

Lineamientos para la operación eficiente de sistemas de generación de vapor y reducción de emisiones atmosféricas en plantas de beneficio del sector palmero

Alexander Valencia Cruz, Marcelo Hernández Mahecha
Juan Carlos Espinosa Camacho



Publicación cofinanciada por
Fedepalma-Fondo de Fomento Palmero

Coordinación editorial
Yolanda Moreno Muñoz
Esteban Mantilla

Diseño y diagramación
Ximena Díaz Ortiz

Impresión
Javegráf

ISBN: 978-958-8616-72-8

Bogotá, D.C.-Colombia
Septiembre de 2015

The background image shows a large industrial facility, likely a sugar refinery, with multiple levels of metal structures, pipes, and walkways. The facility is set against a clear sky. In the foreground, there are several palm trees, suggesting a tropical or subtropical location. The overall scene is brightly lit, possibly during the day.

Lineamientos para la operación eficiente de sistemas de generación de vapor y reducción de emisiones atmosféricas en plantas de beneficio del sector palmero

Alexander Valencia Cruz, Marcelo Hernández Mahecha
Juan Carlos Espinosa Camacho

Lineamientos para la operación eficiente de sistemas de generación de vapor y reducción de emisiones atmosféricas en plantas de beneficio del sector palmero

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Fedepalma

Jens Mesa Dishington

Presidente Ejecutivo

Andrea Carolina González Cárdenas

Directora Unidad de Planeación Sectorial y Desarrollo Sostenible

Juan Carlos Espinosa Camacho

Líder Ambiental

Edna Katherin Ibarra León

Líder Ambiental*

Julián David Cifuentes Sánchez

Analista Ambiental**

Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma

José Ignacio Sanz Scovino

Director General

Jesús Alberto García Núñez

Coordinador Programa de Procesamiento

Nidia Ramírez Contreras

Líder de Ingeniería

Autores

Alexander Valencia Cruz, CAIA Ingeniería

Marcelo Hernández Mahecha, CAIA Ingeniería

Juan Carlos Espinosa Camacho, Fedepalma

Edición

Juan Carlos Espinosa Camacho

Bogotá, Colombia
Septiembre de 2015

* Hasta septiembre de 2014.

** Desde mayo de 2014.



Contenido

Agradecimientos	12
Presentación	14
Introducción	16
Siglas, acrónimos y abreviaturas	18
Parte I. Marco regulatorio y estrategia gremial sobre emisiones atmosféricas	21
1 Marco regulatorio de emisiones atmosféricas	22
1.1 Requerimientos legales en emisiones para las plantas de beneficio	22
1.2 Resolución 909 de 2008	23
1.2.1 Objeto y alcance	24
1.2.2 Estándares de emisión admisibles para las plantas de beneficio	24
1.2.3 Corrección por oxígeno	26
2 Gestión del sector palmero para modificar la Resolución 909 de 2008	27
2.1 Proceso de formulación de la nueva reglamentación	28
2.2 Primer diagnóstico y propuesta de modificación	28
2.3 Requerimientos adicionales del Ministerio de Ambiente	30
2.4 Estudio técnico desarrollado por el sector palmero	31
2.4.1 Caracterización de emisiones y de implementación de buenas prácticas	32
2.4.2 Análisis técnico y económico de alternativas de cumplimiento	33
2.4.3 Efecto potencial de las emisiones del sector sobre la calidad del aire	35
2.4.4 Análisis costo-beneficio de cumplir con el estándar de 50 mg/m ³ de MP	37

2.5 Propuesta para modificar la Resolución 909 de 2008	38
2.6 Respuesta negativa del Ministerio de Ambiente	39
3 Diagnóstico sectorial de emisiones de MP y buenas prácticas	40
3.1 Caracterización de emisiones de MP y de variables del proceso de combustión	40
3.2 Síntesis de resultados y conclusiones	44
4 Estrategia gremial para la gestión integral de emisiones de MP	45
4.1 Objetivo y fases de desarrollo	45
4.2 Fase 1: Portafolio preliminar de buenas prácticas para reducir emisiones de MP	46
4.3 Fase 2: Ejercicio piloto de implementación de las BPO	48
4.3.1 Selección de las calderas piloto	49
4.3.2 Diagnóstico integral de las calderas piloto	50
4.3.3 Plan piloto de implementación de las BPO	55
4.3.4 Resultados obtenidos y conclusiones del ejercicio piloto	56
4.4 Fase 3: Construcción de lineamientos de gestión para las plantas de beneficio	59
Parte II. Lineamientos de gestión de emisiones para plantas de beneficio del sector palmero	63
5 Modelo para la gestión integral de emisiones de MP con un enfoque preventivo	64
5.1 Premisas sobre la eficiencia de la combustión y la generación de material particulado	64
5.2 Objetivos y líneas de acción	65
5.3 Estrategia de Controles Primarios de Emisiones	67
5.3.1 Propósito: combustión completa de la biomasa	67
5.3.2 Variables primarias de control de la combustión	68
5.3.3 Consignas de control de la combustión	69
5.3.4 Buenas prácticas operacionales para una combustión completa	72
5.4 Estrategia de Controles Secundarios de Emisiones	73
5.4.1 Propósito: control de emisiones de MP a la atmósfera y cumplimiento legal	73
5.4.2 Equipo de control de emisiones según el esfuerzo requerido de remoción de MP	74

5.4.3 Buenas prácticas operacionales para controlar la emisión de MP a la atmósfera	76
5.5 Esquema general del modelo de gestión integral de emisiones de MP	77
5.6 Hoja de ruta para la implementación del modelo de gestión	77
5.6.1 Paso 1: Comprender y apropiar los conceptos y lineamientos del modelo	77
5.6.2 Paso 2: Realizar un diagnóstico integral	80
5.6.3 Paso 3: Definir objetivos y metas concretas	81
5.6.4 Paso 4: Priorizar e implementar Buenas Prácticas Operacionales	84
6 Portafolio de Buenas Prácticas Operacionales	87
6.1 Combustible	88
6.2 Control de la combustión	94
6.3 Operación del sistema de vapor	100
6.4 Ingeniería y mantenimiento	100
6.5 Corrección por oxígeno	105
6.6 Sistemas de control de emisiones	111
Conclusiones	112
Bibliografía	115
Anexos	117
Anexo 1. Paquetes de BPO diseñados para el ejercicio piloto	121
Anexo 2. Características y eficiencia de los equipos de control de emisiones	122
Ciclones y multiciclones	124
Filtros de mangas	124
Precipitadores electrostáticos	127
Anexo 3. Estimación de costos para la adquisición, instalación y operación de equipos de control de emisiones en plantas de beneficio	130
Anexo 4. Procedimiento para estimar la cantidad de combustible requerido en la caldera	132
	143

Lista de Tablas

Tabla 1. Principales requerimientos legales en emisiones atmosféricas para plantas de beneficio del sector palmero	22
Tabla 2. Estándares de emisión admisibles para equipos de combustión externa que utilicen biomasa como combustible	25
Tabla 3. Primera propuesta del sector palmero para modificar la Resolución 909 de 2008	30
Tabla 4. Principales resultados de la caracterización de emisiones de MP del sector realizada en 2011-2012	32
Tabla 5. Resultados del análisis técnico de alternativas tecnológicas para cumplir con la Resolución 909 de 2008	33
Tabla 6. Resultados del análisis económico de alternativas tecnológicas para cumplir con la Resolución 909 de 2008	34
Tabla 7. Resultados del análisis del efecto potencial de las emisiones de MP del sector sobre la calidad del aire	35
Tabla 8. Resultados del análisis de tres escenarios de modelación de dispersión de contaminantes	36
Tabla 9. Calderas seleccionadas para el ejercicio piloto de implementación de BPO	50
Tabla 10. Síntesis de la evaluación cualitativa de consignas de control en las calderas piloto	51
Tabla 11. Síntesis de la evaluación cuantitativa de MP y oxígeno en las calderas piloto	53
Tabla 12. Comparación de niveles de MP antes y después de la implementación de BPO en las plantas piloto	57
Tabla 13. Eficiencia de remoción requerida en los equipos de control según el nivel de MP a la salida de la caldera	66
Tabla 14. Equipos de control de emisiones adecuados según el estándar aplicable y el grado de avance en Controles Primarios de Emisiones	75

Tabla 15. Indicadores sobre la calidad de la combustión en un muestreo isocinético	81
Tabla 16. Ejemplos de metas para la estrategia de Controles Secundarios de Emisiones	82
Tabla 17. Ejemplo de establecimiento de metas para la estrategia de Controles Secundarios de Emisiones.....	83
Tabla 18. Ejemplo de establecimiento de metas para la estrategia de Controles Primarios de Emisiones	84
Tabla 19. Ejemplo de evaluación de las consignas de control	85
Tabla 20. Paquetes de BPO diseñados para implementación en las seis plantas piloto	122
Tabla 21. Tipos de ciclones y multiciclones y su eficiencia teórica de remoción de MP.....	125
Tabla 22. Factores que incrementan o disminuyen la eficiencia esperada de un ciclón o multiciclón	126
Tabla 23. Ventajas y desventajas de los ciclones y multiciclones	127
Tabla 24. Ventajas y desventajas de los filtros de manga.....	129
Tabla 25. Ventajas y desventajas de los precipitadores electrostáticos.....	131
Tabla 26. Parámetros de las tres calderas para la estimación de costos de sistemas de control de emisiones	135
Tabla 27. Escenarios analizados para la estimación de costos de control de emisiones	135
Tabla 28. Comparativo de costos estimados por tecnología de control de emisiones y tamaño de caldera	138
Tabla 29. Detalle de la estimación de costos de equipos de control de emisiones	140

Lista de Figuras

Figura 1. Ejemplo de la corrección por oxígeno de referencia según la Resolución 909 de 2008	26
Figura 2. Portada de la propuesta de modificación de la Resolución 909 de 2008 entregada al MADS en 2013	38
Figura 3. Resultados de las mediciones de material particulado en las 16 calderas evaluadas	41
Figura 4. Variación entre las dos mediciones de MP en las calderas analizadas	42
Figura 5. Niveles de oxígeno en la chimenea (%) medidos durante la caracterización de emisiones de MP	43
Figura 6. Principales resultados de la caracterización sectorial de emisiones de MP realizada en 2012	44
Figura 7. Objetivo y fases de la estrategia sectorial de emisiones de material particulado	46
Figura 8. Portada de la publicación del portafolio preliminar de buenas prácticas	47
Figura 9. Resultados y lecciones aprendidas de la fase 1 de la estrategia gremial de gestión de emisiones de MP	48
Figura 10. Algunos hallazgos de la evaluación cualitativa de consignas de control de la combustión	52
Figura 11. Controles primarios y controles secundarios de emisiones de MP	66
Figura 12. Eficiencia de la combustión comparada con la concentración de oxígeno en la corriente de gases efluentes	67
Figura 13. Variables primarias a controlar en el proceso de combustión	68
Figura 14. Clasificación de las consignas de control de la combustión	69
Figura 15. Listado de BPO de los Controles Primarios de Emisiones	72

Figura 16. Relación entre las variables y consignas de control y las BPO de los Controles Primarios de Emisiones	73
Figura 17. Eficiencia de remoción de MP de los principales equipos de control de emisiones.....	74
Figura 18. Listado de BPO de los Controles Secundarios de Emisiones	76
Figura 19. Esquema general del modelo de gestión integral de emisiones de MP	78
Figura 20. Puntos de medición a la salida de la caldera, y en la chimenea	80
Figura 21. Relación entre consignas de control y categorías de BPO para los Controles Primarios de Emisiones	86
Figura 22. Portafolio de BPO para los Controles Primarios y Controles Secundarios de Emisiones	87
Figura 23. Geometría y principio de funcionamiento de los ciclones y multiciclones	125
Figura 24. Principio de funcionamiento del filtro de mangas	128
Figura 25. Principio de funcionamiento del precipitador electrostático	130
Figura 26. Esquema de implementación de dos ciclones en serie según el flujo de la caldera	136
Figura 27. Esquema de implementación de un filtro de mangas después de un ciclón, según el flujo de la caldera	137
Figura 28. Esquema de implementación de un precipitador electrostático	137

Agradecimientos

Son muchas las personas y organizaciones que han contribuido a que hoy las plantas de beneficio del sector palmero cuenten con unos lineamientos y una hoja de ruta para la gestión integral de sus emisiones de material particulado.

Queremos agradecer en primer lugar al Fondo de Fomento Palmero, que financió esta iniciativa durante más de cuatro años, y a la Junta Directiva de Fedepalma y a su Presidente Ejecutivo, Jens Mesa Dishington, que le dieron prioridad a esta temática, de gran relevancia para mejorar la gestión ambiental de las empresas palmeras en el país.

También agradecemos al equipo directivo, técnico y operativo de las plantas de beneficio que participaron en la caracterización de emisiones llevada a cabo entre noviembre de 2011 y marzo de 2012 y en el ejercicio piloto de implementación de Buenas Prácticas Operacionales para reducir emisiones entre enero de 2013 y marzo de 2014: Aceites S.A., Agroindustrias del Sur del Cesar Ltda. y Cía. S.C.A. - Agroince., Agropecuaria Santamaría S.A., Alianza Oriental S.A., C.I Extractora el Roble S.A.S., C.I Tequendama S.A.S., Entrepalmas S.A.S., Extractora Central S.A., Extractora Cusiana S.A.S., Extractora Sur del Casanare S.A.S., Guaicaramo S.A., Hacienda La Cabaña S.A., Indupalma Ltda., Inversiones La Mejorana S.A.S., Oleaginosas Santana S.A.S., Palmaceite S.A., Palmeras de la Costa S.A. y Palmeras del Llano S.A. Su interés y motivación por ser parte de esta iniciativa, y en especial sus ideas y retroalimentación permitieron inicialmente identificar los vacíos y prioridades que condujeron a estructurar esta iniciativa, y posteriormente afinar el portafolio de Buenas Prácticas Operacionales (BPO) que se presenta en esta publicación como guía para todas las plantas de beneficio del sector palmero colombiano.

Agradecemos también al equipo de la Compañía de Consultoría Ambiental liderado por Edilberto Sabogal, que adelantó los muestreos isocinéticos y otros estudios técnicos en diferentes fases de este trabajo, por su profesionalismo y calidad.

En sus primeras etapas, este trabajo contó con la valiosa participación de los Comités Asesores de Plantas de Beneficio de Cenipalma. Agradecemos en especial

el acompañamiento de sus representantes en las múltiples reuniones técnicas para sustentar una propuesta para modificar la Resolución 909 de 2008: Ramiro Benavides, Joergen Carrillo, Carlos Contreras, Jairo Iván Hoyos, María del Mar Maldonado, Nilson Rodríguez y Nazly Valenciano. Su dedicación y valiosos aportes permitieron enfocar el estudio acorde a las particularidades y necesidades del sector y obtener de él información valiosa para estructurar la estrategia gremial de manejo de emisiones atmosféricas que aquí se presenta.

Un agradecimiento especial a Jesús Alberto García y Nidia Ramírez del programa de Procesamiento de Cenipalma, quienes acompañaron, apoyaron, retroalimentaron y contribuyeron de múltiples formas a construir cada una de las etapas de esta iniciativa, cuyos frutos presentamos luego de más de 4 años de trabajo en conjunto. Este logro es también de ustedes y es una muestra de colaboración efectiva entre el Área Ambiental de la Unidad de Planeación Sectorial y Desarrollo Sostenible de Fedepalma y el Programa de Procesamiento de Cenipalma.

Queremos reconocer de manera muy especial el trabajo de Katherin Ibarra, Analista Ambiental de Fedepalma desde mayo de 2012 hasta septiembre de 2014, quien coordinó con CAIA Ingeniería los aspectos técnicos, logísticos y administrativos de este trabajo durante casi dos años y medio. Este es un producto de su iniciativa, esfuerzo y dedicación. Asimismo, a Julián Cifuentes, Analista Ambiental de Fedepalma desde mayo de 2014, quien apoyó las últimas fases de este trabajo y ayudó a elaborar o actualizar algunas de las tablas y figuras de esta publicación. Por último, queremos también reconocer el aporte del equipo técnico de CAIA Ingeniería, en particular el de Carlos Alonso Rodríguez y Germán Méndez, por su rigurosidad, conocimiento y empeño por obtener los mejores resultados para el gremio palmero.

Presentación

La transformación de los sistemas productivos hacia esquemas sostenibles por el reconocimiento de su impacto sobre el medio ambiente, el mayor conocimiento sobre las alternativas que brindan nuevas tecnologías, y por los avances en la legislación, es una realidad al interior de la palmicultura colombiana.

En sus inicios, el enfoque de la gestión ambiental de las empresas y sectores productivos giró en torno al cumplimiento de los requerimientos legales. Bajo este enfoque se desarrollaron tecnologías de control de la contaminación, principalmente sistemas de tratamiento de aguas residuales, equipos de control de las emisiones atmosféricas y tecnologías para la disposición adecuada de sustancias tóxicas y residuos ordinarios y peligrosos.

Posteriormente, la gestión ambiental empresarial evolucionó hacia estrategias más proactivas, buscando prevenir la contaminación en vez de remediar o controlar sus potenciales impactos. Fue así como surgieron conceptos como Producción Más Limpia y Eco-eficiencia, que buscaron maximizar la producción de bienes y servicios minimizando al mismo tiempo su uso de materias primas y otros recursos naturales e insumos y su generación de residuos y contaminación.

Estas estrategias de producción eco-eficiente no sólo reducen el impacto ambiental de un proceso productivo sino que también mejoran su eficiencia, al maximizar la tasa de transformación de materias primas e insumos de un proceso en productos con valor agregado. En otras palabras, bajo una óptica de eco-eficiencia se considera que los residuos son el reflejo de la ineficiencia de un proceso de transformación.

El manejo de las emisiones atmosféricas en las plantas de beneficio de aceite de palma, y en especial las de material particulado, permite ejemplificar muy bien esta evolución en el enfoque de la gestión ambiental. En un principio, se destacó la instalación de equipos de control de emisiones para cumplir con los estándares de la reglamentación. Bajo un enfoque de eco-eficiencia, se busca reducir la generación de material particulado durante la combustión de la biomasa en

las calderas, mejorando la eficiencia y el control del sistema de generación de vapor para toda la planta.

Esta publicación presenta los lineamientos para una gestión integral de emisiones atmosféricas en plantas de beneficio del fruto de la palma de aceite. Estos lineamientos son el resultado de la implementación de una estrategia sectorial sobre emisiones, que Fedepalma y Cenipalma han venido desarrollando por más de cuatro años.

Las directrices aquí presentadas tienen por objetivo que las plantas de beneficio cumplan adecuadamente con los estándares aplicables de emisión de material particulado de la Resolución 909 de 2008 del Ministerio de Ambiente, utilizando para ello un enfoque de prevención de la contaminación que redunde en una mayor eficiencia de su proceso productivo.

La estrategia que Fedepalma viene promoviendo para que el sector palmero colombiano avance en el camino de la sostenibilidad, incluye encontrar y potencializar este mutuo beneficio entre la gestión ambiental, la eficiencia y la productividad, haciendo de este estudio un ejemplo claro de lo que perseguimos.

De la misma forma, esperamos que con este análisis, que reúne el conocimiento de varios expertos, los palmeros puedan demostrar cómo su empresa no solo se hace más eficiente sino tiene un mayor compromiso ambiental, a través de su implementación.

Jens Mesa Dishington
Presidente Ejecutivo de Fedepalma

Introducción

Este documento recoge los principales resultados y aprendizajes de más de cuatro años de trabajo de Fedepalma y Cenipalma en torno a la adecuada gestión de emisiones atmosféricas en las plantas de beneficio de aceite de palma.

Desde su expedición, la Resolución 909 de 2008 se presentó como un difícil reto para el sector palmero; durante mucho tiempo se consideró que las plantas de beneficio no podrían cumplir sus estándares admisibles de emisión de material particulado, a menos que invirtieran en costosos equipos de control de emisiones.

Ello motivó inicialmente a que el sector palmero buscara una modificación de la Resolución por parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Si bien el Ministerio rechazó la propuesta de modificación, los estudios técnicos que se realizaron para sustentarla permitieron caracterizar en detalle las emisiones de material particulado de las plantas de beneficio e identificar los principales factores que incidían en su generación.

El control de la combustión en las calderas y, en general, la eficiencia del sistema de generación de vapor, fueron identificados como factores clave en la generación de emisiones de material particulado en las plantas de beneficio. También se evidenció un bajo grado de adopción de prácticas operacionales encaminadas a reducir la generación de material particulado en el proceso o a garantizar su efectivo control antes de su emisión a la atmósfera.

Estos resultados llevaron a que Fedepalma y Cenipalma desarrollaran una estrategia gremial para la gestión integral de las emisiones atmosféricas en plantas de beneficio, bajo un enfoque de prevención de la contaminación. Si bien el objetivo primordial de la estrategia fue orientar a las empresas palmeras en las acciones necesarias para cumplir con la Resolución 909 de 2008, su enfoque fue lograrlo a través del mejoramiento de la eficiencia y el control del proceso productivo y no únicamente con tecnologías de final de tubo para el control de la contaminación.

La **Parte I** de esta publicación, que comprende los capítulos 1 al 4, presenta los aspectos más relevantes del marco regulatorio de emisiones atmosféricas para

el sector palmero, así como los objetivos y fases de desarrollo de la estrategia gremial sobre esta temática.

El capítulo 1 describe los principales requerimientos legales aplicables a las plantas de beneficio en materia de emisiones atmosféricas y entra en mayor detalle sobre la Resolución 909 de 2008. El capítulo 2 hace referencia a la gestión gremial liderada por Fedepalma entre 2009 y 2013 para la modificación de dicha resolución. Describe en específico los requerimientos de información que el Ministerio estableció para sustentar adecuadamente la propuesta del sector, los estudios técnicos efectuados para dicho propósito, la propuesta de modificación presentada al Ministerio y las razones expuestas para su rechazo.

El capítulo 3 muestra los principales resultados del estudio de caracterización de las emisiones del sector y describe las oportunidades identificadas para mejorar su gestión bajo un enfoque preventivo.

El capítulo 4 presenta la estrategia gremial que Fedepalma y Cenipalma definieron para abordar de manera integral lo concerniente a las emisiones atmosféricas en las plantas de beneficio del sector palmero. Describe en detalle sus objetivos y las tres fases que se propusieron para su desarrollo. En la Fase 1 se definieron de manera preliminar un conjunto de variables y consignas de control y un portafolio de buenas prácticas operacionales para reducir emisiones en el proceso. En la Fase 2 se llevó a cabo un ejercicio piloto para implementar y retroalimentar este conjunto de variables, consignas y BPO. A partir de los resultados de este ejercicio, en la Fase 3 se construyeron unos lineamientos específicos para orientar la gestión de las empresas palmeras en torno a sus emisiones atmosféricas.

La **Parte II** del documento, que comprende los capítulos 5 y 6, contiene dichos lineamientos. El capítulo 5 presenta un modelo de gestión integral de emisiones bajo un enfoque preventivo y de optimización de procesos. Inicia por presentar algunos conceptos teóricos que relacionan la generación de material particulado con la eficiencia de la combustión de biomasa, y luego presenta las variables primarias y consignas de control para lograr una combustión completa y, por ende, menor generación de MP.

Estas acciones están encaminadas a *prevenir* y minimizar la generación de MP en el proceso productivo y se relacionan con la estrategia de Controles Primarios de Emisiones. De forma complementaria, la estrategia de Controles Secundarios de Emisiones buscará que el nivel de material particulado que se emite a la atmósfera por la chimenea cumple con los estándares de la Resolución 909 de 2008.

El capítulo 6 contiene un portafolio detallado de Buenas Prácticas Operacionales (BPO), que contiene las acciones específicas para implementar estas dos estrategias.

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ACFM	<i>Actual Cubic Feet Per Minute</i> Pies cúbicos por minuto reales
BPO	Buenas Prácticas Operacionales
CAR	Corporación Autónoma Regional
Cenipalma	Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CTA	Consejo Técnico Asesor del Ministerio de Ambiente
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i> Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
Fedepalma	Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite
GEF	<i>Global Environmental Fund</i> Fondo para el Medio Ambiente Mundial de Naciones Unidas
GEI	Gases de efecto invernadero
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MAVDT	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio del Protocolo de Kyoto
MP	Material Particulado
NO _x	Óxidos de Nitrógeno
O ₂	Oxígeno
OMS	Organización Mundial de la Salud
PC	Pudrición de cogollo
PM ₁₀	Material particulado con diámetro menor a 10 micras
PM _{2,5}	Material particulado con diámetro menor a 2,5 micras
PPM	Partes por millón
SAC	Sociedad de Agricultores de Colombia
STAR	Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales
TFF	Toneladas de fruto fresco
TFFH	Toneladas de fruto fresco por hora
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i> Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente

Foto: Katherin Ibarra





Parte I. Marco regulatorio y estrategia gremial sobre emisiones atmosféricas



Parte I. Marco regulatorio y estrategia gremial sobre emisiones atmosféricas

1 Marco regulatorio de emisiones atmosféricas

Este capítulo presenta algunos aspectos relevantes del marco regulatorio de emisiones atmosféricas aplicable a las plantas de beneficio del sector palmero en Colombia. La sección 1.1 describe los principales requerimientos legales que dichas plantas deben cumplir en materia de emisiones atmosféricas, y la sección 1.2 presenta en mayor detalle la Resolución 909 de 2008, que establece los estándares admisibles de emisión para fuentes fijas¹ en el país. Se incluyó un numeral específico sobre la corrección por oxígeno, que es un factor determinante para el cumplimiento de dichos estándares.

1.1 Requerimientos legales en emisiones para las plantas de beneficio

Los seis requerimientos legales más importantes aplicables a las plantas de beneficio del fruto de la palma de aceite con relación a sus emisiones atmosféricas (a julio de 2015) se describen en la Tabla 1:

Tabla 1. Principales requerimientos legales en emisiones atmosféricas para plantas de beneficio del sector palmero.

Temática	Requerimiento	Reglamentación
Permiso de emisiones	Contar con permiso de emisiones atmosféricas vigente para cada una de las fuentes fijas de emisión que así lo requieran (calderas de la planta de beneficio, etc.)	<ul style="list-style-type: none">▪ Decreto 948 de 1995, Arts. 72-73▪ Resolución 619 de 1997 (Minambiente), Art. 1

1 Fuente fija: Es la fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa (Resolución 909 de 2008, definiciones).

Temática	Requerimiento	Reglamentación
Estándares de emisión admisibles	Cumplir con los estándares de emisión admisibles para fuentes fijas, mediante monitoreo de los parámetros establecidos en la reglamentación acorde con la frecuencia establecida en el permiso de emisiones y realizado por laboratorios acreditados por el IDEAM.	<ul style="list-style-type: none"> Resolución 909 de 2008 (Minambiente), Arts. 18-21 (para calderas que utilicen biomasa como combustible) Resolución 760 de 2010 (Minambiente) – Protocolo anexo
Altura de la chimenea	Contar con una chimenea para la descarga de emisiones a la atmósfera; cumplir con la altura reglamentaria de la chimenea.	<ul style="list-style-type: none"> Resolución 909 de 2008 (Minambiente), Arts. 69, 70 Resolución 760 de 2010 (Minambiente) – Protocolo anexo Resolución 591 de 2012 (Minambiente) Resolución 1632 de 2012 (Minambiente)
Plan de contingencia	Contar con un Plan de contingencia para los sistemas de control de emisiones atmosféricas.	<ul style="list-style-type: none"> Resolución 909 de 2008 (Minambiente), Arts. 79, 80, 81
Operación de equipos de control de emisiones	Garantizar que los equipos de control de emisiones son operados con base en las especificaciones del fabricante y en lo estipulado en el Protocolo de Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica por Fuentes Fijas.	<ul style="list-style-type: none"> Resolución 760 de 2010 (Minambiente) – Protocolo anexo
Control de emisiones fugitivas	Contar con sistemas de control para las emisiones fugitivas (aquellas provenientes de los solventes utilizados para algunas plantas de palmistería o del laboratorio).	<ul style="list-style-type: none"> Resolución 909 de 2008 (Minambiente), Art. 90

1.2 Resolución 909 de 2008

Las emisiones atmosféricas de las plantas de beneficio del sector palmero están reguladas por la Resolución 909 de 2008 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), “por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones”. Esta resolución derogó el Decreto 02 de 1982, que durante más de 25 años reguló los parámetros y límites máximos de emisiones contaminantes por fuentes fijas en Colombia.

1.2.1 Objeto y alcance

El objeto de la Resolución 909 de 2008 incluyó el establecimiento de las normas y los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para fuentes fijas, y adoptar los procedimientos de medición de emisiones para fuentes fijas (Art. 2).

Su ámbito de aplicación abarca, entre otros, las fuentes fijas de las actividades industriales y los equipos de combustión externa.

Dicha Resolución definió de manera específica estándares de emisión admisibles para diferentes procesos, equipos e industrias del país, según la naturaleza de sus actividades, combustibles utilizados y contaminantes atmosféricos generados.

1.2.2 Estándares de emisión admisibles para las plantas de beneficio

En específico, las plantas de beneficio del sector palmero están cobijadas por el Capítulo VII de la Resolución 909 de 2008, que establece los estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire cuando se utiliza biomasa como combustible en equipos de combustión externa. Esto debido a que sus emisiones provienen de los equipos de combustión externa (calderas) utilizados en los sistemas de generación de vapor para el proceso productivo, y en ellos se utiliza biomasa como combustible (principalmente fibra y cuesco, dos subproductos resultantes del proceso de extracción de aceite de palma).

En este capítulo se fijaron estándares únicamente para dos contaminantes atmosféricos: los óxidos de nitrógeno (NO_x)² y el material particulado (MP)³, según se muestra en la Tabla 2.

-
- 2 Los óxidos de nitrógeno tienen su origen antropogénico en las combustiones a altas temperaturas, donde se produce monóxido de nitrógeno (NO) que rápidamente se oxida formando dióxido de nitrógeno (NO_2), siendo este el contaminante de interés sanitario por su incidencia en afectaciones a la salud humana. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la exposición a altas concentraciones de NO_2 puede causar irritación en los ojos, nariz, garganta y pulmones, cansancio, náuseas, y en situaciones en que la concentración de este gas sea muy elevada, puede causar edema pulmonar uno o dos días después de la exposición al contaminante. En niños asmáticos pueden incrementarse los episodios de bronquitis (OMS, 2006).
 - 3 El material particulado es la denominación que reciben las partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire. Dichas Partículas Suspendidas Totales (PST) se clasifican principalmente por su tamaño como PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, es decir, aquellas partículas con diámetro menor a $10 \mu\text{m}$ y $2.5 \mu\text{m}$ correspondientemente. El material particulado fue identificado como uno de los principales contaminantes que generan efectos nocivos sobre la salud humana, en la Política de Prevención ►

Tabla 2. Estándares de emisión admisibles para equipos de combustión externa que utilicen biomasa como combustible.

Tipo de combustible	Capacidad de producción de vapor (t/h)	Tipo de instalación	Estándar de Emisión Admisible (mg/m ³)*	
			MP	NO _x
Biomasa	Todos	Nueva	50	350
		Existente	300	350

* Condiciones de referencia: 25°C, 760 mm Hg, oxígeno de referencia de 13 %.

Fuente: MAVDT, Resolución 909 de 2008; Arts. 18, 19.

En relación con la Tabla 2, se deben tener en cuenta las siguientes definiciones:

- Instalación existente: Aquella instalación que se encontraba construida y operando a la entrada en vigencia de la Resolución 909 de 2008 (julio 15 de 2008).
- Instalación nueva: Aquella instalación que inició operación con posterioridad a la entrada en vigencia de la Resolución 909 de 2008 (julio 15 de 2008).

El régimen de transición de la Resolución 909 de 2008 fue establecido de la siguiente manera (Art. 103):

- Los equipos de combustión externa considerados como existentes y que estuvieran cumpliendo con los estándares de emisión aplicables del Decreto 02 de 1982 para el día 15 de julio de 2008, deberían cumplir con los nuevos estándares para instalaciones existentes a partir del 15 de julio de 2010.
- Los equipos considerados como existentes y que el 15 de julio de 2008 no estuvieran cumpliendo con los estándares del Decreto 02 de 1982, deberían cumplir con los nuevos estándares a partir del 15 de enero de 2010.
- Los equipos considerados como nuevos deberían cumplir con los nuevos estándares a partir del momento de iniciar su operación.

-
- ▶ y Control de la Contaminación del Aire (MAVDT 2010). En dicha política se hace referencia a la relación directa que existe entre el incremento de concentraciones de PM₁₀ y PM_{2,5} y las consultas médicas por afecciones pulmonares. Dicho incremento se estimó en 15 % para la ciudad de Bogotá. La exposición a altas concentraciones de PM₁₀ y PM_{2,5} están directamente relacionadas con el aumento de la mortalidad y morbilidad por afecciones pulmonares. Las principales afecciones causadas por estas partículas son bronquitis, asma, disminución de la capacidad respiratoria y, en general, mayor número de casos de infecciones respiratorias agudas (OMS, 2014).

1.2.3 Corrección por oxígeno

La Resolución 909 de 2008 fijó los estándares de emisión admisibles de gases contaminantes con base en un oxígeno de referencia específico de 13 % (Art. 88). Al fijar este nivel de oxígeno de referencia, la Resolución buscó evitar que se “diluyeran” los gases contaminantes en grandes corrientes de aire.

