



Universidad del Bío-Bío
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería en Maderas
Escuela Ingeniería Civil Química



FACTORES QUE AFECTAN EN EL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA EN LAS CENIZAS GENERADAS EN LA CALDERA DE PODER.

Informe de Habilitación Profesional presentado en conformidad a los requisitos
para obtener el título de Ingeniero Civil Químico

CONSTANZA DANIELA PINTO LUENGO

Profesor Tutor: Dr. Carlos Rozas Mellado

Ingeniero Supervisor: Romina Rojas Opazo

Concepción, Agosto 2019

RESUMEN

Las cenizas volantes generadas a partir de la combustión de la biomasa en las calderas de lecho fluidizado, tienen propiedades que la hacen atractiva para su empleo como reemplazo de las puzolanas en la producción de cemento. Un problema asociado a esta valorización es el alto contenido de materia orgánica, la cual genera que las cenizas adquieran un color negro o gris oscuro, provocando que el color del cemento también se vea alterado. Es por esto que la presente habilitación profesional tiene como objetivo, evaluar las variables de operación que afectan el contenido de materia orgánica de las cenizas provenientes de la Caldera de Poder de Planta Celulosa Arauco, para su uso en la elaboración de cemento. Las variables de operación que fueron evaluadas son el aire de combustión, aire de fluidización y temperatura del lecho. Además, de las características de la biomasa, tales como la granulometría y el contenido de humedad, siendo la variable respuesta el contenido de materia orgánica en las cenizas, lo cual fue realizado en Planta Celulosa Arauco y también en Planta Bioenergía Viñales, que fue utilizada como referencia, debido a que poseen calderas con características idénticas (ver ANEXO B), que genera cenizas con bajo contenido de materia orgánica. Se encontró en ambas plantas que, el contenido de materia orgánica en las cenizas generadas es inferior al 6% requerido para evitar que las cenizas adquieran un color oscuro. La biomasa utilizada en la Planta Celulosa Arauco cumple con los requisitos de la granulometría, siendo de 31% finos, 65% aceptado, 0,9% sobre tamaño y 2,8% sobre espesor. Sin embargo, el porcentaje de finos en la Planta Bioenergía Viñales fue de 50%, el cual no cumple con el máximo permitido. El contenido de humedad de la biomasa, en Planta Celulosa Arauco fluctuó entre 46-52% y en Planta Bioenergía Viñales entre 44-49%. En relación al flujo de aire de combustión en Planta Celulosa Arauco y Planta Bioenergía Viñales se ajustan a lo requerido, con un rango de operación de 2,7-4,0 y 2,9-4,0 kg de aire por cada kg de combustible, respectivamente. Con respecto al aire de fluidización, se determinó que en ambas plantas se suministra más del mínimo requerido, donde con una altura de lecho entre 45-50 [cm], el aire de fluidización en promedio fue de 25 [Nm³/s], permitiendo la correcta fluidización del lecho. Además, se determinó que la composición del aire de fluidización en Planta Celulosa Arauco es de 45% aire primario y 55% gas de recirculación, en cuanto a Planta Bioenergía Viñales es de 27% aire primario y 73% gas de recirculación.

Por otra parte, se observó que la temperatura del lecho en Planta Celulosa Arauco es inferior en relación a la Planta bioenergía Viñales, pudiendo provocar que la biomasa, no se quemara en su totalidad y genere un mayor contenido de materia orgánica en las cenizas. Se puede concluir que, en Planta Celulosa Arauco, la biomasa cumple con los requisitos establecidos en el manual de operación de la caldera, el exceso de gas de recirculación provoca un aumento en el contenido de materia orgánica en las cenizas, y el flujo de aire de combustión y la fluidización, para ambas calderas, cumplen con los requisitos establecidos. La Planta Bioenergía Viñales cumple con los requisitos de calidad del contenido materia orgánica (<6%). En Planta Celulosa Arauco igual se cumplen los requisitos, sin embargo, hay muestras que se aproximan el máximo, por lo que requiere de un control estricto de los parámetros operacionales.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres Elba Luengo y Wilson Pinto, por ser un ejemplo de constancia, perseverancia y responsabilidad. Por haberme forjado como la persona que soy, muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que incluye este. A mis hermanos, Caroline y Eduardo, por el apoyo brindado en el transcurso de cada año de mi carrera. A Bastián Vergara por su infinita paciencia y su disposición a ayudar para que este trabajo saliera adelante. En general, agradezco a mis familiares y amigos por ser mi apoyo siempre y compartir conmigo cada esfuerzo.

A la empresa Celulosa Arauco y Constitución S.A., por permitirme disponer de los medios necesarios para llevar a cabo este trabajo, a las personas quienes conforman el equipo, ya que no dudaron ni un instante en compartir sus conocimientos, en especial a la ingeniera Romina Rojas por la asistencia y apoyo prestado en el desarrollo del presente trabajo de investigación.

A la Universidad del Bío-Bío, principalmente a la Escuela de Ingeniería Civil Química y a los docentes que la componen, por los valiosos conocimientos impartidos, ya que fueron la base para la realización de esta investigación. En especial al profesor Carlos Rozas, por haberme facilitado siempre los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades propuestas durante el desarrollo de esta tesis.

TABLA DE CONTENIDOS

| | |
|--|-----|
| RESUMEN | ii |
| AGRADECIMIENTOS | iv |
| TABLA DE CONTENIDOS | v |
| NOMENCLATURA..... | vii |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 3 |
| 3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA | 4 |
| 3.1 Descripción de la empresa | 4 |
| 3.1.1 Proceso Productivo Celulosa | 5 |
| 3.1.2 Generación de residuos..... | 6 |
| 3.2 Valorización de las cenizas de biomasa en industria cementera..... | 9 |
| 3.2.1 Factores que afectan al contenido de materia orgánica en ceniza de biomasa | 10 |
| 4. OBJETIVOS..... | 12 |
| 4.1 Objetivo General | 12 |
| 4.2 Objetivos Específicos | 12 |
| 5. METODOLOGÍA..... | 13 |
| 5.1 Recursos materiales y equipos | 13 |
| 5.1.1 Calidad de la biomasa..... | 13 |
| 5.1.1.1 Determinación de granulometría..... | 13 |
| 5.1.1.2 Determinación de humedad | 13 |
| 5.1.2 Condiciones actuales de operación de la caldera de poder..... | 13 |
| 5.1.3 Contenido de materia orgánica en cenizas..... | 14 |
| 5.1.3.1 Determinación del contenido de materia orgánica..... | 14 |

| | |
|---|----|
| 5.2 Procedimiento | 15 |
| TABLA DE CONTENIDOS | |
| 5.2.1 Calidad de la biomasa..... | 15 |
| 5.2.1.1 Muestreo Biomasa..... | 15 |
| 5.2.1.2 Determinación Granulometría | 16 |
| 5.2.1.3 Determinación de humedad | 17 |
| 5.2.2 Condiciones actuales de operación de la caldera de poder..... | 17 |
| 5.2.2.1 Recolección información..... | 17 |
| 5.2.3 Contenido de materia orgánica en ceniza | 18 |
| 5.2.3.1 Muestreo Ceniza | 18 |
| 5.2.3.2 Determinación Materia Orgánica..... | 18 |
| 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 19 |
| 6.1 Resultados..... | 19 |
| 6.1.1 Calidad de la biomasa..... | 19 |
| 6.1.2 Condiciones actuales de operación de la caldera de poder..... | 22 |
| 6.1.3 Contenido de materia orgánica en cenizas..... | 27 |
| 6.2 Discusión | 30 |
| 6.2.1 Calidad de la biomasa..... | 30 |
| 6.2.2 Condiciones actuales de operación de la caldera de poder..... | 31 |
| 6.2.3 Contenido de materia orgánica en cenizas..... | 32 |
| 7. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES | 33 |
| 8. REFERENCIAS | 34 |
| 9. ANEXOS | 36 |
| 9.1 ANEXO A. Balance de materia de la caldera..... | 36 |
| 9.2 ANEXO B. Características de las calderas..... | 39 |

NOMENCLATURA

| | |
|--------|---|
| ARAUCO | : Celulosa Arauco y Constitución S.A. |
| PCA | : Planta Celulosa Arauco |
| PBV | : Planta Bioenergía Viñales |
| CP4 | : Caldera de poder n°4 |
| BFB | : Lecho fluidizado burbujeante |
| DRIS | : Depósito de residuos industriales sólidos |
| RISES | : Residuos Industriales sólidos |
| DREGS | : Rechazo clarificador verde |
| GRITS | : Rechazo apagador |
| ECF | : Libre de cloro elemental |
| CVB | : Ceniza volante de biomasa |
| CFB | : Ceniza fondo de biomasa |

Índice de Tablas.

| | |
|--|----|
| Tabla 1.Descripción de Plantas de Celulosa Arauco y Constitución S.A | 4 |
| Tabla 2.Generación de residuos sólidos en plantas nacionales de ARAUCO, 2018. | 6 |
| Tabla 3.Resumen de las características de calderas de biomasa | 8 |
| Tabla 4.Especificaciones granulometría biomasa | 16 |
| Tabla 5.Estadístico descriptivo biomasa, Planta de Celulosa Arauco..... | 20 |
| Tabla 6.Estadístico descriptivo biomasa Planta de Bioenergía Viñales | 21 |
| Tabla 7.Condiciones de operación | 22 |
| Tabla 8.Relación másica aire-combustible teórica..... | 23 |
| Tabla 9.Relación altura de lecho-Aire fluidización..... | 24 |
| Tabla 10.Valores Cp y su interpretación. | 28 |
| Tabla 11.Composición elemental de la biomasa de diseño. | 36 |
| Tabla 12.Mezcla de biomasa alimentada..... | 36 |
| Tabla 13.Composición del aire | 38 |

Índice de Figuras.

| | |
|---|----|
| Figura 1.Tecnologías de combustión de biomasa | 7 |
| Figura 2.Composición de la biomasa alimentada..... | 19 |
| Figura 3.Granulometría de la biomasa, Planta Celulosa Arauco. | 20 |
| Figura 4.Granulometría biomasa, Planta Bioenergía Viñales..... | 21 |
| Figura 5.Contenido de humedad en base húmeda de la biomasa..... | 22 |
| Figura 6.Relación másica aire-combustible operacional. | 23 |
| Figura 7. Relación entre el oxígeno y el exceso de aire | 24 |
| Figura 8.Altura lecho..... | 25 |
| Figura 9.Aire de fluidización, Planta Celulosa Arauco..... | 25 |
| Figura 10.Aire de fluidización, Planta Bioenergía Viñales | 25 |
| Figura 11.Composición aire de fluidización, Planta Celulosa Arauco..... | 26 |
| Figura 12.Composición aire de fluidización, Planta Bioenergía Viñales | 26 |
| Figura 13.Temperatura lecho de caldera..... | 27 |
| Figura 14.Contenido de materia orgánica en ceniza | 27 |
| Figura 15.Informe de capacidad de entre/dentro plazo para Ceniza de Planta Celulosa Arauco. . | 28 |
| Figura 16.Carta de control Xbarra-Rango de ceniza, Planta Celulosa Arauco..... | 29 |

1. INTRODUCCIÓN

Los desechos de madera generados en la industria papelera, son valorizados a través de la quema en calderas tanto para obtener energía térmica como para aliviar posibles problemas de eliminación de residuos sólidos. En las calderas, los desechos de madera normalmente se queman en forma de madera aserrada, corteza, aserrín, virutas o astillas (“Wood Waste Combustion In Boilers”, 1996). En la combustión de biomasa se generan dos tipos de residuos, ceniza de fondo de biomasa (CFB) formada por la fracción gruesa de ceniza producida en la parrilla y cenizas volantes de biomasa (CVB), partículas arrastradas por la corriente de gases al exterior de la cámara de combustión. La cantidad y calidad de las cenizas producidas está fuertemente influenciado por las características y la tecnología de combustión de la biomasa utilizada (Carrasco, 2008).

