasteciendo así a Antioquía. Este carbón, empleado en las diferentes empresas en el Área Metropolitana, tiene la calidad presentada en la Tabla 3, siendo este un dato importante para la determinación del comportamiento de la combustión de dicho combustible, en especial para el CEVA [11].

Tabla 3. Calidad del carbón en Antioquia [7].

Área	Sector	Humedad [%]	Cenizas [%]	Materia Volátil [%]	Carbono Fijo [%]	Azufre Total [%]	Poder calorífico [BTU/lb]
Venecia-Fredonia		11,64	8,11	40,06	40,2	0,48	10,426
Amagá-Angelópolis		13,16	11,96	36,69	38,18	0,55	9,682
Venecia-Bolombolo	Rincón Santo	9,84	11,1	38,45	40,61	1,04	10,09
	Bolombolo	8,49	7,9	37,77	45,91	1,09	11,113
Titiribí		7,25	7,92	37,99	46,84	0,72	11,767
Riosucio-Quinchía		4,08	15,56	31,75	48,61	1,8	10,713
Aránzaru-Santagueda	Aránzazu	22,22	28,69	30,33	18,76	0,67	5,451
	Santagueda	19,03	25,05	37,32	18,6	0,43	6,23

La combustión del carbón es un proceso vital para la producción de energía debido a que con él se logra obtener calor. En este, el carbón pasa por 4 etapas: calentamiento y secado, desvolatilización y combustión de volátiles, hinchamiento y fragmentación primaria, y combustión del char, como se ve en la Figura 1 [12]. El secado es la etapa más rápida de carácter endotérmico y se efectúa a bajas temperaturas; en esta se produce la evaporación de la humedad del combustible y su evacuación hasta el exterior, elevando la temperatura del combustible hasta la temperatura de pirólisis [13].

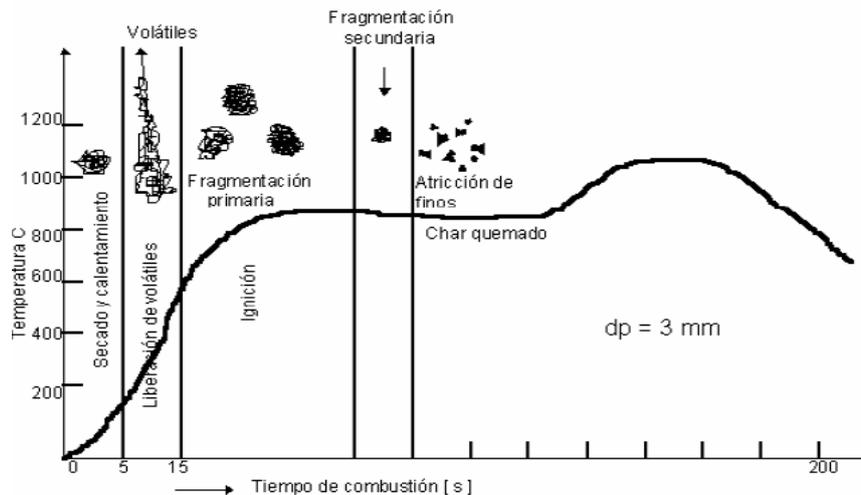
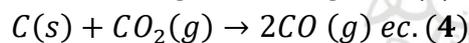
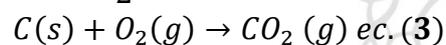
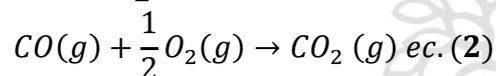
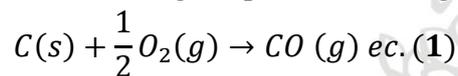


Figura 1. Etapas de combustión del carbón. [12]

La desvolatilización y la combustión de volátiles es una etapa rápida de carácter endotérmico donde se producen los volátiles, los cuales son los responsables de aproximadamente el 40 % del calor liberado en la cámara de combustión. En esta se presenta la remoción del agua adsorbida ($< 150\text{ }^{\circ}\text{C}$), la evolución del agua formada durante la pirólisis ($300 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$), el ablandamiento del carbón ($400 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) y la producción de monóxido de carbono e hidrógeno ($> 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) [12]. A su vez es importante su estudio ya que permite identificar las zonas donde se presenta una alta liberación de volátiles, los cuales son perjudiciales para la velocidad de combustión del char dado por la presencia de bajas concentraciones de oxígeno en dichas zonas.

En el hinchamiento y la fragmentación primaria ocurre la ignición del combustible al llegar a la temperatura requerida por el este. En cuanto a la combustión del char, es la etapa más lenta e importante para saber la eficiencia de la combustión; esta es una fase de carácter exotérmico debido a que las partículas de char con oxígeno producen las siguientes reacciones [12]:



De estas reacciones la oxidación del monóxido de carbono (ec. 1) brinda dos terceras partes del calor producido por la reacción global; a su vez, de las reacciones se pueden establecer 3 regímenes, caracterizados por cómo reacciona la partícula de char con el oxígeno. El primero se distingue por presentarse bajas temperaturas (660 a $900\text{ }^{\circ}\text{C}$) donde el oxígeno entra al char poroso en concentraciones uniformes, presentándose una disminución de la densidad de partícula; el segundo ocurre cuando es compatible las velocidades de reacción química y difusión en los poros del char, siendo consumido el oxígeno cerca de la superficie externa de la partícula. Por el contrario, el tercero ocurre a altas temperaturas con velocidades de reacción superior a la velocidad de transferencia de masa, controlando esta última el proceso de combustión; en este, el oxígeno reacciona en cuanto llega a la superficie de la partícula de char, disminuyendo su diámetro a densidad constante al quemarse.

Para el caso específico de las partículas de carbón pulverizado, en estas el proceso de desvolatilización es muy rápido, con una duración de aproximadamente 0,1 s, diferente a la combustión del char que requiere aproximadamente 1 s. A su vez, las velocidades de calentamiento entre 104 a 106 °C/s, teniendo temperaturas máximas de 1600 °C para partícula de carbón pulverizado [12].

Un factor muy importante a la hora de tratar con el carbón es conocer de manera precisa su composición; por lo cual se suelen realizar pruebas como análisis próximo y último, pues proveen las cantidades relativas de humedad, materia volátil, ceniza, carbono fijo, y el porcentaje de los principales elementos químicos presentes en el carbón. El análisis próximo comprende la medida de los contenidos de humedad, volátiles, cenizas y carbono fijo; es la forma más simple y generalizada de caracterizar un carbón debido a que se puede realizar con un equipo básico de laboratorio, aunque hoy en día hay equipos totalmente automáticos más complejos. La humedad se determina generalmente por porcentaje de pérdida de peso al calentar una muestra en estufa a 105 °C; a medida que se aumenta la temperatura de calentamiento, se desprenderá el agua [14].

En cuanto a los volátiles, estos están compuestos de cantidades de hidrógeno, óxidos de carbono, metano y otros hidrocarburos de bajo peso molecular; el contenido de estos representa la reactividad y facilidad de ignición que tiene el carbón. El ensayo propuesto por la *International Organization for Standardization* (ISO) para la determinación fija la temperatura a 900 °C por 7 min en un espacio sin presencia de aire; se define como volátiles a la pérdida de peso de las muestras en estas condiciones.

Las cenizas son el residuo sólido tras una combustión completa de la materia orgánica y oxidación de la materia mineral presente en el carbón. Por eso, las cenizas definen la calidad del carbón en la combustión, representando mayores sobrecostos de manipulación y tratamiento, así como los posibles problemas de erosión en los equipos de transporte y combustión. El contenido en carbono fijo se obtiene al realizar la diferencia a 100 de la suma de los contenidos anteriores. Este permite estimar la cantidad de coque o char que se puede producir. En cuanto al análisis último, se analiza el carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno adicionándole la humedad y contenido de cenizas del análisis próximo. Este análisis es necesario para los balances de materia y energía [14].

Para el caso del carbón que se utiliza en el CEVA, se le realizó dichos análisis en el 2015, como se ve en la Figura 2, donde se evidencia los porcentajes de las variables mencionadas anteriormente, las cuales cada una fue evaluada siguiendo métodos planteados por la norma ASTM.

REPORTE DE ANÁLISIS

LOCALIDAD BARRANQUILLA
 FECHA NOVIEMBRE 26, 2015
 PRODUCTO CARBÓN

De acuerdo a instrucciones recibidas de COLTEJER S A, los siguientes resultados analíticos fueron establecidos por el laboratorio de SGS Colombia S.A.S. en Barranquilla, según la norma aplicable:

ID Laboratorio: CO1501386.001	Fecha de Recibido: 26/11/2015	Fecha de Análisis: 28/11/2015
ID Muestra: MUESTRA RECIBIDA		
*-ANÁLISIS PROXIMO COMPLETO		
	Base Como Se Recibe	Base Seca
Humedad Total, % en peso	9.80	
Ceniza, % en peso	22.25	24.66
Materia Volátil, % en peso	36.13	40.06
Carbono Fijo (por diferencia), % en peso	31.82	35.28
Azufre, % en peso	0.50	0.55
Poder Calorífico Bruto (Btu/Lb)	8263	9161
Poder Calorífico Bruto (Kcal/Kg)	4591	5090
Poder Calorífico Bruto (GJ/Ton)	19.22	21.31
		Método
		ASTM D3302/D3302M-12*
		ASTM D7582-12 (*)
		ASTM D7582-12 (*)
		ASTM D3172-07a(by diff)
		ASTM D4239-14e1 Method A(*)
		ASTM D5865-13(*)
		ASTM D5865-13
		ASTM D5865-13
*-ANÁLISIS DE CHN		
	Base Como Se Recibe	Base Seca
Carbono, % en peso	48.51	53.79
Hidrógeno, % en peso	3.62	4.02
Nitrogeno, % en peso	1.08	1.20
		Método
		ASTM D5373-14 Metodo A (*)
		ASTM D5373-14 Metodo A (*)
		ASTM D5373-14 Metodo A (*)
*-ANÁLISIS DE HGI (HARDGROVE GRINDABILITY INDEX)		
		Resultado
Índice Molienda (HGI)		42
Humedad HGI		6.85 %
		Método
		ASTM D409M-12(*)
		ASTM D409M-12(*)
*-CALCULO DE OXIGENO POR DIFERENCIA		
	Base Como Se Recibe	Base Seca
Oxígeno (por diferencia) %	14.24	15.78
		Método
		ASTM D3176-09 (by diff)

Figura 2. Análisis del carbón del CEVA.

Cabe resaltar que la aplicación del carbón varía según su clase, como se evidencia en la Figura 3, para lo cual se puede considerar la lignita, bituminoso y sub-bituminoso como adecuados para la generación de energía.

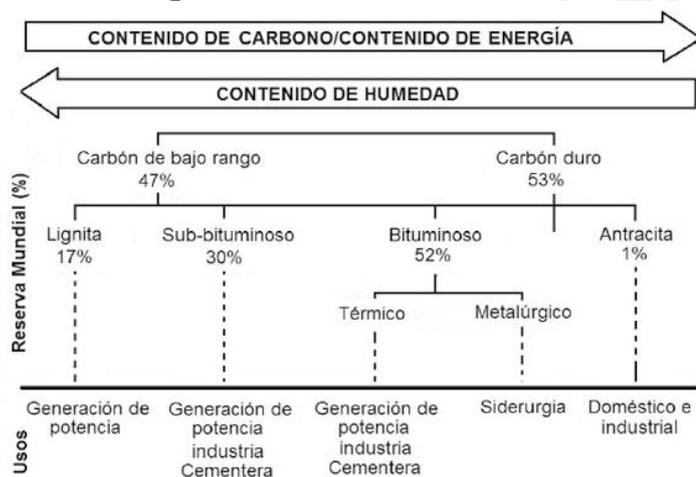


Figura 3. Aplicación según la clase de carbón [9].

3.2 Ciclo Rankine para generación de energía

Existen diversos ciclos para generar energía, como lo son los ciclos de potencia de gas o los ciclos de potencia de vapor y combinados, siendo el ciclo Rankine uno de los más ideales si se desea producir energía mediante vapor [4]. El vapor es una fase del agua que se produce al ebullición, el cual se irá saturando a medida de que se siga agregando más calor; sin embargo, el vapor sobrecalentado, el cual se obtiene al exponer a una temperatura más alta el vapor saturado aumentando su temperatura por encima de la de evaporación, es utilizado para la generación de energía debido a que este al ingresar en la turbina se demora más tiempo en condensar que el vapor saturado, permitiendo que no se presenten golpes de ariete y daño en la infraestructura de la turbina, siendo más eficiente el proceso. Para el ciclo Rankine, la eficiencia está dada por medio de la siguiente fórmula [15]:

$$\text{Rankine efficiency } n_R = \frac{H_i - H_e}{H_i - h_e} \text{ ec. (5)}$$

Donde H_i es la entalpía de entrada a la turbina, H_e la entalpía de salida de la turbina y h_e la entalpía sensible de condensados. Este ciclo está compuesto principalmente por bomba de alimentación, turbina, condensador y caldera, representados esquemáticamente en la Tabla 7 [4]. El primer elemento se encarga de llevar el agua a evaporar hacia la caldera, esta agua usualmente suele ser desaireada y precalentada por medio de un economizador, para luego adquirir la presión suficiente para entrar a la caldera, siendo esta presión superior a la de diseño de la caldera [15].

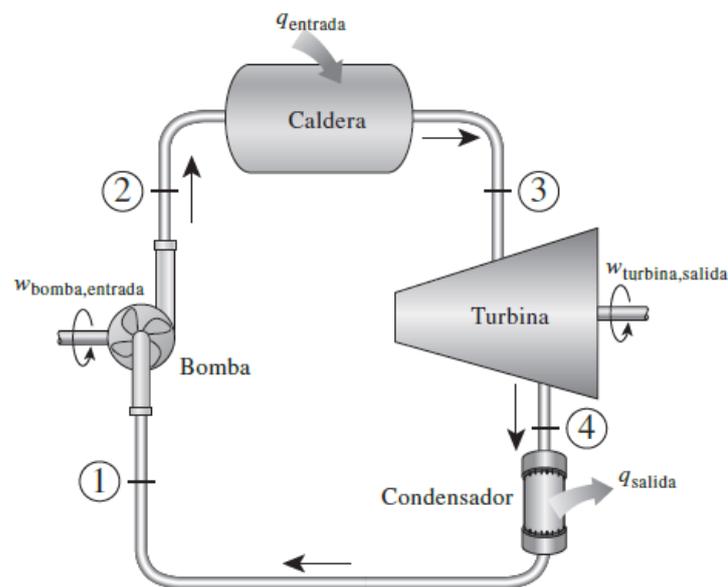


Figura 4. Representación esquemática de un ciclo Rankine [4].

En la turbina, para el caso de las de vapor, la temperatura máxima está limitada a unos 540 a 600 °C y presión de 35 MPa; en estas el vapor proveniente de la caldera es conducido hasta la turbina donde un gobernador lo distribuye y separa para ser disparado a los álabes de la turbina, provocando un movimiento del eje que las sostiene. Este eje está acoplado a un alternador donde se produce un campo eléctrico el cual permite la transformación de la energía, produciéndose así la energía eléctrica. Estas turbinas suelen presentar diferentes configuraciones con el fin de disminuir la presión del vapor, encontrándose en algunas centrales extracciones de vapor a diferentes presiones para utilizar en otros procesos [16].

El vapor que sale de la turbina es llevado a un condensador, el cual permite retomar al estado líquido del agua, estando a una temperatura superior a la ambiental, siendo llevada como condensado primario al sistema de alimentación de agua, retornando a la caldera. Por otro lado, la caldera es de los elementos más importante de los sistemas de generación de energía, la cual es un generador o intercambiador de calor que transfiere energía en forma de calor ya sea por productos de la combustión o cualquier otra fuente de calor, al agua para que esta se convierta en vapor y así utilizarla en los procesos que se requiera. Existen diversos tipos de calderas, las cuales se pueden clasificar según su fluido de trabajo, el uso de combustible, su configuración, parámetros de operación, entre otros; para el desarrollo del proyecto será indispensable dar prioridad a las calderas acuatubulares [17].

Las calderas acuotubulares, como se muestra en la Figura 5, son aquellas donde el agua es el fluido de trabajo, el cual pasa por los tubos presentes al interior de la caldera mientras que los gases de combustión fluyen alrededor de estos, presentándose transferencia de calor por radiación, convección y conducción; a su vez, son calderas con altas eficiencias utilizadas en procesos donde se requieran altas presiones de vapor (3000 psi) y vapor saturado o sobresaturado, siendo ideales para la producción de energía eléctrica por su alta capacidad de producir vapor. A su vez, están compuestas principalmente por un hogar o cámara de combustión, quemador, tubos de agua y vapor, domos superior e inferior y sistema de monitoreo y control [17].

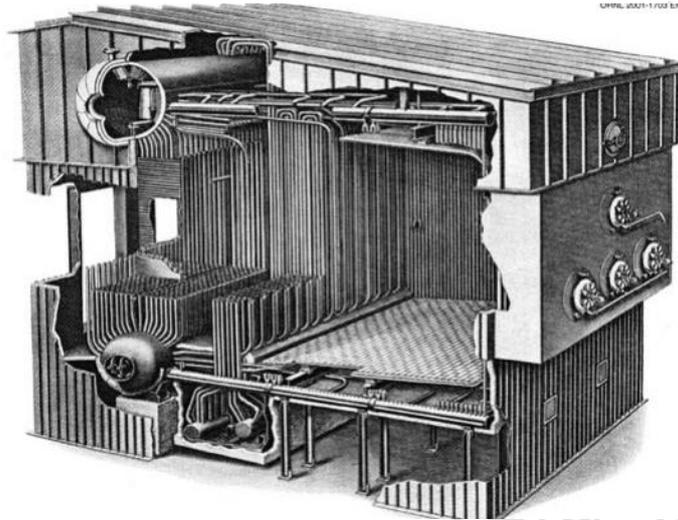


Figura 5. Esquema de caldera acuotubular [17].

Entre estos, el quemador es un dispositivo que se encarga del mezclado del aire y combustible para posteriormente darse la combustión. Una técnica para favorecer la combustión es tratar de aumentar el contacto entre el carbón y el oxígeno permitiendo más superficie de contacto entre esto, por lo cual es necesario reducir el tamaño de la partícula del carbón [18]. Comercialmente se encuentra el carbón según su tamaño; el carbón todo mina es el que sale apenas se extrae de la mina, el granulado tiene un tamaño entre 1½ a 2 in, el ripio posee un tamaño entre 0 a 0,98 in, el de cocina entre 2 a 7 in y el de almendra entre ¼ a 1½ in [19].