El factor de corrección es, simplemente, un número por el cual se debe multiplicar la medición real de material particulado obtenida en el estudio isocinético a condiciones de referencia,⁴ y viene dado por el nivel de oxígeno en los gases de la chimenea. En la Figura 1 se muestran factores de corrección para diferentes niveles de oxígeno en los gases de la chimenea.

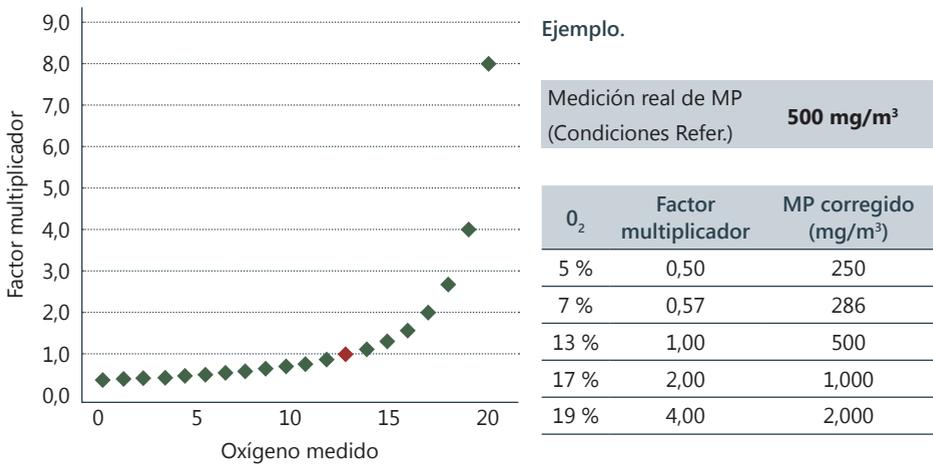


Figura 1. Ejemplo de la corrección por oxígeno de referencia según la Resolución 909 de 2008.

Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar en la Figura 1, a mayor presencia de oxígeno se tiene un incremento exponencial del factor multiplicador. Es así como el factor multiplicador es apenas 0,5 para un nivel de oxígeno de 5 % en los gases de la chimenea, es igual a 1,0 para 13 % de oxígeno (nivel de referencia), pero aumenta rápidamente a 2,0 con un oxígeno de 17 % y llega inclusive a 8,0 con un oxígeno de 20 %.

4 25°C y 760 mm Hg de presión.

En otras palabras, la corrección por oxígeno es un factor determinante para cumplir con el estándar máximo admisible de emisiones para las plantas de beneficio del sector palmero. Como ejemplo, en la Figura 1 se muestra el caso de una planta cuya medición real de MP en los gases de la chimenea fue de 500 mg/m³. Suponiendo que fuese una instalación existente, tendría que cumplir con el estándar de 300 mg/m³.

- Si su nivel de oxígeno fuese 5 % o 7 %, cumpliría con el estándar, pues la concentración de MP corregida por oxígeno sería de 250 mg/m³ o 286 mg/m³ respectivamente.
- Sin embargo, si su nivel de oxígeno fuese mayor y llegase a 13 %, 17 % o 19 % inclusive, no cumpliría con el estándar pues su concentración de MP corregida por oxígeno sería de 500 mg/m³, 1.000 mg/m³ o 2.000 mg/m³, respectivamente.

Por todo lo anterior, la primera recomendación para cumplir con la Resolución 909 de 2008 de emisiones atmosféricas es tener un adecuado control del nivel de oxígeno en el proceso de combustión, así como del ingreso de aire en los ductos de salida de los gases. En los capítulos 5 y 6 se explicarán más en detalle algunas buenas prácticas para asegurar este control de oxígeno.

2 Gestión del sector palmero para modificar la Resolución 909 de 2008

En este capítulo se describe la gestión adelantada por Fedepalma y Cenipalma para que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible modificara los estándares de la Resolución 909 de 2008 aplicables al sector palmero. Dicha gestión comprendió el período entre julio de 2008, cuando entró en vigencia la Resolución, y julio de 2013, fecha en la cual el Ministerio rechazó la propuesta de modificación elaborada por el sector palmero.

La sección 2.1 se refiere al proceso que adelantó el Ministerio de Ambiente para formular la nueva Resolución. La sección 2.2 presenta los aspectos más relevantes del primer documento de diagnóstico y propuesta de modificación de la Resolución, entregado por Fedepalma al Ministerio en 2010. La sección 2.3 describe los requerimientos adicionales solicitados por el Ministerio para considerar una modificación a la reglamentación. En la sección 2.4 se muestran los principales resultados del estudio contratado por Fedepalma para caracterizar las emisiones de MP del sector, identificar las alternativas y limitaciones para cumplir con los nuevos estándares de emisión, y sustentar técnicamente una

nueva propuesta de modificación de la Resolución. La sección 2.5 presenta la propuesta de modificación radicada ante el Ministerio en 2013 y la sección 2.6 presenta la respuesta negativa obtenida por parte de dicha entidad.

2.1 Proceso de formulación de la nueva reglamentación

Dado que la nueva reglamentación de emisiones atmosféricas por fuentes fijas buscaba establecer estándares diferenciados según el tipo de industria, proceso productivo, materia prima y combustible utilizados, y que derogaría el Decreto 02 de 1982 que había estado vigente por más de 20 años, su proceso de formulación liderado por el entonces MAVDT contempló la socialización y retroalimentación con diversos sectores productivos del país.

El proyecto de Resolución fue sometido a consulta pública en los meses de marzo y abril de 2008, y fue presentado ante el Consejo Técnico Asesor (CTA)⁵ del Ministerio de Ambiente en diciembre de 2007 y en mayo de 2008. La Sociedad de Agricultores de Colombia (SAC) tiene asiento en dicho Consejo Técnico Asesor y Fedepalma, como organización gremial del sector palmero colombiano, es miembro de la SAC.

Sin embargo, el sector palmero no tuvo una efectiva participación en la retroalimentación del proyecto de norma. Por lo anterior, Fedepalma y las empresas del sector palmero consideraron inicialmente que los estándares de emisión admisibles que fueron incluidos en el Capítulo VII de la Resolución no eran pertinentes para las características y condiciones de las calderas utilizadas en las plantas de beneficio de aceite de palma.

2.2 Primer diagnóstico y propuesta de modificación

Una vez expedida la Resolución 909 de 2008, Fedepalma inició un diálogo con el Ministerio de Ambiente para que considerara modificar los estándares de emisión de material particulado aplicables al sector palmero.

El 13 de julio de 2010 Fedepalma entregó al Ministerio de Ambiente un primer documento de diagnóstico y análisis de la problemática de cumplimiento con

.....

5 El Consejo Técnico Asesor del Ministerio de Ambiente es la máxima instancia consultiva de dicho Ministerio. En él tienen asiento la academia, las ONG, la sociedad civil y los sectores productivos del país. Antes de la expedición de nuevas políticas o reglamentaciones ambientales, el Ministerio de Ambiente generalmente convoca al CTA para presentarlas y recibir su retroalimentación.

la nueva resolución, en el que se resaltaron los siguientes tres aspectos (Fedepalma, 2010):

- i. Descripción de las características técnicas de las calderas utilizadas en las plantas de beneficio del sector y sus sistemas de control de emisiones; ambos diseñados para la anterior reglamentación colombiana o para la de otros países palmeros, que en ese momento era menos estricta que la Resolución 909 de 2008.
- ii. Datos de emisiones de MP del sector a partir de los estudios isocinéticos de las plantas de beneficio, en donde se mostraba que cumplían a cabalidad con el Decreto 02 de 1982 pero no cumplían con los nuevos estándares de la Resolución 909 de 2008.
- iii. Descripción de cuatro problemáticas del sector para cumplir con la nueva reglamentación de emisiones:
 - a. Incidencia de la enfermedad de Pudrición de Cogollo (PC) en los ingresos y capacidad de inversión de las empresas del sector: para entonces, la PC había afectado 90 % del área sembrada en Tumaco, y había generado pérdidas entre 6 y 11 % de producción de fruto en la Zona Oriental y por más de 5.000 millones de pesos en el primer semestre de 2009 en la Zona Central.
 - b. Menores ingresos de las empresas del sector por la caída del precio internacional del aceite de palma, que había sido de 28 % frente al año anterior.
 - c. Elevados costos de cumplimiento para las plantas más antiguas del sector. Muchas de estas plantas antiguas deberían cambiar su caldera para poder cumplir con la nueva reglamentación, incurriendo en altos costos para reemplazarla y en la compra de onerosos equipos de control de emisiones para cumplir con el estándar de 50 mg/m³ de MP.
 - d. Calderas consideradas como instalaciones nuevas por la Resolución pero con características de instalaciones existentes. Siete plantas de beneficio del sector habían adquirido recientemente calderas y sistemas de control de emisiones que no alcanzaron a iniciar su operación antes de julio 15 de 2008. Aunque eran consideradas como nuevas por la reglamentación y debían cumplir con el estándar de 50 mg/m³, habían sido negociadas y compradas estando en vigencia el Decreto 02 de 1982 y, por lo tanto, estaban diseñadas para dar cumplimiento a estándares menos estrictos de emisión de MP.

Con base en estos argumentos, el documento presentó cinco propuestas para que el sector palmero diera cumplimiento a la Resolución 909 de 2008, que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Primera propuesta del sector palmero para modificar la Resolución 909 de 2008.

Aspecto	Descripción
Plazo adicional	<ul style="list-style-type: none"> Plazo de tres años para que las plantas de beneficio del sector palmero dieran cumplimiento a la nueva resolución, teniendo en cuenta el tiempo requerido para la adquisición, instalación y adecuación de los equipos necesarios para ello.
Consideración especial para plantas en el proyecto MDL	<ul style="list-style-type: none"> Consideración especial y plazo de cuatro años para las 32 plantas de beneficio que hacían parte del Proyecto Sombrilla MDL para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI),⁶ teniendo en cuenta la magnitud de las inversiones en que estaban incurriendo estas empresas para dicho proyecto.
Consideración para otras plantas que invirtieran en cogeneración con biogás	<ul style="list-style-type: none"> Igual consideración y plazo de cuatro años para las empresas que, sin estar en el Proyecto Sombrilla MDL, también estuviesen considerando invertir en proyectos de cogeneración de energía con biogás y presentaran su Plan de Inversiones para ello antes de dos años.
Consideración para calderas nuevas compradas con anterioridad	<ul style="list-style-type: none"> Consideración de las siete calderas antes mencionadas como instalaciones existentes, con un estándar de emisión aplicable de 300 mg/m³ de MP.
Revisión del estándar de 50 mg/m ³ para calderas nuevas	<ul style="list-style-type: none"> Solicitud de revisión del estándar de 50 mg/m³ para las calderas nuevas del sector, teniendo en cuenta las problemáticas expuestas y las onerosas inversiones requeridas para su cumplimiento.

Fuente: Fedepalma, 2010

2.3 Requerimientos adicionales del Ministerio de Ambiente

La entonces Dirección de Gestión Ambiental Sectorial del Ministerio de Ambiente no acogió ninguna de las cinco propuestas presentadas por el sector palmero para facilitar su cumplimiento de la Resolución 909 de 2008.

6 Este proyecto contemplaba la captura del gas metano resultante de la degradación anaerobia de materia orgánica en los sistemas de tratamiento de aguas residuales (STAR) de 32 plantas de beneficio del sector palmero colombiano, para su posterior combustión. Con ello, se liberaba a la atmósfera dióxido de carbono (CO₂) en vez de metano (CH₄), el cual tiene un potencial de calentamiento global 21 veces mayor que el del CO₂. Esta iniciativa fue avalada por Naciones Unidas bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) del Protocolo de Kyoto. Su potencial de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se calculó en 757.000 toneladas de CO₂ equivalente.

Ante esta negativa, Fedepalma continuó gestionando la posibilidad de modificar la Resolución y en noviembre de 2010 la entonces ministra de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Beatriz Uribe Botero, manifestó que evaluaría nuevamente esta posibilidad una vez Fedepalma le entregara un documento que sustentara los siguientes tres aspectos:

1. Que las plantas de beneficio del sector estaban implementando buenas prácticas de operación y de eficiencia en sus calderas.
2. Que a pesar de ello, tenían dificultades para cumplir con los estándares de la nueva Resolución.
3. Que los estándares que propusiera el sector palmero no generarían un impacto actual o futuro en la salud de la población.

2.4 Estudio técnico desarrollado por el sector palmero

Para dar cumplimiento a las exigencias del Ministerio de Ambiente, en 2011 Fedepalma elaboró los términos de referencia del estudio técnico para recopilar y analizar la información requerida y la convocatoria para seleccionar la firma que lo realizaría. En noviembre de 2011 se contrató para tal fin a CAIA Ingeniería, una firma de ingeniería especializada en eficiencia energética y en emisiones atmosféricas.

En el período comprendido entre noviembre de 2011 y octubre de 2012, CAIA desarrolló los siguientes cuatro productos:

1. Caracterización de emisiones de MP de las plantas de beneficio y de la implementación de buenas prácticas para reducirlas, que incluyó:
 - a. Análisis de posibles factores para los niveles de emisión generados.
 - b. Análisis preliminar de las buenas prácticas que implementaban las empresas del sector para reducir sus emisiones de MP.
2. Análisis técnico y económico de las alternativas de cumplimiento de la Resolución 909 de 2008 para el sector palmero (para instalaciones nuevas y existentes).
3. Análisis del efecto potencial sobre la salud de la población de las emisiones de MP actuales y proyectadas del sector palmero.
4. Propuesta preliminar de modificación de la Resolución 909 de 2008, a partir de los productos anteriores.

En las secciones siguientes se sintetizan los principales resultados y conclusiones de esta consultoría, la cual fue desarrollada bajo la supervisión del Área Am-

biental de la Unidad de Planeación Sectorial y Desarrollo Sostenible de Fedepalma, con el apoyo del Programa de Procesamiento de Cenipalma y los miembros y representantes de los Comités Asesores de Plantas de Beneficio de Cenipalma.

2.4.1 Caracterización de emisiones y de implementación de buenas prácticas

A diferencia del primer diagnóstico de emisiones entregado por Fedepalma al Ministerio de Ambiente en 2010, que se basó en datos proporcionados por las mismas empresas, la consultoría contratada con CAIA Ingeniería contempló caracterizar las emisiones de MP en una muestra de 16 calderas del sector, con un único laboratorio acreditado por el IDEAM.

La caracterización de emisiones también contempló un diagnóstico del grado de adopción de buenas prácticas operacionales para controlar y mejorar la eficiencia del sistema de generación de vapor y reducir o controlar las emisiones de material particulado.

En el Capítulo 3 se describen en detalle los resultados de esta caracterización de emisiones de MP y el análisis de las variables explicativas para los niveles de emisión encontrados. Sus principales resultados y conclusiones se muestran en la Tabla 4 (CAIA Ingeniería, 2012a y 2012e, Fedepalma, 2013):

Tabla 4. Principales resultados de la caracterización de emisiones de MP del sector realizada en 2011-2012.

Resultado	Descripción
Bajo cumplimiento de los nuevos estándares de emisión	<ul style="list-style-type: none"> Niveles de emisión de MP significativamente superiores a los estándares admisibles de la Resolución 909 de 2008.
Bajo control de la combustión	<ul style="list-style-type: none"> No se evidenció la implementación sistemática de buenas prácticas para controlar el proceso de combustión en las calderas, que tuvieran un impacto positivo en la reducción de emisiones.
Bajo control de oxígeno	<ul style="list-style-type: none"> Se observaron altos niveles de oxígeno en los gases de la chimenea, lo que dificultaba el cumplimiento de la Resolución por la corrección de oxígeno. No se evidenció un control sistemático de dicho nivel de oxígeno ni en el proceso de combustión ni en los gases de escape en la chimenea.

Resultado	Descripción
Inadecuados mantenimiento y operación de los sistemas de control de emisiones	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No se evidenció la aplicación sistemática de protocolos de control operacional y de mantenimiento de los sistemas de control de emisiones, para verificar su adecuado funcionamiento y su eficiencia esperada de remoción de MP.
Necesidad de adoptar buenas prácticas operacionales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Con base en lo anterior, se evidenció la necesidad de implementar buenas prácticas operacionales para reducir las emisiones de MP, en dos frentes: <ul style="list-style-type: none"> ▪ i) mejorar el control del proceso de combustión ▪ ii) mejorar la eficiencia de los sistemas de control de emisiones

2.4.2 Análisis técnico y económico de alternativas de cumplimiento

Análisis técnico

La consultoría desarrollada por CAIA Ingeniería también analizó, desde una perspectiva técnica, diferentes alternativas tecnológicas para dar cumplimiento a la Resolución 909 de 2008. Sus principales resultados y conclusiones se muestran en la Tabla 5 (CAIA Ingeniería, 2012c, 2012e, Fedepalma, 2013).

Tabla 5. Resultados del análisis técnico de alternativas tecnológicas para cumplir con la Resolución 909 de 2008.

Resultado	Descripción
Alternativas tecnológicas para calderas existentes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Las calderas existentes en el sector están en capacidad de cumplir con el estándar de 300 mg/m³ de MP con: <ul style="list-style-type: none"> ▪ la adopción de buenas prácticas para mejorar el proceso de combustión ▪ sistemas convencionales de control de emisiones como los ya utilizados en el sector (ciclones y multiciclones)
Aspectos clave por abordar mediante Buenas Prácticas Operacionales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Las Buenas Prácticas Operacionales deben abordar, al menos: <ul style="list-style-type: none"> ▪ preparación de la biomasa ▪ alimentación de biomasa a la caldera ▪ distribución de la biomasa en el hogar de la caldera ▪ consumo adecuado de biomasa según los requerimientos de vapor ▪ alimentación de aire para la combustión ▪ adecuada operación y mantenimiento de los ciclones/ multiciclones ▪ evitar las entradas de aire al sistema de control de emisiones y en la chimenea para reducir el factor multiplicador de corrección por oxígeno

Resultado	Descripción
Inviabilidad para solicitar modificación del estándar para calderas existentes	<ul style="list-style-type: none"> Por lo anterior, no se encontraron argumentos técnicos que justificaran la modificación del estándar de 300 mg/m³ para las calderas existentes del sector.
Alternativas tecnológicas para calderas nuevas	<ul style="list-style-type: none"> Las calderas nuevas en el sector pueden cumplir con el estándar de 50 mg/m³ de MP con: <ul style="list-style-type: none"> la adopción de buenas prácticas para mejorar el proceso de combustión sistemas de control de emisiones de alta eficiencia: filtros de manga o precipitadores electrostáticos

Estimación de costos y análisis de viabilidad económica

Adicionalmente, la consultoría contempló una estimación de costos de adquisición, instalación y operación de los sistemas de control de emisiones identificados como pertinentes para el sector según el estándar de emisiones aplicable a las calderas nuevas y existentes. También incluyó un análisis de la viabilidad económica de utilizar tales sistemas de control en las plantas de beneficio del sector palmero. Sus principales resultados y conclusiones se muestran en la Tabla 6 (CAIA Ingeniería, 2012c, 2012e, Fedepalma, 2013).⁷

Tabla 6. Resultados del análisis económico de alternativas tecnológicas para cumplir con la Resolución 909 de 2008.

Resultado	Descripción
Viabilidad económica para calderas existentes	<ul style="list-style-type: none"> Se encontró que era económicamente viable cumplir con el estándar de 300 mg/m³ de MP para calderas existentes, inclusive cuando ello implicaba la instalación de nuevos ciclones o multiciclones de alta eficiencia.
Costos de control de emisiones variables según la capacidad de la caldera	<ul style="list-style-type: none"> Se evidenció que los costos estimados de tecnologías para el control de emisiones varían más significativamente según la capacidad de la caldera que según la tecnología utilizada. Las calderas de menor capacidad requieren soluciones tecnológicas de menor costo, sin importar el estándar de emisiones que deban cumplir. Ello facilita el cumplimiento de los estándares para las plantas de beneficio de menor tamaño y capacidad económica en el sector.

7 En el Anexo 2 se describe en mayor detalle la metodología de análisis utilizada y los costos estimados de adquisición, instalación y operación de sistemas de control de emisiones para el sector palmero.

Resultado	Descripción
Mayores costos de sistemas de alta eficiencia	<ul style="list-style-type: none"> Los sistemas convencionales de control de emisiones (ciclones o multiciclones) requieren menores inversiones de capital que los filtros de mangas y precipitadores electrostáticos. El costo anual equivalente de los ciclones y multiciclones también es menor (incluyendo los costos de operación).
Mayores costos significativos para calderas nuevas	<ul style="list-style-type: none"> Independientemente de la capacidad de la caldera, se encontró significativamente más costoso cumplir con el estándar de 50 mg/m³ que con el de 300 mg/m³. Se estimó que la inversión inicial de los filtros de manga y precipitadores electrostáticos era más de 200 % superior a la de ciclones/multiciclones; su costo anual equivalente se encontró más de 100 % más elevado.
Viabilidad económica para calderas nuevas	<ul style="list-style-type: none"> A pesar de su elevado costo, se encontró que la utilización de filtros de mangas y precipitadores electrostáticos no comprometía la viabilidad económica de las plantas de beneficio del sector. Sin embargo, la instalación de estos equipos sí podría afectar la rentabilidad esperada de una nueva planta de beneficio (se estimó una reducción de 3 a 6 % en el margen neto).

2.4.3 Efecto potencial de las emisiones del sector sobre la calidad del aire

Análisis de calidad del aire

Para analizar el efecto potencial de las emisiones de MP de las plantas de beneficio de aceite de palma sobre la calidad del aire, la consultoría desarrollada por CAIA Ingeniería contempló en primera instancia la medición de calidad del aire en tres de las cuatro zonas palmeras del país. Sus principales resultados se muestran en la Tabla 7 (CAIA Ingeniería, 2012b, 2012e, Fedepalma, 2013).

Tabla 7. Resultados del análisis del efecto potencial de las emisiones de MP del sector sobre la calidad del aire.

Resultado	Descripción
Cumplimiento de los estándares de calidad del aire	<ul style="list-style-type: none"> Se evidenció que en ninguna de las tres zonas monitoreadas existían problemas de calidad del aire asociados con la emisión de MP por las plantas de beneficio del sector palmero. En todas las zonas se cumplía con la reglamentación vigente.

Resultado	Descripción
Bajo riesgo por las emisiones de MP del sector	<ul style="list-style-type: none"> Se encontró que el efecto acumulativo de las emisiones de las plantas de beneficio del sector palmero representaba un bajo riesgo para el ambiente o para las personas que viven en las zonas aledañas a la ubicación de dichas plantas. Lo anterior, a pesar de que se había encontrado que las plantas no estaban cumpliendo con los estándares de emisión admisibles de la Resolución 909 de 2008 para MP, como se describirá en mayor detalle en el capítulo 3.

Modelación de dispersión de contaminantes

Para diferenciar el impacto de las plantas de beneficio del de otras fuentes de emisión de material particulado en las zonas evaluadas, la consultoría también incluyó una modelación de las emisiones de MP y de su dispersión en una región que presenta alta concentración de plantas de beneficio en la zona palmera de los Llanos Orientales.

La modelación se hizo para los siguientes tres escenarios:

- Escenario 1: emisiones de las plantas de beneficio existentes en el área de estudio con base en sus condiciones actuales de operación y ubicación.
- Escenario 2: emisiones de las mismas plantas de beneficio del escenario 1 pero asumiendo que todas cumplieran con la Resolución 909 de 2008.
- Escenario 3: emisiones resultantes de un mayor número de calderas requeridas para una proyección optimista de crecimiento de la producción de aceite de palma en la zona de estudio al año 2032; en este escenario se modeló que todas las plantas (nuevas y existentes) emitirían 300 mg/m³ de MP.

Sus principales resultados se muestran en la Tabla 8 (CAIA Ingeniería, 2012b, 2012e, Fedepalma, 2013).

Tabla 8. Resultados del análisis de tres escenarios de modelación de dispersión de contaminantes.

Resultado	Descripción
Reducción significativa del potencial impacto ambiental al cumplir la reglamentación	<ul style="list-style-type: none"> Cerrar la brecha de cumplimiento con la nueva reglamentación reduciría significativamente el impacto potencial sobre la calidad del aire de las plantas de beneficio del sector.
Efecto marginal por crecimiento del sector	<ul style="list-style-type: none"> La modelación mostró que inclusive un crecimiento muy optimista de la producción del sector tendría un efecto marginal sobre la calidad del aire en la zona de estudio. Bajo este escenario, la concentración de MP llegaría a un máximo de 1,4 % del nivel máximo permitido para promedio anual y a menos de 4,5 % del nivel máximo permitido para 24 horas.

Resultado	Descripción
Beneficio ambiental marginal de estándares más estrictos que 300 mg/m ³ de MP	<ul style="list-style-type: none"> Con la modelación se encontró que el beneficio ambiental de que las calderas nuevas cumplieren con el estándar de 50 mg/m³ en vez de 300 mg/m³ sería marginal (a lo sumo 1,5 µg/m³ de MP o 3 % de la concentración media anual permitida de MP en la reglamentación de calidad del aire).

2.4.4 Análisis costo-beneficio de cumplir con el estándar de 50 mg/m³ de MP

Con base en el análisis económico de las alternativas de cumplimiento de la Resolución 909 de 2008 y en el análisis del efecto potencial de las emisiones del sector sobre la calidad del aire, el estudio de CAIA Ingeniería efectuó también un análisis costo-beneficio de cumplimiento con el estándar de 50 mg/m³ de MP para una planta de beneficio. Sus principales resultados fueron (CAIA Ingeniería, 2012c, Fedepalma, 2013):

- El beneficio estaría asociado a la mejora en la calidad del aire, que, como ya se había encontrado, estaría apenas por encima de 3 % de la concentración media anual permitida de MP en la reglamentación de calidad del aire.
- Por su parte, el costo adicional de capital para instalar filtros de mangas o precipitadores electrostáticos podría llegar a 1.500 millones de pesos⁸ para una caldera de alta capacidad (con flujo de gases de salida superior a 70.000 acfm⁹), es decir, entre dos y cuatro veces mayor que el requerido para cumplir con el estándar de 300 mg/m³.

La conclusión de este análisis fue que el costo marginal de cumplir con el estándar para calderas nuevas se consideraba muy elevado para el beneficio ambiental marginal que se lograría a cambio.

A partir de los resultados y conclusiones de la consultoría desarrollada por CAIA Ingeniería, Fedepalma elaboró la propuesta de modificación de la Resolución 909 de 2008 que se describe en la siguiente sección.

8 Pesos de 2012 a una tasa de cambio de 1.800 pesos por dólar.

9 ACFM es la sigla en inglés para pies cúbicos por minuto reales.

2.5 Propuesta para modificar la Resolución 909 de 2008

Los resultados de la consultoría desarrollada por CAIA Ingeniería fueron presentados en agosto de 2012 en un taller convocado por Fedepalma y Cenipalma y al cual fueron invitados los Gerentes, Directores de Planta y responsables ambientales de las empresas palmeras con planta de beneficio. CAIA Ingeniería complementó y ajustó los informes con base en la retroalimentación recibida y entregó la versión final en octubre de 2012 (CAIA Ingeniería, 2012d).

Con base en lo anterior, Fedepalma elaboró un documento síntesis con los principales resultados y conclusiones del estudio de CAIA Ingeniería, y una nueva propuesta de modificación de la Resolución 909 de 2008 (Figura 2). El documento fue presentado y radicado oficialmente ante el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en marzo de 2013.



Figura 2. Portada de la propuesta de modificación de la Resolución 909 de 2008 entregada al MADS en 2013.

Como ya se mencionó, los resultados de la consultoría desarrollada por CAIA Ingeniería habían evidenciado que no había una justificación técnica ni económica para solicitar la modificación del estándar de 300 mg/m^3 para calderas existentes. Por ello, la propuesta se enfocó únicamente en el estándar de 50 mg/m^3 para calderas nuevas.

El texto propuesto para adicionar un párrafo al artículo 19 de la Resolución 909 de 2008 fue el siguiente:

“Los procesos e instalaciones de beneficio de aceite de palma que utilicen biomasa como combustible tendrán un límite de emisión admisible de material particulado de 250 mg/m³ para las instalaciones nuevas” (Fedepalma, 2013).

Los tres argumentos que sustentaron esta propuesta fueron (Fedepalma, 2013):

1. Bajo efecto nocivo de las emisiones del sector en la calidad del aire.
2. Elevado costo de instalar filtros de mangas o precipitadores electrostáticos en comparación con ciclones/multiciclones de alta eficiencia, frente al beneficio ambiental obtenido.
3. El estándar propuesto también significaba altos niveles de exigencia para el sector, en adopción de buenas prácticas operacionales y mejora de los sistemas de control de emisiones.

2.6 Respuesta negativa del Ministerio de Ambiente

En julio de 2013, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible envió un oficio a Fedepalma en el que dio respuesta negativa a la propuesta de modificación de la Resolución 909 de 2008, con los siguientes argumentos:

- La Resolución 909 de 2008 estableció estándares diferenciados para instalaciones nuevas y existentes, buscando promover procesos de reconversión a tecnologías más limpias.
- Un incremento superior a 1 µg/m³ de concentración media anual de MP puede generar efectos nocivos en la población, incluyendo un aumento en las tasas de morbilidad y mortalidad.
- El estándar propuesto por el sector palmero de 250 mg/m³ de MP para instalaciones nuevas no garantizaría que el incremento de la concentración media anual de MP fuera inferior a 1 µg/m³.
- El estándar propuesto por el sector palmero (250 mg/m³ de MP para instalaciones nuevas) podría cumplirse con la implementación de buenas prácticas para mejorar el proceso de combustión y con equipos convencionales de control de emisiones (ciclones/multiciclones de alta eficiencia). De esta manera, no se evidenciaría un cambio tecnológico significativo entre los equipos nuevos y los existentes que respondiera a las necesidades de reconversión tecnológica promovidas en el país.
- El estándar de 50 mg/m³ para instalaciones nuevas que fijó la Resolución 909 de 2008 sí permite que la concentración media anual de MP no se incremente en más de 1 µg/m³ por las emisiones del sector palmero y también requiere una reconversión a tecnologías más limpias para el control de emisiones.

Dada esta negativa para modificar la Resolución 909 de 2008, Fedepalma y Cenipalma definieron una estrategia para orientar y apoyar a las empresas palmeras con planta de beneficio para dar cumplimiento a los estándares admisibles de emisión de MP.

La estrategia, que se describe en el capítulo 4, se formuló a partir de los resultados de la consultoría desarrollada por CAIA Ingeniería (que se resaltaron en la sección 2.4) y de la caracterización de emisiones de MP de las plantas de beneficio del sector que se presentan en el capítulo 3.

3. Diagnóstico sectorial de emisiones de MP y buenas prácticas

En este capítulo se muestran los aspectos sobresalientes de la caracterización de emisiones de MP de las plantas de beneficio del sector palmero y de buenas prácticas para su prevención y control, adelantada por la firma CAIA Ingeniería para Fedepalma en 2012. Como se mencionó en la sección 2.4, esta caracterización fue un insumo para elaborar la propuesta de modificación de la Resolución 909 de 2008 que el sector palmero presentó al Ministerio de Ambiente en marzo de 2013.

Adicionalmente, fue el punto de partida para definir la estrategia gremial de la Federación para el manejo de emisiones de MP que se presenta en el capítulo 4. En este sentido, sus resultados siguen siendo relevantes para el sector.

3.1 Caracterización de emisiones de MP y de variables del proceso de combustión

La caracterización de emisiones de MP se adelantó en una muestra de 16 calderas de plantas de beneficio de aceite de palma, las cuales fueron seleccionadas como representativas de un universo de 84 calderas que Cenipalma tenía caracterizadas a mediados de 2011. Dicha caracterización se llevó a cabo entre noviembre de 2011 y marzo de 2012 (CAIA Ingeniería, 2012a).

De las 16 calderas analizadas, 11 eran consideradas como existentes por la Resolución 909 de 2008 (les aplicaba el estándar de 300 mg/m³ de MP) y las cinco restantes eran consideradas nuevas (les aplicaba el estándar de 50 mg/m³ de MP).

Dicha caracterización también contempló la medición y análisis de otras variables del proceso de combustión en la caldera y de los sistemas de control de

emisiones que tenían instalados las plantas. A continuación se muestran sus principales resultados.

Niveles de emisión de material particulado

En cada una de las 16 calderas se hicieron dos muestreos isocinéticos siguiendo la metodología establecida por el Protocolo de Control y Vigilancia de Emisiones de Fuentes Fijas (MAVDT 2010), en un intervalo cercano a 24 horas. Sus resultados se muestran en la Figura 3.