Actualmente, las cenizas de biomasa son tratadas como desechos y enviadas a depósitos industriales, sin embargo, estos desechos pueden ser utilizados. Las cenizas de fondo de biomasa, se reutilizan directamente como fertilizantes en suelos agrícolas o forestales. Sin embargo, la reutilización de las cenizas volantes es más delicada debido a un mayor potencial de lixiviación de metales pesados, por lo que es preferible utilizarlas como materiales de construcción. Las cenizas volantes de biomasa al ser ricas en óxidos de Ca, Si, Al y Fe, pueden ser utilizadas como un sustituto de las materias primas tradicionales necesarias para la producción de clinker, como la piedra caliza (Ukrainczyk et al., 2016). Otro uso de la ceniza volante de biomasa es como reemplazo de puzolanas naturales utilizadas en la elaboración de cemento puzolánico (Rivera et al., 2013). Para que las cenizas volantes de biomasa puedan ser utilizadas como reemplazo de puzolanas se requiere de un bajo contenido de materia orgánica, de lo contrario la ceniza adquiere un color negro resultado del exceso de materia orgánica generada a partir de la quema ineficiente en la caldera (Lowe, 2012).

Las cenizas en las que se centra la presente habilitación profesional, se obtienen a partir de la combustión de biomasa en la caldera de poder de la Planta Celulosa Arauco. En las cuales, se ha observado un alto contenido de materia orgánica sin quemar. En este contexto, surge la necesidad de estudiar los parámetros operacionales de la caldera de poder y las características de la materia prima.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La empresa ARAUCO, actualmente genera aproximadamente 352 mil toneladas de residuos sólidos al año, conformado principalmente por cenizas de biomasa con un total de 123.622 toneladas. Del total de cenizas de biomasa producidas a nivel nacional, 80.636 toneladas son generadas en Planta Celulosa Arauco, donde el 84% es enviado a depósitos de residuos sólidos (DRIS) y solo el 16% es valorizado. Debido al bajo porcentaje de valorización, ARAUCO ha planteado como desafío desarrollar iniciativas para la valorización (“Reporte Sostenibilidad”, 2018). De acuerdo a estudios, se ha determinado que las cenizas volantes de la biomasa generadas en las calderas de lecho fluidizado burbujeante, tienen potencial para su utilización en la industria cementera, como reemplazo de las puzolanas (Calleja, 1983), sin embargo, las cenizas volantes de biomasa generadas en la caldera de poder n°4 de Planta Celulosa Arauco no son aptas para ser valorizadas como reemplazo de las puzolanas, esto se debe a que el contenido de materia orgánica es superior a un 6%, provocando que la ceniza adquiera un color negro por la quema ineficiente en la caldera, afectando estéticamente al cemento (Lowe, 2012).

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Descripción de la empresa

Celulosa Arauco y Constitución S.A. (ARAUCO) es una sociedad anónima cerrada, constituida en el año 1979 a partir de la fusión de las compañías Celulosa Arauco S.A. y Celulosa Constitución S.A. Actualmente el 99,98% de la propiedad de ARAUCO pertenece a Empresas Copec S.A. La cual, está presente en el negocio forestal, celulosa, maderas, paneles y energía renovable. En la Tabla 1, se presentan las plantas que conforman ARAUCO a nivel nacional y su respectiva capacidad productiva.

Tabla 1.Descripción de Plantas de Celulosa Arauco y Constitución S.A

| N° | Planta | Región | Capacidad Productiva (ton/año) | Tipo |
|---|--------------|----------|--------------------------------|-----------|
| 1 | Licancel | Maule | 150.000 | BKP, UKP |
| 2 | Constitución | Maule | 355.000 | UKP |
| 3 | Nueva Aldea | Biobío | 1.027.000 | BKP y EKP |
| 4 | Arauco | Biobío | 790.000 | BKP y EKP |
| 5 | Valdivia | Los Ríos | 550.000 | BKP y EKP |
| UKP: Pulpa cruda de pino radiata, BKP: Pulpa blanqueada de pino, EKP: Pulpa blanqueada de eucalipto | | | | |

Fuente: Elaboración en base a Memoria Arauco, 2018.

3.1.1 Proceso Productivo Celulosa

El proceso productivo consta de dos áreas, en primer lugar, está el área de fibra, donde la madera ingresa en forma de troncos, para luego ser descortezados, y posteriormente astillados. Las astillas son impregnadas con vapor de agua, para facilitar la penetración de los licores de digestión. Posteriormente son pre impregnadas con licor blanco para promover el hinchamiento y reducción del contenido de extractivos. En el digestor, las astillas son cocidas con licor blanco, que permite romper las uniones de lignina y liberar las fibras de celulosa. La pasta de celulosa generada en el digestor, se somete a un proceso de lavado y clasificado, generando la celulosa cruda o celulosa sin blanquear. Para el blanqueo se aplica el método libre de cloro elemental (ECF) y se utiliza como agente oxidante el dióxido de cloro, el cual se agrega en forma secuencial a la pasta de celulosa para blanquearla extrayéndose la lignina, posteriormente la pasta es lavada para remover la lignina degradada. La pasta blanqueada es distribuida uniformemente sobre la mesa formadora de la hoja, donde por medio de rodillos se extrae el agua por gravedad y a través de cajas de succión conectadas a bombas de vacío, se forma la lámina. Finalmente, la lámina es secada y cortada, para generar una unidad denominada fardo.

En segundo lugar, está el área de recuperación, donde los residuos generados en la etapa preparación madera, son enviados a la caldera de poder para ser utilizado como combustible, para la generación de vapor. Por otro lado, el licor negro generado en el digestor, es concentrado por medio de evaporadores, para ser enviado a la caldera recuperadora, donde la parte orgánica es quemada. La parte inorgánica y cenizas, son disueltas en agua y se forma el denominado Licor Verde, el cual es sometido al proceso de caustificación, que consiste en adicionar cal viva (CaO) produciendo Licor Blanco, que es reutilizado en la fase de cocción y cal apagada o caliza (CaCO_3) en forma de lodos, a los cuales se les extrae la humedad y son calcinados en hornos especiales, denominados Hornos de Cal para producir, nuevamente la cal viva requerida en el proceso de caustificación (Empresas ARAUCO, 2019).

3.1.2 Generación de residuos.

Las plantas de celulosa de la empresa ARAUCO, producen una diversidad de residuos sólidos tales como residuos de cal apagada, dregs, grits, siendo las cenizas de biomasa los principales residuos, que alcanzan un 35% del total de residuos sólidos generados a nivel nacional. En la Tabla 2, se presenta para cada planta de celulosa, la generación de residuos sólidos, observándose que la Planta Celulosa Arauco, es la que genera una mayor cantidad de residuos sólidos, con un total de 135.673 toneladas por año, donde alrededor del 59% corresponde a cenizas.

Tabla 2. Generación de residuos sólidos en plantas nacionales de ARAUCO, 2018.

| Planta | Ceniza Biomasa [ton/año] | Otros [ton/año] | Generación [ton/año] |
|--------------------------------------|--------------------------|-----------------|----------------------|
| Arauco | 80.637 | 55.036 | 135.673 |
| Constitución | 3.608 | 19.483 | 23.090 |
| Licancel | 8.458 | 14.619 | 23.078 |
| Nueva Aldea | 13.803 | 108.800 | 122.603 |
| Valdivia | 17.117 | 30.418 | 47.535 |
| Total de residuos generados en Chile | 123.623 | 228.356 | 351.979 |

Fuente: Elaboración en base a Consolidado de Residuos ARAUCO, 2018.

En la Figura 1, se presentan los tipos de calderas de biomasa que poseen en la Planta Celulosa Arauco, que son las calderas de lecho fijo o también conocidas como caldera de parrilla y las calderas de lecho fluidizado. Las calderas de parrilla, constan de varias parrillas por las que avanza la biomasa según la demanda requerida. El aire primario se suministra desde la parte inferior del equipo y el proceso de combustión ocurre en las parrillas cuando se suministra aire secundario, generando gases de combustión y cenizas. Un problema asociado a la combustión de la biomasa en este tipo de calderas, es que el contenido materia orgánica sin quemar es elevado (Domínguez, 2018). En las calderas de lecho fluidizado, la combustión se desarrolla con partículas en suspensión, las cuales son fluidizadas, a través de un flujo de aire de fluidización. En este tipo de calderas, la combustión se produce de forma controlada en todo el hogar, la arena del lecho es suspendida en forma burbujeante por una corriente de aire de fluidización, inyectado mediante boquillas. La arena caliente, seca y volatiliza el combustible, maximizando la superficie de contacto de la biomasa. Las partículas gruesas se combustionan dentro del lecho de arena, mientras el combustible fino, en conjunto con los gases volatizados se combustionan sobre el lecho de arena, específicamente en el sector de aire secundario (Domínguez, 2018).

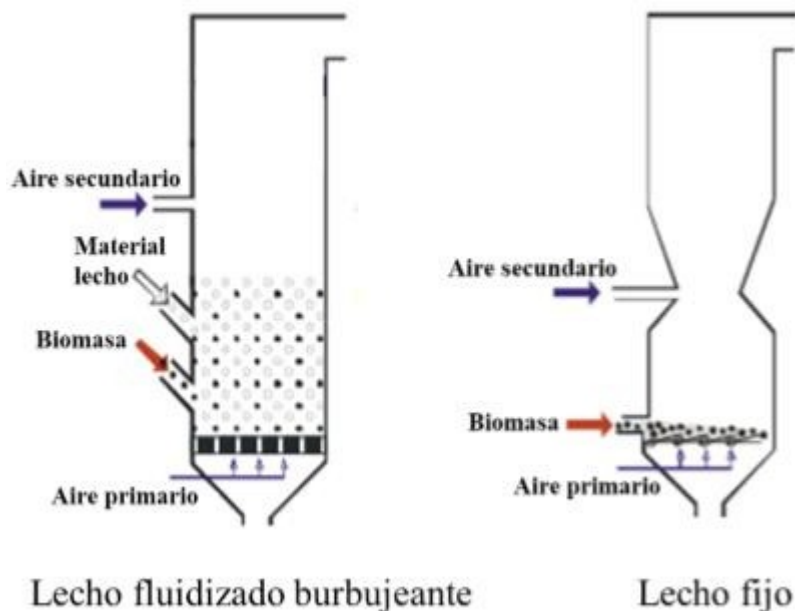


Figura 1. Tecnologías de combustión de biomasa
 Fuente: Obernberger, 2010


En la Tabla 3, se presenta un resumen de las características de las calderas de biomasa, es posible apreciar que, los sistemas de combustión de lecho fijo tienen una gran flexibilidad con respecto al contenido de humedad entre 10 y 60% en base húmeda (b.h.) y el tamaño de partícula (5 mm  100 mm). Las calderas de lecho fluidizado ofrecen una gran flexibilidad con respecto al contenido de humedad (10 - 55% en peso b.h.) y mezcla de combustible, pero una baja flexibilidad con respecto al tamaño de partícula (<80 mm para calderas de lecho fluidizado burbujeante). Debido a las condiciones de combustión homogéneas que se dan en los sistemas de lecho fluidizado, son posibles bajas relaciones de aire en exceso que aumentan la eficiencia y, por lo tanto, compensan los mayores costos de inversión al aumentar la capacidad (Oberberger, 2010).

Tabla 3. Resumen de las características de calderas de biomasa.

| | Caldera de lecho fluidizado burbujeante | Caldera de lecho fijo (Parrilla) |
|---------------|---|----------------------------------|
| Granulometría | <80 mm | 5 - 100 mm |
| Humedad | 10 - 55% en b.h. | 10 - 60% en peso b.h. |
| Costos | Altos costos de inversión y operativos | Bajo costo de operación |
| Eficiencia | 75-92% | 60-90% |

Fuente: Oberberger, 2010

3.2 Valorización de las cenizas de biomasa en industria cementera.

Se ha demostrado que el cemento puzolánico ofrece muchas ventajas sobre los otros, y esto es debido a que el efecto puzolánico permite mejorar su resistencia frente a ambientes ácidos, aumentar la impermeabilidad y mejorar la resistencia mecánica del cemento (Jaigua et al., 2010). Para la elaboración de este tipo de cemento se utilizan mayoritariamente puzolanas naturales, sin embargo, el elevado costo económico y ambiental de explotar canteras para obtener puzolanas, hace más atractivo utilizar como sustituto a las cenizas de biomasa, mejorando la sustentabilidad del sector de la construcción y de la energía. (Rivera et al., 2013)

Para que las cenizas de biomasa puedan ser utilizadas como reemplazo de las puzolanas se requiere que el contenido de materia orgánica sea bajo, de lo contrario la ceniza adquirirá un color negro resultado del exceso de materia orgánica generada a partir de la quema ineficiente en la caldera (Lowe, 2012).