Para la producción de energía es muy común encontrar calderas que trabajan con carbón pulverizado; en los sistemas que lo utilizan, el carbón pasa por un proceso de trituración y pulverización con el fin de obtener partículas de menos de 100 μm , las cuales se mezclan con el aire y son introducidas a la caldera para que se dé la combustión de estas partículas en el hogar, siendo un espacio de alta liberación de energía. Como producto de la combustión del carbón se generan gases de combustión con alta temperatura, los cuales fluyen a través de la caldera, como se muestra en la Figura 6, para transmitir energía mediante convección a los tubos llenos de agua dispuestos al interior de la caldera. Si se tiene un sistema de precalentamiento de aire, es común encontrar una caja de aire en la parte posterior a la caldera, en la cual los gases calientes transfieren energía al aire exterior ingresado por un ventilador de tiro forzado, haciendo intercambio de calor para precalentar el aire que ingresa y por consiguiente pasar por un sistema de filtros o limpieza de gases para su expulsión a través de la chimenea [20].

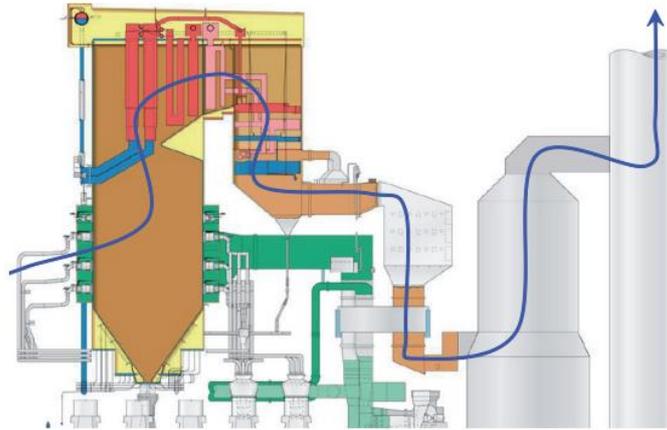


Figura 6. Esquema del flujo de gases de combustión en una caldera de carbón pulverizado [20].

De manera ideal, la combustión en la caldera se da con un nivel de aire y combustible de carácter estequiométrico; sin embargo, en muchos casos se utiliza una combustión con exceso de aire con el fin de garantizar que haya suficiente aire para que la partícula de carbón reaccione y aumentar la turbulencia, la cual ayuda a una mejor mezcla aire/combustible. Esta variable se calcula mediante la *ecuación 6*, al conocer el aire estequiométrico y el aire suministrado a la caldera, el cual debe ser monitoreado para un mayor conocimiento del proceso.

$$\% \text{ exceso aire} = \frac{\% \text{ de aire suministrado}}{\% \text{ de aire suministrado} + \% \text{ aire estequiométrico}} \text{ ec. (6)}$$

Tanto el exceso de aire como la relación aire/combustible dependerán del combustible a utilizar, así como la configuración que tenga la caldera para la combustión, como se muestra en la Tabla 4 y Tabla 5, donde se evidencia que para carbón pulverizado con hogar enfriado parcialmente por agua se puede tener un exceso de aire del 15-40 %.

Tabla 4. Exceso de aire según combustible [21].

Equipo	Tipo de hogar	Exceso de aire recomendado [%]
Carbón pulverizado	Hogar enfriado parcialmente por agua	15-40
Carbón	Stocker esparcidor	30 a 60
Carbón	Stocker subalimentado	20 a 50
Fuel oil	Quemadores de aceite	5 a 10
Fuel oil	Quemadores multicomcombustible y	10 a 20

	llama plana	
Natural gas	Quemadores	5-10

Tabla 5. Relación aire/combustible según el combustible [21].

Fuel	Stoichiometric Air/Fuel Ratio [air ft ³ /fuel lb]	Heat of combustion [BTU/lb]
No. 2 Oil	180-195	18.500-19.800
No. 6 Oil	170-185	17.500-19.000
Bituminous Coal	120-140	12.000-14.000

No obstante, el uso del exceso de aire no siempre conlleva a la quema total del carbón, siendo posible la presencia de productos intermedios como lo son el material particulado, las cenizas y los inquemados, los cuales son perjudiciales para el medio ambiente y la salud [22]. En Colombia, con el fin de llevar un control sobre estas emisiones, se ha optado por implementar la Resolución 909 del 2008, la cual establece las emisiones permitidas para fuentes fijas; en el caso de las centrales térmicas con capacidad instalada de 20 MW que utilicen combustibles fósiles, se estableció como emisiones admisibles de material particulado, SO₂ y NO_x los valores 100 mg/m³, 2800 mg/m³ y 760 mg/m³ respectivamente, utilizando un oxígeno de referencia del 6 % [6].

Existen diversas razones por las cuales se presentan estos residuos; por ejemplo, los problemas operacionales, distribución inapropiada del carbón, tecnologías obsoletas y tipo del carbón llevan a la generación de inquemados. Los inquemados son residuos sólidos, compuestos de carbón, hidrógeno, azufre, entre otros; los cuales están presentes en el material particulado que sale de las chimeneas, en el piso del hogar, en ciclones y filtros de talegas. Estos representan una pérdida de potencia calorífica del combustible, depositándose en forma de hollín en las superficies de intercambio de calor al interior de la caldera, obstaculizando la transferencia de calor de los gases al agua, provocando pérdidas de calor e incremento de la temperatura de salida de los gases de combustión [22]. Como es un problema frecuente, diversos estudios se han realizado entorno a la disminución de estos compuestos, de los cuales se observa que, para lograr una disminución en la generación de los inquemados, se debe mejorar la relación de aire-combustible, verificar que el tamaño del carbón sea adecuado, el tipo de quemador, entre otras.

3.3 Estado del arte

Para el adecuado estudio de las posibles mejoras que se planea analizar, es fundamental el planteamiento del estado del arte que apunten a una disminución de inquemados y de otras emisiones. K.Y. Lisandy et al. [23] realizaron un análisis numérico y experimental del experimento del horno de tubo descendente (*Drop-tube furnace-DTF*), mostrado esquemáticamente en la Figura 7, con el fin de analizar el comportamiento de la producción y concentración de gas contaminante, NO, CO e inquemados dentro de las calderas que utilizan

carbón pulverizado. Para llevar a cabo el estudio, se realizó primeramente un análisis termogravimétrico para obtener los parámetros de entrada como la cinética de combustión del carbón y el parámetro del modelo de poro aleatorio para la simulación numérica unidimensional, utilizando dos carbones de bajo rango de Indonesia: el Tanito y el Kideco. La simulación del experimento DTF se realizó utilizando el software de modelado de procesos gPROMS y se empleó un analizador de gases, para registrar cada segundo las concentraciones de CO, NO, O₂ y CO₂, un método de trazador de cenizas, para calcular la cantidad de carbón presentes en este residuo.

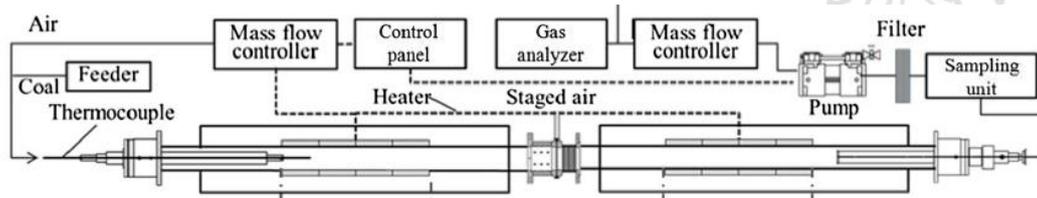


Figura 7. Esquema del equipo experimental DTF de dos etapas [23].

Con este estudio se observó que el carbón con altas tasas de reacción, alta relación estequiométrica y temperatura presenta emisiones superiores de NO y bajas concentraciones de inquemados en comparación con el de bajas velocidades de reacción; esto debido a que se presenta una temperatura pico en la nube de combustión, dando lugar a la formación térmica de NO. Sin embargo, en la combustión de baja relación estequiométrica se observa disminución en la tasa de formación de NO, incluso presentándose altas temperaturas. El CO en cambio, al presentarse temperaturas altas, con alta relación estequiométrica y condiciones de combustible pobre, se evidencia una disminución de las emisiones de CO, siendo la disminución aún mayor a altas temperaturas, diferente a condiciones de combustible rico, donde al aumentar la temperatura se elevan las emisiones de CO.

Para el caso de M. Bilen et al. [24], analizaron tres muestras provenientes del lugar de almacenamiento del carbón, del alimentador de carbón para molinos y fondo de ceniza (*Bottom ash-BA*) tomadas durante 12 días en la central de generación eléctrica de Zonguldak Turkey, como se evidencia esquemáticamente en la Figura 8. Se caracterizó 24 muestras de carbón provenientes de los alimentadores de carbón, las cuales se clasificaron por tamaño y se les realizó un análisis de humedad; mientras la caracterización de las muestras del BA se tomó del colector ubicado en la parte inferior de la caldera y se analizaron en términos de inquemados (*Unburned carbon- UBC*).

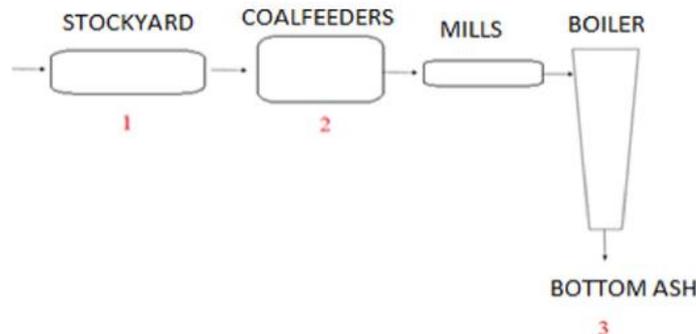


Figura 8. Ubicación de las muestras [24].

De este estudio se puede concluir que los UBC no solo se ven afectados por el aire primario, el tiempo de residencia de la caldera y el calor dentro de la zona de combustión, sino también por el tamaño de las partículas de carbón y el contenido de humedad del carbón de

alimentación, con esto se puede determinar que para reducir la presencia de los UBC se debe establecer de manera precisa estos dos parámetros.

Al tener la humedad como factor importante para la producción de inquemados, R. Kurose et al. [25] realizaron un estudio donde se determinó los efectos de la humedad en las características de la combustión de carbón pulverizado mediante una simulación numérica en tres dimensiones de la combustión en un horno. En la Figura 9 se muestra el diagrama esquemático del volumen de control y el quemador utilizado, el aire de combustión fue inyectado en el horno a través del quemador, siendo dividido en aire primario, secundario y terciario, donde el aire primario es el que transporta el carbón pulverizado. El carbón utilizado fue el carbón bituminoso Newlands, el cual originariamente contiene una humedad del 2.2 %, al cual se le incrementó la humedad al inyectar vapor en conjunto con el aire primario con el objetivo de identificar los efectos de la humedad.

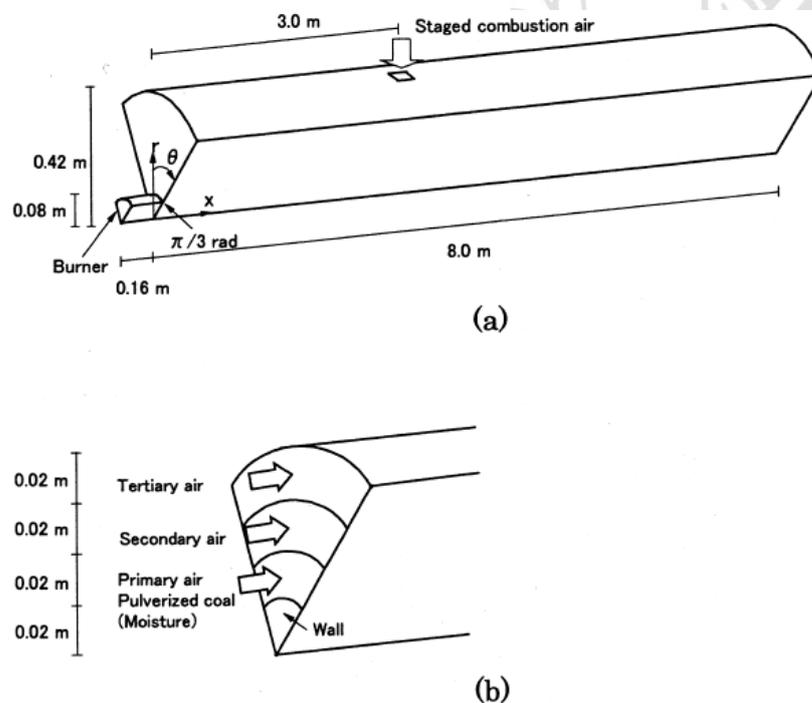


Figura 9. Diagrama esquemático del volumen de control. a) Dimensiones del volumen de control, b) Distribución del aire y carbón en el volumen de control [20].

Los resultados obtenidos mostraron que a medida que la humedad del carbón aumenta, la temperatura de llama y la fracción molar de NO_x disminuye y la fracción molar del O_2 aumenta en la región cerca al quemador; también, bajo esta condición, se ve una disminución de la conversión de NO_x a la salida del horno, así como un aumento en la fracción de inquemados; esto se debe a que la temperatura de llama disminuye porque la humedad suprime la formación de NO_x térmico. Estos resultados dependen de si la humedad del carbón es modelada como vapor o como agua líquida, ya que su calor latente de vaporización varía.

A su vez, en el estudio de S. Ataş et al. [26] se realizó un análisis numérico y experimental del clasificador de un molino de carbón pulverizado, examinando el flujo dentro de este dispositivo ubicado en la central de generación eléctrica Soma B, la cual presentaba baja eficiencia de caldera debido a altas presencia de inquemados; esto con el fin de lograr que ingrese a la caldera un menor tamaño de partícula de carbón. Como se ve en la Figura 10, el molino está compuesto de 7 secciones, al cual se realizó una simulación *Computational Fluid*

Dynamics (CFD) la geometría y malla se modeló utilizando el preprocesador GAMBIT y las simulaciones del flujo fueron realizadas con FLUENT 6.26. Con esto, se evaluaron cuatro diseños diferentes con el fin de lograr un aumento en la eficiencia de la separación del carbón.

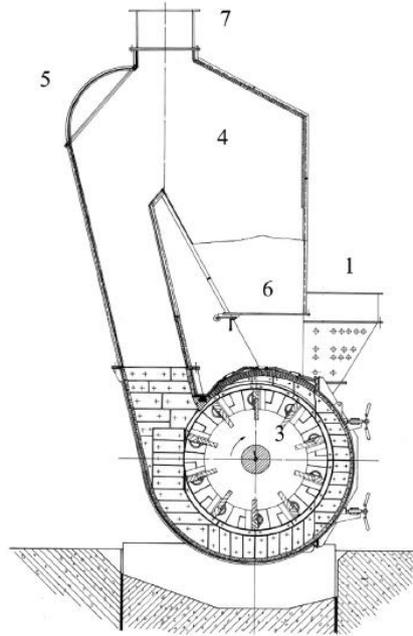


Figura 10. Distribución de las secciones en el molino [26].

Con esto, se evaluaron cuatro diseños diferentes con el fin de lograr un aumento en la eficiencia de la separación del carbón, donde se identificó al diseño D-21 como el más adecuado para aplicar en el molido de la central, debido a que se obtuvo un flujo másico de carbón de 11,7 kg/s y distribuciones de tamaño del carbón de 54,8 % y 97 % para partículas menos de 90 y 1000 μm , respectivamente. Este fue probado de manera experimental al realizar diversos ajustes interiores de la placa; en las pruebas, operar el molino en condiciones de carga más bajas resultó en una distribución del tamaño del carbón más fina en la salida; a su vez se logró determinar que la reducción de la entrada del clasificador mediante el uso de una placa aumentó la velocidad de entrada del gas al clasificador, lo que resultó en tamaños de carbón más pequeños en comparación con la configuración sin placa. Por tanto, una mayor cantidad de partículas pequeñas de carbón se dirigieron al conducto triturado para su posterior molienda, y una cantidad reducida de masa total de carbón fluye hacia los quemadores.

L.Jun et al. [27] ejecutaron una simulación CFD mediante *Ansys Fluent 12.1* con el fin de determinar qué pautas deben seguir en la operación de caldera de carbón pulverizado para obtener reducción de los inquemados. En este estudio se simuló el funcionamiento de una caldera OP-650, presente en una central de generación de energía, la cual es sometida a tres cargas; 200 MW, 170 MW y 140 MW; donde las condiciones de operación que se establecieron para las simulaciones con sus respectivas cargas se evidencian en la Tabla 6. El sistema de suministro de aire se simuló mediante Solidworks para poder establecer los vectores de velocidad, temperatura y presión a la entrada de las superficies de la caldera; en cuanto al diseño, se realizó un modelo 3D el cual consistía en ductos de aire de combustión, 24 quemadores dispuestos en cuatro filas, 10 puertos de aire secundario y un canal de protección. Además, se estableció suposiciones tales como: Las condiciones estaban en estado estable, todo el ducto de aire era una pared adiabática, el carbón no se incluía con el aire primario y se utilizó como modelo de turbulencia el *k-epsilon*.

Tabla 6. Condiciones de operación para simulación [22].

	Units	140 MW	170 MW	200 MW
Avg steam production	t/h	403.45	485.86	581.14
Main steam pressure	MPa	13.43	13.76	14.15
Main steam temp.	°C	536	538	538
Total air flow rate	Nm ³ /h	387,951	468,756	553,251
Total coal feed rate	t/h	55.11	65.08	79.15

Los resultados obtenidos en este trabajo indicaron que no solo las condiciones de operación sino también el tiempo de residencia de las partículas de carbón contribuyen con la reducción de inquemados; sin embargo, este último factor afecta el quemado del carbón, pero solo cuando el quemador se encuentra en un nivel bajo. Para lo cual se recomienda primero determinar los quemadores que operan bajo condiciones pobres utilizando el análisis de CFD, con esto se procede a modificar la relación de aire-combustible de estos quemadores al variar estas condiciones de operación para aumentar el tiempo de residencia de las partículas de carbón para asegurar una combustión completa.

En base a estas investigaciones, se puede observar que el tiempo de residencia del carbón, el flujo de aire, el tamaño del carbón, y las condiciones de operación son parámetros que se deben controlar para lograr una reducción de los inquemados y a su vez, se evaluarán pretratamientos del carbón como métodos para reducir la humedad o mejorar las propiedades de combustión del carbón, procurando buscar un equilibrio entre estos, siendo puntos clave en este estudio.