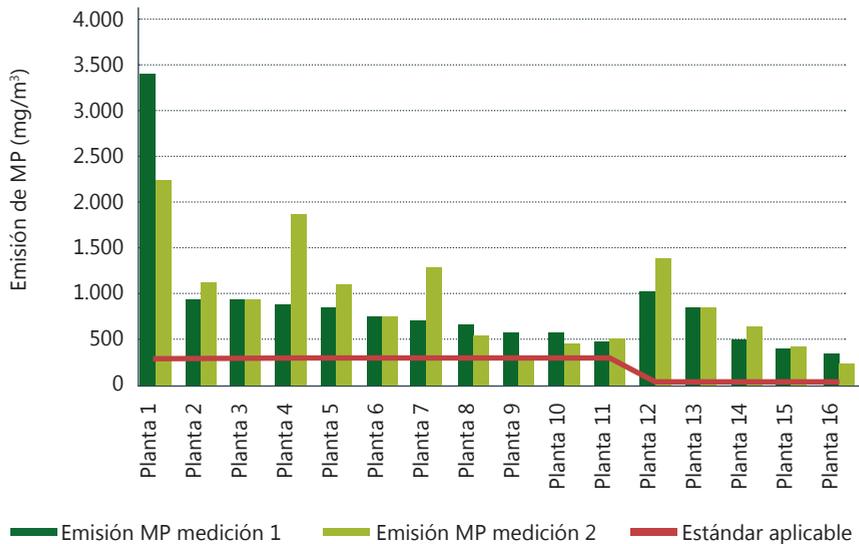


Figura 3. Resultados de las mediciones de material particulado en las 16 calderas evaluadas. Fuente: CAIA Ingeniería, 2012a.

Con esta caracterización se evidenció que los niveles de emisión de material particulado de las plantas de beneficio del sector palmero estaban significativamente por encima de los estándares admisibles, tanto para las calderas nuevas como para las existentes (CAIA Ingeniería, 2012a).

En la Figura 3 también se puede apreciar una alta variabilidad entre las dos mediciones efectuadas en la misma caldera. En 11 de las 16 calderas analizadas la variación entre una medición y otra superó 18 %, llegando a ser inclusive de 72 % en la planta 9, como se muestra en la Figura 4. Estas son variaciones muy elevadas, si se tiene en cuenta que las mediciones se llevaron a cabo en un intervalo cercano a 24 horas.

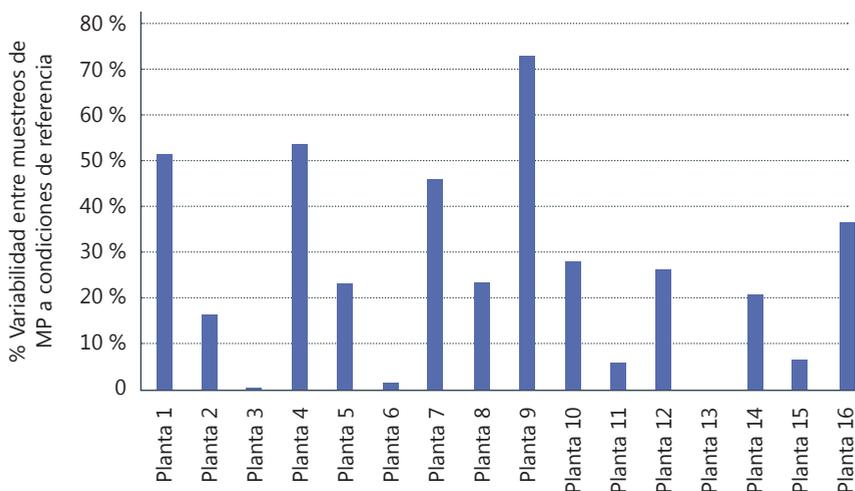


Figura 4. Variación entre las dos mediciones de MP en las calderas analizadas.
Fuente: Adaptada de CAIA Ingeniería, 2012a.

Estas grandes diferencias en las dos mediciones de MP en la misma caldera sugieren una elevada variabilidad en el proceso de combustión y, por tanto, un inadecuado control del mismo (CAIA Ingeniería, 2012a).

Niveles de oxígeno en la chimenea y factor de corrección

Los niveles de oxígeno en la chimenea (tomados en ambas mediciones) también fueron muy variables, siendo el más bajo de apenas 7 % y llegando a ser inclusive superior al 19 %, como se muestra en la Figura 5. Este resultado sugiere un inadecuado control del exceso de oxígeno durante la combustión o la presencia de entradas de aire en los ductos de escape; ambas situaciones pueden incrementar el factor multiplicador de la corrección por oxígeno que fue explicado en la sección 1.2.3.

Cantidad y calidad de biomasa utilizada

Durante las visitas de caracterización de emisiones de MP se evidenció que ninguna de las plantas contaba con un procedimiento sistemático que permitiera calcular y dosificar la cantidad de combustible para el proceso según su requerimiento de vapor.

Ello sugiere que las plantas están consumiendo más biomasa que la realmente necesaria para cubrir su demanda de vapor, lo cual podría generar altos e innecesarios niveles de emisión de MP (CAIA Ingeniería 2012a).

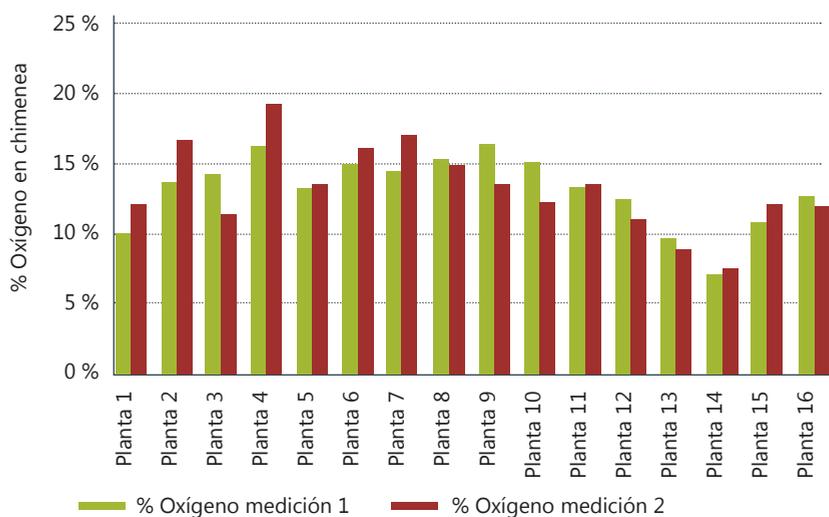


Figura 5. Niveles de oxígeno en la chimenea (%) medidos durante la caracterización de emisiones de MP.
Fuente: CAIA Ingeniería, 2012a.

Eficiencia de los sistemas de control de emisiones

Si bien los sistemas tradicionales de control de emisiones (ciclones y multiciclones) contribuyen a reducir significativamente los niveles de emisión de MP, su eficiencia depende del adecuado monitoreo y control sobre sus variables de operación y funcionamiento, de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

De las 16 calderas evaluadas, nueve contaban con ciclón como sistema de control de emisiones (una de ellas contaba además con un lavador de gases), seis con multiciclón y una no contaba con sistema de control de emisiones.

Se registraron niveles de MP en la chimenea (después del sistema de control) hasta de 3.300 mg/m³ en calderas con ciclones y hasta de 1.500 mg/m³ en calderas con multiciclones. Si se tiene en cuenta que la eficiencia de remoción teórica de MP para estos equipos oscila entre 70 y 90 %, ello planteó dos posibles escenarios: (i) que los niveles de MP generados durante la combustión (antes del sistema de control) llegaban a 33.000 mg/m³, valor extremadamente elevado para este tipo de combustión; o (ii) que los equipos de control de emisiones estaban operando con eficiencias de remoción de MP muy inferiores a lo esperado.

Durante las visitas no se evidenció la implementación sistemática de protocolos de mantenimiento y control operacional de los equipos de control de emisiones, lo que llevó a suponer que se estaba presentando el segundo de ellos.

3.2 Síntesis de resultados y conclusiones

Sintetizando lo anterior, las cuatro conclusiones principales del estudio de caracterización de emisiones de MP de las 16 plantas de beneficio analizadas se muestran en la Figura 6.

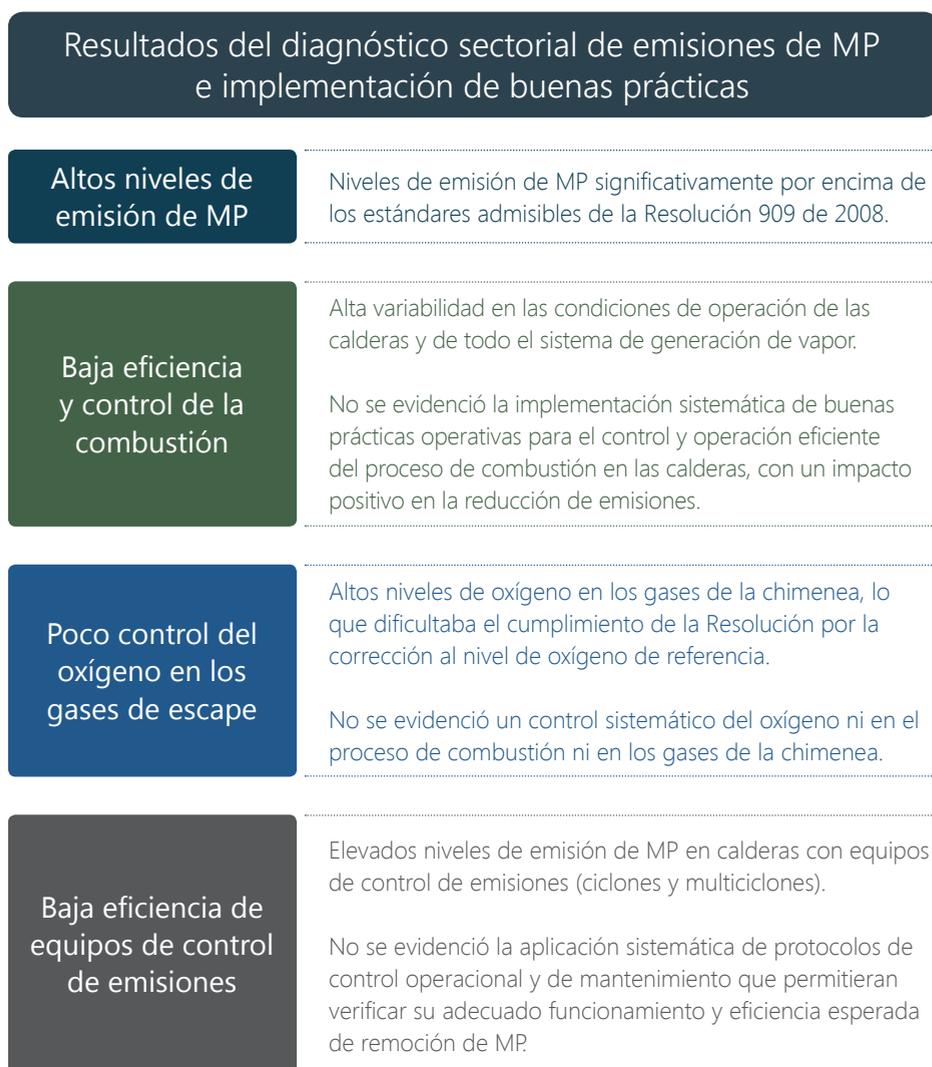


Figura 6. Principales resultados de la caracterización sectorial de emisiones de MP realizada en 2012. Fuente: Adaptada de CAIA Ingeniería, 2012a y 2012e.

4 Estrategia gremial para la gestión integral de emisiones de MP

Este capítulo presenta el objetivo, fases y avances logrados hasta el momento en la estrategia propuesta por Fedepalma y Cenipalma para una gestión integral de emisiones de material particulado en las plantas de beneficio del sector palmero.

Esta estrategia comenzó a estructurarse en el segundo semestre de 2012, luego del taller de presentación de resultados de la consultoría adelantada por CAIA Ingeniería. Como se explicó en la sección 2.4 y en el capítulo 3, en dichos análisis se evidenció la escasa implementación de buenas prácticas para el control de la combustión en las calderas y su importante repercusión en los altos niveles de emisión de material particulado en las plantas de beneficio.

También se mostró que el cumplimiento de cualquiera de los estándares de la Resolución 909 de 2008 (el de 300 mg/m³ para calderas existentes o el de 50 mg/m³ para calderas nuevas) requeriría tanto buenas prácticas para disminuir la generación de emisiones de MP en el proceso, como equipos de control de emisiones para garantizar que los niveles de MP emitidos a la atmósfera estuviera por debajo de los estándares permitidos por la reglamentación vigente.

De esta manera, la estrategia se empezó a desarrollar de manera paralela a la construcción de la propuesta de modificación de la Resolución 909 de 2008, que finalmente se entregó al Ministerio en marzo de 2013, y su desarrollo no se afectó por la negativa del Ministerio de Ambiente a modificar los estándares aplicables al sector palmero. Por el contrario, esa negativa le dio mayor relevancia a que el sector contara con una orientación clara, unos objetivos definidos y unas estrategias y acciones concretas para abordar y gestionar sus emisiones de material particulado de manera eficaz.

La sección 4.1 presenta el objetivo general y las fases de desarrollo de la estrategia y las secciones 4.2, 4.3 y 4.4 indican los principales resultados obtenidos hasta ahora en su implementación.

4.1 Objetivo y fases de desarrollo

El objetivo de la estrategia gremial para el manejo de emisiones de MP es: Proponer, validar y socializar algunos lineamientos para la gestión integral de emisiones de material particulado en las plantas de beneficio del sector palmero, con un enfoque preventivo y de eficiencia de todo su sistema de ge-

neración de vapor, y orientada a reducir el impacto ambiental y a cumplir la reglamentación vigente.

Para el logro de este objetivo se definieron cuatro fases de desarrollo de la estrategia como se muestra en la Figura 7.

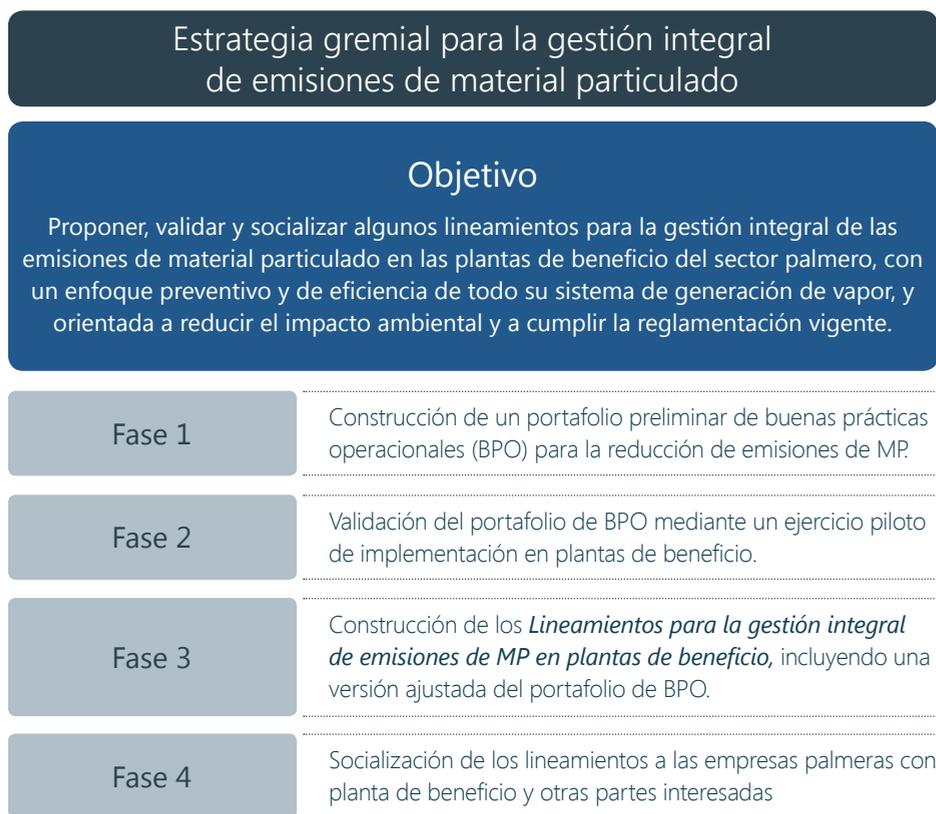


Figura 7. Objetivo y fases de la estrategia sectorial de emisiones de material particulado.

4.2 Fase 1: Portafolio preliminar de buenas prácticas para reducir emisiones de MP

Esta primera fase de la estrategia se adelantó entre diciembre de 2012 y mayo de 2013. Para ello, a finales de 2012 Fedepalma firmó un nuevo contrato con CAIA Ingeniería para desarrollar las fases 1 y 2 de la estrategia. El primer producto de dicho contrato fue la construcción de un portafolio preliminar de buenas

prácticas operacionales (BPO) para reducir emisiones de material particulado en las plantas de beneficio del sector.

Para ello, CAIA Ingeniería desarrolló un marco conceptual sobre la combustión de biomasa y las emisiones de material particulado, y además propuso unas estrategias para mejorar la eficiencia de la combustión y con ello reducir las emisiones y un conjunto de BPO para la implementación de cada estrategia (CAIA Ingeniería, 2013a).

A partir de estos insumos, Fedepalma y CAIA Ingeniería elaboraron el documento *"Portafolio preliminar de buenas prácticas operacionales para cumplir la norma de emisiones"*, que fue publicado por Fedepalma con ocasión del XLI Congreso Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite llevado a cabo en Santa Marta en mayo de 2013. La portada de la publicación se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Portada de la publicación del portafolio preliminar de buenas prácticas.

Los principales resultados y lecciones aprendidas de esta primera fase de desarrollo de la estrategia gremial de emisiones se resumen en la Figura 9.

Estos aspectos y recomendaciones sirvieron de base para diseñar el ejercicio piloto de implementación de Buenas Prácticas Operacionales para reducir emisiones de MP en las plantas de beneficio que se describe en la siguiente sección.

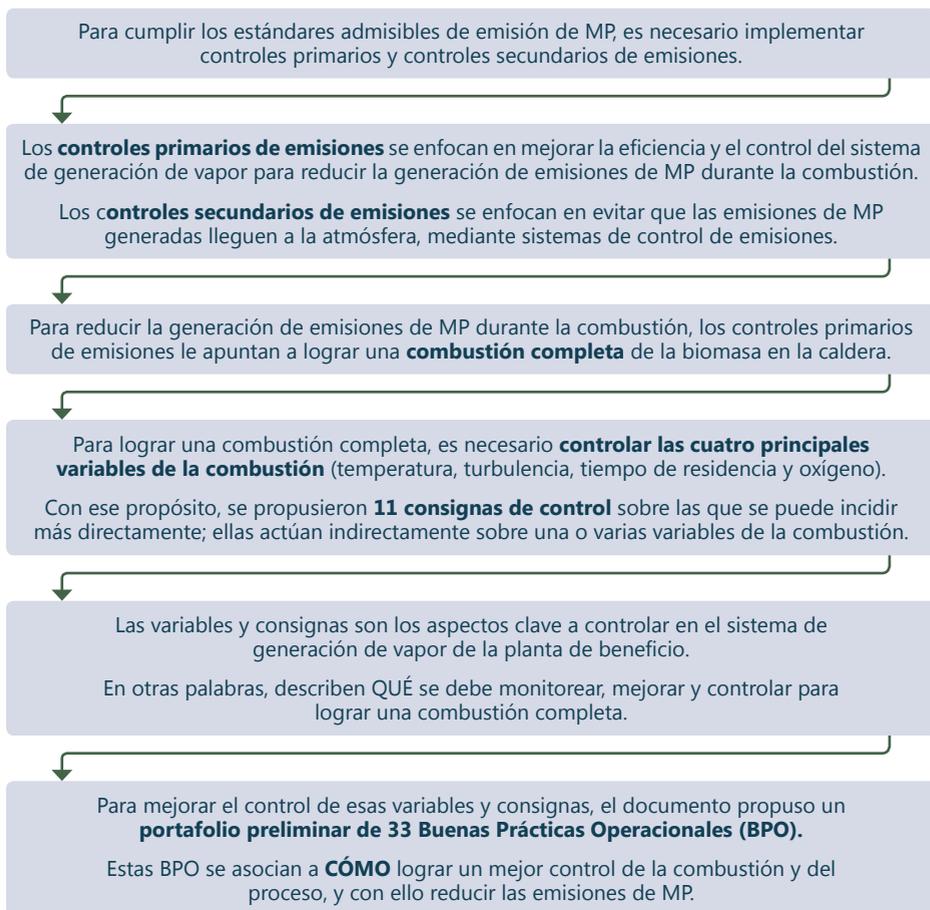


Figura 9. Resultados y lecciones aprendidas de la fase 1 de la estrategia gremial de gestión de emisiones de MP.

Fuente: Elaboración propia a partir de Hernández *et al.*, 2013.

4.3 Fase 2: Ejercicio piloto de implementación de las BPO

El diseño y desarrollo del ejercicio piloto de implementación y validación del portafolio de BPO que se elaboró en la Fase 1 de la estrategia constituyeron otro producto del contrato firmado entre Fedepalma y CAIA Ingeniería en diciembre de 2012.

Este trabajo incluyó: la selección de las plantas y calderas que hicieron parte del ejercicio piloto (sección 4.3.1); un diagnóstico detallado de las condiciones de

operación de esas calderas y una medición de línea base de sus emisiones de MP (sección 4.3.2); la elaboración y concertación de un Plan de Implementación de BPO específico para cada planta (sección 4.3.3); la orientación y el acompañamiento permanente de CAIA Ingeniería durante los primeros seis meses de implementación de las BPO; la medición de emisiones de MP al final de ese período y la elaboración de un informe para cada planta piloto con los resultados obtenidos hasta ese momento y recomendaciones para continuar ejecutando el Plan de Implementación.

Estas actividades se llevaron a cabo entre enero de 2013 y marzo de 2014. Los principales resultados y conclusiones de este ejercicio piloto se presentan en la sección 4.3.4.

4.3.1 Selección de las calderas piloto

Para la selección de las calderas que harían parte del estudio piloto se tuvieron en cuenta los siguientes criterios (CAIA Ingeniería, 2013b):

- **Representatividad del tipo de calderas utilizadas en el sector:** Se seleccionaron calderas de las 6 tipologías (marca, tipo y capacidad) más utilizadas en el sector, con base en 37 tipologías previamente identificadas.
- **Representatividad por zona palmera:** Se buscó que el número de calderas en la muestra fuera representativo de la cantidad de plantas de beneficio en operación en las cuatro zonas palmeras en 2012.
- **Calderas existentes bajo la reglamentación:** Únicamente se tuvieron en cuenta calderas clasificadas como existentes bajo la Resolución 909 de 2008.
- **Incidencia en las emisiones:** Se dio preferencia a las calderas que fueran de operación permanente sobre las de operación irregular o de respaldo.
- **Capacidad de la planta de beneficio:** Se dio preferencia a las calderas de plantas de beneficio de tamaño mediano y pequeño (capacidad de procesamiento hasta 30 t RFF/h), buscando que los resultados fueran replicables por estas plantas de menor capacidad.
- **Disposición de la gerencia a implementar BPO a corto plazo:** Teniendo en cuenta que el estudio piloto tendría una duración inferior a un año, se seleccionaron calderas de empresas palmeras cuya gerencia estuviera en disposición de hacer las inversiones necesarias para la implementación de las BPO a corto plazo.

Las seis calderas seleccionadas con base en estos criterios y algunas de sus principales características se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Calderas seleccionadas para el ejercicio piloto de implementación de BPO.

Zona	Empresa	Marca	Tipo	Capacidad nominal (t vapor /hora)	Sistema de control de emisiones
Central	Agroince Ltda.	Lucey	Mixta	3,2	Ciclón
Norte	C.I. Tequendama S.A.S.	Consultécnica	Mixta	6	Damper
Norte	Aceites S.A.	VR Ingeniería	Piro tubular	12,5	Ciclón
Oriental	Entrepalmas S.A.S.	VR Ingeniería	Mixta	10	Ciclón
Oriental	Inversiones La Mejorana S.A.S	Lucey	Mixta	4,7	Ciclón
Oriental	Palmeras del Llano S.A.	VR Ingeniería	Mixta	15	Multiciclón

4.3.2 Diagnóstico integral de las calderas piloto

La primera actividad efectuada en las seis calderas piloto fue un diagnóstico, que buscaba caracterizar las emisiones de MP de cada caldera y sus condiciones de operación y de control de la combustión.

Para ello, el diagnóstico contempló una evaluación cualitativa y una evaluación cuantitativa:

- Evaluación cualitativa: se hizo una visita a cada planta de beneficio para evaluar de manera cualitativa el grado de monitoreo y control que tuviera sobre las 11 consignas de control propuestas para mejorar la eficiencia de la combustión en la caldera.
- Evaluación cuantitativa: se hizo una medición de material particulado de manera simultánea en la chimenea y en la corriente de gases a la salida de la caldera, para determinar: (i) la eficiencia real del sistema de control instalado; y (ii) las condiciones de la combustión.

Este tipo de diagnóstico, que permitió establecer una línea base de los controles primarios y los controles secundarios de emisiones, nunca se había realizado en una muestra piloto de plantas de beneficio del sector palmero. Se adelantó en los meses de febrero y marzo de 2013; a continuación se muestran sus principales hallazgos (CAIA Ingeniería 2013b).

Evaluación cualitativa de consignas de control de la combustión

La Tabla 10 muestra una síntesis de los resultados de la evaluación cualitativa llevada a cabo en las seis plantas piloto.¹⁰ Como se puede apreciar, ninguna de las plantas contaba con un adecuado control de las principales variables de la combustión. Igualmente, carecían de herramientas y procedimientos de medición para hacer un adecuado monitoreo de la mayoría de las consignas de control de la combustión, y sólo en algunos casos tenían un control aceptable de algunas de ellas. Cabe destacar la planta seis, que mostró un mayor nivel de control de su combustión frente a las otras cinco plantas.

Tabla 10. Síntesis de la evaluación cualitativa de consignas de control en las calderas piloto.

Ítem	Consignas de control	Planta 1	Planta 2	Planta 3	Planta 4	Planta 5	Planta 6
1	Temperatura de la cámara	!	X	!	X	X	!
2	Relación aire/combustible	X	X	✓	X	✓	X
3	Tamaño del combustible	!	X	!	X	X	✓
4	Humedad de la biorrasa	✓	✓	!	✓	!	✓
5	Estratificación del aire	!	!	!	!	!	!
6	Distribución de aire	!	!	!	!	!	!
7	Alimentación combustible	!	X	!	!	!	X
8	Instrumentación y control	X	!	X	X	!	!
9	Capacitación y regulación	!	X	X	X	X	!
10	Mantenimiento	✓	X	✓	!	✓	✓
11	Proceso e ingeniería	X	!	X	!	X	✓

✓ Aceptable

X Deficiente

! Falta información

Fuente: CAIA Ingeniería 2013b.

En la Figura 10 se muestran también algunos hallazgos de la evaluación cualitativa de consignas de control de la combustión en las seis plantas piloto.

10 El orden en que se presentan las plantas en la Tabla 10 no concuerda con el que se muestra en la Tabla 9. Ello con el fin de mantener la confidencialidad de la información referente a las plantas de beneficio participantes en el estudio piloto de implementación de BPO.



Figura 10. Algunos hallazgos de la evaluación cualitativa de consignas de control de la combustión. Fuente: CAIA Ingeniería, 2013b.

Evaluación cuantitativa de niveles de material particulado

En la Tabla 11 se muestran los principales resultados de la evaluación cuantitativa adelantada en las seis calderas piloto. Como se explicó anteriormente, se hizo una medición de MP a la salida de la caldera, antes del sistema de control de emisiones, y otra simultáneamente en la chimenea. La diferencia entre estas dos mediciones permitió establecer la eficiencia real del sistema de control de emisiones instalado. Además se midió el nivel de oxígeno en estos dos puntos, para determinar si había entradas de oxígeno en los ductos de escape o en el sistema de control de emisiones, que aumentarían el factor de corrección de oxígeno. Por último, se muestra el nivel de emisiones corregido al oxígeno de referencia, según se debería reportar a la autoridad ambiental. Para cada una de las variables, se resalta con verde el mejor resultado obtenido y con rojo el peor.

Tabla 11. Síntesis de la evaluación cuantitativa de MP y oxígeno en las calderas piloto.

	Planta 1	Planta 2	Planta 3	Planta 4	Planta 5	Planta 6
MP Salida Caldera (mg/m ³)	4.048,9	3.770,1	2.083,3	3.661,4	3.477,0	558,0
MP en Chimenea (mg/m ³)	734,9	1.158,0	604,2	797,8	1.555,3	591,8
Eficiencia del sistema de control	79,1 %	68,9 %	64,4 %	71,4 %	55,3 %	-6,8 %
O ₂ Salida Caldera	8,9 %	7,9 %	10,2 %	8,8 %	5,5 %	15,0 %
O ₂ en Chimenea	13,0 %	11,1 %	10,2 %	11,4 %	10,1 %	16,4 %
MP Corregido por O ₂ (mg/m ³)	736,7	944,2	448,6	665,5	1.140,4	1.020,3

Fuente: CAIA Ingeniería 2013b.

A continuación se explican estos resultados y se muestra la relevancia de cada una de estas variables en un diagnóstico integral sobre emisiones de MP.

1. MP a la salida de la caldera

- Esta variable casi nunca se mide en las plantas de beneficio.
- Sin embargo, es de gran relevancia pues es un muy buen indicador de la eficiencia y grado de control sobre la combustión. De hecho, debería usarse como punto de partida para el diseño de los sistemas de control de cada caldera.

- Se evidenció que cuatro calderas tenían muy poco control de la combustión (MP superior a 3.000 mg/m³), una tenía un control medio-bajo (MP de 2.063 mg/m³), mientras que otra tenía un muy buen control de su combustión (la planta seis, con MP de 556 mg/m³).
- Este resultado corroboró lo encontrado en la evaluación cualitativa: existía muy bajo control de las variables y consignas que favorecen una mayor eficiencia de la combustión y, por tanto, menor generación de emisiones de MP.
- Sin embargo, el resultado de la planta seis evidenció que sí es posible tener una combustión completa, controlada y limpia en calderas del sector palmero existentes con anterioridad al año 2008.

2. Eficiencia del sistema de control de emisiones

- Esta variable tampoco se mide regularmente en las plantas de beneficio.
- Sin embargo, también es de gran importancia pues permite saber si el sistema de control de emisiones está operando correctamente, con una eficiencia dentro de los parámetros esperados para cada tecnología.
- Las eficiencias observadas para los ciclones y multiciclones instalados estaban muy por debajo de las documentadas para este tipo de sistemas (entre 70 y 90 % de remoción de MP), con excepción de la planta uno.
- Durante las visitas se observó que la mayoría de estos sistemas de control habían sido mal diseñados y se encontraban mal mantenidos, y que las plantas no monitoreaban su eficiencia para así implementar acciones de mantenimiento preventivo.
- En el caso de la planta seis, la eficiencia de remoción de su sistema de control (un dámper con una persiana fija diseñado por la propia planta) dio un resultado negativo.

3. Oxígeno

- Se encontró que el nivel de oxígeno a la salida de la caldera era adecuado para una buena combustión y no se hallaba en exceso, con excepción de la planta seis, que tenía un oxígeno de 15 %.
- Sin embargo, en todos los casos, con excepción de la planta tres, el nivel de oxígeno medido en la chimenea fue superior al medido a la salida de la caldera, lo cual mostró la existencia de entradas de aire en los ductos de escape o en el sistema de control de emisiones.
- Como resultado, el factor multiplicador de la corrección por oxígeno se

incrementó para estas cinco plantas, disminuyendo exponencialmente sus posibilidades de cumplir con la reglamentación vigente.

4. Resultado final – integración de las variables

- Para dar cumplimiento al estándar de 300 mg/m³, es necesario trabajar de manera integral en los tres aspectos mostrados.
- Como ejemplo, la planta seis tenía un mejor control de la combustión, lo que generaba un menor nivel de MP a la salida de la caldera, casi cercano al estándar de 300 mg/m³. Sin embargo, la eficiencia de su sistema de control era prácticamente nula y su nivel de oxígeno en la combustión y en la chimenea eran demasiado altos, por lo que su MP corregido por oxígeno casi se duplicó, llegando a ser superior a 1.000 mg/m³.
- Así mismo, la planta uno tenía un sistema de control de emisiones operando de manera eficiente (casi 80 % de remoción de MP). Sin embargo, tenía una corriente de gases más sucia a la salida de la caldera (más de 4.000 mg/m³), es decir, una combustión menos controlada. Con ello, su sistema de control de emisiones no era suficiente para acercarse al estándar de 300 mg/m³. Adicionalmente, su nivel de oxígeno se incrementó en más de 4 % después de la salida de la caldera, con lo cual aumentó su factor de corrección.
- En el momento del diagnóstico, la planta tres fue la que estuvo más cerca de cumplir el estándar de 300 mg/m³, sin ser la mejor en ninguna de las variables. Tenía un control aceptable de su combustión y con ello un nivel de MP apenas superior a 2.000 mg/m³ a la salida de la caldera; la eficiencia de su sistema de control de emisiones era aceptable (casi 65 %); mantenía un razonable nivel de oxígeno de combustión en la caldera (10,2 %), el cual se mantenía igual en la chimenea, lo que implicaba un excelente control de entrada de aire parásito. Con ello, su factor de corrección fue menor que 1 y al final el MP corregido por oxígeno estaba apenas por debajo de 450 mg/m³, es decir, bastante cerca de cumplir con la Resolución 909 de 2008.