Debido a que las cenizas de biomasa generadas en las calderas de parrilla, contienen un 50% o más de carbono sin quemar, no es posible que sean utilizadas como sustituto de las puzolanas. Sin embargo, las calderas de lecho fluidizado burbujeante, permiten maximizar la superficie de contacto con la biomasa, favoreciendo la combustión, y por tanto obteniéndose un menor contenido de materia orgánica en la ceniza (Domínguez, 2018).

3.2.1 Factores que afectan al contenido de materia orgánica en ceniza de biomasa.

Para que la combustión se lleve a cabo, deben coexistir tres factores, que son, el combustible, que se define como sustancia que desprende energía por combustión, comburente, que es el encargado de oxidar el combustible favoreciendo la combustión y finalmente la energía de activación, que es la energía necesaria para que se inicie la reacción. En las calderas de biomasa, cuando la combustión es completa, la totalidad del combustible es oxidado. Sin embargo, en la práctica es difícil alcanzar el grado máximo posible de oxidación del combustible, ocasionando la aparición de materia orgánica en las cenizas. La combustión puede ser incompleta principalmente en dos casos, cuando el combustible es inadecuado o de mala calidad y cuando el aire suministrado es insuficiente o excesivo (Carrasco, 2008).

3.2.1.1 Efecto del combustible en la combustión.

En los sistemas de combustión, es importante evaluar el porcentaje de humedad del combustible a quemar, ya que un elevado porcentaje produce una reducción de la eficiencia general del sistema y tiene una serie de consecuencias a niveles técnicos, medioambientales y económicos. Esto se debe, a que un alto contenido de humedad reduce la temperatura de combustión por debajo de la óptima y, por tanto, el combustible presenta una combustión incompleta (Hidalgo, 1990).

Otro parámetro importante es la granulometría de la biomasa. Es necesario que el tamaño de la partícula se ajuste a los requerimientos exigidos por la tecnología de conversión energética a la cual va destinada. Con la reducción granulométrica se espera conseguir una distribución de partículas con bajo porcentaje de partículas gruesas y excesivamente finas, que puedan causar problemas tales como el aumento en el contenido de materia orgánica en las cenizas (Nogués et al., 2010).

3.2.1.2 Efecto del aire en la combustión.

El aire que se usa en las reacciones de combustión es el aire atmosférico, que está compuesto por un 21% de Oxígeno (O_2) y un 79% de elementos inertes, que se compone principalmente por Nitrógeno (N_2), por lo tanto, para fines de cálculos se asume que el 79% corresponde a nitrógeno. Mantener un flujo de aire adecuado durante la combustión es fundamental para asegurar una completa combustión.

La combustión se puede desarrollar de tres maneras, como, combustión completa, incompleta y estequiométrica. La combustión completa conduce a la oxidación total de los elementos que constituyen el combustible, para esto es necesario suministrar un exceso de aire (Muñoz, 2012). La combustión incompleta, se debe al defecto de aire, provocando que los componentes del combustible no se oxiden totalmente, generando un porcentaje de materia orgánica sin quemar (Muñoz, 2012). Finalmente, la combustión estequiométrica se lleva a cabo con la cantidad mínima de aire requerida, para desarrollar la combustión de los componentes del combustible en su totalidad, dicha cantidad depende de la composición elemental del combustible (García, 2001).

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo General

Evaluar las variables que afectan el contenido de materia orgánica en las cenizas provenientes de la Caldera de Poder de Planta Celulosa Arauco y Planta Bioenergía Viñales para su uso en la elaboración de cemento.

4.2 Objetivos Específicos

- Evaluar la calidad combustible de la biomasa alimentada a la caldera de poder.
- Evaluar las condiciones actuales de operación de la caldera de poder que afectan al contenido de materia orgánica en las cenizas.
- Determinar el porcentaje de materia orgánica en las cenizas generadas en la caldera de poder.

5. METODOLOGÍA

5.1 Recursos materiales y equipos

5.1.1 Calidad de la biomasa.

5.1.1.1 Determinación de granulometría

- Bolsa de plástico rotulada con tipo de muestra, hora y fecha.
- Harnero marca Testing Machines, Inc
- Bandejas de 90 [mm], 60 [mm], 3[mm] y <3[mm].
- Balanza analítica, capacidad mínima 12kg., precisión 0.1gr

5.1.1.2 Determinación de humedad

- Balanza analítica, capacidad mínima 12kg., precisión 0.1gr
- Bandejas de aluminio para secado de biomasa.
- Estufa para secado de biomasa, con recirculación de aire, operada a aproximadamente 105°C.

5.1.2 Condiciones actuales de operación de la caldera de poder.

- Software PI PROCESS BOOK
- Manual de operación Caldera de Poder marca HYBEX
- Software de estadística Minitab

5.1.3 Contenido de materia orgánica en cenizas.

5.1.3.1 Determinación del contenido de materia orgánica.

- Bolsa rotulada con tipo de muestra, hora y fecha.
- Pala de muestreo.
- Mufla
- Crisol de porcelana
- Balanza analítica
- Espátula, cuchara inoxidable
- Termobalanza Precisa XM60 Platillo
- Espátula, cuchara inoxidable

5.2 Procedimiento

Los muestreos presentados a continuación se llevaron a cabo en Planta Celulosa Arauco y Planta Bioenergía Viñales. En cuanto a los procedimientos, estos se realizaron en las instalaciones de Planta Celulosa Arauco.

5.2.1 Calidad de la biomasa

5.2.1.1 Muestreo Biomasa

El muestreo de la biomasa se realizó de acuerdo al procedimiento establecido en Planta Celulosa Arauco, que consiste en tomar una muestra en la correa transportadora que está dirigida hacia la caldera de poder, esta muestra solo puede ser obtenida cuando la correa está detenida. La muestra fue guardada en una bolsa, que posteriormente fue sellada para evitar contaminación.

Debido a la detención de la correa, para la realización del muestreo, sólo fue posible realizar cuatro muestras diarias entre las 08:00-20:00 horas. Por lo tanto, las muestras serán recolectadas cada tres horas, tomando como punto de inicio las 09:00 am, según lo establecido en un muestreo sistemático.

En la siguiente ecuación, se muestra la determinación del salto sistemático del muestreo.

$$K = \frac{N}{n} = \frac{12}{4} = 3 \quad [\text{Ec.1}]$$

Donde, K: Salto sistemático
 N: Tamaño Población
 n: Tamaño de la muestra

5.2.1.2 Determinación Granulometría

Se determinó la granulometría, para corroborar que la biomasa cumple con las especificaciones de la caldera (Ver Tabla 4).

Tabla 4. Especificaciones granulometría biomasa.

| Granulometría Biomasa | Tamiz | Porcentaje requerido |
|-----------------------|---------------|----------------------|
| Sobre tamaño | >90 mm | <5% |
| Sobre espesor | <90 mm >60 mm | <10% |
| Aceptado | <60 mm >3 mm | >40% |
| Finos | <3 mm | <45% |

Fuente: Manual de operación caldera de poder.

El ensayo de granulometría se realizó bajo el procedimiento establecido por Planta Celulosa Arauco, el cual considera un harnero con cuatro bandejas con orificios de 90 [mm], 60 [mm], 3[mm] y <3 [mm], ordenadas las bandejas de mayor a menor tamaño.

La muestra de biomasa se dispersó sobre el tamiz superior del clasificador y se dejó harnear durante 10 minutos. Concluido este periodo, el clasificador se detiene automáticamente, posteriormente se pesa la muestra retenida en cada bandeja, con una precisión de 0,1 [g]. Para calcular la granulometría de la biomasa, se utilizaron las siguientes ecuaciones, según el tamaño de la biomasa:

$$\text{Sobretamaño}[\%] = \frac{\text{Pesosobretamaño}[\text{g}] * 100}{\text{Peso Total} [\text{g}]} \quad [\text{Ec.2}]$$

$$\text{Sobreespesor}[\%] = \frac{\text{Pesosobreespesor}[\text{g}] * 100}{\text{Peso Total} [\text{g}]} \quad [\text{Ec.3}]$$

$$\text{Aceptado}[\%] = \frac{\text{Pesoaceptado}[\text{g}] * 100}{\text{Peso Total} [\text{g}]} \quad [\text{Ec.4}]$$

$$\text{Finos}[\%] = \frac{\text{Pesofinos}[\text{g}] * 100}{\text{Peso Total} [\text{g}]} \quad [\text{Ec.5}]$$

5.2.1.3 Determinación de humedad

El ensayo de humedad se realizó según la norma TAPPI T 258 om-89. El método utilizado se basa en la determinación gravimétrica de la pérdida de masa de la muestra. Inicialmente, se registra el peso húmedo de la muestra y luego se lleva a una estufa de secado, a una temperatura aproximada de $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, hasta alcanzar un peso constante. Concluido el período de secado, se retira la muestra, se pesa y registra este valor.

Para calcular la humedad se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{Humedad, \%b.h.} = 100 * \left[\frac{\text{P.Húmedo[g]} - \text{P.Seco[g]}}{\text{P.húmedo[g]}} \right] \quad [\text{Ec.6}]$$

5.2.2 Condiciones actuales de operación de la caldera de poder.

5.2.2.1 Recolección información.

Para conocer las condiciones actuales de operación de la caldera de poder, fueron solicitadas las variables operativas en Planta Celulosa Arauco y Planta Bioenergía Viñales. Las variables fueron recopiladas a partir del software Pi Process Book por cada hora de operación en un intervalo de cinco días (06 de mayo-10 de mayo).

Para corroborar que el aire de combustión se ajusta a la teoría, se realizó el balance de materia de la caldera, bajo el procedimiento indicado por García (2016), el procedimiento y las condiciones utilizadas se presentan en ANEXO A.

5.2.3 Contenido de materia orgánica en ceniza.

5.2.3.1 Muestreo Ceniza

Debido a las altas temperaturas que las cenizas adquieren en el contenedor, el muestreo fue realizado por un ingeniero de terreno, una vez que el contenedor fue vaciado en el depósito de residuos industriales de cada planta. Por motivos internos de seguridad se permitió realizar la toma de muestra sólo en las primeras cuatro descargas del día, descargas que se realizan cada tres horas. El muestreo se llevó a cabo durante 5 días (06 de mayo al 10 de mayo), y consistió en tomar tres muestras aleatorias de 300g cada una, la que posteriormente se agruparon y mezclaron para obtener una muestra homogénea.

5.2.3.2 Determinación Materia Orgánica

El ensayo de determinación de pérdida por calcinación se hizo según la norma chilena NCh147 Of.69. Inicialmente se registró el peso del crisol (C), luego se taro y pesó la muestra inicial húmeda, siendo registrada como (P1_{húmeda}). Luego, se llevó por 45 minutos la muestra a la mufla a una temperatura de 950°C. Una vez finalizado este periodo, se retiró el crisol de la mufla y se dejó enfriar en el desecador por 30 minutos, posteriormente se pesó, siendo registrado como (P2). Luego se realizó un arreglo por humedad, para ello se determinó la cantidad de sólidos totales contenidos en la muestra inicial (P1_{seca}). Esto se realizó con una termobalanza, basándose en el manual de operación del equipo, que consiste en distribuir la muestra sobre el platillo y encender la resistencia de secado. El proceso de secado termina cuando la muestra llega a peso constante, registrándose el porcentaje de sólidos totales. Para determinar la muestra inicial seca, se utilizó la siguiente ecuación:

$$P1_{seca} = P1_{húmeda} * \left(\frac{\%Sólidos\ totales}{100} \right) \quad [Ec.7]$$

Para calcular el contenido de materia orgánica, se utilizó la siguiente ecuación

$$ContenidoMateriaOrganica[\%] = \frac{100}{P1_{seca}} * (P1_{seca} - (P2 - C)) \quad [Ec.8]$$

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Resultados

6.1.1 Calidad de la biomasa.

En la Figura 2, se presenta la composición de la biomasa utilizada tanto en la Planta Celulosa Arauco, como en la Planta Bioenergía Viñales.