4 Metodología

La metodología que se desarrolló constó de 3 fases con el propósito de cumplir con los objetivos planteados, realizando un estudio técnico útil para la central térmica CEVA de la empresa Coltejer S.A. Primeramente se realizó una conceptualización del problema, donde se identificó el proceso de generación de energía del CEVA y sus diferentes componentes mediante reconocimiento visual y verbal, y documentos de fabricantes pertenecientes a la central. A su vez, se ejecutó una revisión de históricos de los inquemados producidos diariamente en los últimos tres años, al solicitar la base de datos de estos al personal de la empresa Ahinco S.A, debido a que ellos son los encargados de monitorear diariamente la ceniza que se extrae de los silos para determinar si es óptima para su uso. Adicionalmente se realizó un monitoreo quincenal de las emisiones de gases de combustión mediante la utilización de un equipo *Bacharach* dispuesto en la central, con el fin de llevar un registro actualizado para presentar al Área Metropolitana del Valle de Aburrá en caso de ser solicitado. Al tener identificado el problema, se efectuó una búsqueda y evaluación del estado del arte referente a los procesos de generación de energía, inquemados y emisiones por medio de libros, publicaciones de revistas o artículos dispuestos en la base de datos de la Universidad de Antioquia y en páginas web.

En la fase de caracterización y análisis del proceso de combustión, se recolectó diversas variables del proceso de combustión de la caldera 4 tales como el consumo de combustible, flujo de aire primario y secundario, relación aire-combustible, flujo de gases de combustión, entre otros; las cuales, en su mayoría, se registran y almacenan constantemente en un sistema de control general de la caldera desarrollado por la empresa Soluciones Inteligentes; sin embargo, este sistema no permite la extracción de estas variables de manera remota, únicamente el consumo de carbón y producción de vapor son depositados en una base de datos de Excel, requiriendo que el almacenamiento de las demás variables haya sido ejecutado de manera manual. Además, no se realizó ninguna medición con instrumentos adicional debido a que los datos proporcionados por el sistema fueron suficientes para el desarrollo del proyecto. Con estas variables, se procedió a elaborar el desarrollo de la estequiometría del proceso para determinar el estado actual del proceso de generación de manera teórica de dicha caldera, para lo cual se hizo uso de una memoria de cálculo en el programa Excel, por medio de ecuaciones características de la combustión del carbono, azufre e hidrógeno, elementos fundamentales del carbón.

Finalmente se determinó las posibles mejorías para reducción de los inquemados que pueden implementar en la Central de Energía, Vapor y Aire de Coltejer, gracias a la información recopilada en las primeras fases, mediante el consenso entre el estado del arte y actual proceso de combustión. Se realizó un análisis técnico y económico de cada potencial determinando que porcentaje de reducción de inquemados se puede brindar cada una, y comparando el ahorro que se puede obtener con la inversión inicial que requeriría la mejora. A su vez, se planteó recomendaciones que podrían beneficiar de manera general del proceso, las cuales fueron determinadas según las necesidades observadas en la central y discusión con el personal técnico y operativo.

5 Proceso de generación de la CEVA y levantamiento de línea base.

La Central de Energía, Vapor y Aire (CEVA) de Coltejer, ubicada en el municipio de Itagüí, está compuesta de manera general de 4 calderas acuotubulares capaces de producir en total aproximadamente 470.000 lb/h de vapor, los cuales son dirigidos a 3 turbinas para generar aproximadamente 20 MW de energía y extraer vapor a diferentes presiones. Esta central térmica opera bajo un ciclo Rankine con cogeneración y regeneración, el cual comprende diferentes sistemas como el del carbón, el aire exterior, el agua de alimentación, el vapor, los gases de combustión y los condensados, los cuales se pueden apreciar de manera esquemática en la Figura 11

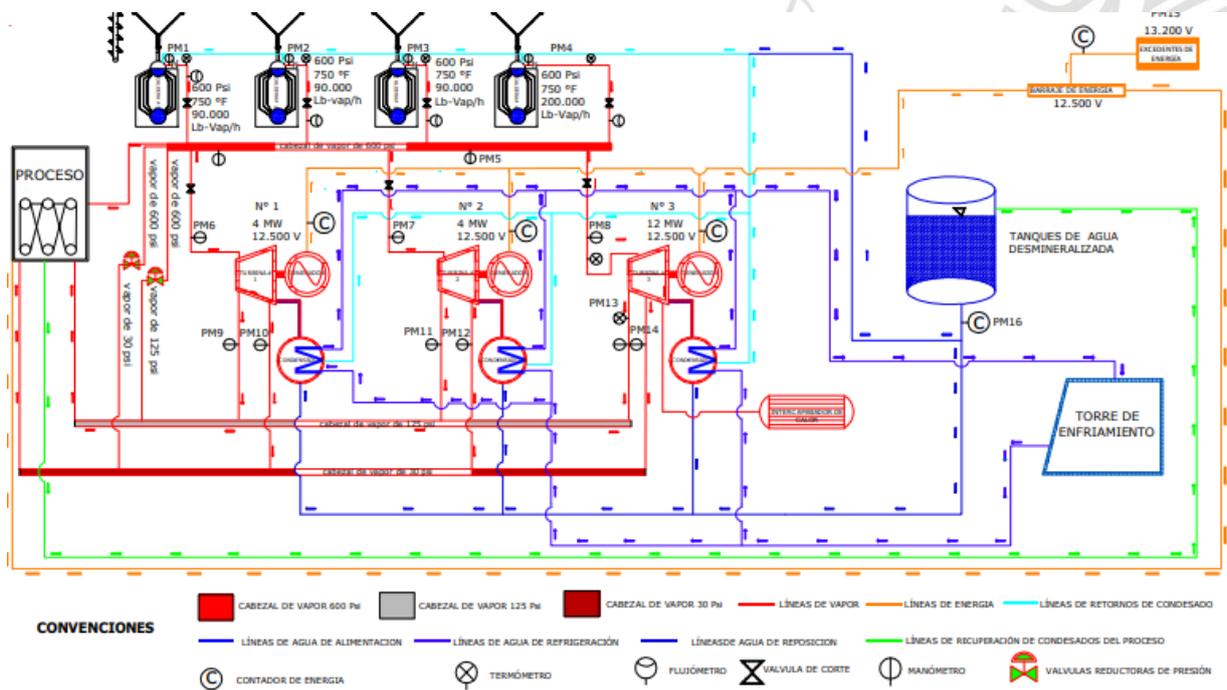


Figura 11. Esquema general de producción de energía y vapor del CEVA.

El sistema de alimentación de carbón inicia con el transporte del carbón bituminoso proveniente de la cuenca del Sinifaná hasta la zona de descarga y almacenamiento, teniendo parte de esta expuesta a las condiciones climáticas. Este carbón es transportado por medio de una retroexcavadora hasta una tolva de carga donde el carbón es llevado al triturador primario, buscando así reducir el tamaño de este hasta 1 ½ in; luego es transportado por un elevador de cangilones y una banda hasta las tolvas de cada una de las calderas en operación. Para el caso de las calderas 1, 2 y 3, el carbón desciende de las tolvas hasta un triturador secundario de martillos, disminuyendo su tamaño hasta máximo ½ in y entrar así al pulverizador, de donde es llevado a los quemadores por medio de un ventilador de succión que se encarga de llevar el carbón junto con el aire primario. Para el caso de la caldera 4, el carbón desciende de las tolvas hasta dos molinos, los cuales cumplen la misma función que el triturador secundario y pulverizador de las otras calderas, reducen el tamaño del carbón para ser dirigido por ventiladores hacia los quemadores en conjunto con el aire primario. Ambos sistemas garantizan que el carbón que ingresa por ductos a los quemadores de la caldera no tenga un tamaño superior a 150 µm.

El aire primario proviene del aire extraído del exterior por medio de un tiro forzado, el cual ingresa el aire por ductos a la caldera para pasar por un precalentamiento dado gracias a los gases de combustión en una cámara de aire; luego de este precalentamiento, el aire se bifurca obteniéndose el aire primario, que ingresa al molino o pulverizador, y el secundario, que entra al hogar con el fin de ayudar a que la combustión sea estable manteniendo una llama adecuada.

En cuanto al agua de alimentación el agua cruda proveniente de una quebrada que pasa por una planta de filtros donde le realizan un primer tratamiento. Luego, es dirigida a la planta des mineralizadora ubicada en las instalaciones del CEVA, la cual se encarga de remover minerales como el magnesio, calcio, sílice, gas carbónico y oxígeno al pasar por una unidad catódica, un desgasificador, una unidad aniónica y una torre de vacío, garantizando que el agua no tenga más de 10 ppm de oxígeno, permitiendo que la tubería se conserve y sea más fácil la evaporación. De la torre de vacío pasa a unos tanques de almacenamiento donde se juntan con condensado secundario proveniente de los procesos de planta de Coltejer, elevando la temperatura del agua para ser dirigida al tanque de retorno. En este tanque, el agua se mezcla con el condensado primario, elevando su temperatura a aproximadamente 110 °C (230 °F), para dar paso a un proceso de desaireación; este está compuesto por un desgasificador, desaireador y tanque de almacenamiento, donde se utiliza vapor para extraer el oxígeno disuelto y calentar el agua a unos 132 °C (270 °F), permitiendo almacenar ésta en un tanque. Desde este elemento, el agua es remitida a una bomba, la cual eleva la presión de esta hasta 850 psi y es dirigida a un calentador de alta presión, de dónde entra el agua con una temperatura de 177 °C (350 °F) a 850 psi a el domo superior de las calderas.

Del domo superior, el agua desciende hasta el domo inferior para luego ascender a los diferentes tubos dispuestos dentro de la caldera de manera lateral y cerca del punto de generación de gases de combustión, permitiendo que se realice la transferencia de calor de los gases al agua, dando lugar al vapor saturado. Este vapor llega hasta el domo superior, brindando más temperatura al agua de alimentación, para luego ser llevado a al sobrecalentador, del cual sale el vapor sobrecalentado a una presión de 600 psi y una temperatura de 399 °C (750 °F), ideal para ser ingresado en las turbinas y producir energía. El vapor es ingresado por medio de boquillas a los álabes de la turbina, provocando el movimiento continuo de estos; además, al pasar por las diferentes etapas de esta máquina, se tienen extracciones en la parte inferior de donde se obtiene vapor de 125 psi, 30 psi y 15 psi. En la Tabla 7 se observa la cantidad de vapor que ingresa a la turbina, vapor para cada una de las extracciones y energía eléctrica obtenida según la producción total de vapor en lb/h, teniendo en cuenta que de lo que se produce, 450 lb/h son llevadas al eyector.

Tabla 7. Cantidad de vapor de extracciones y energía eléctrica obtenida según la capacidad total producida de vapor.

<i>Producción total de vapor [lb/h]</i>		<i>Vapor extracción de 30 psi [lb/h]</i>		<i>Vapor extracción de 125 psi [lb/h]</i>		<i>Vapor que se utiliza para trabajo [lb/h]</i>	
<i>Carga</i>	<i>Vapor</i>	<i>Carga</i>	<i>Vapor</i>	<i>Carga</i>	<i>Vapor</i>	<i>Carga</i>	<i>Vapor</i>
<i>A</i>	<i>138.450</i>	<i>A</i>	<i>19.800</i>	<i>A</i>	<i>19.800</i>	<i>A</i>	<i>90.150</i>
<i>B</i>	<i>113.450</i>	<i>B</i>	<i>8.735</i>	<i>B</i>	<i>8.735</i>	<i>B</i>	<i>89.215</i>
<i>C</i>	<i>114.050</i>	<i>C</i>	<i>16.800</i>	<i>C</i>	<i>16.800</i>	<i>C</i>	<i>74.072</i>
<i>D</i>	<i>76.600</i>	<i>D</i>	<i>0</i>	<i>D</i>	<i>0</i>	<i>D</i>	<i>61.442</i>
<i>E</i>	<i>54.250</i>	<i>E</i>	<i>8.000</i>	<i>E</i>	<i>8.000</i>	<i>E</i>	<i>44.236</i>

Vapor que ingresa a turbina [lb/h]		Vapor extracción de 15 psi [lb/h]		Producción de energía [kWh]	
Carga	Vapor	Carga	Vapor	Carga	kWh
A	138.000	A	8.250	A	12.108
B	113.000	B	6.707	B	11.019
C	113.600	C	5.928	C	10.024
D	76.150	D	3.308	D	7.508
E	53.800	E	1.564	E	5.028

El vapor de 125 psi se utiliza principalmente para los procesos de tela de Coltejer, el calentador de alta presión y los sellos de la turbina 3; el vapor de 30 psi se utiliza para el desaireador y los sellos de las turbinas 1 y 2; el de 15 psi para el calentamiento de condensados. De estos vapores se obtienen 3 tipos de condensados: el condensado primario proviene del vapor que sale de la turbina y pasa por el eyector, llegando directamente al desgasificador; el condensado secundario se da como resultado de los procesos por donde pasan las extracciones de vapor de la turbina y llegan al tanque de retorno para mezclarse con el agua de alimentación; y el condensado terciario proviene del condensador de alta presión como producto del vapor de 125 psi y es llevado directamente al desaireador.

Por último, los gases de combustión generados siguen un flujo donde circular a través de la caldera siguiendo el camino de unas placas dispuestas con el fin de producir un flujo capaz de transferir calor al agua y al aire exterior, a su vez permite que las partículas más pesadas de los gases como escoria, ceniza e inquemados caigan hacia diversos colectores dispuestos en la parte inferior de la caldera para su remoción; los gases son extraídos por un ventilador de tiro inducido el cual los dirige hacia el Baghouse, el cual es un este es un dispositivo de filtros compuesto por 12 módulos los cuales albergan talegas de tela especial capaces de atrapar las partículas de ceniza más pequeña que quedan en los gases, estos gases son impulsados por otros ventiladores de succión hacia la chimenea para su expulsión. Cabe señalar que al Baghouse se le realiza ciclos de limpieza, los cuales, por medio de aire llamado aire reverso, se agitan las talegas provocando que las cenizas descendan a unas tolvas para su extracción.

Actualmente el CEVA cuenta con la caldera 1, 3 y 4 como funcionales, estando en operación la última. Las calderas 1 y 3 son de la marca *Riley Stoker Corporation* y cada una cuenta con la capacidad de producir 90.000 lb/h, mientras que la caldera 4 es de la marca *Combustion Engineering* con una capacidad de 200.000 lb/h. En la Tabla 8, se exponen las especificaciones técnicas de las tres calderas:

Tabla 8. Especificaciones técnicas de las calderas 1,3 y 4 del CEVA.

Caldera	1 y 3	4
Tipo de caldera	Acuotubular	Acuotubular
Marca	<i>Riley Stoker Corporation</i>	<i>Combustion Engineering</i>
Fecha de fabricación	1954	1960
Producción nominal de vapor [lb/h]	90.000	200.000
Capacidad máxima [BHP]	2.600	5.797
Presión de diseño [psi]	625	675
Presión de generación [psi]	600	600

Temperatura de generación [°F]	750	750
Consumo de combustible	120 [ton/día]	240 [ton/día]
Tiempo de funcionamiento (h/día, días/semana, días/año)	24 h/día, 30 días/mes	24 h/día, 30 días/mes
Frecuencia de mantenimiento	Mantenimiento general cada 18 meses, rutinas de inspección cada 6 meses.	

En la Tabla 9 se muestra las variables destacadas de la caldera, obtenidas por el software instalado en PLC de la empresa Soluciones Inteligentes; esta recoleta información son valores promedios. Cabe señalar que estos datos se pueden ver por una pantalla de PLC, pero no son almacenados en un servidor; por lo cual, si se requiere tener acceso a estos valores se debe navegar en el PLC para encontrar los registros de estos por minutos cada día.

Tabla 9. Variables destacadas en el sistema de operación de la caldera.

Variables registradas por el sistema de control	
Relación aire/combustible	8,4
Temperatura molino 1 [°C (°F)]	77(170,5)
Temperatura molino 2 [°C (°F)]	76 (168)
Flujo de aire [lb/h]	150.000
Flujo aire primario 1 - Apertura damper [%]	76
Flujo aire primario 2 - Apertura damper [%]	75
Lb/kg de carbón	16,7
Eficiencia [%]	60

En cuanto a la estequiometría, se conoce que, para el caso del carbón, el cual está compuesto de carbono, hidrógeno, azufre, entre otros componentes, se toma en cuenta los elementos que reaccionan con el oxígeno para hacer el cálculo del aire estequiométrico al plantear reacciones químicas mostradas en las ecuaciones 7,8 y 9 y la composición del carbón mostrada en la Tabla 10 para encontrar el aire estequiométrico y los productos de combustión que se obtienen. De las ecuaciones se puede afirmar que se necesitan dos moles de O para quemar un mol de C y un mol de S, y ¼ mol de O para quemar un mol de H. Con esto, se encontró la cantidad de aire estequiométrico de la siguiente manera:

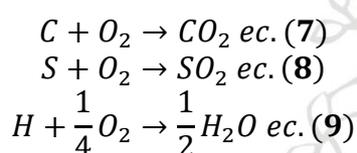


Tabla 10. Composición del carbón del CEVA.