4.3.3 Plan piloto de implementación de las BPO

Teniendo en cuenta los resultados del diagnóstico, se diseñó un paquete específico de BPO para cada una de las seis plantas piloto, para un período de seis meses. Además, se acordó que la implementación de ese paquete de BPO se haría en dos fases y que al final de cada una de ellas se haría una medición de MP para evaluar por separado el efecto de cada conjunto de BPO. De esta manera, se tendría la posibilidad de evaluar el efecto de implementar 12 paquetes diferentes de BPO (CAIA Ingeniería 2013c).

Si bien algunas de las seis plantas piloto mostraron problemáticas similares en su diagnóstico, el diseño de los planes de acción buscó la mayor variedad posible entre los 12 paquetes de BPO. En el Anexo 1 se describen en detalle los 12 paquetes de BPO diseñados.

De forma transversal, se propusieron dos acciones comunes a todas las plantas (CAIA Ingeniería, 2013c):

- **Cantidad óptima de combustible:** La alimentación de la cantidad óptima de biomasa a la caldera es la mayor garantía del control de emisiones puesto que al usar solo el combustible que se necesita, se reduce la generación de contaminantes. Sin embargo, dado que ninguna de las plantas piloto había calculado el combustible que su proceso demandaba, ni tenía manera de dosificarlo a la caldera, el cálculo de la cantidad óptima de combustible se incluyó en el paquete de BPO para todas las plantas.
- **Temperatura mínima de operación de la caldera:** Ninguna de las plantas conocía la temperatura de operación de sus calderas. Esta temperatura es una de las variables por controlar para lograr una combustión completa; es particular para cada caldera y depende de su diseño, de la temperatura del aire primario, del tipo de combustible y de la eficiencia de la combustión. Sin embargo, se evidenció que la operación de las calderas se controlaba únicamente con base en la presión de vapor. Por ello, se incluyó una BPO para todas las plantas con el objetivo de medir la temperatura de la cámara de combustión para asegurar que siempre se opera por sobre una “temperatura mínima” que asegure el funcionamiento óptimo de la combustión.

Luego de presentar y retroalimentar el paquete de BPO para cada planta, se acordó con cada una de ellas el plan de acción para su implementación en el período comprendido entre julio y diciembre de 2013. Durante ese tiempo las plantas contaron con acompañamiento permanente por parte de CAIA Ingeniería, como parte de las actividades contempladas en su contrato con Fedepalma.

4.3.4 Resultados obtenidos y conclusiones del ejercicio piloto

La Tabla 12 sintetiza los resultados obtenidos en la última medición de MP efectuada luego de la implementación de las BPO en cuatro de las plantas piloto (excluyendo dos que tuvieron imprevistos en la operación de sus calderas que impidieron una medición confiable de MP):

Tabla 12. Comparación de niveles de MP antes y después de la implementación de BPO en las plantas piloto.

	Planta 1		Planta 3		Planta 5		Planta 6	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
MP en chimenea (mg/m ³)	735	1.075	604	372	1.555	1.192	592	158
O ₂ en chimenea	13,0 %	12,9 %	10,2 %	15,0 %	10,1 %	12,7 %	16,4 %	17,2 %
MP corregido por O ₂ (mg/m ³)	737	1.058	449	496	1.140	1.149	1.020	331
Mejora en calidad de emisiones	-46,3 %		38,4 %		23,4 %		73,3 %	
% ejecución compromisos	49,0 %		73,0 %		63,0 %		87,0 %	

Fuente: Adaptada de CAIA Ingeniería 2014a.

Algunos factores que incidieron en estos resultados se explican a continuación:

- **Plazo requerido mayor que el estimado:** el plazo originalmente establecido de seis meses para la implementación del paquete de BPO fue corto. En ese lapso, ninguna de las seis plantas logró implementar 100 % de las BPO. El mayor porcentaje de ejecución fue 87 %; incluso hubo dos plantas con menos de 50 % implementado.
- **Inadecuado seguimiento a las labores contratadas:** varias de las plantas contrataron diversas labores con terceros, tales como el sellamiento de las entradas de aire al sistema, el aislamiento de la caldera, o el mantenimiento de los equipos de control. Sin embargo, las plantas no hicieron un adecuado seguimiento a la efectividad de dichos trabajos y se observaron casos en los que las condiciones finales empeoraron en vez de mejorar.
- **Imprevistos en la operación de las calderas:** una de las plantas se vio en la necesidad de cambiar el horno de su caldera durante la fase de implementación del piloto, lo cual cambió drásticamente sus condiciones de línea base y retrasó la ejecución del plan de acción por la puesta a punto de la caldera. Otra de las calderas presentó múltiples fallas de operación durante el piloto, lo cual también impidió una adecuada implementación del paquete de BPO y dificultó las mediciones de MP al final del ejercicio.

Los principales resultados y conclusiones de este ejercicio piloto se describen a continuación:

1. Relación positiva entre implementación de BPO y reducción de emisiones

- Las plantas que lograron avanzar más en su plan de acción (planta seis con 87 % y planta tres con 73 %) fueron las que mayor reducción de emisiones de MP lograron antes de la corrección de oxígeno (73 y 38 % respectivamente).
- Ello muestra una relación positiva entre la adopción de BPO y la reducción de emisiones de material particulado.

2. Es viable cumplir con el estándar de 300 mg/m³ con la adopción de BPO

- Si bien ninguna de las plantas logró cumplir con el estándar de 300 mg/m³ al final del ejercicio, dos de ellas lo hubieran logrado de no ser por la corrección de oxígeno.
- La planta seis tenía un nivel de MP en la chimenea inferior a 300 mg/m³, pero su oxígeno era tan alto (17,2 %) que con el factor de corrección quedó en 331 mg/m³, apenas por encima del estándar admisible.
- La planta tres llegó a un nivel de MP en la chimenea de 372 mg/m³. De haber mantenido su nivel de oxígeno original (10,2 %), habría llegado a 276 mg/m³, cumpliendo así con el estándar.

3. Controlar la combustión toma tiempo y requiere un enfoque integral

- Al inicio de este ejercicio, las plantas uno y cinco mostraban niveles muy bajos de control de la combustión, como se mostró en la Tabla 11. Sus niveles de MP a la salida de la caldera superaban 3.400 mg/m³.
- Para estas plantas, un lapso de seis meses fue insuficiente para abordar todas las deficiencias de su sistema de generación de vapor, empezando por aspectos básicos de mantenimiento.
- Ello explica, en parte, que apenas hayan logrado cumplir con 49 % y 63 % de su plan de acción.
- A pesar de esto, la planta cinco logró disminuir sus emisiones de MP (sin corrección de oxígeno) en 23 %.
- La planta uno, por el contrario, incrementó sus emisiones de MP, lo cual pudo deberse a que no tuvo una buena puesta a punto de las mejoras realizadas o a que al controlar mejor una variable desmejoró otras.
- En estos casos faltó una mejor comprensión del enfoque integral que sustenta la adopción de las BPO.

4. Importancia de un buen diagnóstico

- La calidad e integridad de un plan de acción para mejorar la eficiencia del sistema de generación de vapor y reducir las emisiones de material

particulado depende en gran medida de un buen diagnóstico.

- En este ejercicio se hicieron diagnósticos sobre las plantas y calderas piloto como nunca se habían hecho en el sector:
- Se midió el nivel de MP y de otras variables tanto a la salida de la caldera como en la chimenea, lo que permitió diagnosticar simultáneamente la eficiencia de la combustión, la eficiencia del sistema de control y las entradas de aire parásito al sistema que afectaban la corrección por oxígeno
- La evaluación cualitativa de las consignas de control permitió identificar problemáticas específicas y definir prioridades y acciones concretas para reducir las emisiones de MP.

5. Validación y ajuste del portafolio de BPO

- Los logros obtenidos y también las dificultades observadas durante este ejercicio piloto permitieron ratificar la pertinencia de muchas de las BPO originalmente propuestas en el portafolio preliminar, pero ayudaron también a eliminar algunas, fusionar otras e incluir nuevas BPO que no se habían considerado antes.
- De esta manera, la nueva versión del portafolio tiene 23 BPO (diez menos que el anterior), las cuales fueron ajustadas y complementadas con recomendaciones de implementación y fotografías de ejemplos exitosos de su adopción en las plantas piloto.
- El portafolio actualizado de BPO se encuentra en el capítulo seis.

4.4 Fase 3: Construcción de lineamientos de gestión para las plantas de beneficio

La elaboración, ajuste y refinación de los lineamientos para la gestión integral de emisiones de material particulado en plantas de beneficio tomó un poco más de un año, desde julio de 2014 hasta agosto de 2015.

Los insumos más relevantes que se tuvieron en cuenta para ello fueron:

1. Caracterización sectorial de emisiones de MP e implementación de buenas prácticas para su reducción y control (CAIA Ingeniería, 2012a).
2. Propuesta del sector palmero para modificar la Resolución 909 de 2008 del sector (Fedepalma, 2013).
3. Marco conceptual de combustión de biomasa y emisiones de MP y Portafolio preliminar de Buenas Prácticas Operaciones para cumplir la Resolución 909 de 2008 (Hernández *et al.*, 2013).
4. Resultados del ejercicio piloto de implementación y validación del portafolio preliminar de BPO (CAIA Ingeniería, 2014a).

Los resultados del estudio piloto y algunas recomendaciones para reducir emisiones de MP en las plantas de beneficio fueron presentados en el marco de la XII Reunión Técnica Nacional de Palma de Aceite, llevada a cabo en Bogotá en septiembre de 2014 (Espinosa, 2014).

Posteriormente, CAIA Ingeniería elaboró una primera versión de una *Cartilla de lineamientos y recomendaciones para mejorar la eficiencia y reducir las emisiones de material particulado de los sistemas de generación de vapor de las plantas de beneficio del sector*, la cual fue presentada a Fedepalma en diciembre de 2014 (CAIA Ingeniería, 2014b). El contenido de esa cartilla fue socializado y retroalimentado en talleres con representantes de las empresas palmeras, en el marco de los Comités Asesores de Plantas de Beneficio de Cenipalma durante el primer semestre de 2015.

A partir de todo lo anterior, Fedepalma y CAIA Ingeniería afinaron el marco conceptual y el portafolio de BPO para hacerlos más pertinentes al sector palmero y desarrollaron los lineamientos para la gestión integral de emisiones de material particulado (y la eficiencia del sistema de generación de vapor) en plantas de beneficio que conforman la Parte II de este documento.

Foto: Juan Carlos Espinosa





Parte II. Lineamientos de gestión de emisiones para plantas de beneficio del sector palmero

Parte II. Lineamientos de gestión de emisiones para plantas de beneficio del sector palmero

5 Modelo para la gestión integral de emisiones de MP con un enfoque preventivo

Este capítulo presenta un modelo para la gestión integral de emisiones de MP con un enfoque preventivo en las plantas de beneficio de aceite de palma. La sección 5.1 presenta muy brevemente algunos conceptos teóricos sobre la relación entre la eficiencia de la combustión y la generación de material particulado, que son el sustento del resto del capítulo.

La sección 5.2 presenta los objetivos y líneas de acción que deberían orientar una gestión integral de emisiones de MP bajo un enfoque preventivo. Estas líneas de acción están asociadas a la implementación de Controles Primarios de Emisiones, descritos en mayor detalle en la sección 5.3, y Controles Secundarios de Emisiones, descritos en la sección 5.4.

5.1 Premisas sobre la eficiencia de la combustión y la generación de material particulado

Lo primero que debe considerarse es que las emisiones de material particulado son inherentes a cualquier proceso de combustión de biomasa.

Sin embargo, la cantidad de emisiones de material particulado de un determinado proceso de combustión dependerá en gran medida de su eficiencia. En otras palabras, un proceso de combustión que genere exceso de emisiones de material particulado es ineficiente.

Estas ineficiencias generalmente se traducen en mayores costos de operación, debido a un uso excesivo de combustible, o a que dicho combustible no se está convirtiendo eficientemente en energía útil para el proceso productivo.

En este sentido, un proceso de combustión mejor controlado y más eficiente será más costo-efectivo y generará menos emisiones de MP.

Por otra parte, y como se mencionó en la sección 1.1.2, el material particulado es uno de los contaminantes atmosféricos que tienen mayores efectos negativos sobre la salud humana, y por ello la Resolución 909 de 2008 incluyó estrictos estándares para reducir y controlar las emisiones de este contaminante en particular.

En este sentido, **en todo proceso productivo que genere emisiones de MP es importante considerar su potencial impacto ambiental y dar cumplimiento a los requerimientos de la reglamentación vigente y aplicable**, en este caso la Resolución 909 de 2008.

5.2 Objetivos y líneas de acción

Teniendo en cuenta lo expuesto en la sección anterior, una adecuada gestión y manejo de las emisiones de material particulado en un proceso productivo tendrá dos objetivos principales:

1. **Prevenir la creación de material particulado en exceso durante el proceso de combustión**, mediante la aplicación de un mejor control operativo y mayor eficiencia de dicha combustión, para lograr así una combustión completa.
2. **Reducir las emisiones de MP a la atmósfera** mediante sistemas de control de emisiones.

Para lograr el primer objetivo, la línea de acción por seguir se basa en *Controles Primarios de Emisiones*. Ellos se enfocan en el proceso de combustión y abarcan todos los aspectos y variables que inciden en su control y eficiencia. Su campo de acción llega hasta el momento en que los gases de combustión salen de la caldera.

Para lograr el segundo objetivo, la línea de acción se basa en *Controles Secundarios de Emisiones*, cuyo campo de acción abarca desde el momento en que los gases de combustión salen de la caldera hasta que son emitidos por la chimenea. Los controles secundarios de emisiones buscan remover el material particulado de los gases de combustión una vez han dejado la caldera, mediante sistemas de control de emisiones tales como ciclones, multiciclones, filtros de mangas o precipitadores electrostáticos, para evitar que los gases que sean emitidos a la atmósfera tengan concentraciones de MP superiores a los estándares admisibles de la Resolución 909 de 2008.

En la Figura 11 se muestra el alcance y la complementariedad entre los Controles Primarios y Secundarios de Emisiones.

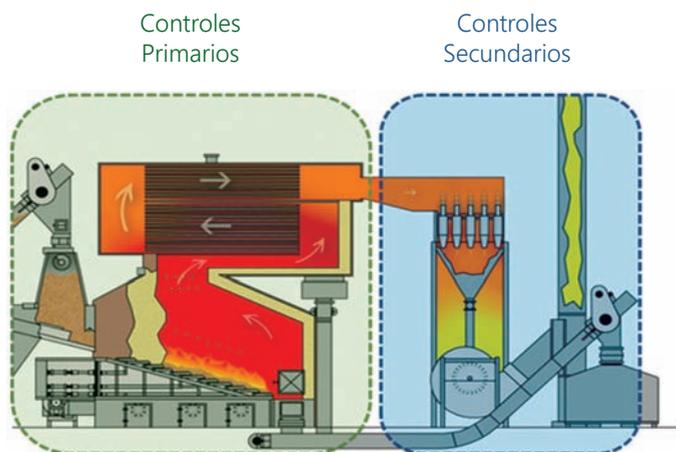


Figura 11. Controles primarios y controles secundarios de emisiones de MP.
Fuente: CAIA Ingeniería, 2014b, adaptada de Wellons FEI Corp.

Para cumplir con la Resolución 909 de 2008 será necesario implementar simultáneamente Controles Primarios y Controles Secundarios de Emisiones. Cuanto mejores Controles Primarios se implementen, menor cantidad de material particulado se generará durante la combustión, y así será menor el esfuerzo requerido en Controles Secundarios, como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Eficiencia de remoción requerida en los equipos de control según el nivel de MP a la salida de la caldera.

MP a la salida de la caldera (mg/m ³)	% de remoción requerido para lograr 300 mg/m ³	% de remoción requerido para lograr 50 mg/m ³
500	40,0 %	90,0 %
1000	70,0 %	95,0 %
2000	85,0 %	97,5 %
3000	90,0 %	98,3 %
4000	92,5 %	98,8 %
5000	94,0 %	99,0 %

Fuente: Elaboración propia.

En las secciones 5.3 y 5.4 se explica en mayor detalle el objeto y el alcance de los Controles Primarios y los Controles Secundarios de Emisiones, así como las principales herramientas para implementarlos en forma efectiva.

5.3 Estrategia de Controles Primarios de Emisiones

Como ya se mencionó, las emisiones de material particulado son inherentes a cualquier proceso de combustión; sin embargo, los Controles Primarios de Emisiones buscan prevenir que en dicha combustión se genere un exceso de material particulado.

En esta sección se describirán los aspectos y variables que deben monitorearse y controlarse en el sistema de generación de vapor de las plantas de beneficio para minimizar la cantidad de MP generada durante la combustión en la caldera, y se presentará un conjunto de Buenas Prácticas Operacionales (BPO) con acciones concretas para lograrlo.

5.3.1 Propósito: combustión completa de la biomasa

La eficiencia de la combustión se puede entender como la eficacia de cualquier aparato de combustión para convertir la energía interna contenida en un combustible en energía calórica para ser usada en un proceso. El principal factor que contribuye a incrementar dicha eficiencia es la combustión completa del combustible utilizado (biomasa en el caso de las plantas de beneficio de aceite de palma). De esta manera, **el fin último de los Controles Primarios de Emisiones en las plantas de beneficio es lograr la combustión completa de la biomasa.**

En teoría, cuando existe una combustión completa el oxígeno presente se consume por completo para oxidar el combustible (UNEP y GEF, 2005). Por ello, idealmente una combustión completa estaría dada por 0 % de oxígeno en los gases efluentes. La Figura 12 muestra cómo una mayor concentración de oxígeno en los gases de escape está asociada con una combustión más ineficiente.

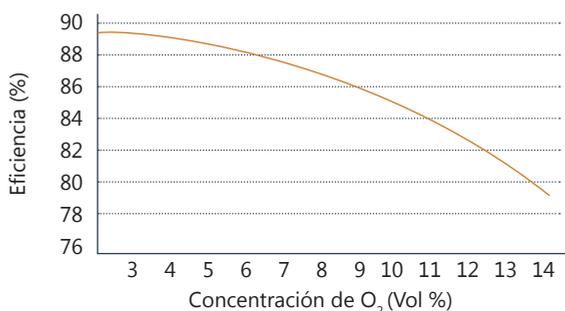


Figura 12. Eficiencia de la combustión comparada con la concentración de oxígeno en la corriente de gases efluentes.

Fuente: UNDP y GEF, 2005.

Con una combustión completa de la biomasa se obtienen los siguientes tres resultados positivos para las plantas de beneficio:

- i. Mayor eficiencia en el proceso de combustión-mayor energía térmica disponible por volumen de biomasa utilizado.
- ii. Mayor costo-efectividad del sistema de generación de vapor.
- iii. Menor generación de emisiones de material particulado.

Teniendo en cuenta lo anterior, **los Controles Primarios de Emisiones actúan sobre el proceso de combustión de la biomasa y sobre las variables que inciden en él, para lograr una combustión completa.**

5.3.2 Variables primarias de control de la combustión

Para lograr una combustión completa es necesario controlar cuatro variables primarias durante el proceso de combustión: la temperatura, el tiempo de residencia, la turbulencia y el oxígeno, como se muestra en la Figura 13:

Variables primarias de control de la combustión	
Temperatura	Suficientemente alta para garantizar una buena combustión.
Tiempo de residencia	Permanencia de la biomasa en el hogar un tiempo suficiente para garantizar una combustión completa.
Turbulencia	Mezcla adecuada de aire y combustible en toda la cámara. Busca asegurar que no existan zonas de combustión localizadas con exceso de combustible y sin oxígeno, para que todo el combustible se queme.
Oxígeno	Existencia suficiente y generalizada de oxígeno disponible. La distribución del oxígeno en el hogar de la caldera debe ser equitativa y controlada; es decir, que se debe evitar que existan zonas de altos o bajos contenidos de oxígeno.

Figura 13. Variables primarias a controlar en el proceso de combustión.

Fuente: Elaboración propia a partir de diversas fuentes

Para ser efectiva, cualquier acción encaminada a mejorar la eficiencia y el control de un proceso de combustión debe incidir directa o indirectamente sobre alguna de estas cuatro variables primarias. Ellas siempre están interrelacionadas y de su adecuado control depende también la prevención de altos niveles de emisiones de material particulado.

Sin embargo, las acciones para controlar mejor la combustión no actúan directa ni exclusivamente sobre alguna de estas variables. Existen elementos más concretos que deberán ser controlados, conocidos como **consignas de control**.

5.3.3 Consignas de control de la combustión

Las consignas de control son aspectos o condiciones que inciden directa o indirectamente sobre las cuatro variables primarias de control de la combustión, y que pueden ser monitoreados y controlados de manera más directa en el proceso. Es decir, que son elementos sobre los cuales se puede actuar de manera directa para controlar la combustión.

Se han identificado nueve consignas de control aplicables a los sistemas de generación de vapor de las plantas de beneficio de aceite de palma, que se dividen en tres categorías, como se muestra en la Figura 14:

1. **Condiciones de operación de la caldera:** elementos del proceso de combustión en el interior de la caldera que inciden en una combustión completa.
2. **Condiciones del combustible:** características del combustible (biomasa), su forma de alimentación y su distribución en el hogar de la caldera que inciden en una combustión completa.
3. **Condiciones externas:** son condiciones externas al proceso de combustión pero tienen una incidencia sobre la generación de una combustión completa.

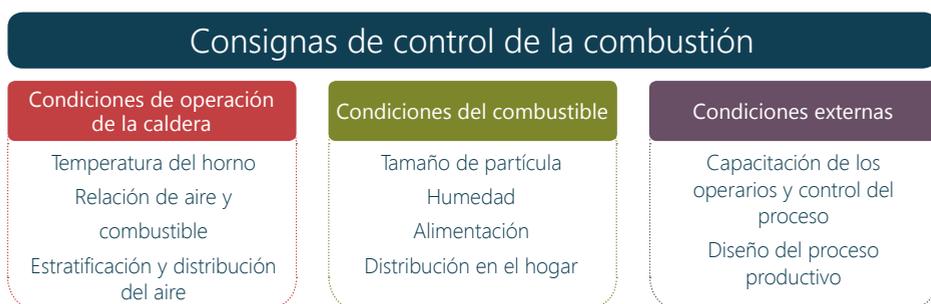


Figura 14. Clasificación de las consignas de control de la combustión. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se explica en mayor detalle cada una de estas consignas de control:

Temperatura del horno

La temperatura es la variable más importante por controlar para lograr una combustión completa, debido a su influencia exponencial en las tasas de reacción. Ella tiene una influencia directa en la velocidad con que se da el proceso de combustión: cuanto más alta sea la temperatura, más rápido es el proceso de combustión y más completa es la misma; por el contrario, cuanto más baja es la temperatura, más demorada es la combustión y mucho menos eficiente.

Relación de aire y combustible

Para la combustión de biomasa es necesario tener una relación aire / combustible superior a 1 para asegurar una mezcla suficiente con aire que permita que todo el combustible se queme. Sin embargo, un exceso de aire reduce significativamente la temperatura de combustión y su eficiencia. Por ello es necesario garantizar una cantidad de aire apenas suficiente, mediante un diseño óptimo de las entradas de aire y un control óptimo de la relación aire / combustible. También se requiere asegurar que siempre que varíe la cantidad de combustible ingresado a la caldera se modifique igualmente el ingreso de aire, de manera que se mantenga la relación entre estas dos variables.

Estratificación y distribución del aire

Una distribución eficiente del aire en la cámara de combustión es de suma importancia para lograr una reducción efectiva de las emisiones. Mediante la aplicación de aire estratificado es posible reducir las emisiones procedentes de una combustión incompleta. La distribución ideal debe contar con un aire primario debajo de la parrilla y otro aire secundario de combustión que permita finalizar la oxidación de los gases aún sin combustionar. Se debe buscar la mejor mezcla de aires de combustión, de manera que se reduzca la cantidad total requerida, logrando una menor relación de exceso de aire y mayores temperaturas de combustión.

Tamaño de partícula

El tamaño de las partículas de biomasa utilizada como combustible juega un papel fundamental en la eficiencia de la combustión. Un combustible con menor tamaño de partícula requiere menos esfuerzo para hacer combustión, dando como resultado un menor tiempo de residencia en el hogar de la caldera. Así mismo, un combustible con mayor tamaño de partícula requiere más esfuerzo para hacer combustión y, por tanto, un mayor tiempo de residencia. En otras palabras, el área de superficie activa del combustible influye directamente en su reactividad. Además, un tamaño de combustible menor genera menos zonas frías sobre la parrilla.

Humedad del combustible

La humedad de la biomasa será liberada en la primera fase de la combustión, usando para ello parte de la energía en este proceso de evaporación. Es decir, que una mayor humedad del combustible dificulta lograr una temperatura suficientemente alta en el hogar. Además, cuando existen variaciones en la humedad y composición del combustible, existen también variaciones en la temperatura de combustión.

Alimentación del combustible

El sistema de alimentación de biomasa que se emplee tiene una incidencia directa en el resultado y eficiencia de la combustión. Para que el proceso de combustión sea controlado, se debe garantizar que el ingreso de combustible sea constante y que corresponda a las necesidades reales de generación de vapor para el procesamiento del fruto. Es indispensable desligar la frecuencia y velocidad de alimentación de combustible a la caldera, de la velocidad a la que se produce biomasa en el proceso de extracción de aceite.

Distribución de combustible en el hogar

La distribución del combustible dentro del hogar puede reducir o aumentar su área superficial activa, lo cual influye en el proceso de combustión disminuyendo o incrementando su reactividad. Adicionalmente, influye en la temperatura de las diferentes secciones del hogar, volviéndola más o menos uniforme.

Capacitación de los operarios y control integral del proceso

En las calderas de biomasa el operario tiene una incidencia significativa sobre el consumo de combustible y la calidad de la combustión en la caldera, pues muchas de las decisiones del proceso de quema se dejan a su criterio. Sin embargo, en muchos casos no cuentan con información suficiente sobre las variables y consignas de control de la combustión, ni con una adecuada retroalimentación del proceso productivo de la planta. Es común que su única exigencia sea mantener la presión de vapor de la caldera, sin preocuparse por la eficiencia del proceso mismo de combustión. Por lo anterior, es necesario que todos los técnicos y operarios responsables del sistema de generación de vapor de la planta conozcan la importancia de ejercer un control integral sobre todas las variables y consignas que influyen en la eficiencia de la combustión y en la generación de emisiones contaminantes. Así mismo, es necesario implementar un mecanismo adecuado de control integral del sistema de generación de vapor, que puede ser a través de un tablero de mando que permita el monitoreo y ajuste permanente de tales variables y consignas de control.

Diseño del proceso productivo

La propia naturaleza del proceso de extracción de aceite de palma implica que los consumos de vapor no sean constantes, obligando a que la caldera tenga

picos de demanda muy altos y condiciones transitorias de generación de vapor con altos niveles de emisiones. Con un adecuado rediseño de procesos y revisión de su ingeniería asociada se puede reducir el consumo momentáneo o definitivo de combustible, se puede también asegurar un mejor control de la combustión y reducir significativamente el nivel de emisiones.

5.3.4 Buenas prácticas operacionales para una combustión completa

Las variables y consignas de control muestran QUÉ se debería controlar para lograr una combustión completa y, con ello, menores emisiones de material particulado.

Como paso siguiente, se ha desarrollado un conjunto de 20 Buenas Prácticas Operacionales (BPO) que muestran CÓMO lograr este objetivo. Ellas han sido clasificadas en cuatro categorías, como se muestra en la Figura 15. Cada BPO contiene una serie de acciones concretas para mejorar las condiciones de la caldera, las condiciones del combustible y las condiciones externas al proceso de combustión (las consignas de control), con el fin de obtener una combustión completa.

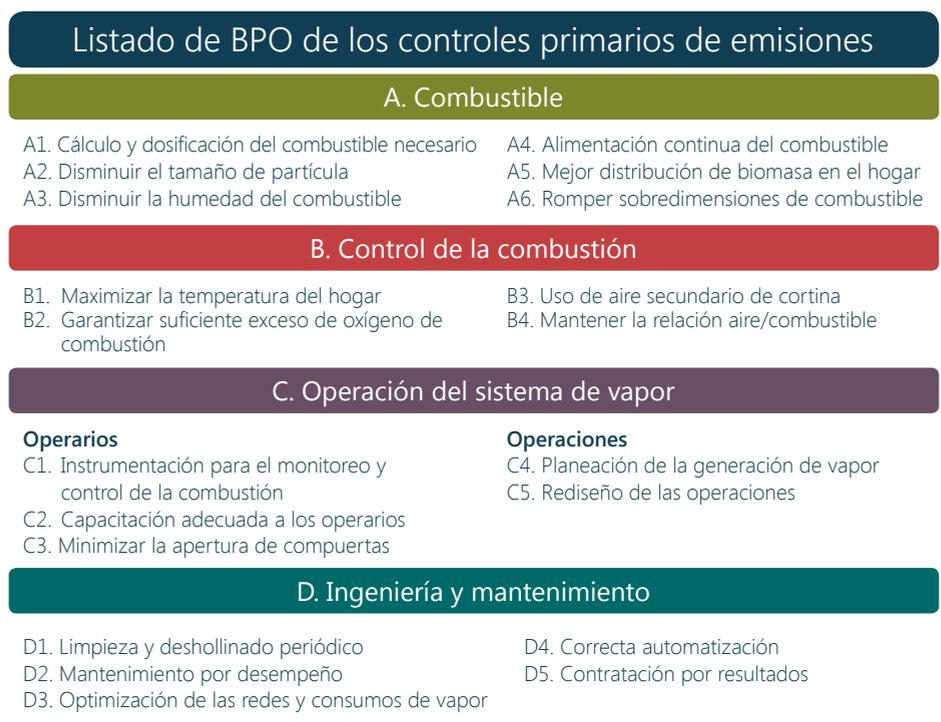


Figura 15. Listado de BPO de los Controles Primarios de Emisiones.

Fuente: Elaboración propia.

Como se ha mencionado, las variables y consignas de control están interrelacionadas y son interdependientes. En otras palabras, las acciones que se implementen para mejorar una consigna de control repercutirán seguramente en otras consignas de control y a su vez tendrán un efecto en más de una variable primaria de control. De la misma manera, implementar una BPO seguramente impactará más de una consigna de control, como se muestra en la Figura 16.



Figura 16. Relación entre las variables y consignas de control y las BPO de los Controles Primarios de Emisiones.

Fuente: Elaboración propia

De esta manera, la estrategia específica que una planta de beneficio debería adoptar para mejorar sus Controles Primarios de Emisiones seguramente incluirá un conjunto de múltiples BPO, que a su vez incidirá positivamente en varias consignas y variables de control de la combustión.

La descripción detallada de las 20 BPO relacionadas con los Controles Primarios de Emisiones se encuentra en el capítulo 6.

5.4 Estrategia de Controles Secundarios de Emisiones

5.4.1 Propósito: control de emisiones de MP a la atmósfera y cumplimiento legal

Como se mencionó, el propósito de los Controles Secundarios de Emisiones es evitar que los niveles de material particulado que se emiten a la atmósfera sean

superiores a los máximos permitidos por la reglamentación vigente. Para ello, se emplean equipos de control de emisiones que remueven el exceso de MP generado durante la combustión hasta cumplir con los estándares aplicables de la Resolución 909 de 2008.

Para lograr su propósito, los Controles Secundarios de Emisiones se enfocan en los siguientes tres aspectos:

1. Contar con un equipo de control de emisiones adecuado, según el esfuerzo requerido de remoción de MP para cumplir con el estándar aplicable.
2. Garantizar la eficiencia esperada del equipo de control de emisiones utilizado.
3. Reducir al máximo el factor multiplicador de la corrección por oxígeno.

En la sección 5.4.2 se describen algunos aspectos por tener en cuenta para escoger el equipo de control de emisiones más apropiado para cada caldera, según el esfuerzo requerido de remoción de MP. En la sección 5.4.3 se muestran las BPO asociadas a los Controles Secundarios de Emisiones.

5.4.2 Equipo de control de emisiones según el esfuerzo requerido de remoción de MP

El equipo de control de emisiones más apropiado para una caldera en particular estará en función del esfuerzo requerido de remoción de emisiones de MP para cumplir con la reglamentación vigente. Ese esfuerzo dependerá de qué tanto material particulado se esté generando durante la combustión o, en otras palabras, de qué grado de avance se tenga en los Controles Primarios de Emisiones.

La Figura 17 muestra los principales tipos de sistemas de control de emisiones utilizados en las plantas de beneficio del sector palmero y su eficiencia esperada de remoción de MP.



Figura 17. Eficiencia de remoción de MP de los principales equipos de control de emisiones.
Fuente: CAIA Ingeniería, 2014b, a partir de EPA, 2002.

El costo de estos equipos de control de emisiones varía significativamente según su eficiencia de remoción. Es así como el costo anual equivalente (que incluye el costo de capital y el costo anual de operación) de los filtros de mangas y precipitadores electrostáticos es mucho mayor que el de los ciclones y multiciclones, y es mayor el costo de un ciclón/multiciclón de alta eficiencia que el de uno convencional. Los ciclones de construcción local, por su parte, son los de menor eficiencia de remoción y los de menor costo.

En la Tabla 14 se muestra el equipo de control de emisiones que debería utilizarse en una caldera, en función de la cantidad de material particulado generado durante la combustión y medido a la salida de la caldera.