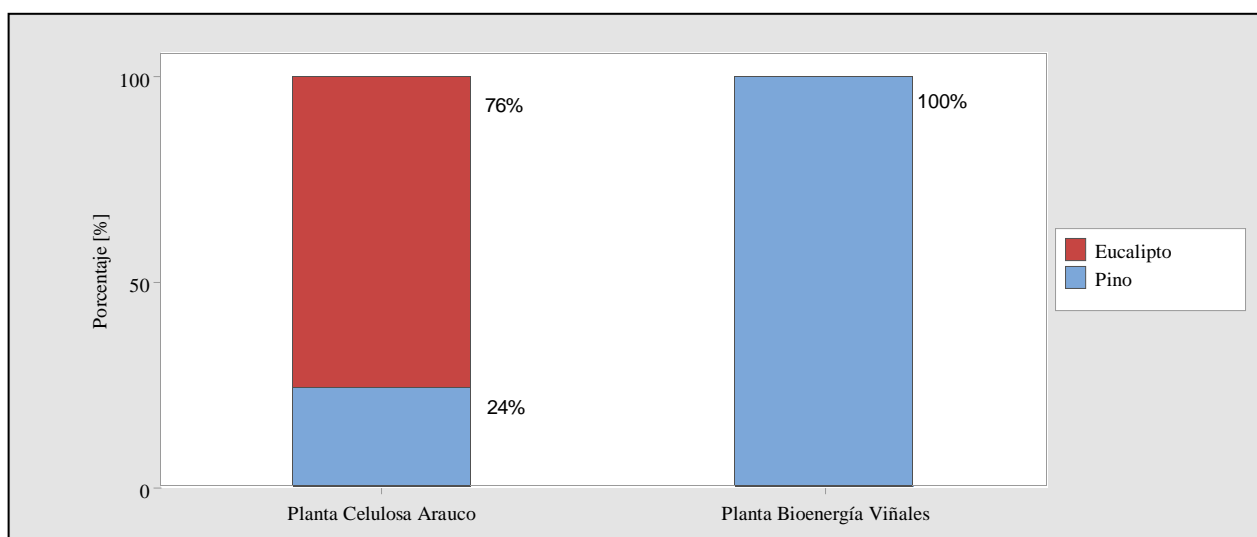


Figura 2. Composición de la biomasa alimentada.
Fuente: Elaborado a partir de la base de datos de Empresa ARAUCO.

En la Figura 3, se presenta la distribución de la granulometría de la biomasa utilizada en la Caldera de Planta Celulosa Arauco, para cada día, en los cuales se tomaron las muestras y su respectivo promedio.

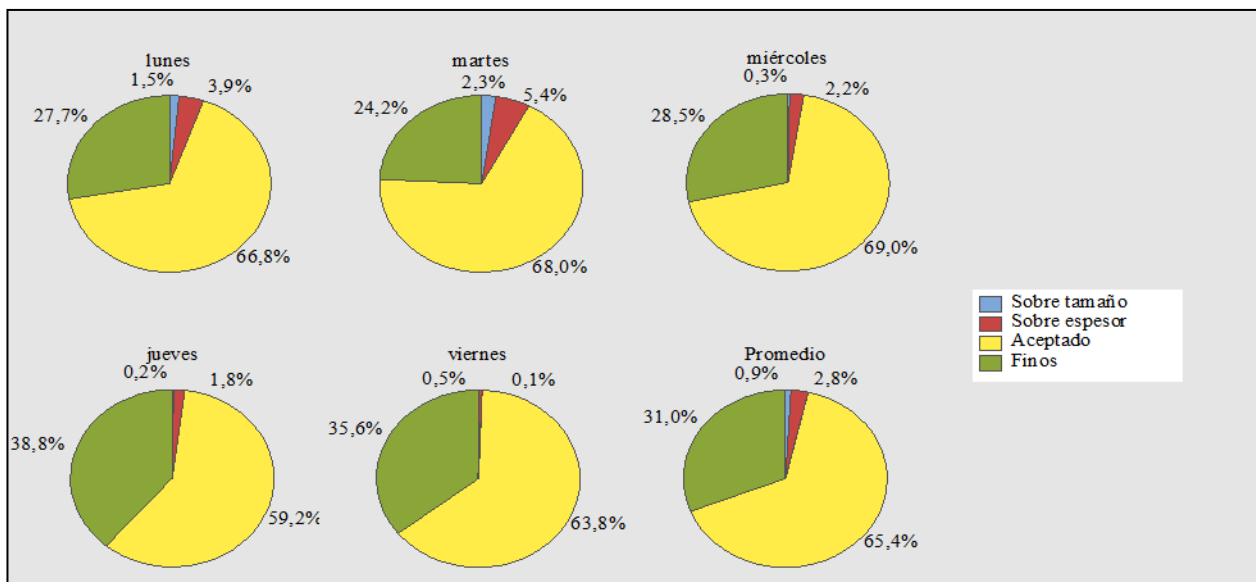


Figura 3. Granulometría de la biomasa, Planta Celulosa Arauco.

En la Tabla 5, se presenta el estadístico descriptivo de la biomasa alimentada en la caldera perteneciente a Planta Celulosa Arauco.

Tabla 5. Estadístico descriptivo biomasa, Planta de Celulosa Arauco.

| Variable | Categoría | Conteo total | Media | Desviación estándar. | Mínimo | Máximo |
|---------------|---------------|--------------|-------|----------------------|--------|--------|
| Granulometría | Aceptado | 20 | 65,24 | 4,19 | 56,89 | 72,40 |
| | Finos | 20 | 30,93 | 6,24 | 22,00 | 41,54 |
| | Sobre espesor | 20 | 2,78 | 2,79 | 0,00 | 7,40 |
| | Sobre tamaño | 20 | 0,88 | 1,07 | 0,00 | 2,90 |

En la Figura 4, se presenta la distribución de la granulometría de la biomasa alimentada a la caldera de Planta Bioenergía Viñales, para cada día, en los cuales se tomaron las muestras y su respectivo promedio.

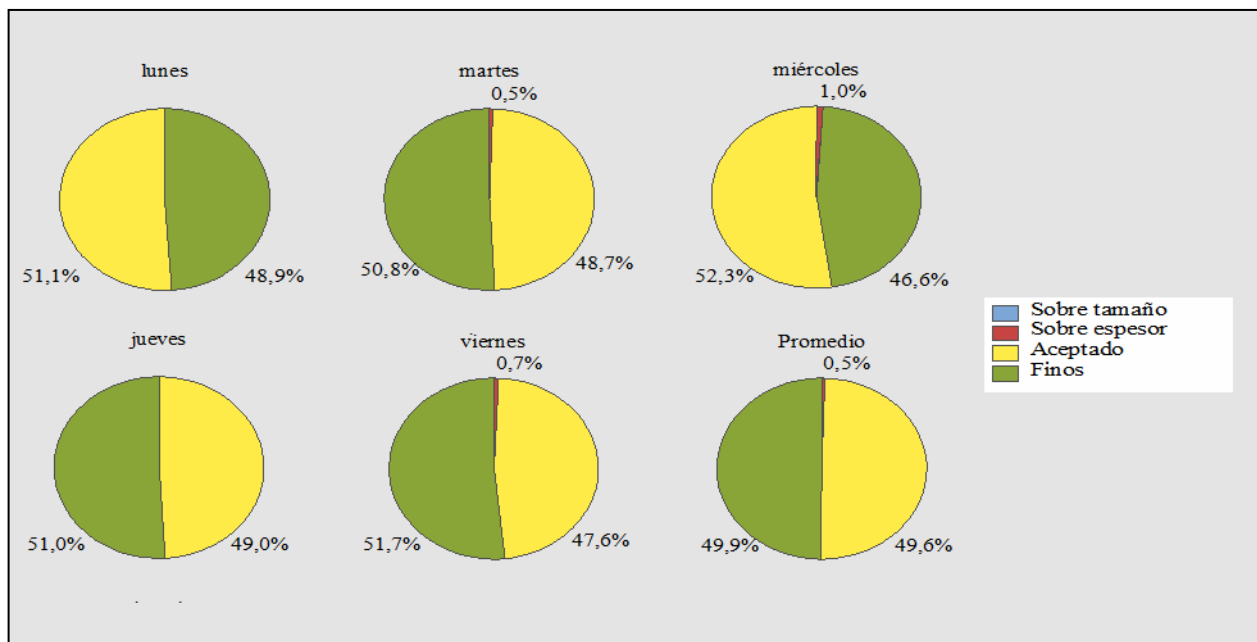


Figura 4. Granulometría biomasa, Planta Bioenergía Viñales.

En la Tabla 5, se presenta el estadístico descriptivo de la biomasa alimentada en la caldera perteneciente a Planta Celulosa Arauco.

Tabla 6. Estadístico descriptivo biomasa Planta de Bioenergía Viñales

| Variable | Categoría | Conteo total | Media | Desviación estándar | Mínimo | Máximo |
|---------------|---------------|--------------|-------|---------------------|--------|--------|
| Granulometría | Aceptado | 20 | 49,61 | 4,03 | 41,57 | 60,65 |
| | Finos | 20 | 49,90 | 4,26 | 39,35 | 58,43 |
| | Sobre espesor | 20 | 0,49 | 1,15 | 0,00 | 3,97 |
| | Sobre tamaño | 20 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

En la Figura 5, se presenta el contenido de humedad en base húmeda de la biomasa utilizada en la caldera de poder de la Planta Celulosa Arauco y la Planta Bioenergía Viñales.

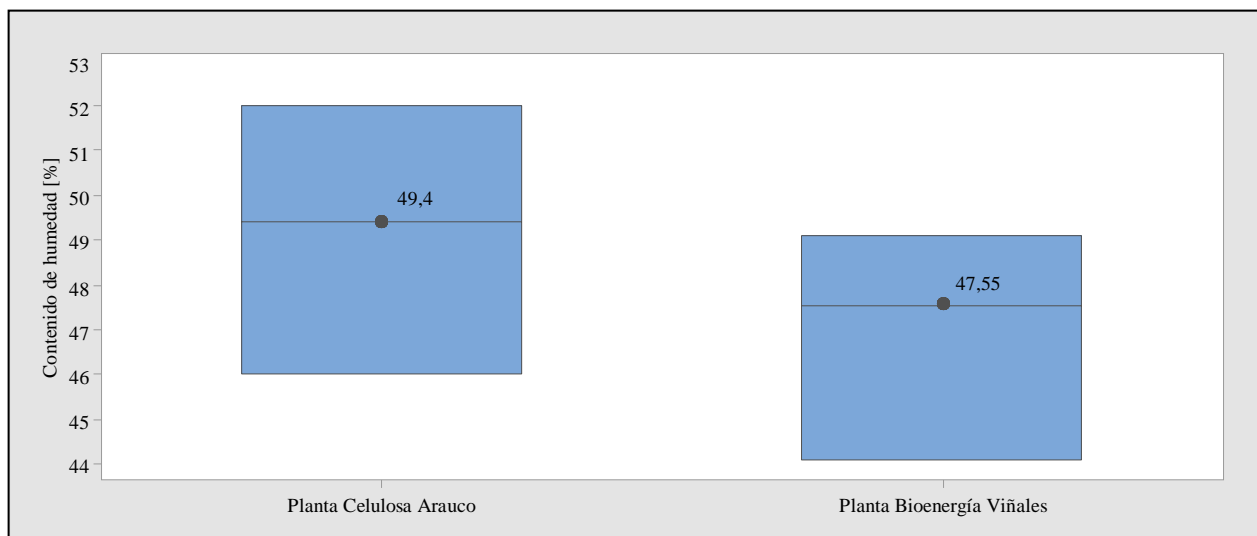


Figura 5. Contenido de humedad en base húmeda de la biomasa.

6.1.2 Condiciones actuales de operación de la caldera de poder.

En la Tabla 7, se presentan las condiciones de operación de la caldera y las características de la biomasa, siendo el contenido de humedad en base húmeda, composición de la materia prima y exceso de aire. Estos resultados fueron utilizados para realizar el balance de masa (ver ANEXO A), el cual permite obtener la relación másica aire-combustible, como mostrado en la Tabla 8. En este balance se supone que la biomasa que ingresa a los silos, no varía sus características, al momento de ingresar a la caldera.

Tabla 7. Condiciones de operación

| | Planta Celulosa Arauco | Planta Bioenergía Viñales |
|----------------|---------------------------|---------------------------|
| Humedad [%] | 49,40 | 47,60 |
| Composición | 76% eucalipto 24% pino | 100% Pino |
| Exceso de aire | 25% | 25% |

Tabla 8. Relación másica aire-combustible teórica.

| Planta | Relación másica aire-combustible (Combustión estequiométrica) | Relación másica aire-combustible (Combustión con exceso de aire- 25%) |
|--------------------|--|--|
| Celulosa Arauco | 2,78 | 3,48 |
| Bioenergía Viñales | 2,92 | 3,65 |

En la Figura 6, se puede observar la relación aire-combustible operacional tanto en Planta Celulosa Arauco, como en Planta Bioenergía Viñales.