Componente	Peso molecular	%peso
Carbono (C)	12	53,79
Hidrógeno (H)	1	4,02

Azufre(S)	32	0,55
Oxígeno(O)	15	15,78
Nitrógeno(N)	14	1,20
Cenizas	-	24,66
Humedad (H2O)	18	6,85

Inicialmente se calculó cuantos kg O se necesitan para quemar el C, S e H con los pesos moleculares de cada componente y con lo interpretado anteriormente de los moles de oxígeno que se necesitan para reaccionar, como se muestra a continuación:

$$\frac{1 \text{ kmol } O_2}{1 \text{ kmol } C} \times \frac{1 \text{ kmol } C}{12 \text{ kg } C} \times \frac{32 \text{ kg } O_2}{1 \text{ kmol } O_2} = 2,664 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg } C}$$

$$\frac{1 \text{ kmol } O_2}{1 \text{ kmol } S} \times \frac{1 \text{ kmol } S}{32 \text{ kg } S} \times \frac{32 \text{ kg } O_2}{1 \text{ kmol } O_2} = 0,998 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg } S}$$

$$\frac{\frac{1}{4} \text{ kmol } O_2}{1 \text{ kmol } H} \times \frac{1 \text{ kmol } H}{1 \text{ kg } S} \times \frac{32 \text{ kg } O_2}{1 \text{ kmol } O_2} = 7,936 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg } H}$$

Luego, se procedió a calcular los kg de O/kg de combustible utilizando la fracción en masa que tiene cada componente en el combustible y los kg de O que necesitan para reaccionar con cada uno, se sumó lo encontrado por cada componente y se le restó el O que entra como parte del carbón, con lo cual se determinó que se necesitan 1,6 kg O por kg de combustible.

$$\frac{0,5379 \text{ kg } C}{1 \text{ kg carbón}} \times \frac{2,664 \text{ kg } O_2}{\text{kg } C} = 1,433 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg carbón}}$$

$$\frac{0,0055 \text{ kg } S}{1 \text{ kg carbón}} \times \frac{0,998 \text{ kg } O_2}{\text{kg } S} = 0,055 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg carbón}}$$

$$\frac{0,0402 \text{ kg } H}{1 \text{ kg carbón}} \times \frac{7,936 \text{ kg } O_2}{\text{kg } H} = 0,319 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg carbón}}$$

$$(1,433 + 0,055 + 0,319 - 0,1578) \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg carbón}} \cong 1,6 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg carbón}}$$

Con este valor, se determinó la cantidad y volumen de aire estequiométrico utilizando la fracción másica del oxígeno en el aire y el valor de la densidad del aire a condiciones estándar (101,325 kPa y 15,6 °C) estándar, siendo de 0,23 y 1,21 kg aire/sm³ respectivamente.

$$\text{Cantidad de aire } stq = \frac{1,6 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg carbón}}}{0,23} = 6,869 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg carbón}}$$

$$\text{Volumen de aire stq} = \frac{6,869 \frac{\text{kg aire}}{\text{kg carbón}}}{1,218 \frac{\text{kg aire}}{\text{sm}^3}} = 5,641 \frac{\text{sm}^3 \text{ aire}}{\text{kg carbón}}$$

De esto se tiene que se necesitan 5,641 sm³ de aire para quemar 1 kg de carbón, si se tiene en promedio un flujo de carbón para la caldera 4 de 6.283,524 kg carbón/h, se necesita un flujo de 35.444,042 sm³aire/h para la combustión. Sin embargo, este valor del aire es estequiométrico y se sabe que el proceso trabaja con un exceso de aire. Este se calcula utilizando la *ecuación 6*, de lo cual se obtiene que el aire que deberían suministrar para un exceso de aire del 15 al 40 %, el cual es el rango previsto para carbón pulverizado, es de 49.631 a 60.420 kg/h (109.417 a 130.203 lb/h).

En cuanto a los productos de combustión, se calculó el nitrógeno que sale, debido a que de manera teórica este no reacciona con el oxígeno, al sumar el nitrógeno que entra con el aire, teniendo en cuenta que su fracción másica en el aire es de 0,77, y el nitrógeno intrínseco en la composición del carbón; a su vez, se utilizaron las *ecuaciones 7,8 y 9* para calcular cuánto de CO₂, SO₂ y H₂O se generan al quemar los componentes correspondientes, conociendo sus pesos moleculares (44, 64 y 18 respectivamente) y la fracción en masa que tiene cada componente en el combustible, teniendo en cuenta que el total de agua que sale se le suma el valor de la humedad intrínseca en la composición del carbón. Con los valores se procedió a calcular las densidades y volúmenes de cada producto de combustión a condiciones estándar, obteniendo los valores expuestos en la Tabla 11.

$$\frac{6,869 \text{ kg aire}}{\text{kg carbón}} \times \frac{0,77 \text{ kg N}_2}{\text{kg aire}} = 5,269 \frac{\text{kg N}_2}{\text{kg carbón}}$$

$$N_2 \text{ total} = (5,269 + 0,012) \frac{\text{kg N}_2}{\text{kg carbón}} = 5,281 \frac{\text{kg N}_2}{\text{kg carbón}}$$

$$\frac{1 \text{ kmol CO}_2}{1 \text{ kmol C}} \times \frac{1 \text{ kmol C}}{12 \text{ kg C}} \times \frac{44 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ kmol CO}_2} \times \frac{0,5379 \text{ kg C}}{1 \text{ kg carbón}} = 1,971 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg carbón}}$$

$$\frac{1 \text{ kmol SO}_2}{1 \text{ kmol S}} \times \frac{1 \text{ kmol S}}{32 \text{ kg S}} \times \frac{64 \text{ kg SO}_2}{1 \text{ kmol SO}_2} \times \frac{0,0055 \text{ kg S}}{1 \text{ kg carbón}} = 0,011 \frac{\text{kg SO}_2}{\text{kg carbón}}$$

$$\frac{0,5 \text{ kmol H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol H}} \times \frac{1 \text{ kmol H}}{1 \text{ kg H}} \times \frac{18 \text{ kg H}_2\text{O}}{1 \text{ kmol H}_2\text{O}} \times \frac{0,0402 \text{ kg H}}{1 \text{ kg carbón}} = 0,359 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg carbón}}$$

$$H_2\text{O total} = (0,359 + 0,0685) \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg carbón}} = 0,428 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg carbón}}$$

Tabla 11. Densidades y volúmenes de los productos de combustión estequiométricos.

Densidades			
P estándar [kPa]	101,325	R SO ₂ [kPa.m ³ /kg.K]	0,130
T estándar [K]	288,75	R N ₂ [kPa.m ³ /kg.K]	0,297

R universal [kPa.m ³ /kmol.K]	8,3145	Densidad CO ₂ [kg/m ³]	1,857
Masa molar CO ₂ [kg/kmol]	44	Densidad SO ₂ [kg/m ³]	2,704
Masa molar SO ₂ [kg/kmol]	64,066	Densidad H ₂ O [kg/m ³]	999,102
Masa molar N ₂ [kg/kmol]	28,0134	Densidad del N ₂ [kg/m ³]	1,182
R CO ₂ [kPa.m ³ /kg.K]	0,18892297		
Volúmenes			
CO ₂ [sm ³ CO ₂ /kg fuel]	1,061	SO ₂ [sm ³ SO ₂ /kg fuel]	0,004
H ₂ O [sm ³ H ₂ O/kg fuel]	0,00042	N ₂ [sm ³ N ₂ /kg fuel]	4,466
Volumen de productos secos [sm ³ /kg fuel]	5,532	Volumen de productos húmedos [sm ³ /kg fuel]	5,532

Teniendo esta línea base del proceso determinada, es importante resaltar que se obtienen residuos sólidos de la combustión real, como lo son las cenizas, las cuales presentan cierto porcentaje de inquemados, a los cuales se les realiza monitoreo todos los días. Esto con el fin de garantizar que no se tenga más de un 6 % de estos, pero este valor ha sido fluctuante a lo largo de los años y varía según el funcionamiento que están teniendo las calderas. En estos momentos, debido a la baja demanda que posee la empresa, solo está en funcionamiento la caldera 4, de la cual en los últimos tres años presentó porcentajes de inquemados mostrados en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados de inquemados del CEVA.

Año	Resultados de inquemados	
2017	Máx.	37,1%
	Promedio	5,6%
	Min.	1,6%
2018	Máx.	23,5%
	Promedio	7,6%
	Min.	2,5%
2019	Máx.	29,4%
	Promedio	7,6%
	Min.	2,7%
2020	Máx.	36,5%

	Promedio	8,4%
	Min.	1,4%

De esta se puede observar que desde el 2018, en promedio, se han obtenido valores superiores al límite, siendo vital el analizar cómo se pueden disminuir estos residuos. Dado que en muchos países del mundo se tiene esta misma problemática frente a las centrales térmicas, diversas investigaciones han obtenido resultados prometedores en la reducción de inquemados.



6 Identificación de posibles mejoras.

Como se describió anteriormente, se enfocó el análisis de las mejoras potenciales a parámetros como el tiempo de residencia del carbón, los pretratamientos del carbón, el tamaño de partícula y el flujo de aire, detallado a continuación.

6.1 Tiempo de residencia del carbón.

De acuerdo con la teoría de combustión, la temperatura de la cámara de combustión, la concentración de oxígeno y el tiempo de combustión son parámetros fundamentales que influyen directamente en la presencia de inquemados en el proceso de combustión del carbón, siendo este último el cual garantiza que las partículas tengan el tiempo suficiente para que se quemara de manera adecuada [28]. En las calderas, el tiempo de residencia normalmente empleado en el hogar para lograr una buena combustión está ente 1 a 2 segundos, como se ve en la Figura 12; sin embargo, existen hogares relativamente cortos lo cuales presentan tiempos de residencia más cortos del deseado, siendo el tamaño un parámetro fundamental.

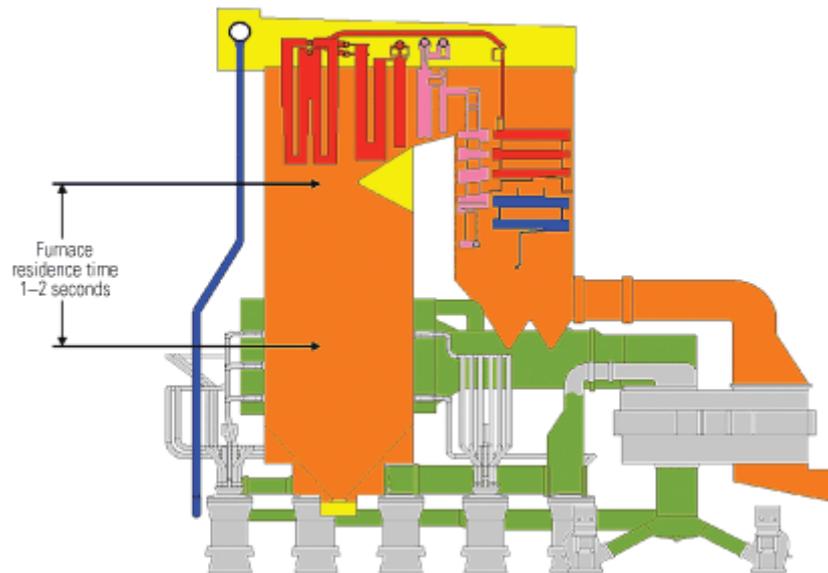


Figura 12. Tiempo de residencia del carbón en calderas [29].

A su vez, este rango de tiempo ideal puede no ser suficiente para que el aire y el combustible migren de las zonas ricas en combustible a las ricas en aire, y se mezclen hasta lograr relaciones teóricas óptimas de aire y combustible para así quemarse completamente [29]. En otras investigaciones, definen como el tiempo de residencia propicio para la combustión de las partículas de carbón entre 1 a 3 segundos, pero este dependerá de la configuración de la combustión y del tipo de carbón a utilizar [30]. J.Zheng y H.He [28] establecen que es posible para las partículas de carbón quemarse completamente con un tiempo de residencia igual o mayor al necesario para su quemado; así como, definieron factores que influyen en este tiempo para partículas finas de carbón antracita en una caldera de lecho fluidizado circulante (CFB- *Circulating fluidized bed*), como lo son la altura del hogar, la velocidad de los gases de combustión en el hogar, la eficiencia de separación en los ciclones, el requemado de la ceniza volante y el tamaño de partícula.

La altura del hogar entre más alta sea, el tiempo será mayor, aumentando la posibilidad de la partícula en quemarse completamente; también encontraron que, para calderas de pequeño

volumen con un hogar de altura limitada, se tiene un rango de diámetros de partículas que es difícil de quemar, incluidas aquellas cuyo diámetro es inferior a $70\ \mu\text{m}$, donde la mayoría no puede ser separadas por el ciclón y devueltas al hogar para su combustión, provocando un mayor contenido de carbono en cenizas volantes. Sin embargo, a medida que el volumen de la caldera aumenta, el hogar aumenta, provocando que el rango de diámetros de las partículas que no puede quemarse en un tiempo determinado a través del hogar se reduzca. Otro factor importante es la velocidad de los gases de combustión, el cual, al aumentar, reduce el tiempo de residencia de las partículas finas de carbón, ocasionando un aumento en el contenido de carbón en la ceniza volante.

La eficiencia de separación del ciclón puede ser aumentada al reducir el tamaño de corte del ciclón (cut-off size), aumentando de esta manera la cantidad de partículas finas capturadas, y prolongando su retención y tiempo de combustión en la zona de alta temperatura del hogar, conduciendo a una mayor eficiencia de combustión y reduciendo el contenido de carbón en la ceniza volante. En cuanto al requemado de cenizas volantes, este puede prolongar el tiempo de residencia de aquellas partículas de carbón sin quemar en la zona de alta temperatura, lo cual beneficia la reducción de inquemados; esto se comprobó mediante un experimento realizado en una caldera CFB con antracita, donde se moduló la alimentación de ceniza en el hogar de 0 a 400 r/min a condiciones constantes de flujo y temperatura de vapor, presentándose una disminución del 37,56 % al 21,68 % del carbono en las cenizas volantes, comprobando que con mayor flujo de regeneración de ceniza se logra una reducción considerable de inquemados. El tamaño de partícula fue evaluado en un estudio experimental sobre la caldera CFB donde se comprobó al aumentarlo de 1,05 a 2,17mm, el contenido de carbón en la ceniza volante disminuyó de un 45 % a un 30 %. A pesar de que cada uno de estos factores fueron evaluados específicamente para calderas CFB que utilizan antracita, se puede evaluar su influencia en una caldera acuotubular que utilice carbón sub-bituminoso.

Otra opción para el aumento del tiempo de residencia del carbón es la planteada por H. Wan et al. [31], los cuales realizaron simulaciones CFD a una caldera con una capacidad de 70.000 kg vapor/h (154.323 lb/h) para observar el comportamiento que tiene al implementar un sistema de requemado de carbón mediante inyectores con el fin de reducir emisiones de NOx e inquemados. La caldera posee 4 quemadores, dispuestos de 2-2 en la pared frontal de la caldera a una elevación de 10,4 m y 12,2 m respectivamente; el carbón requemado era inyectado a través de 6 puertos a una elevación de 13,4 m, con dos puertos en la parte frontal y 4 en la posterior de la caldera. A su vez, se tenían 6 puertos OFA, 4 en la parte frontal a una elevación de 15,4 m y dos a los costados con un ángulo de 15° a una elevación de 14,7 m; esta configuración se puede apreciar en la Figura 13, así como la producción de inquemados en cada componente como modelo base de investigación. La composición del carbón utilizado está expuesta en la Tabla 13.

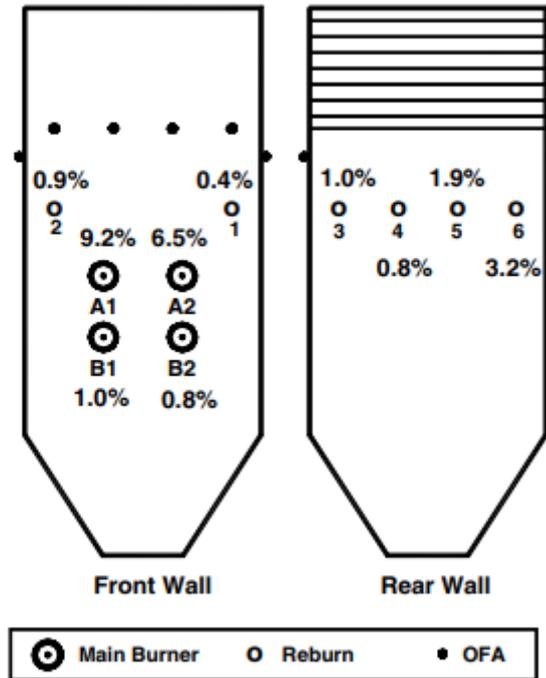


Figura 13. Configuración inicial de los quemadores, inyectores y OFA en la caldera con porcentajes de inquemados bases [31].

Tabla 13. Composición del carbón para simulación [31].

Componente	%Peso
Carbono (C)	53,79
Hidrógeno (H)	4,02
Azufre(S)	0,55
Oxígeno(O)	15,78
Nitrógeno(N)	1,20
Cenizas	24,66
Humedad (H ₂ O)	6,85
Poder calorífico [kcal/kg fuel]	6670

De este modelo base, se simularon 3 casos (A, B, C) donde cambiaban diferentes parámetros de la combustión base como la relación estequiométrica en los quemadores y en los inyectores, el flujo de aire secundario en los quemadores, el flujo de carbón en la zona de requemado, el porcentaje de carbón requemado, y el flujo de aire en los OFA; cabe señalar que el flujo de aire en los inyectores permaneció constante, utilizándose 1,2 kg/s. Como resultado se identificó al caso C como el que menor presencia de inquemados en la ceniza volante tiene, siendo esta de 13,7 wt%, equivalente a una reducción de inquemados del ; este caso presentaba condiciones de operación similares a los de B, difiriendo principalmente en la distribución de aire secundario en los quemadores, siendo esta una posible razón al alto contenido de inquemados proveniente de los quemadores en el caso B, a diferencia del C, el cual se obtuvo el menor valor de estos en la misma zona.

Para el caso del CEVA, es importante aclarar que la altura del hogar y la reducción de corte del ciclón son cambios no factibles o indeseados en estos momentos; sin embargo, en futuros proyectos se podría evaluar estas opciones con más detalle.

6.2 Pretratamiento del carbón.

El carbón, según su tipo y manera de almacenamiento puede presentar ciertas características no muy beneficiosas para su uso en procesos industriales, como lo son la humedad, bajo poder calorífico, presencia alta de cenizas, entre otros. La presencia de la humedad en el carbón causa una reducción en su friabilidad, siendo más complejo su control, reduciendo la calidad de la molienda y dificultado el transporte, separación y clasificación del carbón pulverizado; pudiéndose presentar en la superficie, en los poros e intersticios de las partículas [32]. El contenido de humedad permitido para el carbón dependerá del proceso donde será utilizado, ya sea para coquización, fabricación de briquetas, hidrogenación, gasificación, combustión en calderas, entre otros, como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 14. Contenido de humedad admisible en diferentes procesos industriales [32].