Tabla 14. Equipos de control de emisiones adecuados según el estándar aplicable y el grado de avance en Controles Primarios de Emisiones

Grado de avance en Controles Primarios de Emisiones	Nivel de MP a la salida de la caldera	Calderas existentes Estándar de 300 mg/m ³		Calderas nuevas Estándar de 50 mg/m ³	
		% de remoción de MP requerido	Equipo adecuado de control de emisiones	% de remoción de MP requerido	Equipo adecuado de control de emisiones
ALTO	500	40,0 %	Ciclón de fabricación local	90,0 %	Ciclón/ Multiciclón de alta eficiencia
	750	60,0 %	Ciclón/ Multiciclón convencional	93,3 %	
	1.000	70,0 %		95,0 %	
MEDIO	1.500	80,0 %	Ciclón/ Multiciclón de alta eficiencia	96,7 %	Filtro de Mangas ó Precipitador Electrostático
	2.000	85,0 %		97,5 %	
	2.500	88,0 %		98,0 %	
BAJO	3.000	90,0 %	Ciclón/ Multiciclón de alta eficiencia	98,3 %	
	3.500	91,4 %		98,6 %	
	4.000	92,5 %		98,8 %	
	5.000	94,0 %		99,0 %	

Fuente: Elaboración propia.

De la Tabla 14 cabe anotar lo siguiente:

- Las calderas existentes están en capacidad de cumplir con el estándar de 300 mg/m³ de MP utilizando un ciclón o multiciclón.

- Aquellas calderas existentes con un nivel medio o bajo de adopción de Controles Primarios de Emisiones requerirán un ciclón o multiciclón de alta eficiencia.
- Las **calderas nuevas** están en capacidad de cumplir con el estándar de 50 mg/m³ de MP utilizando filtros de mangas o precipitadores electrostáticos.

En el Anexo 2 se describen el principio de funcionamiento, eficiencia de remoción de MP, ventajas y desventajas, y algunos factores por tener en cuenta para mantener la eficiencia de cada una de estas tecnologías para el control de emisiones de material particulado. Adicionalmente, en el Anexo 3 se muestran los resultados de una estimación de los costos de adquisición, instalación y operación de estas tecnologías, desarrollada por CAIA Ingeniería para Fedepalma en 2012.

5.4.3 Buenas prácticas operacionales para controlar la emisión de MP a la atmósfera

En esta sección se presenta un conjunto de Buenas Prácticas Operacionales con acciones concretas para lograr el objetivo de los Controles Secundarios de Emisiones.

Estas BPO parten del supuesto de que las plantas de beneficio ya cuentan con equipos de control de emisiones adecuados para el esfuerzo requerido de remoción de MP, teniendo en cuenta lo explicado en la sección 5.4.2.

De esta manera, las dos categorías de BPO que se muestran en la Figura 18 buscan, por un lado, reducir al máximo el factor multiplicador de la corrección por oxígeno, y por otro lado, garantizar la eficiencia esperada del equipo de control de emisiones que esté siendo utilizado. En total, hay 3 BPO relacionadas con los Controles Secundarios de Emisiones.

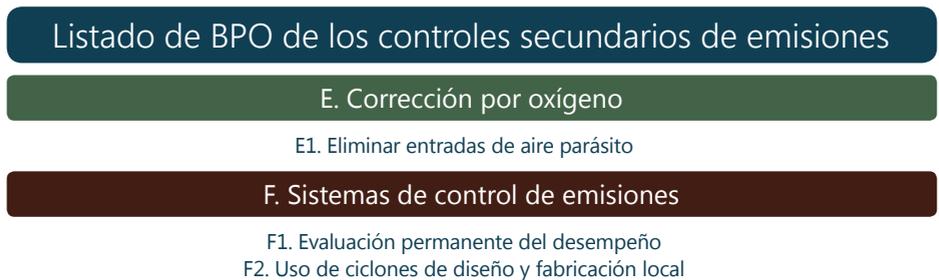


Figura 18. Listado de BPO de los Controles Secundarios de Emisiones.

Fuente: Elaboración propia

5.5 Esquema general del modelo de gestión integral de emisiones de MP

En la Figura 19 se sintetizan los principales aspectos del modelo de gestión integral de emisiones de MP descritas en las secciones 5.1 a 5.4: sus premisas, objetivos, estrategias y líneas de acción.

5.6 Hoja de ruta para la implementación del modelo de gestión

En esta sección se presenta una hoja de ruta para implementar el modelo de gestión integral de emisiones de MP antes descrito, que consta de cuatro pasos que se explicarán en las secciones siguientes.

5.6.1 Paso 1: Comprender y apropiarse los conceptos y lineamientos del modelo

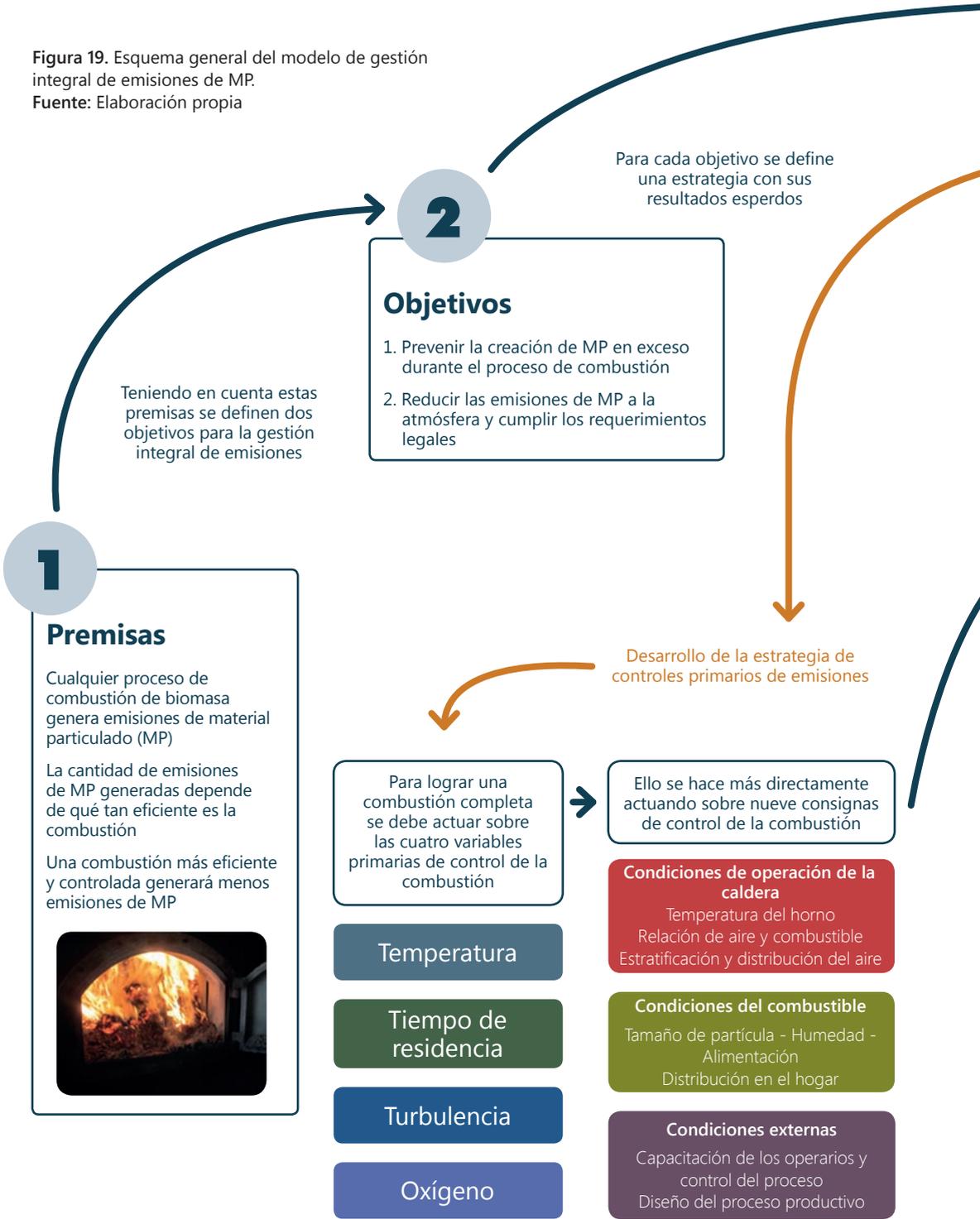
Este primer paso es el más importante para lograr implementar en forma efectiva una gestión integral de las emisiones de MP. Consiste en que el personal técnico y operativo responsable del sistema de generación de vapor de la planta de beneficio comprenda y se apropie de los conceptos y lineamientos del modelo de gestión.

De esta manera, el personal de la planta:

- Comprenderá la relación entre la eficiencia de la combustión y la generación de material particulado.
- Entenderá la diferencia entre los Controles Primarios de Emisiones y los Controles Secundarios de Emisiones.
- Tendrá clara la necesidad de implementar ambos tipos de controles para lograr cumplir los estándares de la Resolución 909 de 2008 en la forma más económica (es decir, minimizando la generación de MP durante la combustión para así requerir un menor esfuerzo de remoción de MP en los equipos de control de emisiones).

A partir de este entendimiento se deberá definir internamente tanto un plan de acción claro, como unos indicadores clave para conseguir este objetivo, sin depender de consultores externos. Si bien será necesario contratar mediciones con laboratorios específicos y ciertos proyectos de ingeniería y otras labores con terceros, lo más importante es que el personal de la planta de beneficio tenga clara la secuencia de pasos por seguir y el propósito de cada paso.

Figura 19. Esquema general del modelo de gestión integral de emisiones de MP.
Fuente: Elaboración propia



3

Estrategias

1. Controles primarios de emisiones

Resultado esperado

Facilitar las condiciones para una combustión completa

2. Controles secundarios de emisiones

Resultados esperados

- i) Contar con un equipo de control de emisiones adecuado según el esfuerzo requerido de remoción de MP
- ii) Garantizar la eficiencia esperada del equipo de control
- iii) Reducir al máximo el factor multiplicador de la corrección de oxígeno

Desarrollo de la estrategia de controles secundarios de emisiones

Mediante la implementación de 20 buenas prácticas operacionales (BPO)

A. Combustible

- A1. Cálculo y dosificación del combustible necesario
- A2. Disminuir el tamaño de partícula
- A3. Disminuir la humedad del combustible
- A4. Alimentación continua del combustible
- A5. Mejor distribución de biomasa en el hogar
- A6. Romper sobredimensiones de combustible

B. Control de la combustión

- B1. Maximizar la temperatura del hogar
- B2. Garantizar suficiente exceso de oxígeno de combustión
- B3. Uso de aire secundario de cortina
- B4. Mantener la relación aire/combustible

C. Operación del sistema de vapor Operarios

- C1. Instrumentación para el monitoreo y control de la combustión
- C2. Capacitación adecuada a los operarios
- C3. Minimizar la apertura de compuertas

Operaciones

- C4. Planeación de la generación de vapor
- C5. Rediseño de las operaciones

D. Ingeniería y mantenimiento

- D1. Limpieza y desdoblado periódico
- D2. Mantenimiento por desempeño
- D3. Optimización de las redes y consumos de vapor
- D4. Correcta automatización
- D5. Contratación por resultados

Esta segunda estrategia se implementa mediante tres BPO

E. Corrección por oxígeno

- E1. Eliminar entradas de aire parásito

F. Sistemas de control de emisiones

- F1. Evaluación permanente del desempeño
- F2. Uso de ciclones de diseño y fabricación local

Portafolio de buenas prácticas operacionales para la reducción de emisiones de MP

5.6.2 Paso 2: Realizar un diagnóstico integral

El segundo paso es realizar un diagnóstico integral que permita identificar y priorizar las acciones de mejora que tengan un mayor efecto positivo sobre la eficiencia del proceso y sobre las emisiones de MP.

El diagnóstico debe establecer cómo se encuentra la planta, y cada caldera en específico, con relación a los dos objetivos planteados en la sección 5.2:

1. Prevenir la creación de material particulado en exceso durante el proceso de combustión.
2. Reducir las emisiones de MP a la atmósfera.

Para ello, se recomienda hacer una evaluación cualitativa y cuantitativa como la que se hizo en las seis calderas del ejercicio piloto de implementación de BPO (sección 4.3.2):

- **Evaluación cualitativa:** Autodiagnóstico o evaluación externa sobre las nueve consignas de control descritas en la sección 5.3.3, y sobre la adopción de sus 20 BPO relacionadas (sección 5.3.4). Con ello se tendría un insumo sobre el grado de avance de los Controles Primarios de Emisiones.
- **Evaluación cuantitativa:** Muestreo isocinético y análisis de gases simultáneo a la salida de la caldera y en la chimenea (antes y después del sistema de control de emisiones), como se muestra en la Figura 20. Con ello se podrá conocer la eficiencia real del sistema de control de emisiones, se podrá determinar si existen entradas de aire parásito que incrementen el factor de corrección por oxígeno y se tendrán indicadores sobre la calidad de la combustión, como se muestra en la Tabla 15.

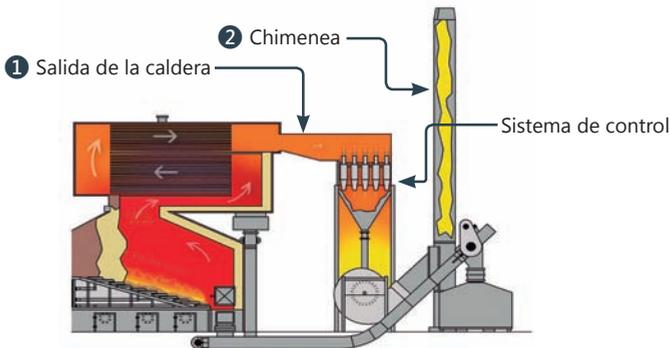


Figura 20. Puntos de medición 1 a la salida de la caldera, y 2 en la chimenea.

Fuente: CAIA Ingeniería, 2014b, adaptada de Wellons FEI Corp.

Tabla 15. Indicadores sobre la calidad de la combustión en un muestreo isocinético.

Indicador	Descripción y medidas de mejora
MP a la salida de la caldera	Una combustión eficiente y controlada debería generar menos de 1.000 mg/m ³ de MP; valores superiores a 2.500 mg/m ³ denotan una mala combustión.
Monóxido de carbono (CO)	Niveles de CO superiores a 500 partes por millón (ppm) indican una mala combustión o combustión incompleta, especialmente debido a una mala distribución del combustible dentro del hogar.
Variabilidad en el CO	Valores muy diferentes de monóxido de carbono en mediciones consecutivas (por ejemplo, cambios de 100 ppm a 10.000 ppm) evidencian una falta de control en la cantidad de combustible que se alimenta a la caldera y un desbalance en la relación aire/combustible.
Oxígeno en la chimenea	El oxígeno determina el nivel de aire de excedencia de la combustión. Se ha encontrado experimentalmente que un nivel óptimo de oxígeno en la combustión de biomasa puede estar alrededor de 11 %; valores muy inferiores empeoran la combustión y un valor superior a 13 % dificulta el cumplimiento del estándar legal por la corrección de oxígeno.
Variación en el oxígeno en la chimenea	Cuando el nivel de oxígeno en la chimenea varía considerablemente entre las tres mediciones de un muestreo isocinético, ello indica que la combustión no es controlada.
Presión absoluta en la chimenea	La presión en la chimenea debe ser ligeramente negativa. Cuando se abra el niple por donde se realiza la medición, una mota de tela o un trozo de papel que se acerque debe tender a ingresar a la chimenea. Una presión positiva en la chimenea implica un exceso de flujo y, por tanto, un exceso en la cantidad de aire requerida para una combustión completa.
Contenido de humedad en gases de chimenea	La humedad de los gases en la chimenea se debe mantener estable entre mediciones hechas en diferentes épocas del año. Teniendo en cuenta que la humedad en los gases proviene de la humedad del combustible y del aire de entrada, un cambio significativo en la humedad puede ser un indicio de una tubería rota en la caldera que hace que el agua ingrese al hogar de la caldera.

5.6.3 Paso 3: Definir objetivos y metas concretas

Como se ha mencionado, el modelo de gestión integral de emisiones de MP se enfoca de manera simultánea en las estrategias de Controles Primarios y Controles Secundarios de Emisiones. Luego de hacer un diagnóstico integral, la

planta de beneficio estará en capacidad de fijar objetivos y metas concretas para cada una de estas dos estrategias.

Teniendo en cuenta que la estrategia de Controles Secundarios de Emisiones está asociada a menos variables y BPO, se sugiere, por simplicidad, empezar por establecer sus objetivos y metas y luego definir los objetivos y metas de los Controles Primarios de Emisiones.

Objetivos y metas para la estrategia de Controles Secundarios de Emisiones

El diagnóstico permitirá identificar brechas y definir metas concretas con relación a dos objetivos específicos de la estrategia de Controles Secundarios de Emisiones, como se muestra en la Tabla 16:

1. **Eliminar las entradas de aire parásito al sistema:** Cualquier diferencia entre el nivel de oxígeno a la salida de la caldera y en la chimenea es una brecha que deberá cerrarse para minimizar el factor multiplicador de la corrección por oxígeno. De esta manera, una primera meta fácil de fijar es reducir esa diferencia a un nivel cercano a 0 %, mediante una minuciosa revisión y sellado de las entradas de aire en los ductos de escape y en el equipo de control de emisiones.
2. **Mantener la eficiencia esperada del equipo de control de emisiones:** Otra brecha importante de cerrar ocurre cuando hay diferencias entre la eficiencia real del equipo de control de emisiones y su eficiencia teórica. Una segunda meta fácil de fijar es acercarse a esa eficiencia teórica. Para ello, será necesaria una muy detallada revisión de las entradas de aire y de los sellos inferiores de los equipos de control, así como un buen mantenimiento general del equipo.

Tabla 16. Ejemplos de metas para la estrategia de Controles Secundarios de Emisiones.

Aspecto	Brechas	Metas mínimas
1. Entradas de aire parásito	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diferencia entre el nivel de oxígeno a la salida de la caldera y en la chimenea 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diferencia < 2 %
2. Eficiencia del equipo de control de emisiones	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diferencia entre la eficiencia real y la eficiencia teórica (o esperada) del equipo de control de emisiones 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eficiencia real del ciclón o multiciclón convencional > 70 % ▪ Eficiencia real del ciclón o multiciclón de alta eficiencia > 80 % ▪ Eficiencia real del filtro de mangas o precipitador > 99 %

Teniendo en cuenta que el tipo de acciones que deberán adelantarse para el logro de estas metas son relativamente conocidas por el personal técnico de

las plantas de beneficio o sus contratistas, es posible suponer un alto factor de éxito en su cumplimiento.

En la Tabla 17 se muestra un caso hipotético de una caldera que, luego de haber hecho un diagnóstico con mediciones de MP y gases a la salida de la caldera y en la chimenea, ha fijado sus metas para la estrategia de Controles Secundarios de Emisiones.

Tabla 17. Ejemplo de establecimiento de metas para la estrategia de Controles Secundarios de Emisiones.

Variable	Línea Base	Metas Controles Secundarios de Emisiones
MP a la salida de la caldera	3.000	3.000
Oxígeno a la salida de la caldera	11,0 %	11,0 %
% Eficiencia equipo de control	55%	75 %
MP en la chimenea	1.350	750
Oxígeno en la chimenea	14,0 %	12,5 %
Factor multiplicador oxígeno	1,143	0,941
MP corregido por oxígeno	1.542,86	705,88

En este ejemplo, el nivel de MP a la salida de la caldera es de 3.000 mg/m³, lo cual seguramente refleja una combustión incompleta y poco controlada. Su nivel de oxígeno a la salida de la caldera es 11,0 % pero aumenta a 14,0 % en la chimenea, lo cual evidencia entradas de aire parásito al sistema. La eficiencia de su equipo de control de emisiones es baja, llegando apenas a 55 %. Con esta eficiencia de remoción de MP se logra reducir el nivel de MP en la chimenea a 1.350 mg/m³. Y dado que el factor multiplicador para la corrección por oxígeno es 1,143, el nivel de MP corregido al oxígeno de referencia es de 1.542 mg/m³, lo cual está bastante lejos de cumplir con el estándar de 300 mg/m³.

Esta planta podría invertir en mantenimiento y reparación de su equipo de control de emisiones, buscando incrementar su eficiencia de remoción de MP a 75 %. Por otra parte, podría adelantar un sellado de todas las entradas de aire en los ductos de escape y el equipo de control de emisiones, reduciendo el aumento de oxígeno entre la caldera y la chimenea de 3 % a 1,5 %. Con estas dos metas, señaladas con color naranja en la Tabla 17, se llegaría a un nivel de MP en la

chimenea de 750 mg/m³ y el factor multiplicador para la corrección por oxígeno sería 0,941. De esta manera, el nivel de MP corregido por oxígeno se reduciría a 705 mg/m³, lo cual acercaría significativamente esta caldera a cumplir el estándar de 300 mg/m³ de MP.

Objetivos y metas para la estrategia de Controles Primarios de Emisiones

Tomando como base las reducciones esperadas en las emisiones de MP por mejorar la eficiencia de los sistemas de control de emisiones y reducir las entradas de aire parásito, la planta tendrá más información y mejores criterios para establecer una meta para la estrategia de Controles Primarios de Emisiones.

La meta deseable estará dada por el nivel de MP a la salida de la caldera que permita cumplir con el estándar admisible de emisiones, bajo el supuesto de que se cumplan las metas de Controles Secundarios de Emisiones descritas en el numeral anterior. En la Tabla 18 se continúa con el ejemplo, fijando ahora una meta de Controles Primarios de Emisiones.

Tabla 18. Ejemplo de establecimiento de metas para la estrategia de Controles Primarios de Emisiones.

Variable	Línea Base	Metas Controles Secundarios de Emisiones	Metas Controles Primarios de Emisiones
MP a la salida de la caldera	3000	3000	1250
Oxígeno a la salida de la caldera	11,0 %	11,0 %	11,0 %
% Eficiencia equipo de control	55 %	75 %	75 %
MP en la chimenea	1350	750	312,5
Oxígeno en la chimenea	14,0 %	12,5 %	12,5 %
Factor multiplicador oxígeno	1,143	0,941	0,941
MP corregido por oxígeno	1542,86	705,88	294,12

En este caso, se supone que el nivel de oxígeno a la salida de la caldera se mantiene en 11 % y que se cumple con las metas de 12,5 % de oxígeno en la chimenea y 75 % de eficiencia del equipo de control de emisiones. Con estos valores, será necesario reducir el nivel de MP a la salida de la caldera a 1.250 mg/m³ para dar cumplimiento al estándar admisible, con un valor de 294,12 mg/m³.

5.6.4 Paso 4: Priorizar e implementar Buenas Prácticas Operacionales

Para cumplir las metas que se describieron en la sección anterior será necesario implementar Buenas Prácticas Operacionales (BPO) relacionadas con los Controles Primarios y con los Controles Secundarios de Emisiones.

Como primera medida, se sugiere implementar las siguientes dos BPO para cumplir las metas de Controles Secundarios de Emisiones:

- E1: Eliminar entradas de aire parásito
- F1: Evaluación permanente del desempeño del sistema de control de emisiones

Posteriormente, se deben priorizar las BPO más pertinentes para cada caldera, en función de los resultados del diagnóstico cualitativo de las nueve consignas de control. Para ello, se sugiere evaluar el estado de cada una de esas consignas de control, usando una calificación de tipo semáforo, como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19. Ejemplo de evaluación de las consignas de control.

Consignas de control		Caldera X	Caldera Y	Caldera Z
Condiciones de la caldera	Temperatura del horno	✓	?	✓
	Relación aire/combustible	?	✓	✗
	Estratificación y distribución de aire	?	✓	✗
Condiciones del combustible	Tamaño de partícula	✓	✗	✗
	Humedad	✗	✗	?
	Alimentación	✓	✗	?
	Distribución en el hogar	✓	✓	✓
Condiciones externas	Capacitación de los operarios y control integral del proceso	?	✗	✗
	Rediseño del proceso productivo	✗	?	✗

✓ Avance aceptable

✗ Avance deficiente

? No se tiene suficiente información por falta de instrumentos para medir su condición actual

De esta tabla se resalta lo siguiente:

- La caldera Z necesita enfocar sus acciones de mejora en dos categorías de consignas de control: condiciones de la caldera y condiciones externas.
- La caldera Y requiere enfocarse principalmente en las condiciones del combustible.
- La caldera X podría enfocarse en las condiciones externas.

En la Figura 21 se muestran las categorías de BPO que están más estrechamente relacionadas con cada categoría de consignas de control. De esta manera,

- Las BPO prioritarias para la caldera Z podrían estar principalmente en las categorías B, C y D.
- Para la caldera Y, podrían estar principalmente en la categoría A.
- Para la caldera X, podrían estar principalmente en la categoría D.

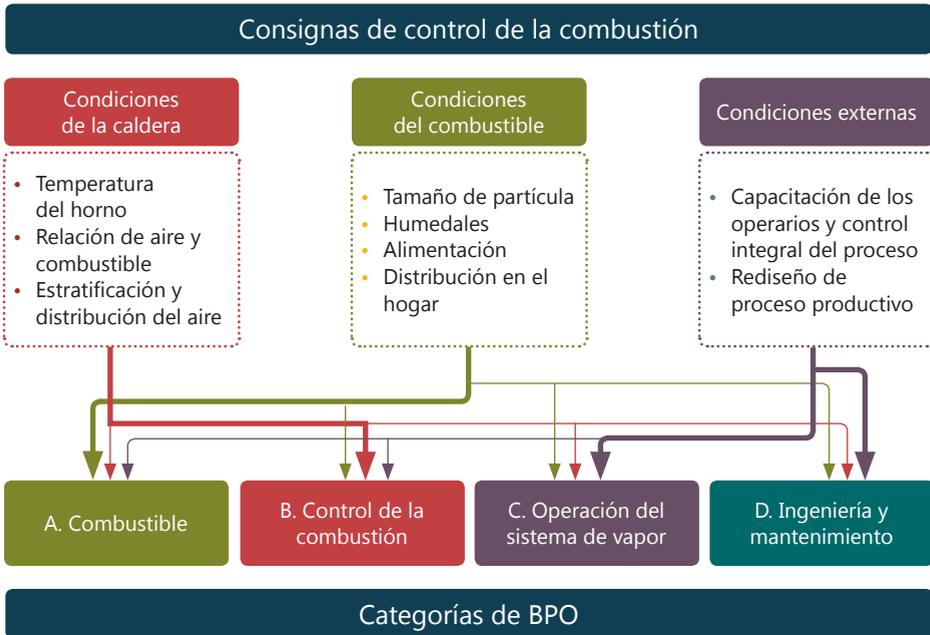


Figura 21. Relación entre consignas de control y categorías de BPO para los Controles Primarios de Emisiones.

Una vez se haya identificado el conjunto de BPO que sean más pertinentes para cada caldera según su condición actual, es conveniente tener en cuenta:

- Es importante garantizar la adecuada implementación de cada BPO. Para ello, en el portafolio de BPO se especificó un mecanismo de verificación para cada una.
- Se debe revisar que la implementación de una BPO no tenga un efecto negativo sobre una o más consignas de control.
- La implementación adecuada de las BPO requiere un tiempo prudente de puesta a punto del sistema. Es muy importante tener en cuenta este tiempo de ajuste, antes de programar cualquier muestreo isocinético, sea de carácter interno o como reporte oficial a la autoridad ambiental.

6. Portafolio de Buenas Prácticas Operacionales

Este capítulo contiene el portafolio ajustado de Buenas Prácticas Operacionales que se sugiere sean implementadas por las plantas de beneficio del sector palmero como parte de sus estrategias de Controles Primarios y Controles Secundarios de Emisiones.

El portafolio está compuesto por 23 BPO, 20 de ellas asociadas a los Controles Primarios de Emisiones y 3 a los Controles Secundarios de Emisiones.

Como se muestra en la Figura 22, hay cuatro categorías de BPO asociadas a los Controles Primarios de Emisiones y dos categorías de BPO asociadas a los Controles Secundarios de Emisiones.

Cada BPO se presenta en forma de ficha, en la cual se incluye la siguiente información: importancia, impacto esperado, descripción, recomendaciones para la implementación y metodología de verificación.

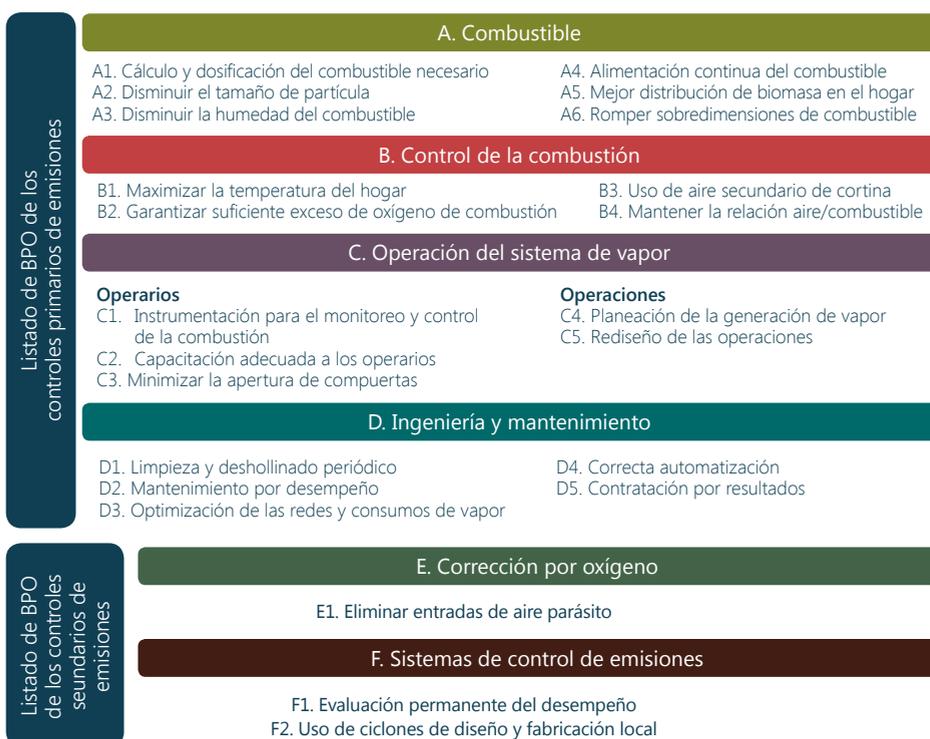


Figura 22. Portafolio de BPO para los Controles Primarios y Controles Secundarios de Emisiones. Fuente: elaboración propia.



A1. Cálculo y dosificación del combustible necesario

Importancia

La alimentación de la cantidad óptima de combustible a la caldera (acorde con las necesidades del proceso), es un factor clave para lograr una combustión completa y la mayor garantía de reducción de emisiones de MP.

Impacto esperado

Menor utilización de biomasa como combustible.
Combustión completa de toda la biomasa utilizada.
Menor generación de emisiones de MP en la combustión.

Descripción

Antes de efectuar cualquier otra intervención en la planta de beneficio, es necesario conocer (o validar en terreno) los requerimientos de consumo de vapor del proceso de producción y a partir de ello calcular la cantidad de biomasa necesaria para cubrir tales requerimientos.

Para determinar la cantidad de biomasa requerida se debe:

1. Medir el consumo de vapor del proceso, usando un medidor de caudal de vapor saturado para cada régimen de operación de la planta de beneficio, o mediante cálculos teóricos basados en el proceso.
2. Calcular y/o medir la capacidad de producción de vapor de cada caldera.
3. Determinar la capacidad calorífica de la biomasa utilizada.
4. Determinar la cantidad de biomasa requerida para el proceso.

Posteriormente deben hacerse los ajustes mecánicos que permitan dosificar a la caldera únicamente la cantidad de biomasa requerida por el proceso (ver BPO A4).

Recomendaciones para la implementación

En el Anexo 4 se presenta una metodología desarrollada por CAIA Ingeniería para calcular la cantidad de combustible requerido a partir de la capacidad nominal de la caldera. Esta metodología puede utilizarse como una aceptable aproximación inicial para esta BPO.

Para obtener un mejor resultado, el cálculo debe hacerse con base en una medición de los requerimientos reales de vapor del proceso y no en la capacidad nominal de la caldera.

Metodología de verificación

Por balance de masa del combustible finalmente dosificado a la caldera.



A2. Disminuir el tamaño de partícula

Importancia

Las partículas pequeñas de combustible necesitan un tiempo de residencia más corto en el hogar y tienen una mayor superficie activa para efectos de combustión. Por ello, es recomendable utilizar biomasa con menor tamaño de partícula para facilitar una combustión completa.

Impacto esperado

Combustión completa de toda la biomasa utilizada.
Menor generación de emisiones de MP en la combustión.¹¹

Descripción

El tamaño de partícula del cuesco es menor que el de la fibra aglutinada que normalmente se usa como combustible, puesto que los procesos de separación de la misma son deficientes, como se explicará en la BPO A6. Por ello, y con relación a esta BPO en particular, es deseable incorporar todos los finos y el cuesco, como el que se muestra en la foto, al combustible que entra a la caldera para mejorar sus características. Algunas plantas mezclan hasta 30 % de finos, pero el límite máximo debe ser aquel que la propia disponibilidad proporcione.