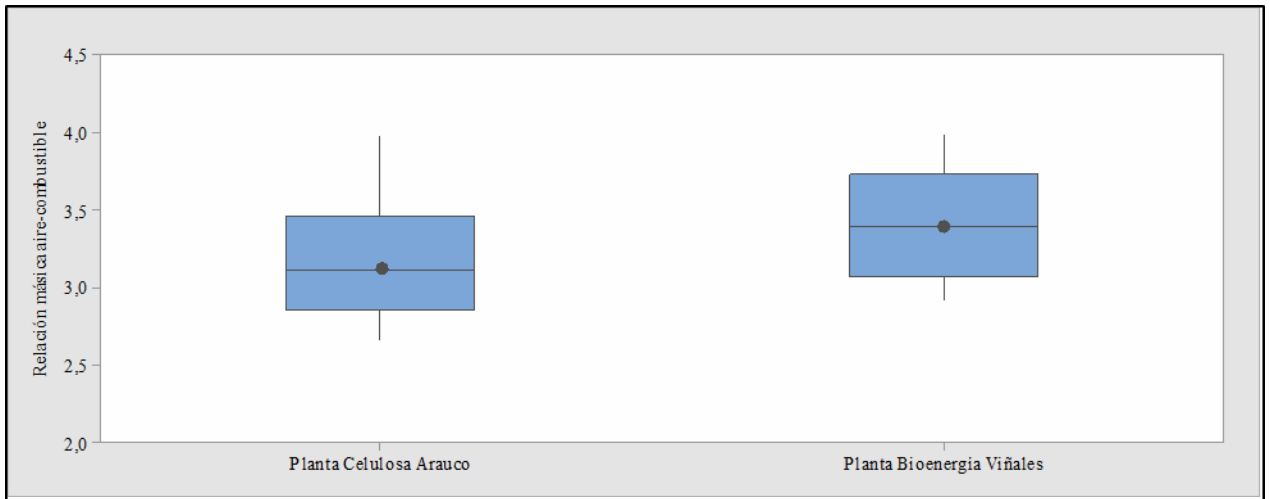


Figura 6. Relación másica aire-combustible operacional.

Para corroborar esta información se relacionó el exceso de aire con el O₂ del gas de combustión, según lo recomendado por Barnard et al. (1995). El exceso de aire, se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Excesodeaire} = \frac{\%O_2}{20,9 - \%O_2} \quad [\text{Ec.9}]$$

Los resultados de esta relación se presentan en la Figura 7.

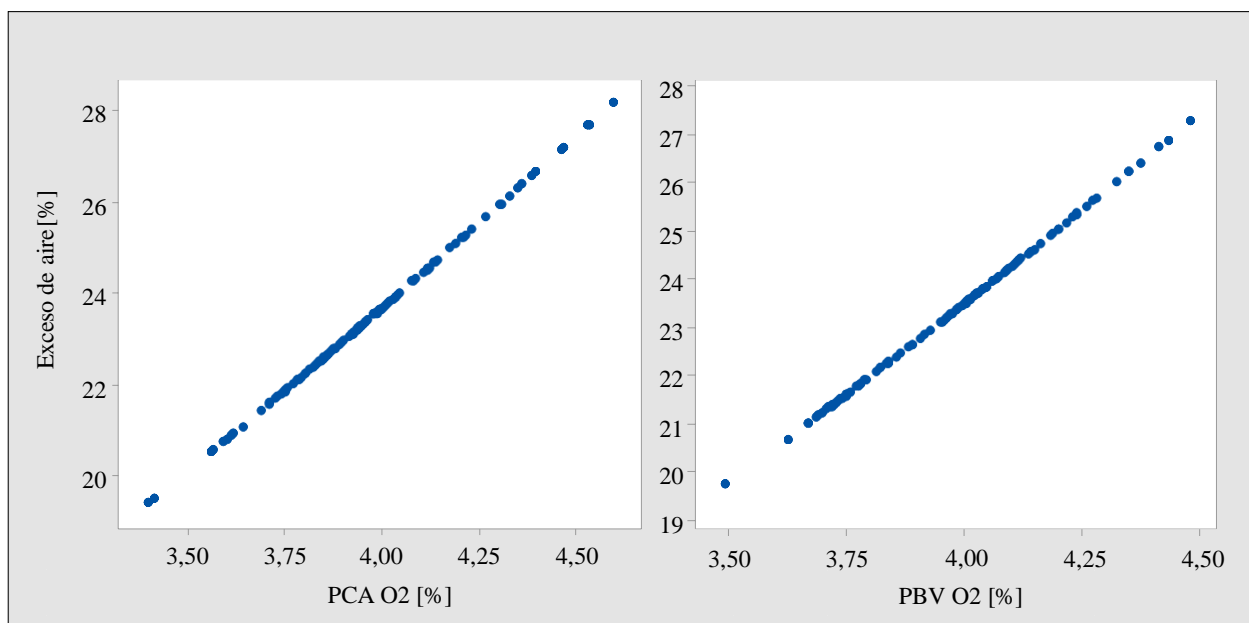


Figura 7. Relación entre el oxígeno y el exceso de aire.

En la Tabla 9, se puede observar el flujo mínimo de aire de fluidización en relación a la altura del lecho, según lo establecido en el manual de operación de la caldera, lo cual permite una correcta fluidización del lecho. Para determinar el aire de fluidización requerido en cada planta, se determinó la altura del lecho (ver Figura 8). En la Figura 9 y Figura 10, se observa el flujo de aire de fluidización suministrado en relación al requerido, para Planta Celulosa Arauco y Planta Bioenergía Viñales, respectivamente.

Tabla 9. Relación altura de lecho-Aire fluidización

| Altura lecho [cm] | Caída de presión [kPa] | Flujo mínimo aire fluidización [Nm ³ /s] |
|-------------------|------------------------|---|
| 40 | 6 | 18 |
| 50 | 7,5 | 22 |
| 60 | 9 | 27 |

Fuente: Manual de operación caldera.

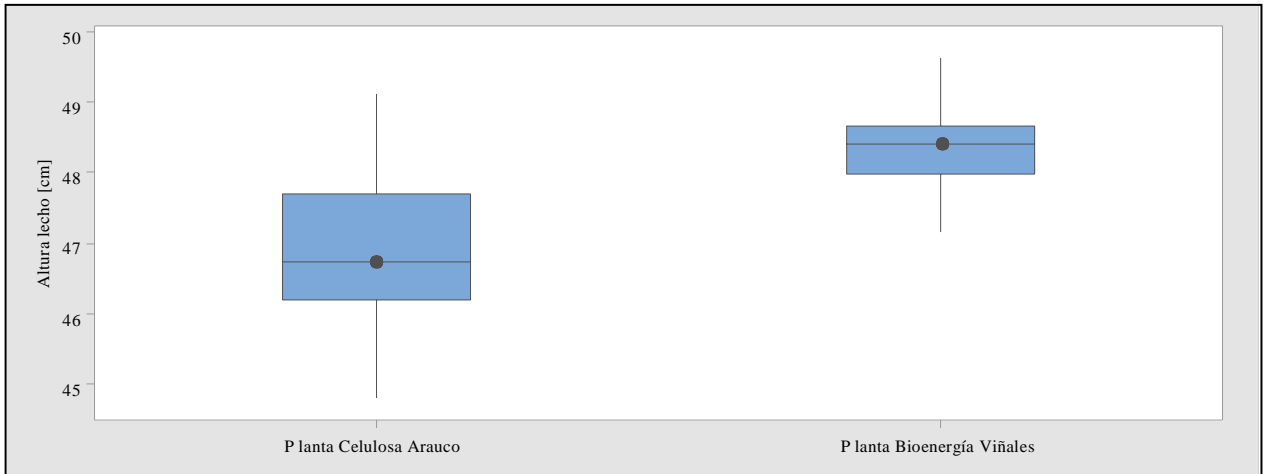


Figura 8. Altura lecho.

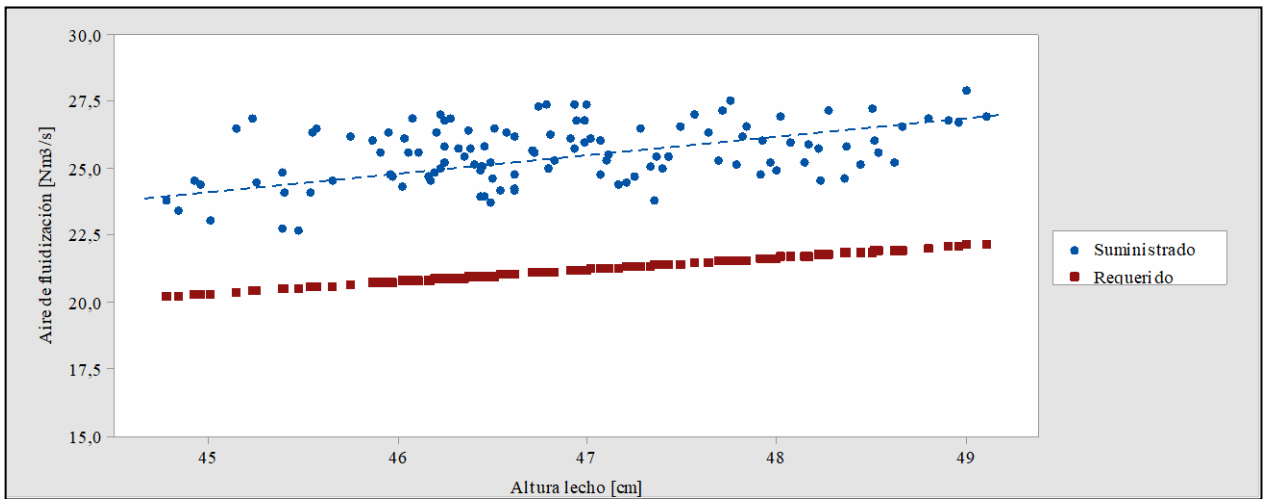


Figura 9. Aire de fluidización, Planta Celulosa Arauco.

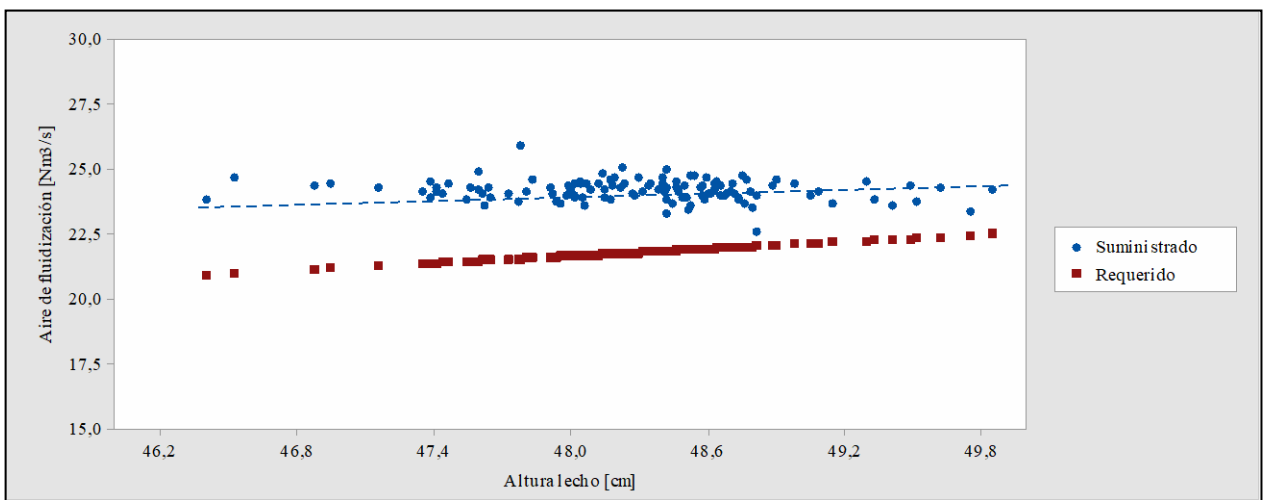


Figura 10. Aire de fluidización, Planta Bioenergía Viñales

En la Figura 11 y en la Figura 12, se presenta la composición del flujo de aire de fluidización de Planta Celulosa Arauco y Planta Bioenergía Viñales, respectivamente.