Procesos	% Humedad
Antracita	
Coquización (basado en el método de embestida).	8 a 12
Coquización (basado en el método de carbonización).	<8
Fabricación de briquetas.	<4
Carbonización a baja temperatura.	Aprox 0
Hidrogenación.	Aprox 0
Combustión de carbón en horno de carbón pulverizado.	<2
Lignito	
Fabricación de briquetas.	8-18
Gasificación.	5-15
Carbonización a baja temperatura.	<15
Hidrogenación.	Aprox 0
Combustión de carbón en horno de carbón pulverizado.	12-15

Por esto, el secado y precalentamiento del carbón son de gran importancia para su combustión, debido al relativamente bajo costo de inversión que requiere con el fin mejorar el proceso a un 30 a 50 % con el precalentamiento y un 10 a 15 % en el secado. Dado que la mayor cantidad de humedad en el carbón se concentra en los poros e intersticios, es necesario realizar un proceso de transferencia de calor y masa, es decir, un secado térmico del carbón. Según Joseph W. Leonard, disminuir la humedad del carbón un 1 % puede incrementar aproximadamente un 0,1 % de su eficiencia térmica, reduciendo su contenido de ceniza en un 4 %. Treybal muestra una curva típica de secado del carbón, como se observa en la Figura 14,

donde del punto 1-2 se aumenta la temperatura del carbón y empieza una pequeña disminución de la humedad, de 2-3 se tiene una velocidad de secado constante y se nota una leve variación en la temperatura y de 3-4 se presenta una disminución de la velocidad de secado y un aumento de la temperatura del carbón. De estos puntos el más importante es el 3 debido a que define la humedad crítica, la cual es de vital importancia para reconocer la región donde opera el secado constante, permitiendo controlar la operación; por ejemplo, si un carbón se seca muy lentamente, se puede producir un valor bajo de humedad crítica, mientras que este mismo carbón si se seca a altas temperaturas, este valor aumenta [33].

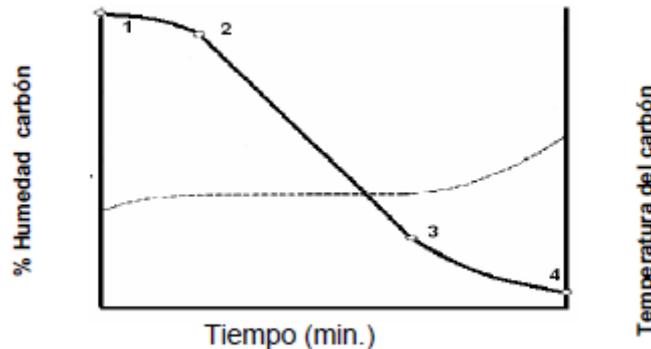


Figura 14. Curva de secado del carbón [33].

Existen diferentes equipos de secado los cuales se clasifican según el método de operación, ya sea continuo o discontinuo, o según el método de secado, como directos o indirectos. Las tecnologías más utilizadas para el secado del carbón son: secadores rotativos, neumáticos, de lecho fluidizado, de lecho fluidizado vibratorios, de eje y de molinos; siendo para el carbón de Coltejer los más adecuados, por la disponibilidad que se tiene de recurso como vapor o gases de combustión como medio de secado [32], los siguientes:

- **Secador rotativo:** Estos secadores son utilizados en muchas plantas industriales, utilizándolos en modo co-corriente para evitar la posibilidad de ignición, ya sea con aire caliente o gases de combustión producidos por la combustión del carbón. En la Figura 15 se puede observar diversas partes de un secador rotativo, donde el componente principal de este secador es la carcasa de acero (3) revestida con un revestimiento refractario y montado sobre rodillos (7) mediante vendajes (aros, 10) ubicados en la carcasa la cual rota utilizando un engranaje dentado (5); el secador suele ser ubicado con una inclinación de 2° a 5° con respecto a la horizontal. Dentro de la carcasa hay elevadores sujetos en el interior los cuales levantan los gránulos de carbón y los rocían gradualmente en el interior de la carcasa en el sentido de la corriente del fluido térmico que se utilice; a su vez, los extremos de la carcasa están sellados laberínticamente a los cabezales de entrada y salida. Los gases de combustión que salen del secador llevan partículas de carbón, siendo hasta el 15 % del carbón ingresado, y son llevados a un sistema de limpieza de gases. Las pérdidas finales de carbón dependerán del tipo de equipo que se usa para la limpieza de gases de combustión y no son superiores del 0,5 a 1,5 %.

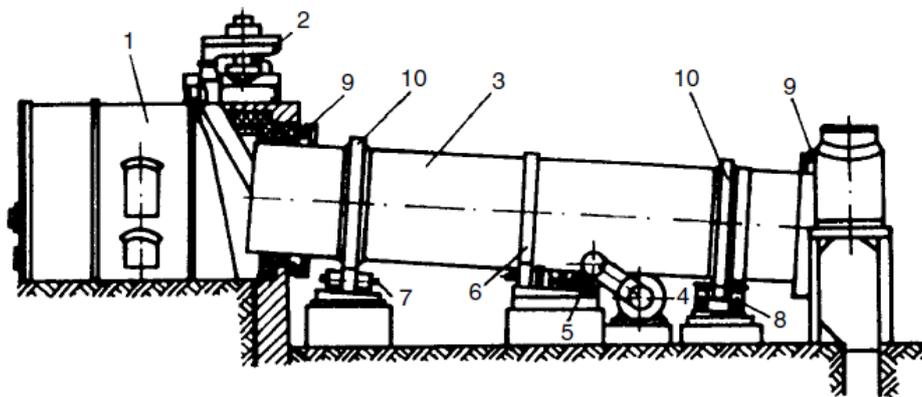


Figura 15. Esquema típico de un secador rotativo [33].

Usualmente la carcasa de estos secadores puede tener una longitud entre 12 a 30 m o más y un diámetro de 1,5 a 3,5 m; la potencia del motor encargado del movimiento rotacional depende de las dos dimensiones mencionadas anteriormente, como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 15. Potencia del motor según la longitud y diámetro del secador [32].

D [m]	L[m]	Motor Power [kW]
1,5	8	8
1,8	12	14
2,2	12 a 14	17 a 20
2,8	12 a 14	28 a 35
3,2	18	75
3,5	27	120

Como datos generales de los secadores rotativos, se tiene que consumen cerca de 3.700 kJ/kg H₂O, tardando el secado entre 15 a 40 min con una velocidad de los gases de combustión entre 2 a 3 m/s para el secado de carbones finos derivados del lavado y no más de 0,5 a 1 m/s para los concentrados post flotación para evitar el arrastre excesivo de carbón. En la Tabla 16 se puede observar cómo cambia la humedad y la temperatura antes y después del proceso de secado, así como la tasa de secado según el tipo de carbón a tratar.

Tabla 16. Parámetros del secador rotativo según el tipo de carbón [32].

Coal type	Coal Moisture		Heating Medium Temperatura [°C]		Drying rate per Unit Volume, Nv [kg/m ³ h]
	Before Dryer	After Dryer	Before Dryer	After Dryer	
Hard coal	9	0,6	900	60	35-40
Fine coal mixed with postflotation concentrate	17	5	740	110	93

Postflotation concentrate	22	5	770	105	116
High-ash mud, grain size 0-2 mm	30	1	750	120	120

- Secador de tubo rotativo: Este tipo de secador utiliza secado indirecto con vapor saturado a presiones entre 0,15 a 0,55 MPa, usados ampliamente para el secado de lignito en plantas de fabricación de briquetas, aunque también es utilizado para el secado del carbón antracita. De manera general, como se ve en la Figura 16, está compuesto por un tambor inclinado (1) el cual en sus paredes perforadas tienen tubos con diámetros entre 102 a 108 mm sin costura dentro de él (2). El vapor caliente entra al secador a través del pin (3) y la carcasa gira en anillos especiales (6) y rodillos (7), siendo impulsado por transmisión de potencia (8) mediante una rueda dentada (9). Debido a la inclinación y rotación del tambor, el carbón es desplazado gradualmente a través los tubos calientes desde la entrada a la salida; en estos tubos están instaladas guías de tornillo las cuales controlan el desplazamiento del carbón. El carbón secado sale al pasar por una cámara (5), el vapor sale de manera ascendiente y el vapor condensado es drenado por medio de un pin ubicado en la parte posterior del tambor.

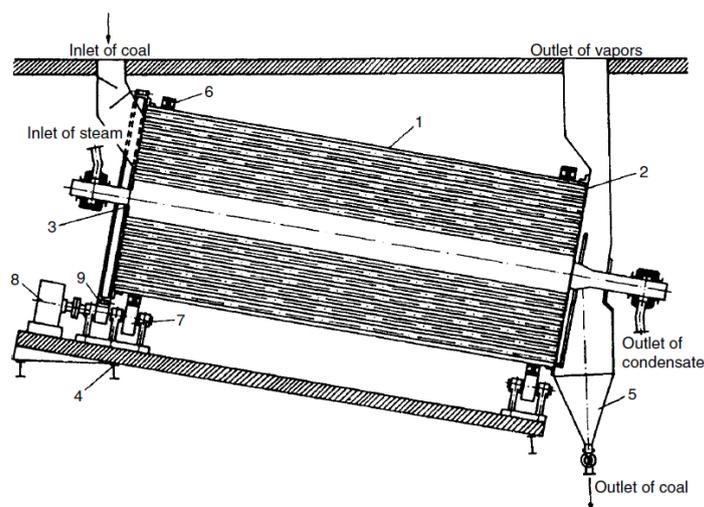


Figura 16. Esquema general de secador de tubo rotativo [32].

En la siguiente tabla se puede apreciar datos técnicos relevantes de estos secadores:

Tabla 17. Datos técnicos generales del secador de tubo rotatorio [32].

Technical data of rotary-tube dryer	
Diameter D [mm]	2.500, 2.800, 3.130, 3.350, 3.750 y 4.000.
Length L [m]	7 a 8
Angle of inclination alfa	Aprox. 8
Speed of rotation n [RPM]	5 a 9
Drying rate per unit exposed surface Nf [kg/m ² h]	5,4 a 8
Temperature of vapor [°C]	90

Coal temperature at outlet [°C]	80
Heat consumption [kJ/kg H ₂ O]	2.950 a 3.100
Dust content in vapor in dryin of brown coal [g/m ³]	25

- Secador neumático: Este tipo de secadores son utilizados ampliamente para el secado de carbón y concentrados flotantes, diseñados comúnmente con diámetros del tubo vertical de 650 a 1.100 mm y una longitud de 14 a 35 m, por donde pasa el fluido caliente (gases de combustión o aire) de arriba abajo, como se puede ver en la Figura 17. En esta imagen se puede observar una instalación típica de este secador, donde el carbón húmedo desde cámara (11) es alimentado (12) al tubo de levantamiento (5) y arrastrado por los gases de combustión derivado de la combustión del carbón en la caldera u horno (2), dando lugar al secado del carbón. Luego, el carbón seco es separado de los gases en el ciclón (6) y en el banco de ciclones (7) mediante un ventilador de succión (8), para ser llevado a un transportador (10) gracias a válvulas de cierre (15,16) ubicadas en la parte inferior de los ciclones. Las partículas más pesadas de carbón que caen de (5) son dirigidos al alimentador (10) por un tornillo (9).

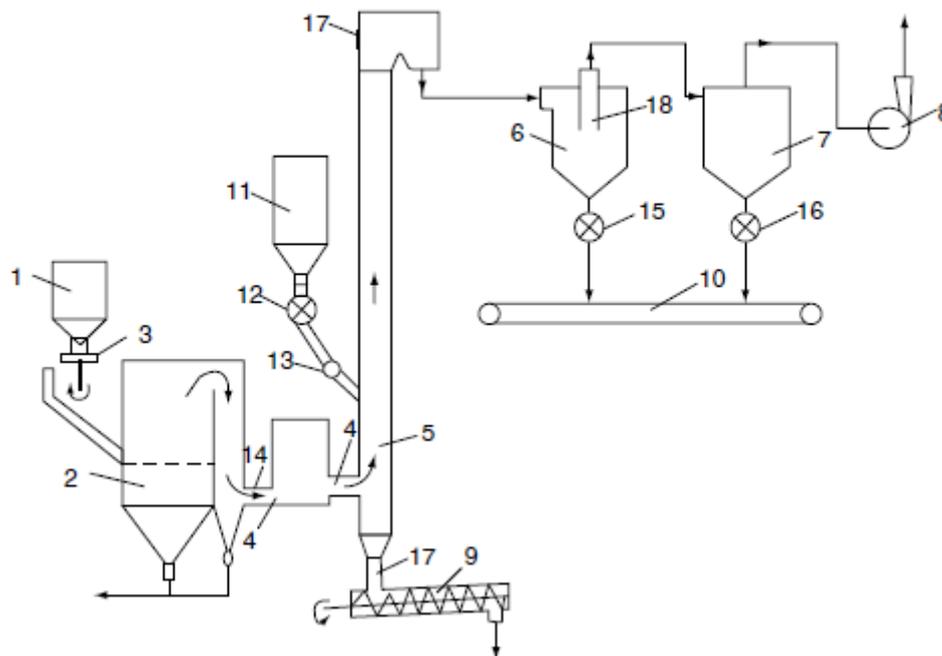


Figura 17. Esquema general de secador neumático [32].

Para estos sistemas la velocidad del gas de secado depende del tamaño de grano del carbón, pudiendo presentarse entre 10 a 40 m/s. En secadores comerciales, se instala un desintegrador en la base del tubo de levantamiento (5) con el fin de triturar y secar trozos de carbón húmedo; con este dispositivo se logra remover el 50 % la humedad del carbón, generándose la mayor etapa de secado a 2 o 3 m en el secador. La longitud del tubo de levantamiento no debe exceder los 35 m y su capacidad dependerá del diámetro, como se muestra en la Tabla 18; a su vez, la alimentación de carbón debe estar situada de 4 a 6 m por encima de la entrada de gases.

Tabla 18. Capacidad del secador según el diámetro. [32]

Diameter [mm]	700	830	900	1100
Capacity [Mg/h]	20-35	30-55	40-65	50-75

Otro pretratamiento que se puede efectuar es la adición de aditivos, los cuales modifican las propiedades de combustión del carbón, incrementando la eficiencia del proceso. Chavda, R., & Mahanwar, P [34] realizaron un estudio sobre los efectos que tienen los aditivos orgánicos e inorgánicos en el carbón; por ejemplo, determinaron que los efectos de las sales de los metales alcalinos, alcalinotérreos, tierras raras y metales de transición resultan ventajosos ya que dan un efecto catalítico en el carbón, el cual aumenta la reactividad de la combustión por la disminución de la temperatura de ignición y el aumento de la velocidad de combustión, mejora el quemado del carbón en las cenizas, acelera la liberación de calor del carbón y reduce la emisión de contaminantes. A su vez, con el fin de evitar la ignición a bajas temperaturas en las minas o lugares de almacenamiento del carbón, se han utilizado aditivos como sales de metales alcalinos y metales alcalinotérreos que proporcionan un efecto retardador; además, una adecuada selección de aditivos también ayuda a reducir la contaminación ocasionada por las emisiones de gases nocivos como SO₂, NO_x, CO y CO₂.

En la Tabla 19, se puede observar los estudios realizados a carbonos sub-bituminosos, tipo de carbón que atañe a este trabajo debido a que es el utilizado en el CEVA, agregándoles aditivos inorgánicos. En cada uno se utilizó diferentes catalizadores y fracciones de estos, obteniendo buenos resultados en cuanto a la combustión, presentando un incremento en la reactividad de oxidación intrínseca, un aumento en la temperatura de combustión y una buena eficacia de inhibición a baja temperatura.

Tabla 19. Estudios sobre la aplicación de aditivos inorgánicos en los parámetros de combustión del carbón sub-bituminoso [34].

Summary on studies of inorganic additives on sub-bituminous coal combustion parameters.				
Research group/reference	Form/amount of catalyst addition	Catalyst reported	Instrumental Analysis	Remark on combustion behavior.
Gopalakrishnan and Bartholomew (1996).	Solution.	CaO	TGA	Intrinsic oxidization reactivity increased.
Taraba, Peter and Slovák (2011).	Solution/ 10 wt%.	NaCl, KCl, CaCl ₂ , Na ₂ SO ₃ , NaNO ₃ , NH ₄ Cl, NaOOCCH ₃ , NaOOCH, EDTA, urea, thiourea, phenol, NaH ₂ PO ₄ .	Calorimetric analysis.	Almost all showed good inhibiting efficiency at low temperature.

Shui-Jun et al. (2012).	Solutions .	Ammonia-free Gel 2, MgCl ₂ and Antioxidant A.	Advanced gas analyzer PG-250A.	Improvement in spontaneous inhibition.
Daood et al. (2014b).	Physical/ 5, 15, 33%.	Iron, aluminum, and silicon-based oxides.	TGA/DTG	Increase in combustion temperature.

En cuanto a los aditivos orgánicos se realizó diversas investigaciones, entre estas está la mezcla de carbón y biomasa en forma de briquetas, la cual mostró mejoras en las propiedades de combustión; otros autores probaron una mezcla de dos carbones, como el lignito y bituminoso, con y sin aglutinantes tales como desechos de las fábricas de papel, cáscara de girasol, el aserrín y desechos de cervecería, con la cual se pudo identificar un aumento en el poder calorífico; además, Ford (1996) describió una composición aglutinante que comprendía poliestireno y un solvente higroscópico (metiletilcetona) el cual proporciona un combustible de alto poder calorífico para uso doméstico y comercial fines, que da una combustión limpia y no contamina el medio ambiente; entre otras investigaciones.

Cabe señalar que en los estudios planteados en el artículo de Chavda, R., & Mahanwar, P [34], no se reconoce concretamente el uso del carbón bituminoso, mostrándose resultados para aquellos con antracita y lignito. A su vez, debido a la gran variedad de carbón en el mundo, cuyas composiciones y características de combustión son diferentes, ningún aditivo específico proporcionará un rendimiento general, siendo necesaria la realización de pruebas específicas para comprobar que determinado aditivo sea funcional para el carbón a utilizar.

6.3 Tamaño de partícula

En los diferentes procesos industriales que utilicen carbón, es importante tener en cuenta la granulometría de este debido a que este factor determina las características fisicoquímicas de las emisiones que se puedan generar por su combustión. Por esto, antes de que este combustible entre a los quemadores, se realiza un proceso de molienda y pulverización, ya sea utilizando trituradores y pulverizadores o molinos, capaces de reducir el tamaño del carbón hasta unidades micrométricas [35].