Para ello, se sugiere implementar un desarrollo mecánico que permita separar los finos y el cuesco seco en línea para después dosificarlo a la fibra. Algunas plantas tienen compuertas de separación de biomasa en la parte inferior del transportador, por donde generalmente va el material más fino que luego se elimina. En vez de retirarse, este material seleccionado debería aprovecharse para ser alimentado a la caldera.



Foto: CAIA Ingeniería

Recomendaciones para su implementación

La implementación específica de esta BPO depende de la configuración mecánica de los transportadores.

Se debe tener cuidado de graduar, en caso de existir, el aire secundario para que las partículas pequeñas de biomasa no lleguen a los piro tubos sin quemarse.

Como ejemplo, una de las seis plantas del ejercicio piloto mantiene una combustión tan limpia, que la medida de MP a la salida caldera es de solo 305 mg/m³. El combustible que utilizaba era una mezcla de cuesco y finos. Aunque la capacidad calorífica de esta biomasa era inferior a la capacidad calorífica promedio de la biomasa usada en las otras cinco plantas piloto, sus características lo hacían superior a cualquier otra biomasa analizada, debido a su mayor área de reacción. El tamaño de partícula de la biomasa parece tener una incidencia mayor que su capacidad calorífica para una buena combustión.

Metodología de verificación

Visual, balance de masas.

¹¹ En el estudio piloto de implementación de las buenas prácticas operacionales se mostró una relación positiva entre el menor tamaño de combustible y la reducción de emisiones contaminantes. Su incidencia fue mayor que la reducción de humedad de la biomasa.

**A3. Disminuir la humedad del combustible****Importancia**

Un menor contenido de humedad del combustible implica una mayor temperatura de combustión y, por ende, menos emisiones contaminantes.

Impacto esperado

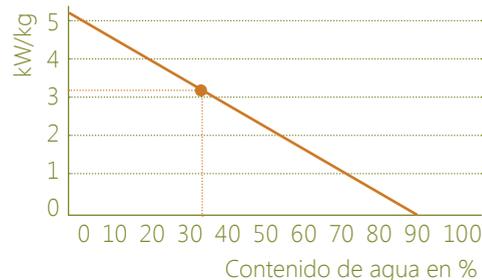
Aumento de la temperatura de la cámara.
Mayor eficiencia en la combustión.

Descripción

La Figura muestra cómo la capacidad calorífica de la biomasa aumenta en la medida en que se disminuye la humedad. Hay dos alternativas principales para reducir la humedad de la biomasa: de manera continua en el proceso (durante su transporte hasta la alimentación de la caldera), o permitiendo un mayor tiempo para el secado de la biomasa antes de su uso como combustible.

Para la primera alternativa, algunas plantas de beneficio han implementado chaquetas de secado en el rompeterotas como la que se muestra en la foto de la derecha, bien sea con el vapor excedente o con los gases de salida de la chimenea, llegando a obtener humedades de hasta 17 %.

Para la segunda alternativa, se recomienda que a corto plazo las plantas de beneficio modifiquen sus operaciones para que la biomasa resultante del proceso sea almacenada durante un tiempo que permita su secado natural (1-2 días), antes de ser alimentada a la caldera.



Fuente: ATMOS

Recomendaciones para la implementación

La implementación del secado artificial puede implicar unos costos notables en inversión y gasto de vapor, que la pueden hacer inviable financieramente.

La BPO B1 muestra otras formas de incrementar la temperatura de la cámara de combustión, para mantener la temperatura en el hogar de la caldera por encima de 850 °C; con ello, no sería necesario secar previamente la biomasa, siempre y cuando su humedad no sea superior a 40 %.

Si el proceso de secado no conduce a una mayor temperatura en el hogar de la caldera, no se reducirán las emisiones contaminantes. Por ello, es muy importante verificar la eficacia de esta BPO en conjunto con la BPO B1.

Metodología de verificación

Medición directa de la humedad del combustible; verificación del aumento de la temperatura de la cámara de combustión en la caldera.



A4. Alimentación continua del combustible

Importancia

Asegurar siempre la misma cantidad de biomasa en la parrilla permite mantener una temperatura de combustión alta y constante, mantener constante la relación aire / combustible y evitar zonas frías de combustión incompleta.

Impacto esperado

Mantenimiento de temperatura alta y constante de combustión.
Reducción de los inquemados y de zonas frías en la parrilla.

Descripción

La operación tradicional de las plantas de beneficio en Colombia hace que la biomasa salga directamente del proceso hacia la caldera. Con ello se obtiene mayor cantidad de combustible sobre los transportadores cuando hay una mayor producción, pero no necesariamente cuando más se necesita.

Se deben evitar al máximo las variaciones de caudal de biomasa sobre los transportadores, puesto que ello impide garantizar la alimentación constante de combustible al hogar. Para lograrlo, es necesario independizar el flujo de alimentación de combustible a la caldera, del flujo de generación de biomasa en el proceso productivo.

Recomendaciones para su implementación

Se recomienda la alimentación por tornillo a la cámara de combustión, sobre la de compuertas temporizadas que permiten la caída de biomasa por gravedad. De ésta manera se evitan fluctuaciones en la alimentación de combustible.

Aunque es necesario para el encendido de la caldera, durante el resto de la operación se recomienda suspender la alimentación manual de combustible a las calderas en las plantas de beneficio que aún conserven este sistema.

Una de las plantas piloto desarrolló el sistema intermedio de almacenamiento de biomasa mostrado en la foto, con resultados muy positivos. A la izquierda se muestra una pila de almacenamiento intermedio de combustible, al centro se ilustra una tolva de alimentación y a la derecha el tornillo de alimentación a la caldera.



Foto: CAIA Ingeniería

Metodología de verificación

Visual.



A5. Mejor distribución de biomasa en el hogar

Importancia

Una distribución adecuada del combustible en el hogar permite garantizar que toda la biomasa entre en contacto con el oxígeno para su combustión, y evitar acumulaciones de biomasa que generen zonas frías en la parrilla.

Impacto esperado

Reducción de los inquemados y de zonas frías en la parrilla.

Descripción

Es común observar acumulación de combustible en ciertos sitios de la parrilla, sobre todo en la entrada. Se debe evitar que se acumule biomasa en cualquier parte del lecho mediante la calibración de los sistemas mecánicos de alimentación de combustible.

Evitar que se formen montículos de biomasa en el lecho impide que se formen zonas con escasez de aire y, por tanto, de combustión incompleta. Idealmente, se debería garantizar que se mantuviera un mismo espesor de biomasa en el lecho (no muy grueso) con el fin de optimizar la combustión. En éste sentido el uso de pellets, como los que se muestran en la foto, contribuye a mejorar significativamente la combustión.

Foto: Julián Cifuentes



El procedimiento debería ser automático para evitar que el operario deba abrir las compuertas para limpiar la parrilla, práctica que impacta de manera significativa el nivel de emisiones.

Recomendaciones para la implementación

Muchas de las calderas del sector tienen elementos de dispersión de la biomasa, mediante el uso de ventiladores a la entrada del combustible.

Se han obtenido muy buenos resultados con esta práctica, aunque se debe llevar a cabo un proceso dispendioso de puesta a punto para lograr la suficiente cantidad de aire que permita una adecuada dispersión de la biomasa, pero evitando al mismo tiempo que las partículas finas sin quemar lleguen directamente a los piro tubos.

En las siguientes fotos se muestra una acumulación excesiva de combustible a la izquierda, en comparación con una mejor distribución de la biomasa en el hogar. En la foto de la izquierda se pueden ver zonas frías de combustión incompleta que generan MP en exceso.

Fotos: CAIA Ingeniería



Metodología de verificación

Visual.



A6. Romper sobredimensiones de combustible

Importancia

Los volúmenes de biomasa de grandes dimensiones que ingresan a la caldera, por lo general tienen partes que no se calientan homogéneamente con el resto de la biomasa y que no entran en contacto con el oxígeno para que haya una adecuada combustión. Por ello, es importante garantizar un tamaño más homogéneo de la biomasa y evitar acumulaciones que produzcan zonas frías en la parrilla.

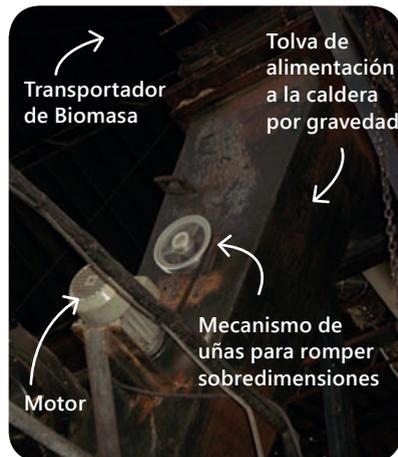
Impacto esperado

Reducción de los inquemados y de zonas frías en la parrilla.

Descripción

Para implementar adecuadamente las BPO A2 y A5, es necesario eliminar los volúmenes grandes de biomasa que vienen del proceso, pues estos caen y se acumulan en un solo punto de la parrilla, en donde se generan zonas frías de combustión incompleta.

Para ello hay desarrollos comerciales y mecanismos diseñados por las plantas de beneficio, que trituran la biomasa de grandes dimensiones mientras es transportada. La foto de la parte superior muestra un sistema comercial de calderas nuevas que tritura la biomasa sobredimensionada mientras es transportada. La foto de la parte inferior muestra la parte exterior de un desarrollo motorizado de una planta local en el que unas "uñas" separan la biomasa a medida que cae a la caldera desde los transportadores. Esta última ha reportado una reducción de 20 % en consumo de combustible mediante dicha implementación.



Fuente: Arriba: Hurst Boiler & Welding Company Inc.
Abajo: CAIA Ingeniería

Recomendaciones para su implementación

No existe aún una amplia experiencia con este tipo de desarrollos. Las implementaciones llevadas a cabo se han basado en el ensayo y error.

Metodología de verificación

Visual.



B. Control de la combustión



B1. Maximizar la temperatura del hogar

Importancia

La temperatura de combustión es la variable más importante por controlar para lograr una combustión completa debido a su influencia exponencial en las tasas de reacción.

Impacto esperado

Aumento de la temperatura del hogar.

Descripción

La implementación de esta BPO requiere tres acciones complementarias:

1. Determinar una adecuada temperatura de combustión.
2. Monitorear y controlar dicha temperatura.
3. Mejorar las condiciones de operación de la caldera para mantener esa temperatura.

En primer lugar, se debe determinar, para cada caldera en particular, la temperatura a partir de la cual se logra una combustión estable. Algunos fabricantes aseguran temperaturas tan altas como 1.000 °C dentro de la cámara; sin embargo, las mediciones efectuadas hasta ahora en las plantas de beneficio del sector muestran temperaturas de operación mucho más bajas, inclusive de 650 °C.

La temperatura de combustión debe ser una de las principales variables de monitoreo y control de una caldera. Una vez establecida la temperatura adecuada de combustión, jamás se debería trabajar la caldera por debajo de dicha temperatura. Para ello, se pueden instalar sensores de temperatura en el hogar de la caldera.

Para mantener una adecuada temperatura de combustión, se requiere también minimizar las pérdidas de calor en el sistema. Es necesario revisar permanentemente todos los aislamientos y corregir los defectuosos. En la mayoría de las calderas del sector palmero se ha encontrado una muy pobre conservación de los aislamientos, lo que afecta notablemente la temperatura de combustión y puede incrementar las emisiones de MP. En las fotografías de abajo se muestran aislamientos defectuosos a la izquierda y aislamientos corregidos en la misma caldera a la derecha.



Fotos: CAIA Ingeniería



B. Control de la combustión



B1. Maximizar la temperatura del hogar

Otra importante pérdida de calor se presenta cada vez que el calderista abre la compuerta de la caldera. Esta práctica debe evitarse al máximo, pues también afecta notablemente la temperatura de la combustión y tiene un efecto significativo en la generación de emisiones de MP.

Es posible también precalentar el aire primario de combustión, para lo cual se puede usar el calor residual de los gases de la combustión antes de los ciclones o el vapor generado por la caldera.

Recomendaciones para la implementación

El sensor de temperatura debe situarse en un lugar en donde se tenga una lectura promedio del hogar evitando puntos fríos o calientes. Es posible también ubicar este sensor de temperatura en los gases de salida, antes de los sistemas de control de emisiones.

La implementación adecuada de esta BPO implica cambiar la manera como se monitorea, controla y operan las calderas en el sector. Por ello se necesita una adecuada sensibilización, capacitación y seguimiento a los técnicos y operarios encargados del sistema de generación de vapor, para que incorporen efectivamente la temperatura como variable principal de control en el proceso.

Metodología de verificación

Monitoreo permanente de la lectura del sensor de temperatura.

Protocolo de verificación y mantenimiento de los aislamientos de la caldera.



B. Control de la combustión



B2. Garantizar suficiente exceso de oxígeno de combustión

Importancia

Para lograr una combustión completa es necesario garantizar una cantidad suficiente de oxígeno disponible en toda la zona de combustión primaria en la zona baja del hogar de la caldera.

Impacto esperado

Combustión completa de todo el combustible.
Adecuada relación aire/combustible.

Descripción

Todos los combustibles, pero sobretodo los sólidos, necesitan tener un nivel de aire en exceso actuando sobre el combustible para asegurar una combustión completa. Por ello, se debe asegurar que los sistemas de inyección de aire primario garanticen un flujo uniforme de entrada para la combustión homogénea en todas las zonas de la cámara, para permitir que exista exceso de oxígeno suficiente sobre toda la parrilla y evitar combustión incompleta en zonas determinadas.

Un segundo paso posterior debe ser determinar de manera práctica el exceso ideal de aire que se debe aplicar para las condiciones de proceso particulares de cada caldera (carga de la caldera, humedad del combustible, etc.) Si bien no existen datos acerca del nivel ideal de excedencia de oxígeno para la biomasa de palma, algunas plantas de beneficio han encontrado teóricamente valores entre 9 y 11 % como adecuados para su proceso.

El nivel de oxígeno ideal es el mínimo posible en el que hay una buena combustión. Debido a que si existe una combustión completa no se genera MP, y que el CO es un indicador directo de la calidad de la combustión, estas dos variables están estrechamente relacionadas. Por ello, una forma de determinar la calidad de la combustión es mediante el uso de un analizador de gases. De manera que es posible variar la cantidad de oxígeno mientras se evalúa la calidad de la combustión, asegurando que el CO no aumente tanto que impida el cumplimiento normativo. Se debe evitar un nivel de CO superior a 1.000 ppm.

En la foto de la izquierda se observa un dämpen ajustable, que le permitió a la planta realizar la determinación práctica de la cantidad de aire primario que requería su proceso. En la foto de la derecha se muestra el montaje definitivo una vez que se encontró la cantidad adecuada de aire primario.



Fotos: Julián Cifuentes



B. Control de la combustión



B2. Garantizar suficiente exceso de oxígeno de combustión

Recomendaciones para su implementación

Una buena alternativa para medir y evaluar autónomamente el nivel de oxígeno en la chimenea es adquirir un equipo de análisis de la combustión. De esta manera, no es necesario hacer una prueba isocinética o contratar un análisis de gases.

Metodología de verificación

Mediante análisis de gases.



B. Control de la combustión



B3. Uso de aire secundario de cortina

Importancia

Además de servir como cortina para prevenir la salida de cenizas, este aire completa la combustión en la parte superior de la cámara.

Impacto esperado

Mantener la combustión en la parte inferior del hogar, aumentar la permanencia del combustible, mejorar la turbulencia y evitar la salida de inquemados.

Descripción

Siempre que sea posible se debe implementar este aire secundario de combustión en la parte superior de la cámara, encima de la parrilla. Dicho acondicionamiento debe contar con reguladores de velocidad en las entradas de aire (*dampers*) que permitan calibrar y fijar la cantidad requerida de aire.

Además de servir como cortina, el aire secundario completa la combustión en la parte superior de la cámara. La foto muestra una combustión ideal en donde en la parte inferior se inicia el proceso de combustión y en la parte superior, con el aire secundario de combustión, se terminan de quemar los gases volátiles que han salido del combustible. Se observa claramente la estratificación de aire que se necesita.

En Colombia no se ha encontrado ningún sistema similar en las plantas visitadas hasta ahora. En muchos casos las calderas cuentan con un aire secundario, debajo de la entrada de combustible, con lo cual no se logra el efecto de cortina.



Fuente: Hurst Boiler and Welding Company, Inc.

Recomendaciones para su implementación

Algunas calderas del sector tienen un "aire secundario" incorporado, con el objetivo de mezclar de una mejor manera el combustible y ayudarlo a dispersarse en la cámara, como el mostrado en la BPO A5. Este aire no es técnicamente un aire de cortina y no se puede considerar de tal manera

Metodología de verificación

Bien sea mediante un visor en la cámara o revisando las cenizas recolectadas en el sistema de control, se debe verificar que no existan partículas grandes de cenizas inquemadas.



B. Control de la combustión



B4. Mantener la relación aire/combustible

Importancia

Se requiere una adecuada mezcla de oxígeno y combustible para obtener una combustión eficiente. Teniendo en cuenta que el flujo de entrada de combustible a las calderas de las plantas de beneficio no es constante, es importante variar también la entrada de aire para que la relación aire / combustible se mantenga. Una carencia momentánea de aire puede disminuir la eficiencia de la combustión, mientras que un exceso momentáneo de aire puede reducir la temperatura de la combustión.

Impacto esperado

Prevenir un exceso de emisiones en los momentos en que haya cambios de régimen o demandas momentáneas de vapor.

Descripción

Una práctica generalizada de los calderistas y de la configuración de calderas automatizadas en el sector palmero es aumentar el ingreso de combustible cuando cae la presión de vapor de la caldera. Ello modifica temporalmente la relación aire / combustible en la cámara de combustión, provoca un ahogamiento momentáneo de la llama y genera zonas frías.

Es necesario entonces implementar mecanismos que permitan mantener la relación aire / combustible. Para ello se requiere instalar variadores de velocidad sobre los tornillos de alimentación de biomasa y sobre los ventiladores de aire primario y secundario de combustión, que puedan actuar simultáneamente.

Además es necesario instalar sensores de oxígeno en los gases de salida que permitan controlar los ventiladores.

Recomendaciones para la implementación

Se recomienda utilizar sistemas de alimentación de biomasa con tornillo, en vez de la apertura temporizada de compuertas, por ser esta última menos precisa.

Las plantas que continúen delegando en el calderista la decisión de aumentar la entrada de combustible, deben capacitarle sobre la importancia de incrementar la entrada de aire primario de combustión en forma simultánea.

Metodología de verificación

Mediante sensores de oxígeno en los gases de escape



6.3.1 Operarios

C1. Instrumentación para el monitoreo y control de la combustión

Importancia

La adecuada operación de una caldera depende de muchos factores interrelacionados y no solo de la disponibilidad momentánea de vapor a cierta presión. No es común en el gremio palmero nacional que las plantas y los calderistas tengan una información suficiente para tomar decisiones de operación y mantenimiento de los sistemas de generación de vapor.

Impacto esperado

Se espera generar un cuadro de control que permita tanto a los operarios como a los directores tomar decisiones informadas respecto al estado de todos los componentes del sistema de generación de vapor y sistemas asociados como los de control, de manera que se garantice una operación adecuada de todos los sistemas y, por tanto, menor generación de ineficiencias e inquemados.

Descripción

Además de la presión de vapor, el operario debe contar como mínimo con los valores de temperatura de la caldera y oxígeno en la chimenea para determinar cuándo las condiciones de operación no son las adecuadas. Una disminución de la primera implica una mala combustión, mientras que un aumento muestra una menor eficiencia en la entrega de calor al vapor, probablemente por ensuciamiento.

Las mediciones de oxígeno, por otro lado, permiten verificar las condiciones de aire/combustible ya descritas y diagnosticar las entradas de aire parásito antes de los muestreos isocinéticos, de manera que se puedan hacer las correcciones respectivas.

Adicionalmente a las anteriores, y como se ha mencionado en las BPO respectivas del proceso, es recomendable contar con la información que se describe en la figura.

Fuente: CAIA Ingeniería 2014b



Recomendaciones para la implementación

El departamento de ingeniería de cada planta debe generar las recomendaciones específicas respecto al uso y planes de acción con cada uno de los elementos de información que se recomiendan.

Metodología de verificación

Visual.



C. Operación del sistema de vapor



C2. Capacitación adecuada a los operarios

Importancia

Los operarios son los responsables de asegurar que las calderas trabajen adecuadamente. Su adecuada capacitación es fundamental para garantizar una combustión más eficiente y reducir la generación de emisiones contaminantes.

Impacto esperado

Implementación adecuada de las buenas prácticas operacionales.
Adecuado monitoreo de las consignas de control.
Mejor desempeño y operación de la caldera, lo cual genera menores niveles de emisiones.

Descripción

La capacitación de los operarios es un aspecto fundamental para una adecuada operación, monitoreo y control del sistema de generación de vapor. Además, ellos son quienes implementarán las Buenas Prácticas Operacionales descritas en este portafolio.

Su capacitación debe ser periódica y debe incluir las variables y consignas que deben controlarse para una combustión más eficiente y una menor generación de emisiones contaminantes. Muchas de las plantas de beneficio que han logrado una mayor homogeneidad en el proceso de combustión la atribuyen a una mayor continuidad en sus operarios. Sin embargo, no se les han brindado herramientas adecuadas para hacer su labor.

Su principal consigna ha sido mantener la presión de trabajo de la caldera, variable que tiene que ver exclusivamente con los requerimientos de vapor de los elementos consumidores, mas no con la eficiencia de la combustión o su potencial impacto ambiental.



Foto: CAIA Ingeniería

Recomendaciones para su implementación

Se debe establecer un tablero de control para los operarios, como se describió en la BPO C1 anterior, que incluya la mayor cantidad posible de información que le ayude en la toma de decisiones.

Metodología de verificación

N.A.



C3. Minimizar la apertura de compuertas

Importancia

La apertura de las compuertas de la caldera genera un ingreso extraordinario de aire frío cambiando la relación aire/combustible y enfriando el hogar, lo cual tiene un impacto inmediato sobre la calidad de la combustión y la generación de emisiones contaminantes.

Impacto esperado

Evitar las grandes emisiones momentáneas de MP cuando se abre la compuerta.

Descripción

Uno de los procedimientos que más impactan las emisiones de material particulado es la apertura de las puertas del hogar para operaciones de movimiento de la biomasa y limpieza de la parrilla, pues se varía notablemente la relación aire / combustible y se facilita la salida de inquemados. Se ha encontrado que aún en plantas que tiene alimentación continua de combustible se incurre en esta práctica.



Se debe evitar al máximo esta actividad, mediante el control de todas las variables del proceso mencionadas. Para ello, es fundamental capacitar a los operarios en este sentido.

Foto: Francisco Toro

Recomendaciones para su implementación

Algunas plantas han encontrado que es posible hacer la limpieza de la parrilla una sola vez por turno de operación, reduciendo drásticamente las aperturas de las compuertas.

Metodología de Verificación

Por procedimiento.



6.3.2 Operaciones

C4. Planeación de la generación de vapor

Importancia

Los picos de consumo de vapor afectan por lo general la relación aire/combustible en la caldera y disminuyen la eficiencia de la combustión, generando también exceso de emisiones de MP. Por ello la importancia de minimizarlos.

Impacto esperado

Mantener las calderas en operación estable y en su mejor punto de operación para sostener los requerimientos permanentes de vapor.

Descripción

Es indispensable que el operario de la caldera conozca previamente y de manera permanente la planeación de la producción y, por ende, de los requerimientos de vapor del proceso, para que pueda tomar decisiones oportunas y anticiparse a los mayores requerimientos de vapor o a caídas de presión en el sistema.

Por lo general, ellos no cuentan con esta información y actúan en forma reactiva ante señales de caída de presión. Para ese momento, el sistema se encuentra en un sitio inestable de operación. Casi siempre cuando baja la presión ya es inevitable el detrimento de la combustión, y la primera reacción del operario es abrir la entrada de biomasa lo cual empeora momentáneamente, pero de manera drástica, la calidad de las emisiones.

Una excelente práctica es mantener una comunicación permanente entre los encargados de la producción y el operario de las calderas, para que le avise con anterioridad sobre el llenado de alguna de las autoclaves o sobre algún consumo importante de vapor. De esta manera, el operario tendrá tiempo suficiente para preparar la caldera para dicha situación, sin tener que esperar a que caiga la presión de la línea de vapor.

Recomendaciones para su implementación

En las plantas que cuentan con más de una caldera, se recomienda que una vez se haya calculado para cada una su capacidad, su temperatura mínima de operación y sus condiciones de consumo de vapor, se mantenga una de las calderas de base y las otras calderas se operen de modo variable en los momentos pico de consumo, de manera que todas trabajen en operación estable.

Metodología de verificación

Por procedimiento.



C5. Rediseño de las operaciones

Importancia

Una dificultad importante que se presenta en el proceso extractivo es que la naturaleza del consumo y las necesidades de vapor no son continuas, y no están sincronizadas con su generación. Los cambios en la carga de vapor representan un nivel muy alto de emisiones así sean momentáneas.

Impacto esperado

Menores pérdidas de presión en la caldera por excesivos consumos momentáneos de vapor.

Evitar la generación excesiva y momentánea de emisiones en estas situaciones.

Descripción

Se debe buscar una planeación más estable del proceso, que permita homogeneizar al máximo el consumo de vapor.

Teniendo en cuenta que el momento de mayor consumo de vapor es durante el llenado de los esterilizadores, se debe programar la producción de manera que jamás coincidan dos llenados simultáneamente, o con otros procesos intensivos de consumo de vapor.

Recomendaciones para su implementación

Algunas plantas han incorporado con éxito un esquema de trabajo continuo, con jornadas de 24 horas. Además del beneficio por mayor utilización de la capacidad instalada de la planta, esta es una práctica recomendable desde el punto de vista de emisiones ya que se minimizan las operaciones de encendido de la caldera, que por su inestabilidad producen mayor contaminación y ensuciamiento de los pirotubos.

Estas plantas operan siempre a un volumen constante de producción y, por tanto, disminuyen las fluctuaciones de biomasa a la entrada de las calderas. De esta manera se logra un volumen constante de combustible sobre los tornillos transportadores y en las tolvas de alimentación de la caldera. Con este fin, siempre es preferible ocupar una mayor capacidad de la planta en pocos días a la semana (ocupación de 80 % o más de la planta), que producir poco durante más días a la semana.

Metodología de verificación

N.A.



D1. Limpieza y deshollinado periódico

Importancia

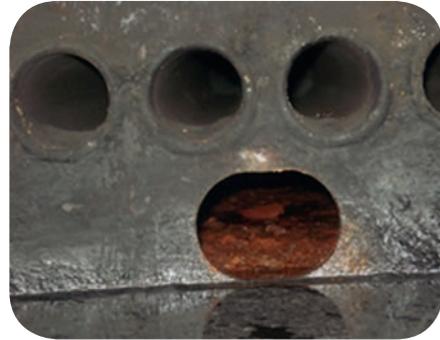
La limpieza y mantenimiento frecuente de los pirotubos hace que haya una mejor transferencia de calor al agua y disminuya la necesidad de combustible.

Impacto esperado

Mayor eficiencia en la operación de la caldera.
Menor generación de emisiones contaminantes.

Descripción

En lo posible, se debe hacer y cumplir una planeación semanal de labores de deshollinado y limpieza de las calderas, para aprovechar los paros de la producción. Varias plantas han incorporado esta práctica y han reportado mejoras sustanciales en su nivel de emisiones.



Fotos: CAIA Ingeniería

Recomendaciones para su implementación

Para ser efectiva, cualquier mejora en la eficiencia debe implicar disminución en el uso de biomasa.

Metodología de verificación

N.A.



D2. Mantenimiento por desempeño

Importancia

Es imposible lograr una combustión más eficiente y menor generación de emisiones de MP al utilizar equipos que no tienen un adecuado mantenimiento.

Impacto esperado

Operación más eficiente de la caldera.
Menores niveles de generación de emisiones.

Descripción

Durante el ejercicio piloto de implementación de las BPO se encontró un muy pobre estado de mantenimiento de la mayoría de las calderas. En ocasiones, incluso, fue imposible efectuar las pruebas isocinéticas planeadas puesto que las calderas no funcionaban de manera continua.

Es vital que el departamento de ingeniería genere un programa de mantenimiento preventivo de las calderas, ductos, redes de vapor, aislamientos y trampas y un protocolo para su implementación y seguimiento periódico.

Para establecer la periodicidad con que se requiere adelantar labores de mantenimiento a los equipos, se recomienda tomar como referencia la información de la instrumentación instalada. De esta manera, el mantenimiento se hará por desempeño y tendrá carácter preventivo.

Recomendaciones para su implementación

Un ejemplo de programación de mantenimiento por desempeño es la utilización de los sensores de oxígeno, los cuales permiten detectar entradas excesivas de aire, o de los sensores de temperatura, que permiten saber en qué momento ha bajado demasiado la eficiencia en la transferencia de calor de los pirotubos.

Metodología de verificación

Mediciones de la eficiencia de la caldera y de la temperatura de los gases de salida.



D3. Optimización de las redes y consumos de vapor

Importancia

Al utilizar mejor el calor generado, es posible reducir el uso de combustible y la generación de emisiones contaminantes.

Impacto esperado

Aprovechar de mejor manera el vapor generado, minimizando sus pérdidas.

Descripción

Existen muchas plantas que ya empiezan a presentar escasez de vapor. Particularmente para estas, y en general para todas las plantas de beneficio, es fundamental revisar a corto plazo los diseños de sus redes de vapor y sus consumos. Muchas de estas redes no tienen trampas de vapor o están mal diseñadas, seleccionadas o instaladas. En la gran mayoría de los casos esto es producto de un crecimiento desordenado de la planta.

Una vez mejoradas las redes y trampas de vapor, es indispensable empezar a usar los condensados que no contengan material orgánico para precalentar el agua de caldera. Esta medida de eficiencia energética implica una importante disminución en los requerimientos de combustible, así como una menor generación de emisiones contaminantes.

La foto de la parte superior muestra un tanque de recolección de condensados para disminuir el consumo de combustible y, por tanto, la generación de MP. La foto de la parte inferior muestra la instalación de trampas de vapor sobre las líneas, cuyo condensado es ideal para alimentar la caldera.



Fotos: CAIA Ingeniería

Recomendaciones para su implementación

Muchas plantas precalientan el agua de caldera usando vapor vivo o a través de serpentines. Esta práctica no disminuye los requerimientos de combustible, por lo cual no representa una BPO aplicable a lo relacionado con las emisiones contaminantes.

Se recomienda seguir lo expuesto en la BPO D5 si se contratan terceros para la optimización de las redes y consumos de vapor.

Metodología de verificación

N.A.



D4. Correcta automatización

Importancia

Una correcta automatización asegura una adecuada dosificación de combustible y una relación aire/combustible constante, favoreciendo una combustión completa.

Impacto esperado

Mejor control simultáneo de varias consignas que favorecen una combustión completa, aún en condiciones de alta exigencia de vapor.

Menor generación de emisiones de MP.

Descripción

Esta BPO busca asegurar una correcta automatización en los sistemas de generación de vapor de las plantas de beneficio. Para ello, es indispensable tener en cuenta dos consignas de control: alimentación de la cantidad adecuada de combustible y su correspondiente relación de aire.

La utilización de sensores de oxígeno a la salida de los gases de combustión permite controlar la proporción de aire / combustible del sistema, mediante variadores de velocidad en aire primario, aire secundario y en los transportadores de alimentación de combustible. Para ello es necesario haber solucionado mecánicamente el problema de alimentación constante de biomasa independientemente del volumen de producción (BPO A4).

Recomendaciones para su implementación

La automatización más común en las plantas de beneficio del sector palmero es el control de la apertura de las compuertas de alimentación, cuyos tiempos siempre permanecen constantes. En ese sentido, se han encontrado los siguientes inconvenientes:

1. Cuando la planta tiene menores necesidades de vapor, la automatización baja el caudal de aire primario, pero mantiene abierta la entrada de combustible (dado que los tiempos de apertura son constantes), ahogando la llama. Cuando la producción vuelve a requerir vapor, se proporciona nuevamente flujo de aire completo, generando grandes combustiones ineficientes momentáneas.
2. En otras ocasiones, nuevamente debido a que los tiempos de apertura de las compuertas son constantes pero el flujo de material por los tonillos alimentadores depende de la producción, el suministro de biomasa se altera respecto de las condiciones de diseño. No sirve de nada la automatización si no se independiza la alimentación a la caldera del volumen de producción.
3. Los operarios deben cambiar manualmente la apertura de la compuerta debido a que las condiciones de flujo de biomasa cambian, para lo cual deben hacer by-pass de las órdenes de la automatización, y esta deja de usarse. Esta operación que inicialmente es una excepción, termina siendo la regla.



D4. Correcta automatización

Cualquier solución de automatización debe controlar permanentemente la relación aire / combustible, asegurando flujo constante de biomasa en los transportadores, alterando a la vez los tiempos de apertura de las compuertas y la velocidad de los ventiladores de aire de combustión, preferiblemente mediante sensores de oxígeno en los gases de escape. Si la automatización implementada no permita controlar adecuadamente tanto la alimentación de biomasa como la de aire, no es efectiva y puede generar mayores emisiones contaminantes.