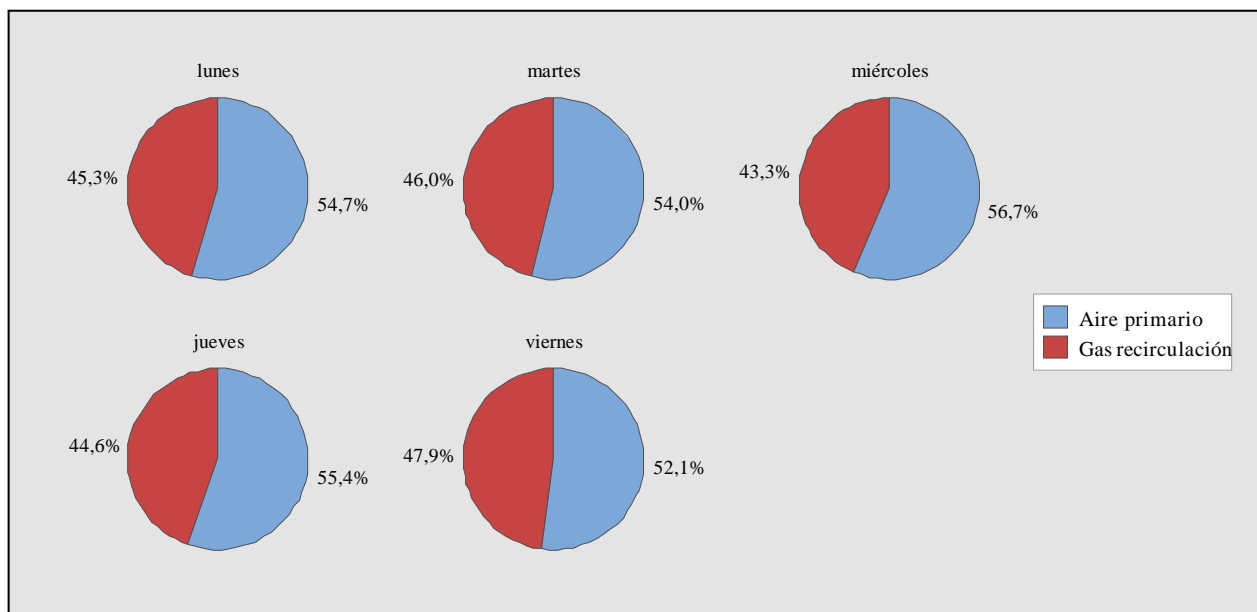


Figura 11. Composición aire de fluidización, Planta Celulosa Arauco

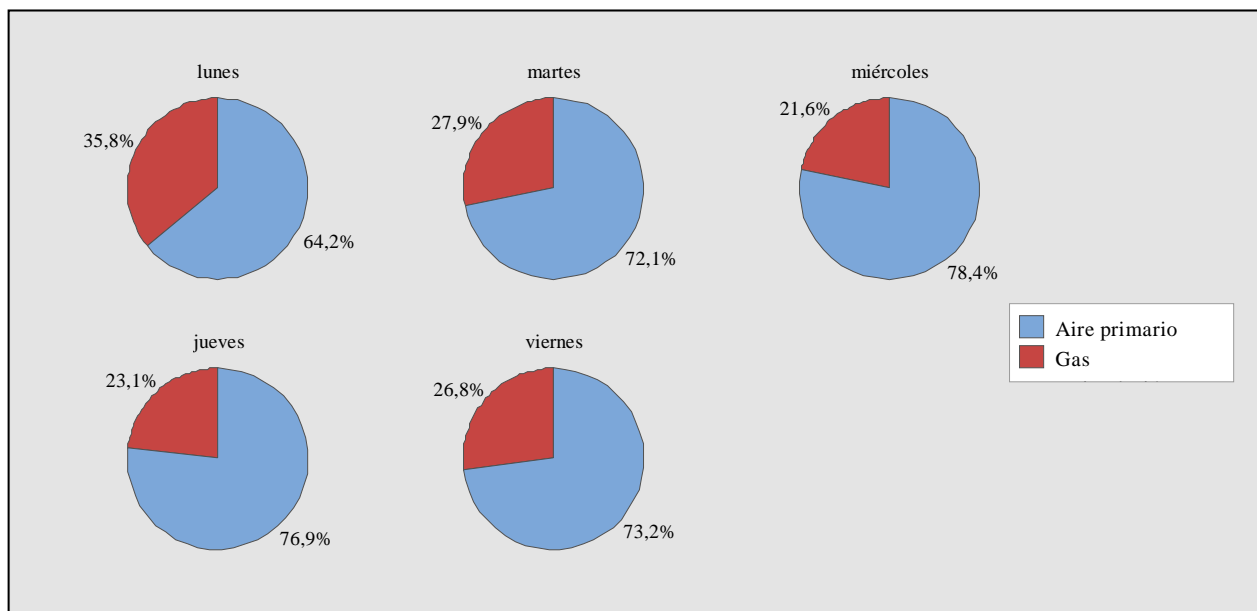


Figura 12. Composición aire de fluidización, Planta Bioenergía Viñales

En la Figura 13, se presenta la distribución de la temperatura del lecho, tanto para Planta Celulosa Arauco, como el Planta Bioenergía Viñales.

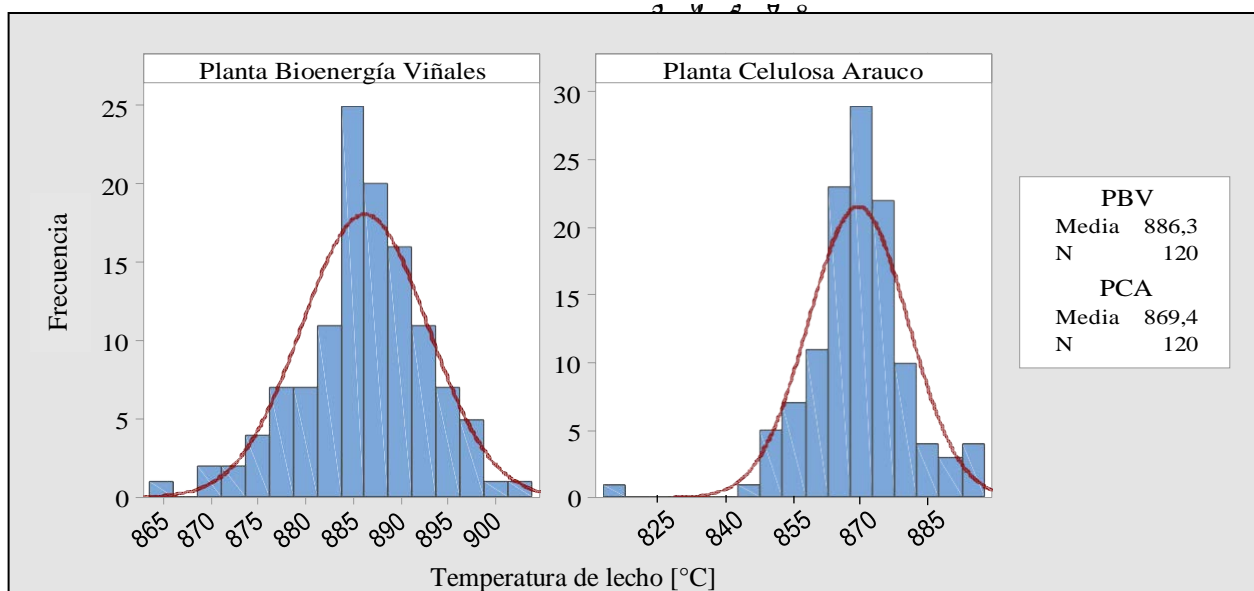


Figura 13. Temperatura lecho de caldera.

6.1.3 Contenido de materia orgánica en cenizas.

Con el fin de conocer el estado de las cenizas, generadas en Planta Celulosa Arauco y Planta de Bioenergía Viñales, se determinó el contenido de materia orgánica, los cuales pueden ser observado en la Figura 14.

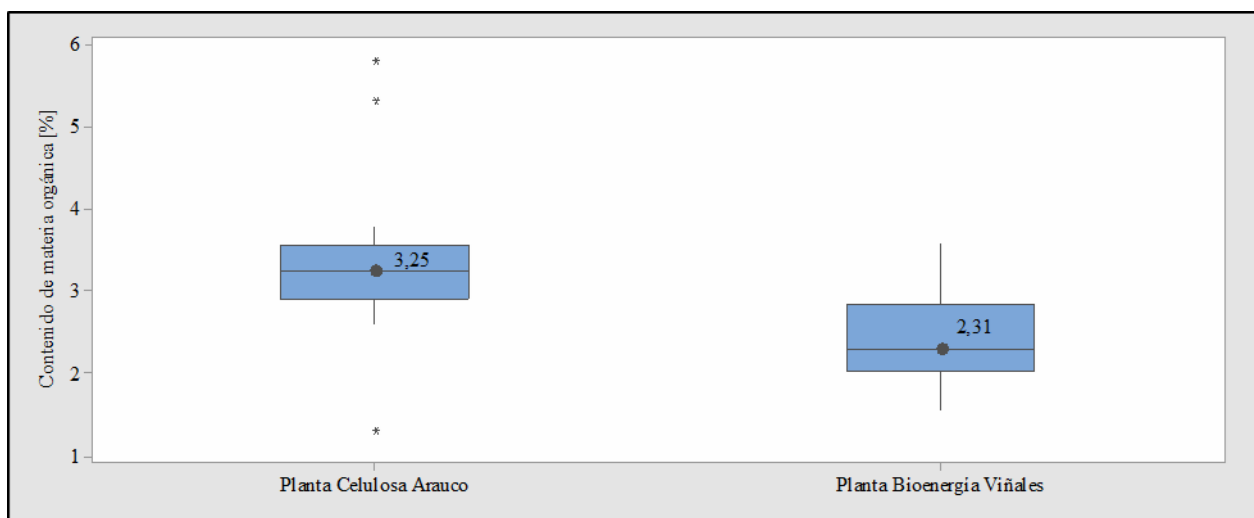


Figura 14. Contenido de materia orgánica en ceniza.

En la Tabla 10, se puede observar los valores del índice de capacidad potencial del proceso (C_p) y su interpretación, según el valor obtenido. En la Figura 15, se presenta el análisis de capacidad del proceso, asociado al proceso de combustión de la biomasa, según las especificaciones del contenido de materia orgánica en las cenizas, para la Planta Celulosa Arauco.

Tabla 10. Valores C_p y su interpretación.

| Valor del índice C_p | Clase o categoría del proceso | Decisión |
|------------------------|-------------------------------|---|
| $C_p \geq 2$ | Clase mundial | Se tiene calidad Seis Sigma. |
| $C_p > 1.33$ | 1 | Adecuado. |
| $1 < C_p < 1.33$ | 2 | Parcialmente adecuado, requiere de un control estricto. |
| $0.67 < C_p < 1$ | 3 | No adecuado para el trabajo. Es necesario un análisis del proceso. Requiere de modificaciones serias para alcanzar una calidad satisfactoria. |
| $C_p < 0.67$ | 4 | No adecuado para el trabajo. Requiere de modificaciones muy serias. |

Fuente: Gutiérrez Pulido & Vara Salazar, 2013.