El tamaño contribuye en las etapas de la combustión; por ejemplo, en la desvolatilización, la temperatura de la superficie aumenta rápidamente cuando las partículas de carbón salen del quemador, debido a la transferencia de calor por radiación y convección de los gases. A su vez, durante el calentamiento, la materia volátil se desprende y se quema alrededor de la partícula, siendo la velocidad de esta etapa y la pérdida de volátiles íntimamente relacionadas con el tamaño de la partícula. En 1989, Knill et al. realizaron un proceso de calentamiento carbón bituminoso con alto contenido de volátiles a una temperatura de 100 °C en una atmósfera reductora; este estudio concluyó que las partículas con un tamaño menor de 70 µm se desvolatilizan en 25 ms y las de 150 µm necesitan entre 50 y 80 ms, lo cual se puede presentar debido a que las partículas de mayor tamaño poseen problemas de transporte y difusión de los volátiles. En cuanto a la combustión del char, la velocidad de esta etapa y el contenido de volátiles también son influenciados por la granulometría, donde los carbonos con alto contenido de volátiles tienen velocidades más grandes en comparación con los de contenido bajo-medio; el descenso de esta velocidad probablemente se presenta porque el contenido de carbono va disminuyendo y porque la ceniza generada por una partícula la

recubre de tal forma que el oxígeno tiene buen contacto con la partícula en la combustión [35]

En un estudio realizado por Vanegas et al. analizaron el tamaño de partícula y la separación gravimétrica en la composición petrográfica, las propiedades fisicoquímicas y el comportamiento de la combustión de carbón mezclado con material inerte bajo condiciones isotérmicas y no-isotérmicas; en este se identificó que las fracciones de menor tamaño presentaron mayores cantidades de ceniza, diferente a las de mayor tamaño que mostraron alta presencia de volátiles y carbono fijo [36]. En el caso del CEVA, el carbón es triturado y pulverizado por medio de molinos de la marca C.E Raymond B.Mill, ya que el carbón ingresa hasta llegar a una placa giratoria donde tres masas disminuyen el tamaño del carbón, de lo cual se obtienen un tamaño de partícula que en su mayoría pasa la malla 200, correspondiente a 74 μm , considerándose un tamaño adecuado para la combustión; sin embargo, si se desea optimizar la combustión, se debería realizar un cambio ya sea en los molinos que se utilizan actualmente, como lo realizaron S. Ataş et al. [26] al variar el diseño del clasificador para obtener una mejor distribución de partículas al interior del quemador con un flujo adecuado, o adquirir molinos con mejor tecnología, con el cual se podría tener más control del tamaño y del flujo de aire, el cual se tratará en el siguiente ítem.

6.4 Flujo de aire

En el proceso de combustión el oxígeno actúa como oxidante de los combustibles, lo cual requiere una mezcla aire/combustible adecuada y uniforme en la zona de combustión para que cada partícula de combustible tenga aire alrededor, obteniendo una correcta reacción [37]. Existen dos tipos de combustión, ideal y real, donde en la ideal la cantidad de aire es calculada de manera teórica para conocer que tanto debe ingresar para consumir el combustible [38]; sin embargo, en una combustión real es muy difícil que el carbón reaccione completamente con la cantidad de aire estequiométrico debido que el combustible y comburente no son puros y las condiciones de combustión no son las más idóneas dando lugar a pérdidas en el proceso, siendo necesario otra cantidad de aire; dentro de esta se puede presentar una combustión completa o incompleta, las cuales pueden ocurrir con o sin exceso de aire. El exceso de aire dependerá del tipo de carbón que se tenga para la combustión, siendo los expuestos en la Tabla 4 los recomendados.

En la Figura 18 se puede observar los reactivos, siendo estos los componentes del carbón y el aire, y los productos que se obtienen según el tipo de combustión; en una combustión completa estequiométrica se obtiene únicamente los productos de color verde (CO_2 , SO_2 , H_2O y N_2), en una combustión completa con exceso de aire los productos serían los de color verde y el de color azul (O_2), si la combustión es incompleta se obtiene los productos de color verde y el de color rojo (CO) y en una combustión incompleta con exceso de aire se obtiene los productos de color verde, el de rojo y el azul [39].

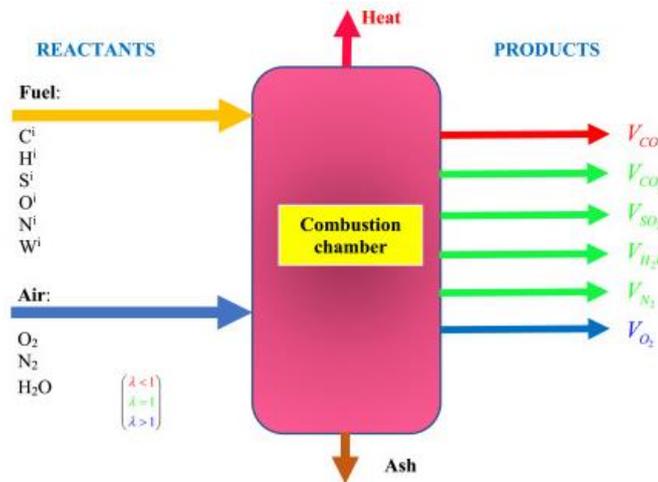


Figura 18. Combustión del carbón[39].

Debido a la necesidad de las entidades gubernamentales sobre las emisiones, las calderas industriales suelen tener analizadores de gases de combustión con monitoreo continuo para identificar el estado de la combustión en tiempo real y tomar medidas según esto; de los elementos más importantes son los analizadores de oxígeno ya que son los encargados de medir el % O_2 a la salida de la caldera ya que define en concreto cuanto de ese aire en exceso no se está utilizando, y al compararlo con los gases de combustión, se evidencia que tan bueno es el flujo de aire para la combustión. Los resultados obtenidos de estos analizadores deberían ser cuidadosamente monitoreados y registrados para tener algún soporte ante alguna entidad ambiente; a su vez, es fundamental que los operarios sepan identificar si el sistema está presentando pérdidas al leer las medidas que estén dando los analizadores, para así actuar en consecuencia y realizar un funcionamiento óptimo en la caldera [37].

Para el caso del CEVA, el flujo de aire empieza desde el tiro forzado, el cual succiona aire exterior para la combustión. Este primero para por un proceso de precalentamiento al entrar a un economizador o caja de aire para ser dividido en aire primario, el cual se dirige a los molinos, y aire secundario, el cual entra a la caldera. La cantidad de aire exterior no es medida de manera precisa por falta de instrumentación y su bifurcación se realiza por medio de dampers, donde la apertura de estos depende de las condiciones del molino; en los molinos se mezclan aire primario con el carbón, realizando un secado de este para ser dirigidos a los quemadores. La operación o el funcionamiento general de la caldera es manejado por un sistema de control PLC, el cual permite visualizar variables como los kilogramos de carbón, las libras de vapor producidas, el porcentaje de oxígeno de la caldera, el porcentaje de apertura de los dampers de aire primario y secundario, las temperaturas de los molinos, entre otros; el sistema analiza cada variable con el fin de tener un modo de operación adecuado. Sin embargo, el control del flujo de aire que ingresa a la caldera es controlado principalmente por la temperatura que debe albergar los molinos, siendo esta de aproximadamente entre 66 a 82 °C (150 a 180 °F), con el fin de garantizar el secado del carbón sin que se auto encienda. Esta metodología no garantiza que la relación aire-combustible y el exceso de aire sean estables e inclusive sean los más idóneos para la combustión del carbón. Además, no se cuenta con un sistema de monitoreo continuo de gases de combustión, pero si con un analizador de oxígeno ubicado a la salida de la caldera, teniendo el medio para saber cuánto oxígeno no se quema pero no que tan buena es la combustión. Por esto, se plantea la posibilidad de implementar un molino con la tecnología capaz de ingresar el aire no solo respetando la temperatura sino

también el flujo de aire; a su vez, se evaluará la implementación de un sistema de monitoreo continuo de gases de combustión, debido a su importancia anteriormente mencionada. Con estos parámetros definidos, se procede a realizar el estudio de las opciones con mayor potencial de cada uno de ellos, así como definir recomendaciones que pueden implementar para obtener una reducción de los inquemados.



7 Análisis técnico de las mejoras potenciales seleccionadas

Antes de plantear la selección y análisis de las mejoras, es importante identificar las pérdidas económicas que representa la presencia de los inquemados producidos en la caldera 4 del CEVA a la empresa, con el fin de ver el impacto que puede generar la reducción de estos. Para esto se tuvo en cuenta el % en peso de la ceniza intrínseca del carbón expuesto en el análisis último, el carbón promedio alimentado a la caldera de los últimos cinco meses de operación, el precio de venta del carbón y el porcentaje de inquemados. Para los cálculos correspondientes para conocer cuánto dinero se pierde por cada 1 %, expuestos a continuación, se determinó la cantidad de ceniza que se produce por hora, dado que el 24,66 % del carbón será ceniza, y el 1 % de la ceniza son inquemados, por ende, se obtiene cuantos kg/h de inquemados se tienen del proceso; con este valor y sabiendo que el precio de venta del carbón a la central es de 150.000 COP/ton.

$$\begin{aligned}
 \text{Ceniza} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] &= 6.283,5 \frac{\text{kg carbón}}{\text{h}} * 0,2466 \frac{\text{kg ceniza}}{\text{kg carbón}} \\
 \text{Ceniza} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] &= 1.549,5 \\
 \text{Inquemados} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] &= 0,01 * 1.549,5 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \\
 \text{Inquemados} \left[\frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] &= 15,495 \\
 \text{Pérdidas por Inquemados} \left[\frac{\text{COP}}{\text{h}} \right] &= \frac{15,495 \text{ ton}}{1000} \frac{\text{ton}}{\text{h}} * 150.000 \left[\frac{\text{COP}}{\text{ton}} \right] \\
 \text{Pérdidas por Inquemados} \left[\frac{\text{COP}}{\text{h}} \right] &= 2.324,3
 \end{aligned}$$

En la Tabla 20 se evidencia los resultados deseados, donde se determina que por cada 1 % de inquemados en la ceniza se pierde 2.324 COP/h. De esto se puede afirmar que, en el 2020, al presentar un promedio de pérdidas en los inquemados del 8,4 %, se perdió 468.574 COP al día (171'029.505 COP al año).

Tabla 20. Cálculo de pérdidas económicas por inquemados.

Cálculo de pérdidas económicas por inquemados			
Ceniza [kg/kg carbón]	0,2466	Inquemados [%]	1%
Carbón total [kg carbón/día]	150.804,6	Inquemados [kg/h]	15,495
Carbón hora [kg carbón/h]	6.283,5	Precio del carbón [COP/ton]	150.000
Ceniza [kg/h]	1.549,5	Pérdidas por inquemados [COP/h]	2.324,3

Con los resultados obtenidos anteriormente, se procedió a realizar el debido análisis técnico de las potenciales mejoras que se pueden implementar para la disminución de los inquemados y optimización del proceso de combustión en la caldera 4 del CEVA, planteadas de manera más detallada a continuación.

7.1 Mejoras potenciales seleccionadas

7.1.1 Requemado del carbón y puestos OFA

Se seleccionó evaluar esta posibilidad de las planteadas en la sección de mejoras para el tiempo de residencia de la partícula debido a que es una opción factible. Para la implementación de este sistema se necesitaría la instalación de inyectores de carbón y puertos OFA, con el fin de lograr las tres zonas de combustión características de esta tecnología, como se ven en la Figura 19.

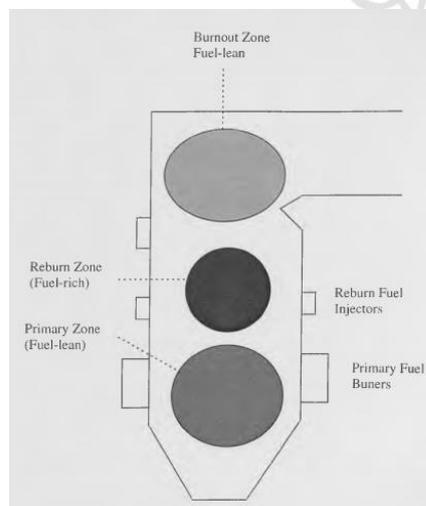


Figura 19. Configuración del requemado en caldera [40].

En la primera zona, donde estarían posicionados los quemadores, el combustible se quema bajo condiciones de combustible pobre con una relación estequiométrica baja (1,05-1,10) debido a que esto permite que el tiempo de residencia y la temperatura de llama aumenten; también se recomienda utilizar en esta zona del 80 - 90 % de combustible y el resto salgan por la zona de requemado. La zona de requemado opera bajo condiciones de combustible rico con relaciones estequiométricas del 0,8 a 0,9; sin embargo, esto es una recomendación ya que en otros estudios se ha encontrado valores de hasta 0,7 o 0,94. Cabe resaltar que es posible utilizar gas y otros hidrocarburos, pero se debe tener presente las emisiones que esto puede producir, en especial de NO_x. La zona de agotamiento trabaja con condiciones de combustible pobre, la cual se caracteriza por el ingreso de aire, siendo un sistema OFA y tiene como principal objetivo el disminuir la producción de NO_x [40]; a su vez, en esta zona usualmente se introduce el 20% del flujo de aire total con un exceso de aire entre 15 a 25 %, y la tasa de inyección dependerá de que tanto se quiera disminuir las emisiones de CO y de inquemados. El tiempo de residencia, a pesar de ser vital en la primera zona, en la zona de requemado es crítico y lo ideal es mantenerlo entre 0,3 a 0,5 s para así permitir una adecuada mezcla y reacción del combustible de requemado con el oxígeno residual y con los productos de la combustión de la primera zona [41].

Con el fin de realizar una adecuada ejecución de esta mejoría en la central es importante el realizar una simulación CFD con el fin de evaluar el comportamiento de las zonas mencionadas anteriormente. A su vez, se puede tomar en cuenta el estudio de H. Wan et al. [29] y los accesos que tiene la caldera 4 en la parte frontal y lateral, como lo son los manholes o escotillas de visión, para la posición y número de inyectores. Los accesos que se podrían considerar para la simulación son los expuestos en la Figura 20, siendo tres posicionados en la parte frontal de la caldera a aproximadamente 2,5 m de la parte superior de la zona de combustión primaria, y dos ubicados a ambos costados de la caldera a la misma altura.



Figura 20. Accesos frontales de la caldera 4.

En cuanto al sistema OFA, no se encuentran accesos de este tipo en la parte superior de la caldera, pero se puede definir la posición de los puertos según el estado del arte, posicionándolos a 2 metros por encima de los inyectores. Para la simulación, según lo que se tiene de la estructura de la caldera y el estado del arte, se puede evaluar la implementación de hasta 6 inyectores dispuestos a una altura entre 1,2 a 2,5 m por encima de los quemadores que se encuentran en la caldera 4 del CEVA, con hasta 6 puertos OFA a una altura máximo de 2 m por encima de los inyectores. La distribución de estos deberá ser un parámetro por evaluar, así como los flujos de aire y combustible que deben pasar por cada quemador, inyector y puertos OFA; esto permitirá establecer la configuración más adecuada con el fin de obtener la disminución de inquemados deseada. En la siguiente tabla se resume, según lo encontrado en el estado del arte y de lo dispuesto en la caldera, las condiciones que se pueden establecer en la simulación para tener una mejor visión de la misma.

Tabla 21. Parámetros a considerar en planteamiento de simulación.

Parámetros del sistema de quemado de carbón	
Número de inyectores	De 4 a 6
Distribución de los inyectores	2 en cada costado de la caldera y de 3 a 4 en la parte frontal
Número de puertos OFA	Hasta 6
Distribución de los puertos OFA	4 en la parte frontal y dos en cada costado de la caldera. Considerar una inclinación de hasta 15° para los ubicados en lateralmente.
Distancia de la zona primaria de	De 1,2 a 2,5 m

combustión a los inyectores	
Distancia de los inyectores a los puertos OFA	Hasta 2 m
Flujo de carbón a quemadores	Del 80 al 90% del total
Flujo de aire en puertos OFA	Hasta un 20% del aire exterior
Exceso de aire deseada en zona de OFA	De 15 al 20%

Además, en la Tabla 22 se presenta un estimado en costos de gastos computacionales, precio de inyectores y puertos OFA, y demás elementos que necesiten de inversión para dicha mejoría considerando la instalación de tres inyectores ubicados en la parte frontal, dispuestos en los accesos mostrados anteriormente y con 4 puertos OFA a una altura de 3,5 m en la parte frontal. Cabe resaltar que para la implementación de este sistema se requiere tener un pulverizador adicional, el cual recibirá carbón de las dos tolvas dispuestas para los molinos de la caldera e ingresará aire proveniente del aire primario por ductos; por esto, se considera la opción de tomar uno de los sistemas de carbón de las otras calderas, compuesto de triturador y pulverizador, o se puede dar uso a los quemadores de gas natural que se tienen disponibles en la central, siendo válido su uso ya que es muy utilizado este combustible en los sistemas de requemado.

Tabla 22. Costos de la implementación de un sistema de requemado de carbón y sistema OFA.

Elementos	Cantidad	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
Inyectores de carbón	3	MFR-S500 con consumo de carbón de hasta 560 kg/h [42].	35.880.100	107'640.300
Puertos OFA	4	Boquillas de alta presión [43].	161.460	645.840
Ductos de aire	1	Placas de acero al carbón de grado SA36 [44]. <ul style="list-style-type: none"> Aire exterior precalentado a OFA. Aire primario a pulverizador. 	5'346.134	5'346.134
Ductos de carbón y mezcla	20	Ductos de 4'' calibre 26 galvanizado [45].	37.990 COP/1 m	758.000
Herramientas y materiales para instalación	1	Todo equipo o utensilio de taller para instalación.	20'000.000	20'000.000
Elementos para el control del flujo de aire, carbón y mezcla.	1	Equipos de medición de flujo.	10'000.000	10'000.000
Gastos computacionales	1	Simulaciones fluidodinámicas para	10'000.000	10'000.000

		obtener la mejor configuración de operación.		
Total				216'708.074

7.1.2 Secador de tubo rotativo

Como se menciona anteriormente se realiza el secado con vapor saturado con una presión entre 0.15 a 0.55 MPa (22 a 80 bares), con lo cual se puede definir para su implementación en la central una presión del vapor de 30 bar, correspondiente a una de las extracciones obtenidas de la turbina. Al consultar diversas páginas web, se seleccionó el secador mostrado en la Figura 21 con las características expuestas en la Tabla 23 para su posible instalación en la central y tiene un precio de 46.000 USD [46]. Según lo presentado por el fabricante se puede ubicar dicho secador después del triturador primario ubicado en el CEVA, pero en este triturador usualmente se presentan problemas por la humedad con la que ingresa el carbón, haciendo que el equipo pare e inclusive afecta en general su transporte hacia las tolvas, por lo cual se recomienda ingresar al secador el carbón que viene del almacenamiento, iniciando el sistema de carbón con este equipo. Este secador permitiría reducir la humedad entre un 12-15 %, permitiendo una mejora en el funcionamiento de la caldera ya que no se necesitará que el aire primario tenga tanta temperatura para el secado del carbón ocurrido en el molino y se tendrá un carbón más seco a la hora de ingresar a la caldera, obteniendo una mejor combustión y por ende una reducción en los inquemados.