Se recomienda seguir lo expuesto en la BPO D5 si se contratan terceros para el desarrollo de automatización o para su revisión periódica.

Metodología de verificación

Debe hacerse un estudio isocinético de MP, o al menos un análisis de gases para verificar que se logran los objetivos de la automatización.



D5. Contratación por resultados

Importancia

Con frecuencia la implementación de estas BPO o de otras soluciones de ingeniería para mejorar la eficiencia del sistema de generación de vapor no ha sido efectiva debido a una mala contratación de proveedores. En estos casos se contrata la realización de obras o actividades, pero no su resultado esperado. Una modificación en los entregables esperados de la contratación y en los condicionantes del pago puede incrementar significativamente la eficacia de las soluciones de ingeniería propuestas.

Impacto esperado

Asegurar la efectividad de las soluciones de ingeniería implementadas.

Descripción

Se debe tener especial cuidado en el proceso de contratación de obras y mejoras de ingeniería y de procesos en el sistema de generación de vapor y, en general, en toda la planta de beneficio, así como en la recepción de los trabajos contratados.

Las plantas acostumbran contratar por cantidades de obra y no por resultados del trabajo contratado, lo que ha traído problemas con la calidad del producto final. Por ejemplo, durante el ejercicio piloto de implementación de BPO se evidenció **un muy** pobre resultado cuando se contrató el sellamiento de entradas de aire, debido a que los contratos estipularon la realización de actividades de sellamiento, mas no exigieron evidencia de que las entradas de aire habían sido efectivamente corregidas. En la tabla se muestra cómo en el ejercicio piloto de implementación de BPO, en cinco de las seis plantas el nivel de oxígeno en la chimenea incrementó entre la medición realizada al inicio del ejercicio y la realizada al final, a pesar de que todas invirtieron recursos para el sellamiento de las entradas de aire parásito.

Estas situaciones generan desmotivación en los equipos de ingeniería y se pierde credibilidad en las BPO y otras soluciones planteadas.

Por otra parte, es común que la recepción de los trabajos no se haga con rigurosidad y que los contratistas no dejen información vital para las plantas. En muchas ocasiones, los contratistas entregan su trabajo sin una adecuada constatación de la calidad del trabajo efectuado por parte de la planta. Y en otras, los contratistas se limitan a entregar su trabajo sin una adecuada capacitación a los operarios, aun si las mejoras realizadas requieren modificar sus protocolos o procedimientos.

	Planta 1	Planta 2	Planta 3	Planta 4	Planta 5	Planta 6
Medición inicial	13,0 %	11,1 %	10,2 %	11,4 %	10,1 %	16,4 %
Medición final	12,9 %	12,3 %	15,0 %	15,3 %	12,7 %	17,2 %
Incremento	-1,2 %	11,3 %	46,7 %	33,9 %	25,9 %	5,0 %

Recomendaciones para su implementación

La planta debe tener muy claro el objetivo de los trabajos por hacer y generar acuerdos de alcance con los contratistas que incluyan la evaluación de cumplimiento de dichos objetivos.

Metodología de verificación:

Protocolos de verificación de los trabajos realizados

Contratos escritos con cláusulas específicas de verificación de la calidad y efectividad de los trabajos.

6.5 Corrección por oxígeno

E1. Eliminar entradas de aire parásito

Importancia

El factor multiplicador de la corrección por oxígeno puede ser determinante para cumplir con lo establecido en la Resolución 909 de 2008. Para ello, debe evitarse cualquier entrada de aire parásito al sistema una vez los gases de combustión dejan la cámara de combustión y en todo su recorrido hasta la chimenea, sobre todo en los sistemas de tiro inducido.

Impacto esperado

Asegurar que el nivel de oxígeno en la chimenea no sea mayor que a la salida de la caldera (oxígeno de combustión).

Evitar incumplimiento de la Resolución 909 de 2008 por el factor multiplicador de la corrección de oxígeno.

Descripción

Si bien se debe asegurar una presencia de suficiente aire en exceso en el hogar para lograr una combustión completa del combustible (BPO B2), una vez que los gases salen de la cámara cualquier entrada adicional de aire al sistema incrementa la presencia de oxígeno en la chimenea y, por tanto, el factor multiplicador de la corrección por oxígeno.

Por ello es necesario monitorear permanentemente los niveles de oxígeno en la cámara de combustión y en la chimenea y, si existe una diferencia significativa entre los dos valores, eso será señal de la existencia de entradas de aire parásito.

Además se debe establecer un protocolo frecuente de detección y eliminación de aires parásitos, sobre todos los ductos de escape y los sistemas de control.

A continuación se muestran imágenes de los conductos del sistema de control de emisiones que presentaban afectaciones en su estructura, permitiendo la entrada de aire parásito, lo cual significa un factor multiplicador mayor en la medición corregida por oxígeno.



Fotos: CAIA Ingeniería

Recomendaciones para la implementación

La labor de detección de entradas de aire puede ser dispendiosa, pero se ha encontrado que el uso de humo mientras el ventilador de inducción está apagado, facilita enormemente la tarea de detección de fugas.

Se recomienda seguir lo expuesto en la BPO D5 si se contratan terceros para el sellamiento de entradas de aire.

Metodología de verificación

Visual con humo o mediante analizador de gases.



6.6 Sistemas de control de emisiones

F1. Evaluación permanente del desempeño

Importancia

Un sistema de control de emisiones requiere un perfecto estado de mantenimiento y de condiciones de operación para tener la eficiencia esperada.

Impacto esperado

Asegurar la eficiencia del sistema de control de emisiones.

Descripción:

Así como se requiere monitorear y controlar variables en el proceso de combustión para garantizar y mejorar su eficiencia, es importante medir y monitorear variables de control para garantizar la eficiencia del sistema de control de emisiones. Las variables de control dependen del sistema de control instalado; para el caso de los ciclones y multiciclones, la caída de presión tiene una injerencia directa sobre su eficiencia.

Sin embargo, ninguno de los sistemas de control de emisiones analizados en los diferentes estudios efectuados por la firma CAIA Ingeniería en el período 2012-2014 monitoreaba estas variables de control. De esta manera, no se conocía su eficiencia de remoción de MP ni se cumplía con lo establecido en la reglamentación vigente.¹²

Es necesario, por tanto, medir regularmente la caída de presión a través del equipo, y compararla con los datos teóricos de diseño o de la EPA que se mostraron en la sección 5.4.2, y corregir las condiciones que hayan podido modificarla, como entradas de aire y falta de sellos.

Recomendaciones para su implementación

Se recomienda hacer periódicamente mediciones simultáneas de MP antes y después del sistema de control para evaluar su eficiencia real. Esta misma medida proporcionará la caída de presión que deberá usarse en cada sistema.

- 12 El Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas adoptado mediante la Resolución 2152 de 2010 establece que: "La actividad objeto de control, deberá suministrar información de los sistemas de control de emisiones a la autoridad ambiental competente, donde describa la operación del mismo, las variables de operación que indiquen que el sistema funciona adecuadamente y que se encuentra en condiciones adecuadas después de realizar mantenimiento". Para los ciclones establece que la eficiencia de estos equipos de control de emisiones de material particulado está asociada a la caída de presión del flujo de gases, a través del sistema, por ello es requisito indispensable que los sistemas de medición de presión que se instalen sean calibrados periódicamente, a intervalos de tiempo inferiores a un (1) año. La caída de presión del sistema se debe registrar continuamente y almacenar de manera permanente en un medio magnético o físico. El dispositivo de presión que se instale debe tener una precisión del 5% de su rango de operación.



F1. Evaluación permanente del desempeño

Continuación recomendaciones para su implementación

En los ciclones es común el desgaste de las esclusas giratorias en la base de los equipos. Algunas plantas de beneficio han logrado diseños interesantes mediante el uso de materiales económicos en las zonas de desgaste y otros más resistentes en el resto del mecanismo, una vez que han controlado la salida de inquemados del hogar, lo que garantiza la durabilidad de los materiales más económicos.

Se recomienda seguir lo expuesto en la BPO D5 si se contratan terceros para el mantenimiento de los equipos de control de emisiones.

Metodología de verificación

Protocolos de mantenimiento y monitoreo de variables de control del sistema.

Mediciones periódicas de MP antes y después del sistema de control, para monitorear su eficiencia.

F2. Uso de ciclones de diseño y fabricación local

Importancia

Son una alternativa más económica frente a la adquisición de ciclones comerciales cuando se tiene una combustión controlada.

Impacto esperado

Asegurar el cumplimiento de la Resolución 909 de 2008 a bajo costo.

Descripción

Los ciclones diseñados y fabricados en las mismas plantas de beneficio para evitar que las labores de palmistería generen contaminación de polvo, han mostrado ser una solución muy económica que permite complementar otras medidas o equipos de control de emisiones. Su eficiencia de remoción de MP llegó a ser de 46 % en una de las plantas del ejercicio piloto de implementación de BPO, con una caída de presión bastante baja (lo que implica un menor consumo energético).



Fotos: CAIA Ingeniería

Recomendaciones para su implementación

Este tipo de sistemas de control de emisiones de bajo costo y baja eficiencia se debe usar como complemento de sistemas comerciales (en serie con otros ciclones), o en calderas cuya combustión se encuentre muy bien controlada (cuya generación de MP en la combustión no supere 600 mg/m^3).

Metodología de Verificación

Medición directa de la eficiencia del equipo.

Conclusiones

Para las plantas de beneficio de aceite de palma, cumplir con los estándares de emisión de material particulado de la Resolución 909 de 2008 ha significado un reto importante. En algunos casos se ha encontrado que la brecha por cerrar es significativa y se ha estimado que el costo de las tecnologías para el control de emisiones es elevado.

En este documento se presentan una serie de lineamientos y herramientas para que las plantas de beneficio aborden esta problemática desde otra óptica, con un enfoque de producción más limpia y prevención de la contaminación.

Bajo este enfoque, se introdujeron dos conceptos clave para la gestión integral de emisiones de material particulado:

1. **Controles Primarios de Emisiones:** Buscan reducir al máximo la generación de material particulado durante el proceso de combustión de biomasa, mejorando su eficiencia y control.
2. **Controles Secundarios de Emisiones:** Buscan controlar la cantidad de material particulado que se emite a la atmósfera por la chimenea, de manera que cumpla con los estándares admisibles de la reglamentación vigente.

Para el caso de las calderas consideradas como "existentes" en la Resolución 909 de 2008, cuyo estándar admisible de emisión de MP es 300 mg/m^3 , este documento muestra cómo se puede cumplir con dicho estándar empleando un equipo tradicional de control de emisiones (ciclón o multiciclón) y con adecuado diagnóstico, estableciendo objetivos y metas concretas e implementando un conjunto de buenas prácticas operacionales relacionadas con los Controles Primarios y los Controles Secundarios de Emisiones.

En la mayoría de los casos, el Plan de Acción que estas calderas deberán implementar podrá ser liderado por el personal técnico y operativo de la misma planta, con un apoyo puntual de consultores externos, y no requerirá inversiones significativas más allá de:

- La adquisición de equipos de medición y monitoreo de las variables de control de la combustión.
- Mantenimiento y reparación de componentes y aislamientos de la caldera, de los ductos de escape y la chimenea y del equipo de control de emisiones instalado (ciclón o multiciclón).
- Adecuación de infraestructura para la adecuada alimentación, dosificación y distribución de combustible a la caldera, para la inyección de aire secundario a la combustión.

Para el caso de las calderas consideradas como "nuevas" por la Resolución 909 de 2008, las cuales deben cumplir con un estándar de 50 mg/m³ de MP, se muestra que será necesario complementar los Controles Primarios y los Controles Secundarios de Emisiones con la instalación de equipos de control de emisiones de alta eficiencia (filtros de mangas o precipitadores electrostáticos). Solo en estos casos será necesario invertir en la adquisición de equipos de control de emisiones a un alto costo.

Bibliografía

- All-Biz Ltd and licensors (s.f.). Filtros de Manga - Limpieza por Pulsos de Aire Comprimido. Recuperado de http://ciudad-buenos-aires.all.biz/filtros-de-manga-limpieza-por-pulsos-de-aire-g95619#.VeiBb_I_M1D
- All-Biz Ltd and licensors (s.f.). Multiciclones® e ciclones. Recuperado de http://sao-paulo.all.biz/multiciclones-e-ciclones-g91480#.VeiCffl_M1A
- Jaroslav Cankař a syn - ATMOS. (s.f.). Los combustibles y la energía. Recuperado de <http://www.atmos.eu/spanish/paliva-energie>
- CAIA Ingeniería (2012a). *Caracterización del material particulado resultante del proceso de combustión en las calderas de las plantas de beneficio del sector. Informe final, producto 1 del contrato Fedepalma-CAIA 043/11*. Bogotá, Colombia.
- CAIA Ingeniería (2012b). *Análisis de dispersión de contaminantes emitidos por las calderas de las plantas de beneficio y su potencial efecto sobre la calidad del aire y sobre la salud de la población circundante. Informe final, producto 2 del contrato Fedepalma-CAIA 043/11*. Bogotá, Colombia.
- CAIA Ingeniería (2012c). *Evaluación técnica y económica para alcanzar los límites máximos de emisión de material particulado establecidos en la resolución 909 de 2008 para plantas de beneficio. Informe final, producto 3 del contrato Fedepalma-CAIA 043/11*. Bogotá, Colombia.
- CAIA Ingeniería (2012d). *Propuesta para la modificación de la Reglamentación vigente sobre emisiones aplicable a las plantas de beneficio de aceite de palma. Informe final, producto 4 del contrato Fedepalma-CAIA 043/11*. Bogotá, Colombia.
- CAIA Ingeniería (2012e). *Propuesta de proyecto normativo de modificación o complemento a la Resolución 909 de 2008 para las plantas de beneficio de aceite de palma. Presentación en PowerPoint de resultados del contrato Fedepalma-CAIA 043/11*. Bogotá, Colombia.
- CAIA Ingeniería (2013a). *Marco teórico y propuesta de BPO aplicables. Informe final, producto 1 del contrato Fedepalma-CAIA 092/12*. Bogotá, Colombia.
- CAIA Ingeniería (2013b). *Diagnóstico de las 6 plantas piloto. Informe final, producto 2 del contrato Fedepalma-CAIA 092/12*. Bogotá, Colombia.

- CAIA Ingeniería (2013c). *Planes de acción para la implementación de BPO en las 6 plantas piloto. Informe final, producto 3 del contrato Fedepalma-CAIA 092/12*. Bogotá, Colombia.
- CAIA Ingeniería (2014). *Informe Final - Proyecto de implementación de buenas prácticas operacionales para reducir emisiones de material particulado en plantas de beneficio. Informe final, producto 4 del contrato Fedepalma-CAIA 044/13*. Bogotá, Colombia.
- CAIA Ingeniería (2014). *Cartilla de lineamientos y recomendaciones para mejorar la eficiencia y reducir las emisiones de material particulado de los sistemas de generación de vapor de las plantas de beneficio del sector palmero. Informe final, producto 5 del contrato Fedepalma-CAIA 042/14*. Bogotá, Colombia.
- Contreras, C. (2010). *Impacto económico en el sector palmero a partir de entrada en vigencia de la resolución 09/08 para nuevas calderas. Documento de trabajo elaborado para Fedepalma y Cenipalma*. Bogotá, Colombia.
- United States Environmental Protection Agency. (2002). *Manual de Costos de Control de Contaminación del Aire* (Sexta edición). Recuperado de EPA website: www.epa.gov/ttn/catc1/dir2/cost_toc-s.pdf
- United States Environmental Protection Agency. (2003a). *Hoja de Datos - Tecnología de Control de Contaminantes del Aire. Ciclones (452/F-03-005)*. Recuperado de EPA website: www.epa.gov/ttn/catc1/dir2/cost_toc-s.pdf
- United States Environmental Protection Agency. (2003b). *Hoja de Datos - Tecnología de Control de Contaminantes del Aire. Precipitador Electrostático Seco (EPA-452/F-03-027)*. Recuperado de EPA website: www.epa.gov/ttn/catc1/dir2/fdesppis.pdf
- United States Environmental Protection Agency. (2003c). *Hoja de Datos - Tecnología de Control de Contaminantes del Aire. Filtro de Tela (EPA-452/F-03-061)*. Recuperado de EPA website: <http://www.epa.gov/ttn/catc1/dir2/ff-revas.pdf>
- United States Environmental Protection Agency. (s.f.). *Controles de Material Particulado (EPA 452/B-02-002)*. Recuperado de EPA website: <http://www.epa.gov/ttn/catc1/dir2/cs6ch1-s.pdf>
- Espinosa, J.C. (2014). *Buenas Prácticas Operacionales para reducir emisiones de material particulado en plantas de beneficio*. Presentación realizada en la XII Reunión Técnica Nacional de Palma de Aceite, organizada por Cenipalma. Bogotá, 30 de septiembre al 2 de octubre de 2014.
- Fedepalma (2013). *Propuesta del sector palmero para modificar la Resolución 909 de 2008 de emisiones atmosféricas*. Documento radicado ante el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible el 21 de marzo de 2013.
- Hernández, M., Valencia, A., Ibarra, E.K. y Espinosa, J.C. (2013). *Portafolio preliminar de buenas prácticas operacionales para el cumplimiento de la norma de emisiones*. Fedepalma, Bogotá.

- Hurst Boiler & Welding Co, Inc. (s.f.). Three Ways to Optimize Solid Fuel Combustion. Recuperado el 21 de marzo de 2013 de http://www.hurstboiler.com/biomass_boiler_systems/three-ways-to-optimize-solid-fuel-combustion
- Miliarium. Filtros de Tela. Recuperado el 20 de agosto de 2015 de <http://www.miliarium.com/prontuario/MedioAmbiente/Atmosfera/FiltrosTela.htm>
- Noguera, L., y Conocimiento tácito y explícito. (24 de febrero de 2015). Gestión conocimiento en Ferrominera Orinoco 2014. Recuperado de <https://tacitoyexplicito.wordpress.com/2015/02/24/gestion-conocimiento-en-ferrominera-orinoco-2014/>
- Organización Mundial de la Salud (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Resumen de evaluación de los riesgos*. Actualización mundial 2005. Ginebra. Recuperado el 3 de septiembre de 2015 de http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf
- Organización Mundial de la Salud (2014). Calidad del aire (exterior) y salud. Nota descriptiva N° 313, marzo. Recuperado el 21 de agosto de 2015 de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- UNDP & GEF. (17 de junio de 2005). Biomass Energy for Heating and Hot Water Supply in Belarus. Best Practice Guidelines. First Draft. Project No. BYE/03/G31. Recuperado de <http://energoeffekt.gov.by/bioenergy/htdocs/en/practa.pdf>
- WELLONS FEI CORP - WELLONS. INC (s.f.) Biomass boiler. Recuperado el 3 de septiembre de 2015 de <http://www.wellonsfei.ca/en/biomass-boiler.aspx>

Reglamentación

- Decreto 02 de 1982. Presidencia de la República.
- Decreto 948 de 1995. Ministerio del Medio Ambiente.
- Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas. Versión 1.0 (2010). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Resolución 591 de 2012. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Resolución 619 de 1997. Ministerio del Medio Ambiente.
- Resolución 760 de 2010. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Resolución 909 de 2008. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Resolución 1632 de 2012. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Foto: Julián Cifuentes





Anexos

Anexo 1. Paquetes de BPO diseñados para el ejercicio piloto

En la Tabla 20 se describen los 12 paquetes de BPO diseñados para el ejercicio piloto en las seis plantas de beneficio. Para cada planta se diseñaron dos paquetes de BPO, correspondientes a las fases 1 y 2 de implementación.

Tabla 20. Paquetes de BPO diseñados para implementación en las seis plantas piloto.

Paquete BPO	Categoría	Acciones propuestas	Motivación	
Planta 1	Fase 1	Combustible	Reducción de la humedad	Verificar posibilidad de secado natural de la biomasa
		Control de la combustión	Definición y uso de temperatura mínima de operación	Minimizar diferencias existentes en temperaturas de operación en cada caldera
		Oxígeno	Eliminación de entradas de aire	Aumento de 4 % de oxígeno entre caldera y chimenea
		Sistema de control	Eliminación de entradas de aire	
	Fase 2	Combustible	Mejora del combustible	Determinar Incidencia del uso de finos en producción de MP
	Operación - Operaciones	Establecimiento de calderas de operación y soporte	Disminuir las emisiones en períodos de transitorios de calentamiento	
Planta 2	Fase 1	Combustible	Mejora del combustible	Determinar Incidencia del uso de finos en producción de MP, reducir zonas frías
			Mejor distribución del combustible	Distribución mecánica existente pero no operativa, reducir zonas frías de combustión
		Control de la combustión	Definición y uso de temperatura mínima de operación	Evidencias de baja temperatura de operación
	Fase 2	Control de la combustión	Corregir aislamientos	Aislamientos defectuosos, pérdida generalizada de calor
		Oxígeno	Eliminación de entradas de aire parásito	Altos niveles de oxígeno en chimenea comparado con caldera
		Operación - Operarios	Minimización de operaciones en el hogar	La apertura constante de compuertas disminuye la temperatura
		Sistema de control	Eliminación de entradas de aire parásito	Altos niveles de oxígeno en chimenea comparado con caldera
Planta 3	Fase 1	Combustible	Alimentación continua	Variación en la masa de combustible alimentado y en la relación aire / combustible
		Oxígeno	Eliminación de entradas de aire parásito	Diferencias altas de oxígeno en un ramal de escape, comparado con el otro

Paquete BPO	Categoría	Acciones propuestas	Motivación	
Planta 3	Fase 1	Operación - Operarios	Minimización de operaciones en el hogar	Eliminar entradas adicionales de aire y disminución de temperatura
		Ingeniería	Rediseño de ductos de escape	Asegurar las condiciones de operación del sistema de control
	Fase 2	Control de la combustión	Definición y uso de temperatura mínima de operación	Existe sistema automatizado cuya medición de temperatura no funciona
		Operación - Operaciones	Comunicación entre proceso y calderas	Evitar consumos instantáneos excesivos mediante planeación de suministro de vapor
Planta 4	Fase 1	Combustible	Mejora del combustible	La planta ya separa los finos, mezclarlos al combustible mejora la combustión
		Ingeniería	Detener entrada de agua al hogar	Aumentar la temperatura del hogar
		Combustible	Distribución homogénea de combustible	Aumentar el área de reacción sobre la parrilla para disminuir zonas frías e inquemados
	Fase 2	Control Combustión	Aire secundario de cortina	Muy alta presencia de inquemados, que pueden ser retenidos con aire de cortina
		Oxígeno	Eliminación de entradas de aire parásito	Cierre de compuerta diseñada para disminuir inquemados, que aumenta oxígeno
		Sistema de control	Eliminación de entradas de aire parásito	Entradas adicionales sobre esclusa del ciclón, que menguan su eficiencia
Planta 5	Fase 1	Control de la combustión	Corregir aislamientos	Eliminar ingresos extendidos de aire frío y mejorar temperatura de la cámara
			Definición y uso de temperatura mínima de operación	Establecer temperatura mínima a operar
		Oxígeno	Eliminación de entradas de aire parásito	Excelente nivel de oxígeno de combustión que se afecta por entradas de aire parásito
		Sistema de control	Eliminación de entradas de aire	
Planta 5	Fase 2	Combustible	Mejora del combustible	Determinar incidencia del uso de finos en producción de MP
		Operación - Redes de vapor	Uso condensados para precalentar agua caldera	Existe trapeo sobre las redes, cuyo condensado se desaprovecha
Planta 6	Fase 1	Oxígeno	Eliminación de entradas de aire parásito	Excelente combustión, pero el exceso de oxígeno impide el cumplimiento normativo
			Determinar exceso ideal de aire	Disminuir aire de combustión para cumplir con la Norma sin dañar la combustión
		Sistema de control	Eliminación de entradas de aire	Excelente combustión, pero el exceso de oxígeno impide el cumplimiento normativo
	Fase 2	Combustible	Distribución homogénea de combustible	Mejorar combustión, evidencia de zonas frías
		Control de la combustión	Definición y uso de temperatura mínima de operación	Establecer temperatura mínima a operar
		Operación - Redes de vapor	Rediseño de trampas de vapor	Mejorar eficiencia ante escasez de vapor

Anexo 2. Características y eficiencia de los equipos de control de emisiones

En este Anexo se describe el principio de funcionamiento de los principales equipos de control de emisiones utilizados en las plantas de beneficio del sector palmero. Se muestra también su eficiencia de remoción de MP y se dan algunas recomendaciones para mantenerla o mejorarla, así como las ventajas y desventajas de cada tecnología.

Ciclones y multiciclones

Los ciclones¹³ y multiciclones¹⁴ son los equipos de control de emisiones más conocidos y utilizados en el sector palmero colombiano. Su principio de funcionamiento se basa en la aplicación de fuerzas centrífugas sobre un gas con contenido de material particulado. Su geometría y funcionamiento se muestra en la Figura 22.

13 En este tipo de sistemas de control, el gas ingresa por un conducto de entrada ubicado en la parte superior del ciclón a una velocidad V_i (velocidad de entrada al ciclón). Este conducto se halla ubicado en forma tangencial al barril o cuerpo del ciclón. El gas entra al barril y comienza el movimiento en espiral descendente. El cambio de dirección genera un campo centrífugo en el que las partículas que son transportadas por el gas debido a su inercia, se mueven alejándose del centro de rotación o "eje del ciclón" por acción de las líneas de fuerza del campo centrífugo, alcanzando las paredes internas del barril del ciclón. En ellas pierden movimiento y se deslizan por la pared del barril hacia el cono y desde allí hacia la base del ciclón, donde finalmente se depositan (EPA 2003a).

El gas en su movimiento descendente va despojándose de las partículas sólidas y al llegar a la base del cono, invierte el flujo, siguiendo una espiral ascendente ya prácticamente libre de partículas. El movimiento del gas en el interior del ciclón consiste en una trayectoria de doble hélice. Inicialmente realiza una espiral hacia abajo, acercándose gradualmente a la parte central del ciclón, y a continuación se eleva y lo abandona a través de una salida central situada en la parte superior. Esta doble espiral es la que se denomina flujo ciclónico (EPA 2003a).

14 En un multiciclón, los gases ingresan por la parte superior de los ciclones en sentido vertical descendente. Unas aletas instaladas al interior de este ducto generan un movimiento tangencial en los gases, mientras que la fuerza centrífuga hace que se separe el polvo de los gases y se depositen las partículas más pesadas en la tolva, que son evacuadas por medio de una válvula rotativa ubicada en la descarga de la tolva. Posteriormente, los gases son desviados en sentido vertical ascendente, terminando el ciclo de separación (EPA 2003a).

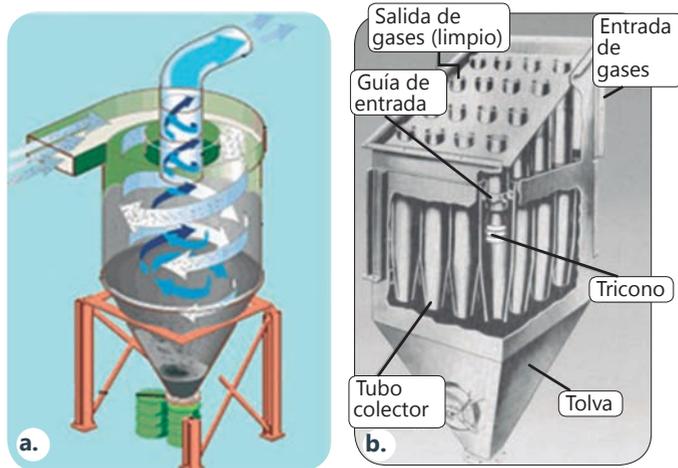


Figura 23. Geometría y principio de funcionamiento de los ciclones (a) y multiciclones (b).
Fuente: (a) MAVDT 2010; (b) All-biz Ltd.

Existen tres tipos de ciclones y multiciclones, cuya eficiencia teórica de remoción de MP se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. Tipos de ciclones y multiciclones y su eficiencia teórica de remoción de MP.

Separadores inerciales (Ciclones y multiciclones)		
Tipo	Eficiencia	Caída de presión / costo de operación
Convencional	70-90 %	BAJO/MEDIO
De alta eficiencia	80-99 %	ALTO
De alta capacidad	80-99 %	ALTO

Fuente: EPA 2003a.

Además de la capacidad de remoción, la principal diferencia entre los ciclones o multiciclones convencionales y los de alta eficiencia es su caída de presión, que es mayor en los de alta eficiencia. Ello incrementa su consumo de energía y, por tanto, su costo de operación. Como se planteó al inicio de esta sección, un mayor grado de implementación de Controles Primarios de Emisión disminuye la generación de MP durante la combustión y a su vez el esfuerzo requerido para su remoción.

Con ello, las calderas existentes podrían reducir el costo de instalación y operación de sus equipos de control de emisiones, instalando ciclones/multiciclones convencionales en vez de ciclones/multiciclones de alta eficiencia.

Por otra parte, una diferencia importante entre los ciclones y los multiciclones se relaciona con su capacidad de flujo de aire entrante. Mientras que los multiciclones pueden operar con flujos de aire de entrada de hasta 50 sm³/s (metros cúbicos por segundo en condiciones estándar), equivalentes a 106.000 scfm,¹⁵ los ciclones individuales están diseñados para operar con flujos de aire de entrada entre 0,5 y 12 sm³/s, es decir, entre 1.060 scfm y 25.400 scfm (EPA, 2003a). Por ello, una caldera con un flujo de aire de salida mayor que 12 sm³/s debe utilizar un multiciclón, o en su defecto dos o más ciclones individuales en paralelo, para el control de sus emisiones.¹⁶

Adicionalmente, es necesario tener en cuenta que la eficiencia de un ciclón o multiciclón varía en función de su diseño geométrico, del tamaño de partícula y de algunas características del gas entrante, como se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22. Factores que incrementan o disminuyen la eficiencia esperada de un ciclón o multiciclón.

Aspecto	Factores que incrementan la eficiencia	Factores que disminuyen la eficiencia
Tamaño de partícula del material particulado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mayor tamaño de partícula (material particulado grueso) ▪ Mayor densidad de partículas 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Menor tamaño de partículas (material particulado fino – PM₁₀ y PM_{2,5})
Diseño geométrico	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mayor longitud del cuerpo del ciclón (ciclones) ▪ Mayor número de revoluciones del gas en el ciclón (ciclones) ▪ Mayor proporción entre el diámetro del cuerpo del ciclón (ciclones) y el diámetro del conducto de salida del gas ▪ Mejor pulimento de la superficie de la pared interior del ciclón (ciclones) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mayor diámetro del cuerpo del ciclón (ciclones) ▪ Mayor diámetro del ducto de la salida del gas ▪ Mayor área del conducto de entrada del gas
Características del gas entrante	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mayor velocidad del aire en el conducto de entrada 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mayor densidad del gas ▪ Mayor viscosidad del gas

Fuente: Adaptada de EPA 2003a

15 Pies cúbicos por minuto en condiciones estándar (*standard cubic foot per minute*).

16 Este aspecto es de gran trascendencia, pues dos de las 16 calderas caracterizadas en el diagnóstico sectorial presentado en la sección 2.4 tenían flujos de aire de entrada al sistema de control de emisiones superiores a 12 m³/s. Para garantizar una buena eficiencia de remoción de MP, estas dos calderas deberían contar con dos ciclones trabajando en paralelo o un multiciclón.

Los factores expuestos en la Tabla 22 deben tenerse en cuenta para:

- Establecer si los ciclones/multiciclones actualmente instalados tienen un diseño adecuado para las condiciones del gas entrante y para la eficiencia de remoción requerida.
- Modificar el diseño de los ciclones/multiciclones actuales para que sea óptimo según esas condiciones y eficiencia.
- Adquirir nuevos ciclones/multiciclones con un diseño óptimo para esas condiciones y eficiencia.

Por último, los ciclones y multiciclones son equipos de control de emisiones de bajo costo relativo y fácil instalación para una planta de beneficio. Su consumo de energía también es relativamente bajo, con excepción de los de alta eficiencia que consumen mayor energía por su mayor caída de presión. Las principales ventajas y desventajas de esta alternativa tecnológica de control de emisiones se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23. Ventajas y desventajas de los ciclones y multiciclones.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bajos costos de capital ▪ Falta de partes móviles – menores requerimientos de mantenimiento y bajos costos de operación ▪ Caída de presión relativamente baja (2 a 6 pulgadas de columna de agua), comparada con la cantidad de MP removido ▪ Limitaciones de temperatura y presión dependientes únicamente de los materiales de construcción ▪ Colección y disposición de MP en seco ▪ Requisitos espaciales relativamente pequeños ▪ No se requiere pre-tratamiento para los gases antes de ingresar al ciclón 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eficiencias de colección relativamente bajas para material particulado fino (PM₁₀ y PM_{2,5}) ▪ No pueden manejar materiales pegajosos o aglomerantes ▪ Mayor consumo de energía en ciclones o multiciclones de alta eficiencia, por sus altas caídas de presión

Filtros de mangas¹⁷

En un filtro de mangas o filtro de tela, el gas residual se pasa por una tela de tejido apretado o filtro, causando que el material particulado en el gas sea re-

17 Adaptado de: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Hoja de datos – Tecnología de Control de contaminantes del aire. Filtros de Tela. EPA – CICA.

colectado en la tela por tamizado y por otros mecanismos. Los filtros pueden tener forma de hojas, cartuchos, o bolsas, siendo las bolsas el tipo más común de filtro utilizado.¹⁸ El gas fluye desde afuera hacia adentro de las bolsas y de ahí hacia la salida del gas. Las partículas se recolectan en el exterior de las bolsas y caen hacia una tolva debajo del filtro de tela,¹⁹ como se muestra en la Figura 23.