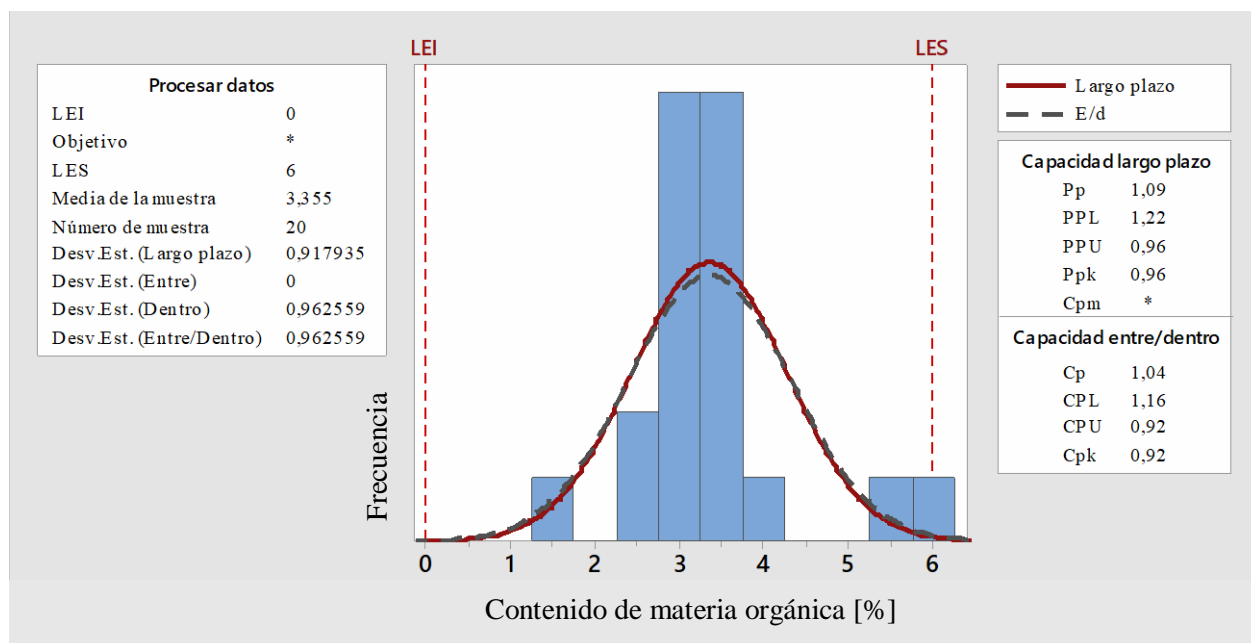


Figura 15. Informe de capacidad de entre/dentro plazo para Ceniza de Planta Celulosa Arauco.

En la Figura 16, se puede apreciar la carta de control Xbarra-Rango de las cenizas generadas en Planta Celulosa Arauco.

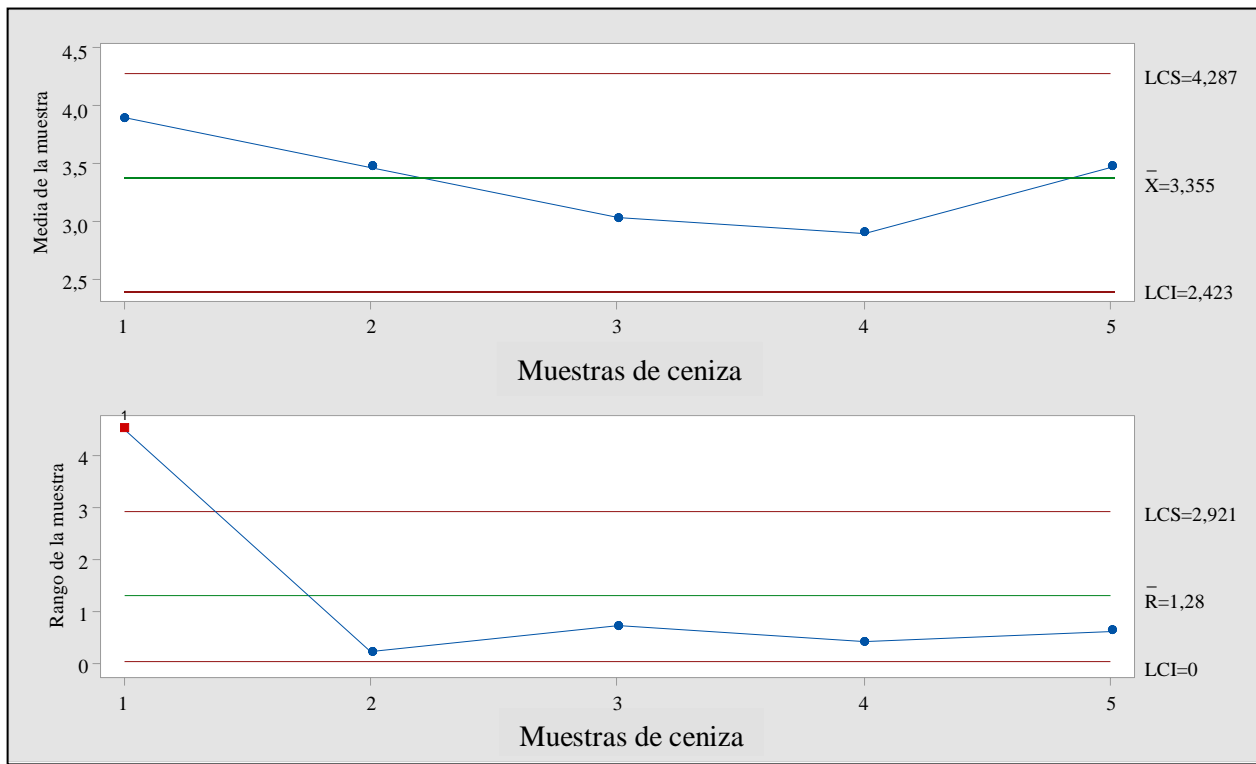


Figura 16. Carta de control Xbarra-Rango de ceniza, Planta Celulosa Arauco.

6.2 Discusión

6.2.1 Calidad de la biomasa.

De acuerdo a la Figura 2, en Planta Celulosa Arauco, la biomasa proviene principalmente de residuos de Eucalipto, alcanzando un 76% del total. Esto se debe a que los desechos de la biomasa utilizada, provienen principalmente de la línea 1 de Planta Celulosa Arauco, la cual produce celulosa kraft blanqueada en base a eucalipto. A diferencia de la caldera de poder de la Planta Bioenergía Viñales, sólo utiliza pino.

En la Figura 3, se observa que la biomasa de Planta Celulosa Arauco cumple con los requisitos señalados en la Tabla 4, siendo de 31% finos, 65% aceptado, 0,9% sobre tamaño y 2,8% sobre espesor. Lo cual impide, que se presenten alteraciones en la alimentación de la biomasa hacia la caldera y en los niveles de temperatura del lecho. Sin embargo, de acuerdo a los datos presentados en la Figura 4, en Planta Bioenergía Viñales, el porcentaje de finos superó el máximo permitido, alcanzando un 50%, este exceso de finos al tener un bajo tiempo de residencia en el lecho, esto se debe que, si las partículas son demasiado finas, se pueden proyectar fuera del hogar, por lo que no se puede mantener un adecuado número de ellas en el lecho fluidificado pudiendo provocar un aumento en el contenido de materia orgánica en las cenizas volantes.

En la Figura 5, se observa que, tanto en Planta Celulosa Arauco, como en Planta Bioenergía Viñales, el contenido de humedad de la biomasa cumple con el requisito establecido para un correcto funcionamiento de la caldera, el cual no debe ser mayor a un 56%, permitiendo, que la biomasa se quemara en su totalidad.

6.2.2 Condiciones actuales de operación de la caldera de poder.

A partir del balance de materia, se determinó que la relación másica aire-combustible para Planta Celulosa Arauco y Planta Bioenergía Viñales, es de 2,78 y 2,92, respectivamente. Al considerar un exceso de aire del 25%, se obtuvo una relación de 3,48 y 3,65. En la Figura 6, se observa que, tanto en Planta Celulosa Arauco, como en Planta Bioenergía Viñales, el flujo de aire de combustión suministrado se encuentra dentro del rango determinado a partir del balance. Sin embargo, hay que considerar que el balance de materia realizado se hizo en base al flujo de combustible en la entrada de los silos de la caldera, existiendo la posibilidad de una alguna diferencia en estos resultados, debido a que el flujo a la salida del silo (alimentación al lecho de la caldera), no es igual al de entrada al silo. Por lo tanto, para corroborar esta información, en la Figura 7, se presenta la relación entre el oxígeno del gas de combustión y el exceso de aire suministrado, obteniéndose que, en ambas plantas, el exceso de aire se encuentra en un rango entre 20%-28%, manteniendo un contenido de oxígeno en el gas de combustión, entre 3,5% y 4,5%.

En la Tabla 9, se presenta el flujo de aire de fluidización mínimo a partir de la altura del lecho de la caldera presentado en la Figura 8. De acuerdo a la Figura 9 y Figura 10, en ambas plantas se entrega el flujo aire de fluidización requerido, permitiendo que se genere una correcta suspensión, mezclado y quema de las partículas combustibles. Evitando problemas asociados a la fluidización, tales como la acumulación de partículas de combustible en zonas puntuales del lecho, generando que el combustible y la ceniza se junten conformando masas escoriificadas (“Calderas de lecho fluidificado”).

En la Figura 12, se puede observar, que el aire de fluidización en Planta Bioenergía Viñales se compone de un 27% de gas de recirculación y un 73% de aire primario. En cuanto a Planta Celulosa Arauco, esta composición es de 45% de gas de recirculación y un 55% de aire primario (ver Figura 11), observándose que en Planta Celulosa Arauco se utiliza un porcentaje mayor de gas de recirculación en relación a la otra planta en estudio, lo cual provoca que la temperatura del lecho sea inferior (Suvarnakuta et al. 2010). La temperatura del lecho se presenta en Figura 13, donde en Planta Celulosa Arauco la temperatura promedio es de 870°C y en Planta Bioenergía Viñales la

temperatura promedio es de 890°C, de acuerdo a literatura este aumento de temperatura permite quemar de mejor manera la biomasa (Tuominen, 2018).

De acuerdo a los resultados obtenidos del contenido de materia orgánica en las cenizas, se observa, que la planta que presenta una mayor temperatura de lecho, el contenido de materia orgánica es inferior. Por lo tanto, es conveniente disminuir el contenido de gas de recirculación en Planta Celulosa Arauco, de tal forma que permita aumentar la temperatura del lecho y consecuentemente disminuir el porcentaje de materia orgánica en las cenizas. No obstante, se debe considerar que la temperatura máxima del lecho no debe superar los 900°C, debido a que puede causar sinterización en el lecho, provocando la obstrucción de las boquillas de aire fluidizado y la interrupción del proceso de combustión (Huhtinen et al., 2013).

6.2.3 Contenido de materia orgánica en cenizas.

Se evaluó el contenido de materia orgánica en las cenizas generadas en las calderas de poder de Planta Celulosa Arauco y Planta Bioenergía Viñales. De acuerdo a la Figura 14, se observa que en ambas plantas se cumple el requerimiento establecido por Empresa Polpaico, con un máximo de 6% de materia orgánica en las cenizas. Sin embargo, en Planta Bioenergía Viñales, el valor más alto de contenido de materia orgánica fue de 3.5%, en cuanto a la Planta Celulosa Arauco si bien, esta se encuentra dentro del límite establecido, la muestra con un mayor contenido de materia orgánica fue de 5,8%, acercándose al máximo.

A partir del análisis del índice de capacidad potencial del proceso (C_p), presentado en la Figura 15, se obtuvo un valor de 1,04, lo cual indica que la ceniza generada en Planta Celulosa Arauco se adecua parcialmente al límite establecido (0%-6%), requiriendo el proceso un control estricto para lograr la calidad Seis Sigma, esto quiere decir que como máximo se generen 3,4 defectos por millón de oportunidades de error (Gutiérrez, 2013). Además, en la carta de control Xbarra-Rango, presentada en la Figura 16, se observa en la carta rango que, la obtención del contenido de materia orgánica se encuentra fuera de control estadístico, debido a que, en el primer día, este contenido se encuentra fuera de los límites de control.

7. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusión

En Planta Bioenergía Viñales se cumple con los requisitos de calidad del contenido materia orgánica, no obstante, en Planta Celulosa Arauco este contenido es parcialmente adecuado, por lo que requiere de un control estricto de las variables de operación.

La biomasa alimentada en Planta Celulosa Arauco cumple con los requerimientos establecidos en el manual de operación de la caldera, en cuanto PBV no cumple el porcentaje de finos.

De las variables operacionales estudiadas se concluye que el flujo de aire de combustión y el flujo de aire de fluidización, para ambas calderas analizadas, cumplen con los requisitos establecidos.

En Planta Celulosa Arauco, el alto porcentaje de gas de recirculación provoca un aumento en el contenido de materia orgánica en las cenizas.

7.2 Recomendaciones

Se recomienda que Planta Celulosa Arauco realice diferentes ensayos que permitan determinar el porcentaje adecuado de flujo de gas de recirculación y flujo de aire primario, de tal forma que permitan aumentar la temperatura del lecho, para disminuir el contenido de materia orgánica en las cenizas. Para estas pruebas se recomienda no superar los 900°C para evitar la sinterización de la ceniza de fondo.