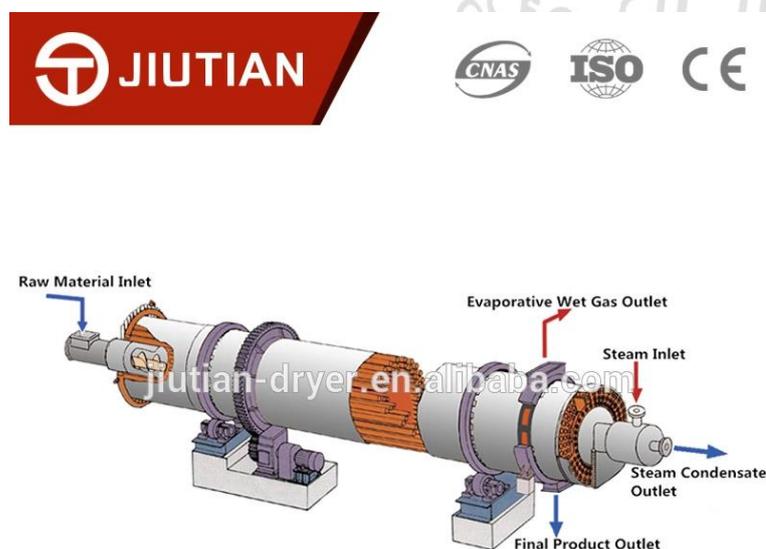


Figura 21. Secador de tubo rotativo JIUTIAN [46].

Tabla 23. Ficha técnica del secador rotativo seleccionado [46].

Datos técnicos del secador rotativo	
Lugar de origen	Henan, China
Marca	Dingli
Voltaje [V]	380
Potencia [kW]	50-80
Modelo	DLHT 2218

Capacidad [T/d]	88-200
Humedad inicial [%]	35-50
Humedad final [%]	12-15
Temperatura de secado [°C]	110-250
Dimensiones [m]	10x30
Material	Acero inoxidable 304

7.1.3 Cambio molinos

Para la mejora del tamaño de partícula, se plantea la inversión en un molino nuevo, con el cual se pueda tener seguridad de que la granulometría del carbón pase en su mayoría la malla 200, como se puede lograr con el molino LM110M Raymond marca Zenith el cual garantiza brindar un carbón pulverizado capaz de pasar la malla 200; en la Figura 22 y en la Tabla 24 se puede logra visualizar su diseño y sus datos técnicos respectivamente, siendo un molino con un precio de 89.600 USD. Según la capacidad que tiene el molino, se puede afirmar que este podría suplir la necesidad de carbón de la caldera 4, ya que en la central en promedio se tiene hasta 7 t/h y el molino seleccionado maneja capacidades de hasta 10 t/h; además, permite una mayor temperatura en el molino, ideal para un buen manejo del flujo de aire.



Figura 22. Molino XZM236 seleccionado [47].

Tabla 24. Ficha técnica del molino XZM236 Zenith [47].

Datos técnicos del molino XZM236	
Lugar de origen	Shanghai, China
Marca	Zenith
Tipo	Raymond
Modelo	LM110M
Capacidad [t/h]	7-10
Tamaño de entrada [mm]	0-25
Temperatura del aire del	75-95

molino [°C]	
Finura del polvo del carbón [%]	5-20
Tipo de motor	AC
Potencia del motor [kW]	90

Sin embargo, los molinos que se tienen actualmente, a criterio de la central, son bastante funcionales, estando poco abiertos a la posibilidad de comprar otro tipo de molino, siendo pertinente el planteamiento de implementar un cambio en la zona de clasificación del carbón dentro de los molinos. Los molinos en la parte superior disponen de una configuración de láminas dispuestas de tal manera que cuando el aire primario junto con el carbón pulverizado pasa por esta zona, las partículas de carbón de un tamaño aún grande, comparado con el deseado, caen nuevamente a la base del molino para que se sigan reduciendo su tamaño, mientras que las más ligeras pasan esta zona de clasificación al quemador. Existen diferentes investigaciones donde evalúan la configuración dispuesta en esta zona, como lo realizaron S. Ataş et al. [26], donde realizaron una simulación y pruebas experimentales; por lo cual, se sugiere realizar esto mismo para la adecuada evaluación de esta posibilidad, definiendo diferentes posiciones de las láminas, con el fin de identificar cual es beneficioso en la producción de inquemados. Para la simulación se establece un costo computacional de 10.000.000 COP; en este trabajo no se estipulará ningún gasto relacionado con la parte experimental ya que, según los resultados arrojados por la simulación, se procedería a dar cambio de la distribución de las láminas dispuestas o se agregarían otras.

7.1.4 Control de aire

Como se evidenció en los cálculos del exceso de aire, el flujo de aire que ingresa a la caldera está por encima de los rangos recomendados para carbón pulverizado, siendo vital el controlar este factor para garantizar la adecuada combustión. El ingreso de aire es gracias a un ventilador de tiro forzado y la cantidad que ingresa varía según la apertura de una compuerta ubicada en el ducto; sin embargo, esto no es óptimo ya que no permite que el flujo sea controlado según la variación de carga que pueda presentar la caldera. Por esto, se considera la instalación de un variador de velocidad como opción importante, ya que también permite obtener un ahorro en cuanto a la energía eléctrica consumida por el motor del ventilador actual.

El variador de velocidad permite variar la velocidad del motor, optimizando el trabajo requerido por el ventilador, siendo más eficiente su funcionamiento. Para su selección se tuvo en cuenta que este se utilizará para controlar la velocidad de un motor Westinghouse de 150 HP, 440 V, 78 A y opera a 1180 RPM dedicado a manejo de aire. En la Tabla 25 se puede observar la ficha técnica tanto del variador de velocidad y su respectivo precio.

Tabla 25. Datos técnicos y precios de variador de velocidad.

Datos técnicos y precio de variador de velocidad seleccionado [48].	
Referencia	ATV61QC11N4
Tipos de motor	Síncrono y asíncronos
Filtro EMC	Integrado
Número de fases	3
Voltaje suministro	323-528

[V]	
Frecuencia de suministro [Hz]	50-60
Precio [COP]	58'671.139

A continuación, se realizó el análisis de las mejoras identificadas con sus respectivos planteamientos técnicos y económicos, se procedió a comparar entre ellas estos aspectos con el fin de determinar qué relación costo/beneficio puede traerle a la empresa.

7.2 Análisis técnico/económico de las mejoras

Teniendo como base estos resultados, se procedió a comparar las mejoras planteadas, como se evidencia en la Tabla 26, la cual contiene cuanto es el costo de inversión que requiere cada una, que porcentaje de reducción de inquemados se puede obtener, el ahorro y en cuanto tiempo la inversión se recupera. Cabe señalar que los porcentajes de reducción de inquemados son estimados según lo encontrado en el estado del arte; para el porcentaje del requemado de carbón y sistema OFA se consideró lo encontrado por H. Wan et al. [29]. El porcentaje del secador de tubo rotativo se estimó teniendo en cuenta una gráfica de % humedad vs inquemados planteada por R. Kurose et al. [25], para lo cual se tuvo en cuenta la humedad que tendría el carbón al salir del secador, definido en la ficha técnica de equipo. El porcentaje que se estableció para los molinos fue considerando que la influencia del tamaño de carbón y la distribución de partícula puede lograr que se reduzca hasta en 4 % los inquemados[49][50]; el correspondiente a lo obtenido por la implementación de un variador de velocidad para el tiro forzado se determinó teniendo en cuenta que esta mejora permitiría que el sistema de aire fuera más fácil de controlar, permitiendo que se pueda establecer un exceso de aire apropiado a la caldera; por lo cual el porcentaje se obtuvo al analizar una gráfica presentada por I. Kuaots et al. [51] donde muestra como varía el porcentaje de inquemados según la tasa de mezcla a condiciones diferentes de exceso de aire, considerando para este caso una tasa de mezcla del 0 % a condiciones medias de exceso (30 %-50 %), siendo la más aproximada a la recomendada en la literatura para carbón pulverizado.

Tabla 26. Comparativa de posibles mejoras.

Mejorías	Costo inversión [COP]	Reducción de inquemados [%]	Ahorro [COP/año]	Retorno de inversión [años]
Requemado de carbón y sistema OFA	216'708.074	47	80'562.161	2,7
Secador de tubo rotativo	162'053.400	22-33	38'006.557-57'009.835	4-3
Molino	315'486.080	52	89'586.883	3,5
Simulación y análisis para zona de clasificación	10'000.000	52	89'586.883	0,1

de los molinos				
Variador de velocidad	58'671.139	28,6	48'865.573	1,2

De esta tabla podemos observar que la implementación del molino, a pesar de ser un equipo capaz de manejar la carga de carbón que requiere el proceso y proporcionar mejor confiabilidad por ser un equipo nuevo, no se consideraría relevante para la central debido a que los molinos que se utilizan actualmente están en buen estado y proporcionan el mismo tamaño de partícula de carbón que el molino recomendado, por lo cual al ver el tiempo en el que se recuperaría la inversión, no es del todo viable. Sin embargo, se recomienda el considerar la mejoría planteada para la realización de un cambio en la zona de clasificación, la cual no se podría comparar directamente con el ahorro estimado dado que requeriría una inversión enfocada a la simulación y análisis de esta mejora, siendo una inversión no tan elevada capaz de proporcionar buenos resultados en el proceso de combustión, como lo plantea S. Ataş et al. [26]. Por otro lado, el variador de velocidad, a pesar de no representar el mayor ahorro en cuanto a los inquemados, su implementación contribuiría con ahorro en cuanto al consumo de energía eléctrica de la central y optimización del proceso de combustión de la caldera ya que se podría controlar mejor el flujo de aire a diferentes cargas de la caldera sin que se gaste más energía de lo necesario. Asimismo, en términos directos de comparación, es la opción en la que más rápido se recupera la inversión, siendo una opción muy viable.

En cuanto al secador de tubo rotativo, así como el variador de velocidad, a pesar de no presentar el mayor porcentaje de reducción de inquemados, contribuye en la optimización del proceso de combustión ya que al llegar el carbón más seco al molino, no se requeriría tan altas temperaturas de aire para secarlo, permitiendo la disminución de la temperatura de los gases de combustión; además, facilitaría considerablemente el transporte del carbón a través de la central, ya que al posicionarlo como primer equipo en la línea del carbón, no se presentarían atascos en el triturador primario ni en el elevador, eventos que ocurren de manera constante en el CEVA. Con esto, a pesar de que su precio puede ser más elevado que el variador de velocidad, obteniéndose un beneficio en cuanto a la producción de inquemados similar a este, se obtendrían tener presente los demás beneficios descritos en cuanto a su utilidad en el sistema de alimentación del carbón.

Por último, la implementación del requemado de carbón y sistema OFA ofrecen un alto porcentaje reducción de inquemados, pero no el mayor; sin embargo, es una de las opciones que menor tiempo requiere para recuperar la inversión, siendo de la mejor opción en cuanto a costo/beneficio que se puede desarrollar. Además, este sistema no solo contribuye con la disminución de inquemados, sino también reduce las emisiones de NOx, siendo un valor agregado esencial para la central.

Por otro lado, se contemplan recomendaciones que pueden considerar desarrollar en la central como lo son: la capacitación técnica del personal operativo de la caldera, la compra de un servidor capaz de almacenar la información almacenada en el sistema de control general de la caldera, la implementación de medidores de flujo en los ductos de aire primario y secundario, y la instalación del medidor de gases en chimenea. Lo primero va enfocado en que, a pesar de que el personal operativo de la central cuenta con el conocimiento experimental para el manejo de la caldera, no posee conocimiento teórico, siendo este último necesario para que el

operario pueda identificar si la caldera está presentando algún problema al observar el comportamiento de las variables que muestra el sistema de control y actuar de manera consecuente, de tal manera que la forma que no afecte energéticamente el proceso, presentándose pérdidas innecesarias por prácticas mal implementadas.

A su vez, una recomendación para la operación de la caldera es el porcentaje de oxígeno de esta, dado que según se muestra en la Figura 23, el punto de operación óptimo es 3,5 %, el cual se puede configurar por el operario en el sistema de control de la caldera en el momento de operación. Estos datos se obtuvieron al recolectar información del sistema de control sobre el oxígeno de la caldera y de la base de datos que maneja la empresa Ahinco sobre los resultados de inquemados del mes de septiembre hasta diciembre. De esta gráfica también se puede observar que la generación de inquemados es fluctuante a pesar de que los puntos de operación se encuentre en valores cercanos, esto puede deberse a que no solo el porcentaje de oxígeno en la caldera afecta o influye en la operación de la caldera, pero si es uno de los más destacados.

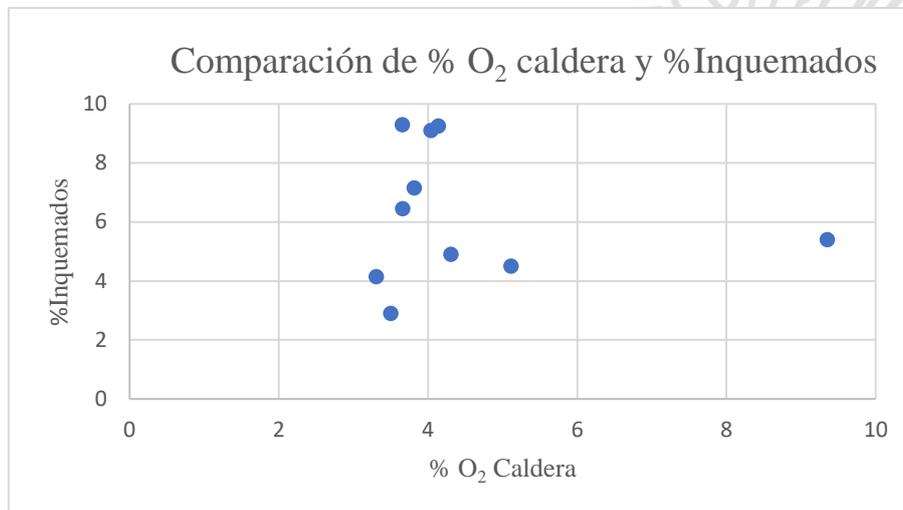


Figura 23. Porcentaje de inquemados según el porcentaje O₂ Caldera.

En cuanto al servidor, se recomienda su adquisición debido a que las variables de operación manejadas por el sistema de control general de la caldera solo se almacenan en dicho elemento, siendo difícil la manipulación de estas de manera remota para su posible estudio, ya que, con la condición actual, se debe tomar registro manual, lo cual puede ser tedioso y alargaría el periodo de tiempo del estudio. Otra recomendación relacionada con la recopilación de datos es la implementación de medidores de flujo de aire primario y secundario, ya que de estos solo se tiene información del porcentaje de apertura de los dampers que controlan el paso del aire, esto con el fin de tener un mejor control y estimación del proceso de combustión en caso se encuentre un punto de operación óptimo. El instrumento sugerido es el mostrado en la Figura 24, él puede transmitir la señal al sistema de control general de la caldera y así tener un registro de datos; este tiene un valor aproximado de 2'000.000 COP y para su instalación se requiere el diseño de una placa orificio para los ductos correspondientes, siendo un posible proyecto de ingeniería para futuro.



Figura 24. Medidor de flujo sugerido.

Por último, la implementación de un sistema de monitoreo continuo de gases de combustión es fundamental para cualquier central térmica ya que con esto se tiene información en tiempo real sobre las condiciones en las que se encuentra la caldera dado que, al cuantificar los gases, tenemos una visión más clara sobre lo que ocurre y como se podría corregirlo. Si estos datos se comparan con diferentes parámetros operativos como flujo de aire o flujo de carbón, se podría obtener puntos de operación idóneos y aterrizados a la realidad. Adicional a esto, el registro de los gases de combustión es un documento pedido por las entidades gubernamentales competentes en el área ambiental, como lo son el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Cabe resaltar lo importante de que los operarios sepan identificar si el sistema está presentando pérdidas al leer las medidas, para así actuar en consecuencia y realizar un funcionamiento óptimo en la caldera. Actualmente se encuentra en la central un dispositivo de monitoreo de gases de combustión el cual se tenía previsto instalar el año pasado, pero por motivos del apagado de la central en diciembre, ya que este año empezó su desmontaje, no se pudo instalar.

8 Conclusiones

- En este trabajo se estableció que, en promedio, para el año 2020, había presencia de un 8,4% de inquemados en la ceniza que sale de la caldera. Estos inquemados representan unas pérdidas económicas de aproximadamente 20 millones COP/año por cada 1% de inquemados presente en la ceniza, lo representa para la empresa pérdidas cercanas a 170 millones COP/año. A su vez, entre mayor sea la presencia de estos inquemados en la ceniza, esta será de menor provecho para la empresa Ahinco, los cuales utilizan la ceniza para la producción de cemento, siendo otro ingreso perdido para la empresa si Ahinco rechaza la ceniza.
- En cuanto al estado de la combustión se encontró mediante la estequiometría que el aire estequiométrico para la combustión en la caldera 4 es de 43157,7 kg/h; sin embargo, es ideal el trabajar con un exceso de aire para garantizar la quema del carbón, para lo cual el estado del arte encontrado sugiere que para carbón pulverizado se debe mantener un exceso del 15 al 40%. Actualmente, el flujo de aire que ingresa a la caldera varía según la carga que requiera, siendo muy cercano su valor a las libras de vapor producidas, utilizándose comúnmente un exceso superior al 40%. Además, según la figura comparativa entre el porcentaje de inquemados y porcentaje de oxígeno de la caldera, se observó que este último varía entre 3 a 9 %, siendo el punto óptimo encontrado de 3,5% para obtener una presencia de inquemados en la ceniza de un 2,9%.
- El estado del arte permitió identificar los parámetros que influyen en la disminución de inquemados, así como del proceso en combustión en sí, siendo estos el tiempo de residencia del carbón, el flujo de aire, el tamaño del carbón, y humedad, permitiendo enfocar el estudio de las posibles mejorías a estos puntos. A su vez, se planteó recomendaciones que se consideran importantes a implementar para optimizar el proceso. De cada parámetro se evaluó diferentes posibilidades de mejora, siendo las estudiadas en este trabajo la instalación de un sistema de requemado de carbón e instalación de puertos OFA en la caldera, la implementación de un secador de carbón, la compra de un molino, la evaluación de un cambio en una zona del molino actual y la instalación de un variador de velocidad en el tiro forzado.
- De los resultados se puede concluir que la mejora que brinda una posibilidad mayor de obtener reducción de inquemados, siendo esta de hasta un 47%, es la instalación de un sistema de requemado de carbón y de puertos OFA, los cuales a su vez contribuyen con la disminución de emisiones de NOx; sin embargo, este requerirá una inversión y tiempo para su puesta en marcha altos. En cuanto a precio, la mejora destacada es la implementación de un variador de velocidad, siendo la opción de menor costo con un beneficio viable al no solo beneficiar la combustión por tener un mejor flujo de aire sino también por el ahorro económico que significaría su instalación ya que se reducirían los gastos energéticos del ventilador de tiro forzado. En cuanto al secador, a pesar de tener un costo elevado, es posible recuperar la inversión en menos de 4 años, obteniendo beneficios no solo para la combustión sino también para el transporte del carbón.
- Del análisis se puede concluir que las mejoras con mayor potencial debido a su relación costo/beneficio es la implementación del sistema de requemado de carbón y

puerto OFA y la instalación de un variador de velocidad para control de flujo de aire, ambos aportan no solo a la reducción de inquemados, sino también a disminuir otro tipo de emisiones y al ahorro energético respectivamente. Sin embargo, se destaca la primeramente mencionada, considerando que es la que más alto porcentaje de reducción de inquemados brinda.