Actualmente en Planta Celulosa Arauco y Planta Bioenergía Viñales no se tiene conocimiento de la cantidad de biomasa que ingresa a la caldera, por lo que es recomendable instalar un medidor de flujo de la biomasa que ingresa al lecho de la caldera.

8. REFERENCIAS

Calderas de lecho fluidificado.XVII. Recuperado desde http://manager.redsauce.net/AppController/commands_RSM/api/api_getFile.php?itemID=185&propertyID=20&RStoken=59e8ac1045d03e2ff6564c0638315f38

Calleja, J. (1983). Adiciones y cementos con adiciones. Recuperado desde <https://www.researchgate.net/publication/269664222> Adiciones y cementos con adiciones

Carrasco garcía, J. (2008). Combustión directa de la biomasa. Recuperado desde http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45279/componente45278.pdf

Domínguez Gómez, M. (2018). Centrales de biomasa: tipos de caldera y caso práctico. Recuperado desde <https://www.researchgate.net/publication/328307481> CENTRALES DE BIOMASA TIPOS D E CALDERA Y CASO PRACTICO

Empresas ARAUCO (2019). Manual interactivo celulosa Arauco [Programa interactivo]

García, J. (2016). Caldera Biomasa. Recuperado desde <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90906/fichero/TFG+Javier+Garc%C3%ADa+Reyes+PDF.pdf>

Gutiérrez Pulido, H., & Vara Salazar, R. (2013). Control estadístico de la calidad y Seis Sigma (3rd ed.). México: McGraw-Hill Education.

Hidalgo, (1990). La humedad en la biomasa: herramientas de medida y control. Recuperado desde <http://www.energetica21.com/descargar.php?seccion=articulos&archivo=krrMI1uxULvYQ6WQ6DrPPnEQWBDEa0AAprMxh7k2HUPYPlpJpVZ50dJ.pdf>

Jaigua, b., contreras, m., & murillo, l. (2010). Estudio de hormigones de altas prestaciones utilizando áridos y cemento local, cenizas volcánicas naturales y súper-plastificante.

Lowe, r. (2012). Pozzolanic properties of biomass fly ash. Recuperado desde https://tigerprints.clemson.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2390&context=all_theses

Memoria ARAUCO. (2018). Recuperado desde http://www.svs.cl/sitio/aplic/serdoc/ver_sgd.php?S567=16b517db8b47253cdeae0c8e4c5d89b2vfdwqmvfovvrvejoukvfevrvuk5lrtfcufqwpq==&secuencia=-1&t=1562562334

Muñoz Solares, M. (2012). Análisis comparativo de gases de combustión de calderas bagaceras.

Nogués, F., García-Galindo, D., & Rezeau, A. (2010). Energía de la biomasa (Volumen I) (1st ed.). España: Prensas Universitarias Zaragoza.

Rivera, F., López, M., & Martínez, P. (2013). Evaluación del uso de altos volúmenes de cenizas volantes en el hormigón. Recuperado desde https://www.researchgate.net/publication/312898623_Evaluacion_del_uso_de_altos_volumenes_de_cenizas_volantes_en_el_hormigon

Reporte sostenibilidad. (2018). Recuperado desde https://www.arauco.cl/chile/wp-content/uploads/sites/14/2017/07/reporte_arauco_2018.pdf

Tuominen T. (2018). Dynamics and adjustment of the circulating fluidized bed boiler. Recuperado desde https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/158677/tuominen%20toni_kiertoleijukattilan%20dynamiikka%20ja%20s%C3%A4%C3%A4t%C3%B6.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ukrainczyk,a, Vrbos,b & Koendersa (2016). Reuse of Woody Biomass Ash Waste in Cementitious Materials <https://pdfs.semanticscholar.org/5d6b/de14e3f4714955fd559d710cc631279a527a.pdf>

Wood Waste Combustion In Boilers. Eecuperado desde https://www3.epa.gov/ttn/chief/old/ap42/ch01/s06/final/c01s06_oct1996.pdf

9. ANEXOS

9.1 ANEXO A. Balance de materia de la caldera.

Este ejemplo de cálculo, se realiza en base a las condiciones de operación presentadas a continuación:

Tabla 11. Composición elemental de la biomasa de diseño.

| Elemento (%E) | Eucalipto [%] | Pino [%] | PM [g/mol] |
|----------------|---------------|----------|------------|
| C | 46,40 | 48,40 | 12,01 |
| H ₂ | 5,70 | 6,20 | 2,02 |
| S | 0,02 | 0,04 | 32,07 |
| N ₂ | 0,20 | 0,10 | 28,01 |
| O ₂ | 43,69 | 42,46 | 31,99 |
| Ceniza | 3,99 | 2,80 | - |

Fuente: Manual de operación de la caldera.

La biomasa alimentada, proviene de dos tipos de

Tabla 12. Mezcla de biomasa alimentada.

| Porcentaje eucalipto [%] | Porcentaje pino [%] |
|--------------------------|---------------------|
| 70 | 30 |

Balance materia por componente:



Cálculo de moles de O₂ requerido por quemar cada componente:

Base de cálculo: 1 kg de combustible

50% de humedad (50% seco)

Moles requeridos para quemar el carbono:

$$\begin{aligned} & \frac{70\%}{100} * 1 [\text{kg}] * \frac{46,40\%}{100} * \frac{1}{12,01} \left[\frac{\text{mol C}}{\text{g}} \right] * \frac{1000[\text{g}]}{1[\text{kg}]} * \frac{1 [\text{mol O}_2]}{1[\text{mol C}]} * \frac{50\%}{100} + \frac{30\%}{100} * 1 [\text{kg}] \\ & * \frac{48,40\%}{100} * \frac{1}{12,01} \left[\frac{\text{mol C}}{\text{g}} \right] * \frac{1000[\text{g}]}{1[\text{kg}]} * \frac{1 [\text{mol O}_2]}{1 [\text{mol C}]} * \frac{50\%}{100} = 19,56 \text{ moles de O}_2 \end{aligned}$$

Moles requeridos para quemar el hidrógeno:

$$\begin{aligned} & \frac{70\%}{100} * 1 [\text{kg}] * \frac{5,7\%}{100} * \frac{1}{2,02} \left[\frac{\text{mol H}_2}{\text{g}} \right] * \frac{1000[\text{g}]}{1[\text{kg}]} * \frac{0,5 [\text{mol O}_2]}{1[\text{mol H}_2]} * \frac{50\%}{100} + \frac{30\%}{100} * 1 [\text{kg}] * \frac{6,2\%}{100} \\ & * \frac{1}{2,02} \left[\frac{\text{mol H}_2}{\text{g}} \right] * \frac{1000[\text{g}]}{1[\text{kg}]} * \frac{0,5[\text{mol O}_2]}{1[\text{mol H}_2]} * \frac{50\%}{100} = 7,25 \text{ moles de O}_2 \end{aligned}$$

Moles requeridos para quemar el oxígeno:

$$\begin{aligned} & \frac{70\%}{100} * 1 [\text{kg}] * \frac{43,69\%}{100} * \frac{1}{31,99} \left[\frac{\text{mol O}_2}{\text{g}} \right] * \frac{1000[\text{g}]}{1[\text{kg}]} * \frac{50\%}{100} + \frac{30\%}{100} * 1 [\text{kg}] * \frac{42,46\%}{100} \\ & * \frac{1}{31,99} \left[\frac{\text{mol O}_2}{\text{g}} \right] * \frac{1000[\text{g}]}{1[\text{kg}]} * \frac{50\%}{100} = 6,77 \text{ moles de O}_2 \end{aligned}$$

Moles requeridos para quemar el nitrógeno:

$$\begin{aligned} & \frac{70\%}{100} * 1 [\text{kg}] * \frac{0,2\%}{100} * \frac{1}{28,01} \left[\frac{\text{mol N}_2}{\text{g}} \right] * \frac{1000[\text{g}]}{1[\text{kg}]} * \frac{2 [\text{mol O}_2]}{1[\text{mol N}_2]} * \frac{50\%}{100} + \frac{30\%}{100} * 1 [\text{kg}] * \frac{0,1\%}{100} \\ & * \frac{1}{28,01} \left[\frac{\text{mol N}_2}{\text{g}} \right] * \frac{1000[\text{g}]}{1[\text{kg}]} * \frac{2[\text{mol O}_2]}{1[\text{mol N}_2]} * \frac{50\%}{100} = 0,0643 \text{ moles de O}_2 \end{aligned}$$

Moles requeridos para quemar el azufre:

$$\frac{70\%}{100} * 1 [\text{kg}] * \frac{0,02\%}{100} * \frac{1}{32,07} \left[\frac{\text{molS}}{\text{g}} \right] * \frac{1000[\text{g}]}{1[\text{kg}]} * \frac{1[\text{molO}_2]}{1[\text{molS}]} * \frac{50\%}{100} + \frac{30\%}{100} * 1 \left[\frac{\text{kg}}{100} \right] * \frac{0,04\%}{100} * \frac{1}{32,07} \left[\frac{\text{molS}}{\text{g}} \right] * \frac{1000[\text{g}]}{1[\text{kg}]} * \frac{1[\text{molO}_2]}{1[\text{molS}]} * \frac{50\%}{100} = 0,0041 \text{ moles de O}_2$$

Cantidad total de moles de O₂ requerido:

$$\sum \text{mol O}_2 = 19,56 + 7,25 + 0,0643 + 0,0041 = 26,88 \text{ moles O}_2$$

Considerando que la biomasa aporta un porcentaje de O₂, la cantidad total de moles requeridos es:

$$\text{Moles O}_2 \text{ requeridos} = 26,88 - 6,77 = 20,11 \text{ moles O}_2$$

El oxígeno necesario es tomado del exterior, por tanto, se introduce como aire.

Tabla 13. Composición del aire.

| Oxígeno | Nitrógeno |
|---------|-----------|
| 21 | 79 |

Volumen molar O₂ = 22,4 [l/mol]

Densidad aire = 1,29 [g/l]

$$\begin{aligned} \text{Masadeaire} &= 20,11 \text{ moles O}_2 * \frac{100}{21} * 22,4 \left[\frac{\text{l}}{\text{mol O}_2} \right] * 1,29 \left[\frac{\text{g}}{\text{l}} \right] * \frac{1}{1000} \left[\frac{\text{kg}}{\text{g}} \right] \\ &= 2,77 \text{ kg aire} \end{aligned}$$

Se trabaja con un exceso de aire para que las reacciones se den de manera más satisfactoria, el exceso de aire con el que se trabajará será del 25%.

$$2,77 \text{ kg de aire} * 1,25 = 3,46 \text{ kg de aire}$$

Esto indica que, por cada 1 kg de biomasa alimentada, se requieren 3,46 kg de aire.

92 ANEXO B. Características de las calderas

Las calderas de poder estudiadas fueron fabricadas por la empresa METSO POWER, el modelo de estas es HYBEX, que corresponde a calderas de lecho fluidizado burbujeante, además estos equipos son del tipo acuotubular de alta presión. La superficie de calefacción es de 8.290 [m²], la producción de vapor es de 210 [Ton/h] para combustible basado en madera y 250 [Ton/h] para combustible combinado con Fuel Oil N°6, la presión máxima de trabajo autorizada es de 100 [bar] y el combustible utilizado son desechos húmedos de madera.

La caldera de poder se compone principalmente de las siguientes partes:

- Elementos a presión (tubos de pared, domo, sobrecalentadores, banco generador, economizador, etc.)
- Sistema de aire de combustión (ductos, ventiladores, calentadores, dampers, etc.)
- Sistema de gases de combustión (ductos, ventiladores, dampers, chimenea, etc.)
- Sistema de combustible (silos, transportadores, tornillos, válvulas rotatorias, etc.)
- Sistema combustible auxiliar (sistema de petróleo pesado, sistema de gas natural, sistema de gas propano, quemadores de partida, quemadores de carga)
- Sistema de manejo de arena (sistema de izaje de bolsas, silo, válvula rotatoria, etc.)
- Sistema de manejo de desechos (chutes, transportadores, válvulas rotatorias, etc.)
- Sistema de incendio (gabinetes de manguera, detectores de flujo extintores manuales)
- Precipitador electrostático - Sistema de control
- Sistema de seguridad caldera (PLC, etc.)
- Sistema de agua de alimentación
- Sistema de agua y vapor