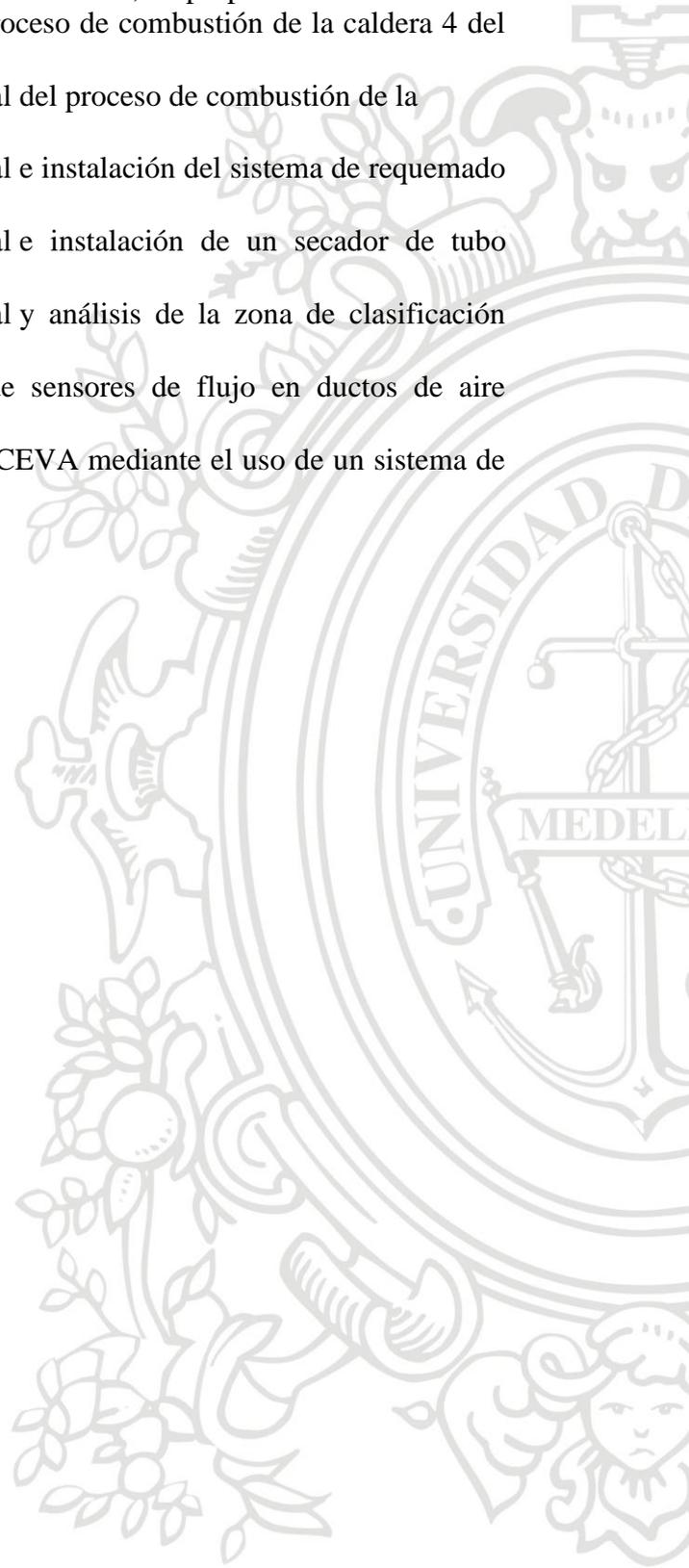
- Las mejoras identificadas anteriormente permitirán tener una amplia visión de ideas que se pueden desarrollar en los años venideros para la optimización del proceso de combustión de la caldera 4 del CEVA, siendo esencial su análisis tanto teórico como experimental, para que se tenga resultados reales de como benefician el proceso de combustión de la caldera y como afecta a las emisiones. Las recomendaciones planteadas son buenas estrategias que a pesar de que no se evaluaron a detalle, son viables y algunas no requieren una alta inversión.



9 Proyectos futuros

Según las mejoras identificadas y complemento a este estudio, se propone la realización de los siguientes proyectos con el fin de optimizar el proceso de combustión de la caldera 4 del CEVA.

- Simulación dinámica de fluidos computacional del proceso de combustión de la caldera 4.
- Simulación dinámica de fluidos computacional e instalación del sistema de quemado de carbón y puertos OFA.
- Simulación dinámica de fluidos computacional e instalación de un secador de tubo rotatorio.
- Simulación dinámica de fluidos computacional y análisis de la zona de clasificación de los molinos.
- Diseño de placa orificio para instalación de sensores de flujo en ductos de aire primario y secundario de la caldera 4.
- Análisis de los productos de combustión del CEVA mediante el uso de un sistema de monitoreo continuo.



10 Referencias bibliográficas

- [1] UPME, “Petroleo.” <https://www1.upme.gov.co/InformacionCifras/Paginas/PETROLEO.aspx> (accessed Oct. 01, 2020).
- [2] Enerdata, “Producción de electricidad.” <https://datos.enerdata.net/electricidad/estadisticas-mundiales-produccion-electricidad.html> (accessed Oct. 01, 2020).
- [3] 20 minutos, “Fenómeno de El Niño afecta la generación de energía en Colombia,” 2016. <https://www.20minutos.com.mx/noticia/57374/0/fenomeno-de-el-nino-afecta-la-generacion-de-energia-en-colombia/> (accessed Oct. 10, 2020).
- [4] M. A. B. Yunus A. Cengel, “Termodinámica 7 Edición.”
- [5] R. M. N. D and D. E. L. V. D. E. Aburrá, “Gaceta Oficial N°4451,” pp. 12–19, 2017.
- [6] MinAmbiente, “Resolucion 909 del 5 de Junio de 2008,” *Ideam*, p. 36, 2008, [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527650/Resolucion+909+de+2008.pdf/a3bcdf0d-f1ee-4871-91b9-18eac559dbd9>.
- [7] UPME, “El Carbón Colombiano. Fuente de Energía para el mundo,” *Unidad Planeación Min. Energética*, p. 53, 2005.
- [8] M. S. Falcón, “Cómo se FORMA el CARBÓN - Proceso y tipos,” 2020. https://www.ecologiaverde.com/como-se-forma-el-carbon-2747.html#anchor_4 (accessed Oct. 10, 2020).
- [9] R. B. Zapata, J. F. Pérez, Bayer, and J. C. Salazar, “Carbones colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energéticas,” *Rev. Ion*, vol. 27, no. 2, pp. 43–54, 2014.
- [10] “Carbon.” <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/carbon.aspx> (accessed Jan. 25, 2021).
- [11] “Carbón Térmico,” 2016.
- [12] C. Arturo, L. Giraldo, P. Como, R. Parcial, C. Arturo, and L. Giraldo, “COMBUSTIÓN DE CARBÓN,” 2002.
- [13] J. Dominguez Cerdeira, J. Santiago Cid, J. Uceda Martinez, P. Garrido Otaola, and J. Lahoz Pequeruí, “Guía básica de calderas industriales,” *Cons. Econ. y Hacienda, Organ. Dir. Gen. Industria, Energía y Minas.*, vol. 3, pp. 71–95, 2012, [Online]. Available: <https://www.achs.cl/portal/trabajadores/Capacitacion/CentrodeFichas/Documents/descripcion-de-caldera-y-generadores-de-vapor.pdf>.
- [14] V. Cortés, “Carbón,” *HispanÁfrica*, no. 11, p. 83, 2000.
- [15] “Superheated Steam | Spirax Sarco.” <https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/steam-engineering-principles-and-heat-transfer/superheated-steam> (accessed Oct. 13, 2020).
- [16] Compañía de Alumbrado Eléctrico de San Salvador (CAESS), “La Energía Eléctrica, Generación, Distribución Y Consumo,” pp. 17–64, 2005, [Online]. Available: <https://webquery.ujmd.edu.sv/siab/bvirtual/Fulltext/ADLD0000526/Capitulo 2.pdf>.
- [17] S. Devica, “Improving Steam System Performance,” *Pengaruh Harga Disk. Dan Persepsi Prod. Terhadap Nilai Belanja Serta Perilaku Pembelian Konsum.*, vol. 7, no. 9, pp. 27–44, 2015.
- [18] “La combustión del carbón | Textos Científicos.” <https://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/combustion-carbon> (accessed Oct. 14, 2020).
- [19] ..:::“Mina La Margarita:::.. - Carbón térmico.” <http://www.minalamargarita.com/carbon-termico/> (accessed Oct. 15, 2020).
- [20] J. Fernando, G. Pérez, and S. Jiménez, “Combustión de carbón,” *Univ. Medellín*, pp. 1–7, 2012.
- [21] “What is the Air Fuel Ratio Effect on Combustion Efficiency?” <https://sagemetering.com/combustion-efficiency/air-fuel-ratio-effect-on-combustion-efficiency/> (accessed Jan. 17, 2021).

- [22] EOCARBÓN LTDA and U. P. BOLIVARIANA, "Calderas a Carbón." p. 139, 1998, [Online]. Available: [http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Calderas a carbón \(1998\).pdf](http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Calderas a carbón (1998).pdf).
- [23] K. Y. Lisandy, J. W. Kim, H. Lim, S. M. Kim, and C. H. Jeon, "Prediction of unburned carbon and NO formation from low-rank coal during pulverized coal combustion: Experiments and numerical simulation," *Fuel*, vol. 185, pp. 478–490, 2016, doi: 10.1016/j.fuel.2016.08.026.
- [24] M. Bilen, S. Kizgut, and B. Akkaya, "Prediction of unburned carbon in bottom ash in terms of moisture content and sieve analysis of coal," *Fuel Process. Technol.*, vol. 138, pp. 236–242, 2015, doi: 10.1016/j.fuproc.2015.06.010.
- [25] S. Ataş, U. Tekir, M. A. Paksoy, A. Çelik, M. Çam, and T. Sevgel, "Numerical and experimental analysis of pulverized coal mill classifier performance in the Soma B Power Plant," *Fuel Process. Technol.*, vol. 126, pp. 441–452, 2014, doi: 10.1016/j.fuproc.2014.05.016.
- [26] R. Kurose, H. Tsuji, and H. Makino, "Effects of moisture in coal on pulverized coal combustion characteristics," *Fuel*, vol. 80, no. 10, pp. 1457–1465, 2001, doi: 10.1016/S0016-2361(01)00019-9.
- [27] J. Li *et al.*, "CFD approach for unburned carbon reduction in pulverized coal boilers," *Energy and Fuels*, vol. 26, no. 2, pp. 926–937, 2012, doi: 10.1021/ef201700a.
- [28] J. Zheng and H. He, "Factors related to the residence time of fine particle concerning the burnout of Fujian anthracite during combustion in CFB Boiler," *Challenges Power Eng. Environ. - Proc. Int. Conf. Power Eng. 2007, ICOPE 2007*, pp. 864–867, 2007, doi: 10.1007/978-3-540-76694-0_161.
- [29] "Managing air to improve combustion efficiency." <https://www.powermag.com/managing-air-to-improve-combustion-efficiency/> (accessed Dec. 28, 2020).
- [30] W. P. Linak and T. W. Peterson, "Effect of coal type and residence time on the submicron aerosol distribution from pulverized coal combustion," *Aerosol Sci. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 77–96, 1984, doi: 10.1080/02786828408958996.
- [31] H. P. Wan, C. Sen Yang, B. R. Adams, and S. L. Chen, "Controlling LOI from coal reburning in a coal-fired boiler," *Fuel*, vol. 87, no. 3, pp. 290–296, 2008, doi: 10.1016/j.fuel.2007.05.014.
- [32] J. Pikon' and A. Mujumdar, "Drying of Coal," *Handb. Ind. Drying, Third Ed.*, no. November 2006, 2006, doi: 10.1201/9781420017618.ch43.
- [33] A. J. Dangond, Jaime Rodolfo. Baute, "Diseño basico de un sistema secador de carbón utilizando gases de combustión.," pp. 2007–2009, 2007.
- [34] R. Chavda and P. Mahanwar, "Effect of inorganic and organic additives on coal combustion : a review," *Int. J. Coal Prep. Util.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–18, 2018, doi: 10.1080/19392699.2018.1536046.
- [35] "Aspectos relacionados con la formación de partículas y la interpretación de resultados.," p. 8.
- [36] M. V. Chamorro, R. B. Meléndez, G. Castellanos, and C. Navarro, "Estudio de la combustión de carbones beneficiados provenientes de intercalaciones de las minas de la Jagua de Ibirico-Cesar mediante análisis termogravimétrico," *Prospectiva*, vol. 6, no. 1, pp. 55–62, 2008.
- [37] Y. S. D. E. Seguridad and D. E. L. Proceso, "COMBUSTION, QUEMADORES, CONTROLES Y SISTEMAS DE SEGURIDAD DE LLAMA. PROCESO BASICO DE COMBUSTION PROCESO BAs/co DE COMBUSTION," *Man. calderas*, 2005, [Online]. Available: http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio_sin_paredes/fac_ing/Manu_cald/cap/11.pdf.
- [38] B. A. Orozco Barrera, "AJUSTE DE LOS PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN EN LA CALDERA DE LA COMPAÑÍA ELÉCTRICA DE SOCHAGOTA S.A. E.S.P. - TERMOPAIPA IV PARA BUSCAR UNA REDUCCIÓN EN LOS NIVELES DE NO_x," no. x, p. 17, 2016, [Online]. Available: https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/2703/1/TGT_1324.pdf.
- [39] L. S. Paraschiv, A. Serban, and S. Paraschiv, "Calculation of combustion air required

- for burning solid fuels (coal / biomass / solid waste) and analysis of flue gas composition,” *Energy Reports*, vol. 6, no. September 2019, pp. 36–45, 2020, doi: 10.1016/j.egy.2019.10.016.
- [40] T. A. Naja, “Coal as a Reburn Fuel for NO_x Reduction,” no. June, 1997, [Online]. Available: <http://etheses.whiterose.ac.uk/2551/>.
- [41] U.S Department of Energy, “Micronized Coal Reburning Demonstration for NO_x Control: A DOE Assessment,” no. X, 2001.
- [42] “Precio De Fábrica De Carbón Pulverizado Quemador Para Calderas - Buy Quemador De Carbón Para Calderas Quemador De Carbón Para Calderas Precio De Fábrica Quemador De Carbón Product on Alibaba.com.” https://spanish.alibaba.com/product-detail/factory-price-pulverized-coal-burner-for-boilers-60836757693.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.718ffd8fBXGcF7 (accessed Jan. 26, 2021).
- [43] “De Alta Presión De Acero Inoxidable Ajustable De Agua De Atomización De Aire De Boquilla De Niebla Para Esterilizar - Buy De Acero Inoxidable De Atomización De Aire De Boquillas, Etanol De Aire Y Aceite De La Boquilla De Atomización De, Plano De Tipo De Presión De La Boquilla De Atomización De Aire Product on Alibaba.com.” https://spanish.alibaba.com/product-detail/high-pressure-adjustable-stainless-steel-water-air-atomizing-mist-nozzle-for-sterilize-62540328686.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.71085d07IvhwD2&s=p (accessed Jan. 26, 2021).
- [44] “Lámina De Rollo De Carbono Cs Laminada En Caliente, Placa De Acero Astm A36 - Buy Rollo De Hoja, Chapa De Acero Revestida, De Acero Hojas Product on Alibaba.com.” https://spanish.alibaba.com/product-detail/hot-rolled-cs-carbon-roll-sheet-astm-a36-steel-plate-1600186893459.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.5f8f5663O5jLRN&s=p (accessed Jan. 26, 2021).
- [45] “Ducto 4" Calibre 26 Galvanizado xlm - EASY Colombia.” <https://www.easy.com.co/p/ducto-4%22-calibre-26-galvanizado-xlm/> (accessed Jan. 20, 2021).
- [46] “Secado Varios Carbón Propiedad Limo De Vapor De Tubo Secador Rotatorio - Buy Carbón Baba Secador De Vapor Tubo Secador Rotatorio Product on Alibaba.com.” https://spanish.alibaba.com/product-detail/drying-various-coal-property-slime-steam-tube-rotary-dryer-1600097412335.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.15e257025QqkXV&s=p (accessed Jan. 20, 2021).
- [47] “2500 De Malla De Carbonato De Calcio Molino De Carbón De Polvo De La Máquina De Molino - Buy Molino De Carbón De Carbonato De Calcio Molino De Carbón De Polvo De La Máquina De Molino Product on Alibaba.com.” https://spanish.alibaba.com/product-detail/2500-mesh-calcium-carbonate-mill-coal-machine-powder-mill-1600101201795.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.4cad7f52JI4qcl&s=p (accessed Jan. 21, 2021).
- [48] I. Continuous, “ATV61QC11N4,” 2021.
- [49] C. R. C. and C. N. Kim, “Numerical investigation on the low combustion and NO_x emission characteristics in a 500MW tangentially red pulverized-coal boiler,” *Fuel*, vol. 88, no. 9, p. 1720, 2019.
- [50] and W. L. Y. Tu, H. Liu, K. Su, S. Chen, Z. Liu, C. Zheng, “Numerical study of H₂O addition effects on pulverized coal oxy-MILD combustion,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 138, p. 252, 2015.
- [51] I. Kūlaots, R. H. Hurt, and E. M. Suuberg, “Size distribution of unburned carbon in coal fly ash and its implications,” *Fuel*, vol. 83, no. 2, pp. 223–230, 2004, doi: 10.1016/S0016-2361(03)00255-2.