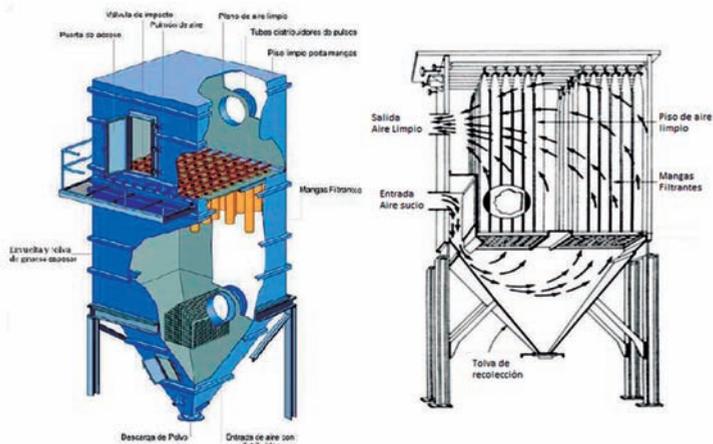


Figura 24. Principio de funcionamiento del filtro de mangas.

Fuente: (izq.) All-biz Ltd (a); (der.) Miliarium.

La eficiencia típica de diseño de un filtro de mangas nuevo oscila entre 99 y 99,9 % para material particulado. Los filtros de mangas existentes tienen un rango de eficiencias de operación de 95 a 99,9 %.

Varios factores determinan la eficiencia de recolección de los filtros de tela. Estos incluyen la velocidad de filtración del gas, las características de las partículas, las características de la tela y el mecanismo de limpieza. En general, la eficiencia de recolección aumenta al incrementar las velocidades de filtración y el tamaño de las partículas.

18 Las bolsas pueden tener de 6 a 9 metros de largo y 12,7 a 30,5 centímetros de diámetro. Se colocan grupos de bolsas en compartimientos aislables para permitir la limpieza de las bolsas o el remplazo de algunas de ellas sin tener que parar el funcionamiento de todo el filtro de tela. Las bolsas están cerradas por el fondo, abiertas en la parte superior y reforzadas por retenedores internos llamados jaulas.

19 La recolección en seco del material particulado en las tolvas facilita su manipulación y posterior disposición. Adicionalmente, cuenta con compuertas de inspección en las tolvas para facilitar el acceso a la cámara sucia en las operaciones de mantenimiento y tolvas individuales para cada módulo, con válvulas rotativas, con el fin de facilitar el manejo de cenizas y a su vez permitir un manejo independiente de cada módulo en el filtro.

Otros aspectos que pueden condicionar la operación y eficiencia del filtro de mangas son:

- **Flujo de aire:** Los filtros de mangas pueden manejar flujos de entrada de aire desde menos de 0,10 a más de 50 metros cúbicos estándar por segundo (sm^3/s).
- **Temperatura:** Si la temperatura del gas de entrada es muy alta, o si los gases efluentes presentan un alto grado de inquemados, se pueden quemar los filtros de tela. Por lo general, los filtros de material adecuado pueden manejar temperaturas de gases cercanos a 260 °C, con picos hasta de aproximadamente 290 °C. Para evitar el deterioro de los filtros, se pueden utilizar enfriadores por aspersión o dilución con aire para bajar la temperatura de la corriente de aire de entrada. Sin embargo, al bajar la temperatura aumenta la humedad de la corriente de aire. Por tanto, la temperatura mínima de la corriente de aire debe permanecer por encima del punto de rocío de cualquier condensable en la corriente.
- **Requisitos de pre-tratamiento de las emisiones:** Con base en el numeral anterior, es posible que el filtro de mangas requiera un sistema de enfriamiento de los gases de entrada que evite daños en las mangas. También se pueden utilizar ciclones para reducir la temperatura de los gases de entrada y la carga de material particulado sobre el filtro de tela, especialmente a altas concentraciones de entrada.

Las principales ventajas y desventajas de los filtros de mangas se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Ventajas y desventajas de los filtros de manga.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Alta eficiencia de remoción de material particulado grueso y fino. • Son relativamente insensibles a las fluctuaciones en las condiciones de la corriente de gas. • No tienen problemas de corrosión ni oxidación de sus componentes. • Operación relativamente simple. • Fácil instalación, mantenimiento y replazo de las mangas. • Recolección en seco del material particulado removido para su fácil procesamiento o disposición. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costos de capital medios a altos. • Deterioro de las mangas por altas temperaturas de los gases de entrada. Para esos casos, se pueden requerir sistemas previos de enfriamiento, o mangas metálicas o de mineral refractario especial; todo ello eleva los costos. • Altos requerimientos de mantenimiento o replazo de las mangas. Las altas temperaturas y la presencia de material particulado ácido o alcalino puede reducir la vida útil de las mangas. • Su eficiencia puede verse significativamente afectada por el contenido de humedad de los gases de combustión. En lugares con elevados niveles ambiente de humedad, deberá garantizarse un mantenimiento continuo que asegure la hermeticidad del equipo para evitar el ingreso de aire con alto contenido de humedad.

Precipitadores electrostáticos²⁰

Los precipitadores electrostáticos secos (PES) son dispositivos para el control de emisiones de material particulado, que utilizan fuerzas eléctricas para movilizar las partículas hacia las superficies de recolección. Una carga eléctrica es impartida a las partículas encauzadas cuando pasan a través de una corona, una región en donde fluyen los iones en fase gaseosa. Los electrodos situados en el centro del plano del flujo se mantienen a un alto voltaje y generan un campo eléctrico que fuerza a las partículas hacia las paredes recolectoras. Los recolectores son golpeados o "martillados" por varios métodos mecánicos para desprender las partículas, que se deslizan descendiendo hacia una tolva en donde son recolectados, como se muestra en la Figura 24.

Debido a que los PES actúan únicamente sobre el material particulado por eliminar y solo impiden el flujo de la corriente de gas de manera mínima, sus caídas de presión son muy pequeñas (típicamente menores que 0,5 pulgadas de agua). Por ello, sus requerimientos energéticos y sus costos de operación son relativamente bajos.

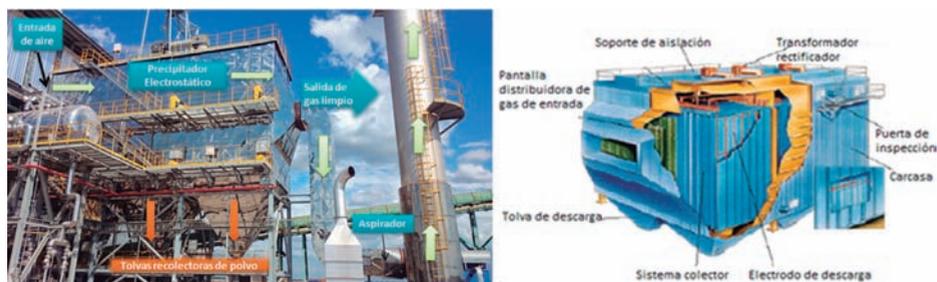


Figura 25. Principio de funcionamiento del precipitador electrostático.
Foto: (der.): Julián Cifuentes. PES de Palmar de Almatira en Orocué, Casanare.
Fuente (izq.): Noguera, 2015.

La eficiencia típica de diseño de un precipitador electrostático nuevo oscila entre 99 y 99,9 % para material particulado. Los equipos existentes más antiguos tienen un rango de eficiencia de operación de 90 a 99,9 %

Un factor condicionante de la eficiencia de remoción de MP es el tamaño del precipitador, el cual depende de varios parámetros de diseño. Uno de los más

20 Adaptado de EPA 2003b.

importantes es el área específica requerida de recolección, que se define como la relación entre la superficie de los electrodos colectores y el flujo del gas entrante. Mayores superficies de recolección conducen a mejores eficiencias de remoción. La relación antes mencionada se encuentra generalmente en el rango de 40 a 160 m² por m³/s de flujo del gas.

Las principales ventajas y desventajas de los precipitadores electrostáticos se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25. Ventajas y desventajas de los precipitadores electrostáticos.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Muy altas eficiencias de remoción de material particulado grueso y fino. • Bajos requisitos energéticos y costos de operación. • Pueden manejar altas temperaturas de gases de entrada, hasta de 700 °C. • Pueden operar bajo presiones altas (hasta 1.030 kPa) o en condiciones de vacío. • Pueden manejar altas velocidades de flujo de gases de manera efectiva. • Recolección en seco del material particulado removido para su fácil procesamiento o disposición. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevados costos de capital. • No son muy apropiados para procesos productivos muy variables, pues son muy sensibles a las fluctuaciones en las condiciones de la corriente de gas (velocidad de flujo, temperatura, composición de las partículas y del gas y la carga de partículas). • Grandes requerimientos de espacio debido a su tamaño. • Los electrodos de descarga fabricados de alambre (aproximadamente 2,5 mm de diámetro) requieren altos niveles de mantenimiento. • Puede presentarse corrosión cerca de la parte superior de los alambres por el efecto de fugas de gas y la condensación ácida. Además, los alambres largos sujetos con pesas tienden a oscilar (la parte media del alambre puede acercarse al tubo, causando más chispas y desgaste). • Puede existir un peligro de explosión al tratar gases combustibles y/o recolectar partículas combustibles. • Requieren personal de mantenimiento relativamente calificado, así como tener precauciones especiales para proteger al personal frente al alto voltaje. • No son recomendables para la eliminación de partículas pegajosas o húmedas.

Anexo 3. Estimación de costos para la adquisición, instalación y operación de equipos de control de emisiones en plantas de beneficio

El estudio efectuado en 2012 por la firma CAIA Ingeniería para Fedepalma contempló una estimación de los costos de adquisición, instalación y operación de las tres alternativas de tecnologías de control de emisiones que habían sido previamente identificadas como pertinentes para las plantas de beneficio de aceite de palma, de cara al cumplimiento de la Resolución 909 de 2008: sistemas inerciales (ciclones y multiciclones), filtros de mangas y precipitadores electrostáticos.

Metodología

El análisis se hizo con base en la metodología del Costo Anual Equivalente, descrita en la sexta edición del *Manual de Costos de Control de Contaminación del Aire* de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por su sigla en inglés) (EPA 2002).

Este método permite analizar alternativas de inversión en tecnología con vidas útiles similares, y utiliza los siguientes tres indicadores:

- Inversión Total de Capital (TCI): Incluye todos los costos de compra del equipo de control de emisiones, los costos de mano de obra y los materiales para la instalación de ese equipo, los costos para la preparación del sitio y edificios, y otros costos indirectos de instalación.
- Costo Total Anual (TAC): Incluye todos los costos de operación del sistema, suministros, servicios y otros gastos directos e indirectos, así como la recuperación de capital de inversión inicial. Estos costos tienen una base anual, ya que este período considera las variaciones estacionales de la producción (y de la generación de emisiones). El TAC se calculó para un período de 20 años, con una tasa de descuento de 13 %.²¹

21 La tasa de descuento utilizada se tomó de Contreras (2010).

- Costos Directos de Operación (DC): Este indicador refleja los costos directos de operación del equipo de control de emisiones. Se obtiene al restar el costo de recuperación del capital y los costos indirectos de operación (gastos administrativos) del costo total anual.

Mediante los dos primeros indicadores es posible comparar diferentes tipos de tecnologías de una manera homogénea, siempre y cuando la vida útil de las mismas sea similar, que es el caso de las tecnologías analizadas. El procedimiento de estimación del Manual de la EPA y, por ende, del presente análisis, tiene una **incertidumbre de $\pm 30\%$** .

Tecnologías analizadas

Las tres tecnologías que se analizaron son las siguientes:

- Dos ciclones en serie: Esta tecnología se analizó para calderas existentes. La eficiencia teórica de este sistema es de 90 %, pues el segundo ciclón es de alta eficiencia y permitiría cumplir con el estándar de 300 mg/m³ de MP; incluso, permitiría llegar a 200 mg/m³. Por implicar un mayor costo que los sistemas tradicionales de control de emisiones, este se tomó como el peor escenario de costos para calderas existentes.
- Filtro de Mangas después de un ciclón²²: Esta tecnología se analizó para calderas nuevas. Su eficiencia teórica de remoción de MP de 99,0 % permitiría cumplir con el estándar de 50 mg/m³ de MP a cualquier caldera del sector.
- Precipitador Electrostático: Esta tecnología también se analizó para calderas nuevas. Su eficiencia teórica de remoción de MP de 99,9 % también permitiría cumplir con el estándar de 50 mg/m³ de MP a cualquier caldera del sector.

Supuestos

Los supuestos utilizados en el análisis fueron:

- La tasa de cambio utilizada fue \$ 3.100 por dólar y el salario mínimo se actualizó al vigente en 2015.
- No se consideraron costos de compra de terreno adicional, capital de trabajo o instalaciones fuera de sitio. Se supuso que la planta de beneficio tendría

22 El uso de un ciclón antes del filtro de mangas es sugerido en varias fuentes, y por uno de los fabricantes nacionales, como forma de garantizar el enfriamiento de los inquemados para proteger los filtros y evitar la colmatación rápida de los mismos. Es posible reemplazar el ciclón por un enfriador previo, que es un equipo más económico. Existen fabricantes que garantizan el funcionamiento del filtro de mangas bajo cualquiera de estos esquemas. Se modeló el primero de ellos por ser el de mayor costo inicial y el más costoso de operar.

servicios (v.g., electricidad) con capacidad para soportar la carga adicional que requiriera el sistema de control.

- Se supuso que se usaría la chimenea existente, una nueva campana de recolección de tipo ranura y conductos circulares longitudinales en acero galvanizado sin aislamiento. No se tuvieron en cuenta costos de compra de: encendedor, amortiguadores, compresor, ni transportador de tornillo.
- No se tuvieron en cuenta ingresos por el uso de las cenizas en compost u otras aplicaciones, ni egresos por disposición de las mismas. Todos ellos son elementos del plan de negocio particular de cada planta y afectan por igual cualquier tecnología seleccionada.
- No se consideraron impuestos sobre la renta en la metodología de la EPA. El IVA se supuso descontable en su totalidad, por lo cual los precios mostrados son antes de IVA.
- Para los costos de transporte se supuso que los equipos se ubicarían en Villavicencio, y que se importarían desde Estados Unidos. Todos los equipos se consideraron fabricados en Estados Unidos, con excepción de las campanas, los ductos y sus accesorios.
- Todas las estimaciones incluyeron los soportes de entrada y de salida, plataformas, pasamanos, y los dispositivos para la descarga de las tolvas. Los precios indicados son de flanco a flanco.
- La eficiencia combinada de ventilador y motor es de 0,65 y una gravedad específica de 1.000.
- No se tuvieron en cuenta costos de combustible para calentamiento de la casa de bolsas o del sistema de conductos asociado.
- No se tuvo en cuenta la energía para el precalentamiento de la biomasa, que afectaría por igual a cualquier tecnología seleccionada.
- En los costos de instrumentación de cada escenario, se incluyó la automatización necesaria para la alimentación de la biomasa. En todos los escenarios se supuso esta automatización como condición de garantía de éxito.
- La eficiencia del ciclón de preacondicionamiento (para el filtro de mangas) se supuso de 90 % y la carga de material particulado a la entrada se supuso entre 2,3 y 230 g/m³ (1,0 y 100 gr/scf).
- Se supuso un factor de uso de la capacidad instalada de procesamiento de la planta de beneficio de 55 %.

Escenarios analizados

El análisis contempló nueve escenarios, puesto que la implementación de las tres tecnologías fue evaluada en tres tamaños de calderas, según su capacidad de generación de vapor y su caudal de gases de salida:

- i. Una caldera grande de 75.000 acfm²³ de flujo volumétrico de gases de salida, correspondiente al mayor tamaño de caldera en la muestra caracterizada para el diagnóstico sectorial presentado en el Capítulo 3.
- ii. Una caldera pequeña de 7.600 acfm correspondiente al menor tamaño de caldera en la muestra caracterizada.
- iii. Una caldera mediana de 42.000 acfm.

Los principales parámetros de estas tres calderas utilizados para el análisis se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26. Parámetros de las tres calderas para la estimación de costos de sistemas de control de emisiones.

Variable	Unidades	Caldera de menor flujo	Caldera de flujo medio	Caldera de mayor flujo
Flujo volumétrico de los gases de salida (condiciones en la chimenea)	ft ³ /min	7.656,70	42.360,30	74.347,50
	m ³ /s	3,6	20	35,1
Temperatura del gas	°C	244,1	336	267,8
Presión del gas	mm Hg	726,2	740,9	750,2
Humedad del gas	%	9	19,9	12,2
Velocidad del flujo de gas	m/s	4,9	20	18,1
Factor de uso de la capacidad instalada		55 %	55 %	55 %

Fuente: CAIA Ingeniería 2012c.

Los nueve escenarios analizados se muestran en la Tabla 27 y en las Figuras 25, 26 y 27.

Tabla 27. Escenarios analizados para la estimación de costos de control de emisiones.

Escenario	Tamaño de caldera	Sistema de control de emisiones
1	Grande – 75.000 acfm	Dos series de dos ciclones en paralelo ²⁴
2	Grande – 75.000 acfm	Un filtro de mangas después de dos ciclones en paralelo ²⁵

23 ACFM es la sigla en inglés para pies cúbicos por minuto reales.

24 Teniendo en cuenta que la EPA no recomienda utilizar un solo ciclón para caudales superiores a 12 metros cúbicos por segundo en condiciones estándar (sm³/s), para la caldera de mayor flujo se consideró instalar dos series de dos ciclones en paralelo.

25 Teniendo en cuenta que la EPA no recomienda utilizar un solo ciclón para caudales superiores a 12 metros cúbicos por segundo en condiciones estándar (sm³/s), para la caldera de mayor flujo se consideró instalar dos ciclones en paralelo antes del filtro de mangas.

Escenario	Tamaño de caldera	Sistema de control de emisiones
3	Grande – 75.000 acfm	Un precipitador electrostático
4	Mediana – 42.000 acfm ²⁶	Dos ciclones en serie
5	Mediana – 42.000 acfm	Un filtro de mangas después de un ciclón
6	Mediana – 42.000 acfm	Un precipitador electrostático
7	Pequeña – 7.600 acfm	Dos ciclones en serie
8	Pequeña – 7.600 acfm	Un filtro de mangas después de un ciclón
9	Pequeña – 7.600 acfm	Un precipitador electrostático

Fuente: CAIA Ingeniería 2012c.

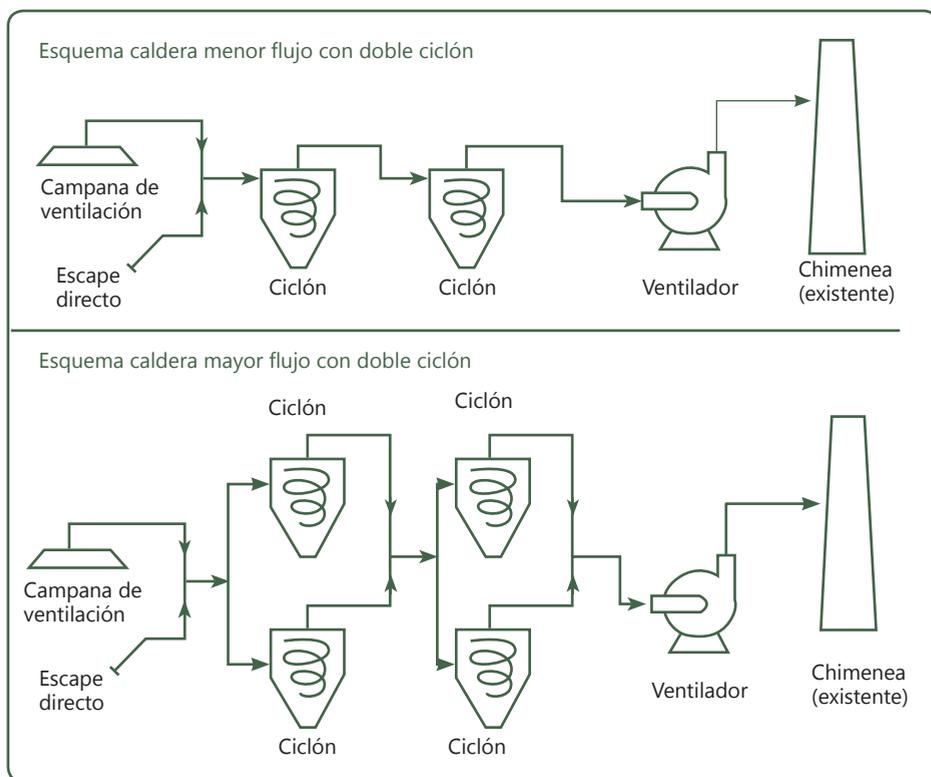


Figura 26. Esquema de implementación de dos ciclones en serie según el flujo de la caldera.

Fuente: CAIA Ingeniería, 2012c.

26 Esta caldera tiene un flujo de 20 m³/s a condiciones de chimenea, lo que equivale a 9.4 m³/s a condiciones estándar. Por ello solo requiere un ciclón.

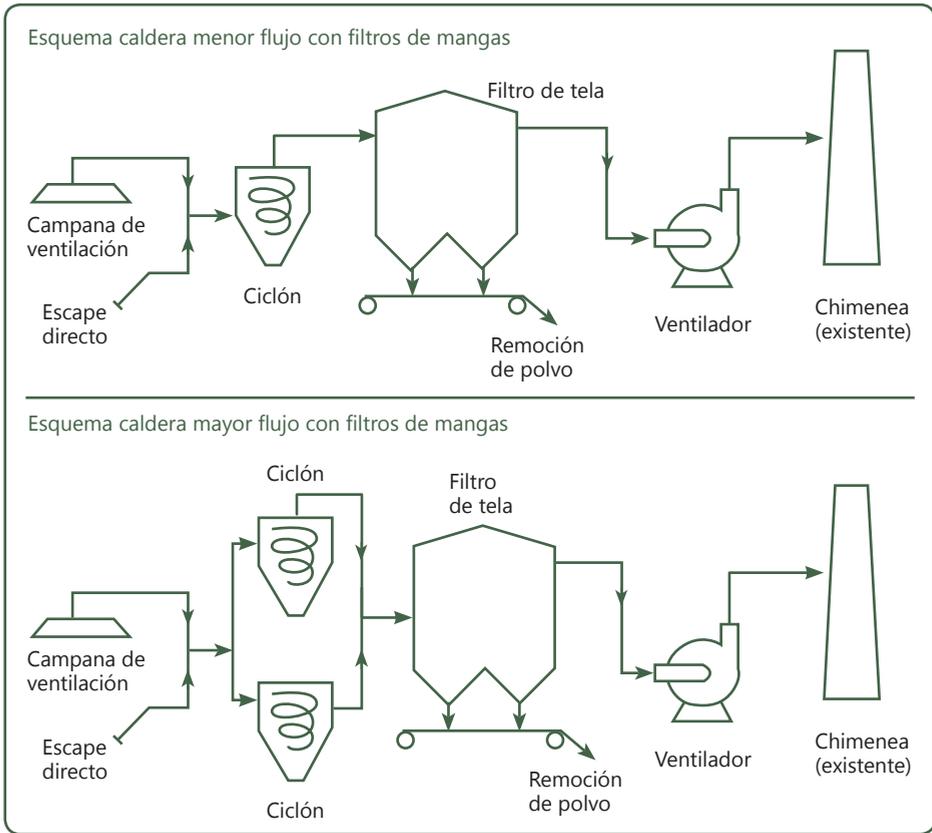


Figura 27. Esquema de implementación de un filtro de mangas después de un ciclón, según el flujo de la caldera.

Fuente: CAIA Ingeniería, 2012c.

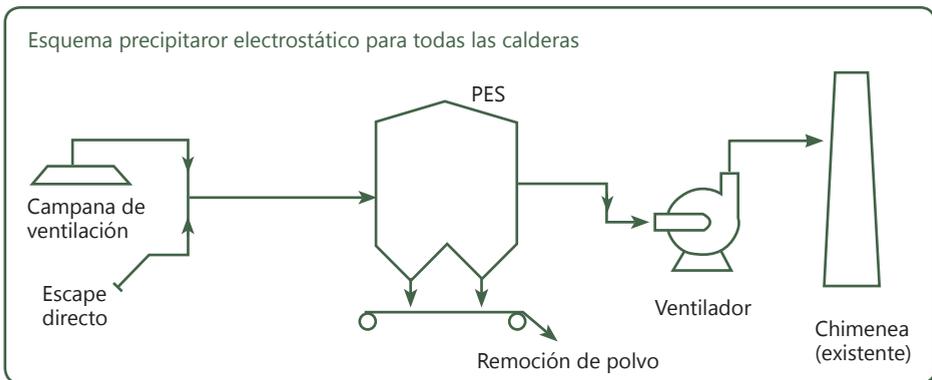


Figura 28. Esquema de implementación de un precipitador electrostático.

Fuente: CAIA Ingeniería, 2012c.

Comparación de costos estimados por tecnología y tamaño de caldera

En la Tabla 28 se muestra una síntesis de los costos estimados por tecnología de control de emisiones y por tamaño de caldera.

Tabla 28. Comparativo de costos estimados por tecnología de control de emisiones y tamaño de caldera.

Caldera	Flujo de gases	Variable de comparación	Tecnología de control de emisiones		
			Ciclones en Serie (miles de \$)	Filtros de mangas (miles de \$)	PES (miles de \$)
Flujo alto	75.000 acfm	TCI	1.578.435	4.132.129	4.599.304
		DC	230.929	333.726	108.623
		TAC	518.765	1.087.248	959.646
Flujo medio	42.000 acfm	TCI	844.739	2.418.459	2.057.937
		DC	131.805	176.144	59.870
		TAC	285.850	617.172	440.658
Flujo bajo	7.600 acfm	TCI	231.734	853.988	681.081
		DC	26.838	49.615	15.683
		TAC	69.098	205.353	141.709

TCI: Inversión total de capital

DC: Costos directos anuales de operación

TAC: Costo total anual

Fuente: Actualizada a partir de CAIA Ingeniería 2012c.

De esta tabla se puede concluir lo siguiente:

- Los costos estimados de adquisición, instalación y operación de tecnologías para el control de emisiones varían más significativamente según la capacidad de la caldera que según la tecnología utilizada.
- De esta manera, las calderas de menor capacidad requerirán soluciones tecnológicas de menor costo, sin importar el estándar de emisiones que deban cumplir (50 mg/m³ o 300 mg/m³).
- Los sistemas convencionales de control de emisiones (ciclones) requieren menores inversiones de capital que los filtros de mangas y precipitadores electrostáticos.

- En cuanto al costo de operación, el precipitador electrostático es el de menor costo de operación por su baja caída de presión y, por ende, bajo requerimiento de energía.
- Al comparar el costo total anual de estas tres alternativas, la más económica sigue siendo la de dos ciclones en serie; la más costosa es el filtro de mangas.
- El precipitador electrostático es la alternativa más económica para las calderas nuevas que deben cumplir el estándar de 50 mg/m^3 . Sin embargo, requieren mayor espacio que los filtros de mangas, más estrictos controles de operación y procedimientos de mantenimiento, y son más sensibles a la variabilidad del proceso productivo y a fluctuaciones en las condiciones de los gases de entrada, como se mencionó en la sección 5.4.2.

Costos estimados por escenario

En la Tabla 29 se presenta el detalle de la estimación de costos para cada uno de los nueve escenarios analizados.

Tabla 29. Detalle de la estimación de costos de equipos de control de emisiones.

Concepto	Estimación de costos		
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
	Serie de 2 ciclones 74347 cfm	Filtros de Tela-74347 cfm	Precipitador Electrostático 74347 cfm
Inversión de Capital Total (Cifras en Pesos \$000)			
Equipo Importado	838.428	1.306.646	1.526.896
Equipo auxiliar	114.102	114.102	114.102
Instrumentación	83.843	130.665	152.689
Transporte	100.611	156.797	183.227
Nacionalización	125.764	195.997	76.344
Costos de Equipo Comprado (PEC)	1.262.748	1.904.207	2.053.260
Cimientos y Soportes	25.255	76.168	82.130
Manejo y Erección	0	952.103	1.026.630
Sistema Eléctrico	0	152.336	164.261
Tubería	0	19.042	20.532
Aislamientos Adicionales	0	133.294	41.065
Pintura	0	38.084	41.065
Costos Directos de Instalación	25.255	1.371.029	1.375.685
Costos Directo Total (DCT)	1.288.003	3.275.236	3.428.945
Ingeniería	126.275	190.421	410.652
Gastos de construcción y campo	126.275	380.841	410.652
Honorarios constructor	0	190.420	205.326
Inicio de obra	0	19.042	20.532
Prueba de rendimiento	0	19.042	20.532
Modelaje			41.065
Contingencias	37.882	57.126	61.597
Costos Indirectos de Instalación (IC)	290.432	856.893	1.170.359
Inversión de Capital Total (TCI)	1.578.435	4.132.129	4.599.304
Costo Total Anual (TAC) -Método EUAC (Cifras en Pesos \$000)			
Mano de Obra de Operación	0	10.057	3.352
Mano de Obra de Supervisión	0	1.509	503
Mantenimiento (Mano de Obra y materiales)	4.565	9.956	1.117
Servicios (Energía)	226.364	223.640	20.533
Tratamiento de residuos	0	0	83.117
Repuestos		88.564	0
Costo Directo Anual (DC)	230.929	333.726	108.623
Gastos Generales	2.739	12.913	12.322
Cargos Administrativos	31.568	82.642	91.986
Prediales	15.784	41.321	45.993
Seguros	15.784	41.321	45.993
Recuperación de Capital	224.696	588.224	654.728
Total Costos Indirectos (IC)	287.836	753.522	851.023
Costo Total Anual (TAC)	518.765	1.087.248	959.646

Concepto	Estimación de costos		
	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
	Serie de 2 ciclones 42360 cfm	Filtros de Tela- 42360 cfm	Precipitador Electrostático 42360 cfm
Inversión de Capital Total (Cifras en Pesos \$000)			
Equipo Importado	419.034	739.257	663.988
Equipo auxiliar	101.715	101.715	75.455
Instrumentación	41.903	73.925	66.399
Transporte	50.284	88.710	79.678
Nacionalización	62.855	110.888	33.199
Costos de Equipo Comprado (PEC)	675.792	1.114.497	918.722
Cimientos y Soportes	13.516	44.580	36.749
Manejo y Erección	0	557.249	459.361
Sistema Eléctrico	0	89.160	73.498
Tubería	0	11.145	9.187
Aislamientos Adicionales	0	78.015	18.374
Pintura	0	22.290	18.374
Costos Directos de Instalación	13.516	802.438	615.544
Costos Directo Total (DCT)	689.307	1.916.935	1.534.265
Ingeniería	67.579	111.449	183.744
Gastos de construcción y campo	67.579	222.899	183.744
Honorarios constructor	0	111.449	91.872
Inicio de obra	0	11.144	9.187
Prueba de rendimiento	0	11.144	9.187
Modelaje			18.374
Contingencias	20.273	33.434	27.561
Costos Indirectos de Instalación (IC)	155.432	501.524	526.671
Inversión de Capital Total (TCI)	844.740	2.418.459	2.057.937
Costo Total Anual (TAC) -Método EUAC (Cifras en Pesos \$000)			
Mano de Obra de Operación	0	10.057	3.352
Mano de Obra de Supervisión	0	1.509	503
Mantenimiento (Mano de Obra y materiales)	5.163	9.956	1.117
Servicios (Energía)	126.642	104.162	9.187
Tratamiento de residuos	0	0	45.710
Repuestos		50.460	0
Costo Directo Anual (DC)	131.805	176.144	59.870
Gastos Generales	3.098	12.913	5.515
Cargos Administrativos	16.894	48.369	41.158
Prediales	8.447	24.184	20.579
Seguros	8.447	24.184	20.579
Recuperación de Capital	120.251	344.276	292.955
Total Costos Indirectos (IC)	154.045	441.028	380.788
Costo Total Anual (TAC)	285.850	617.172	440.658

Concepto	Estimación de costos		
	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
	Serie de 2 ciclones 7657 cfm	Filtros de Tela-7657 cfm	Precipitador Electrostático 7657 cfm
Inversión de Capital Total (Cifras en Pesos \$000)			
Equipo Importado	87.458	236.773	187.783
Equipo auxiliar	65.570	65.569	65.570
Instrumentación	8.746	23.677	18.778
Transporte	10.495	28.412	22.534
Nacionalización	13.119	35.516	9.389
Costos de Equipo Comprado (PEC)	185.387	389.949	304.054
Cimientos y Soportes	3.708	15.598	12.162
Manejo y Erección	0	194.974	152.027
Sistema Eléctrico	0	31.196	24.324
Tubería	0	3.899	3.040
Aislamientos Adicionales	0	27.296	6.081
Pintura	0	15.598	6.081
Costos Directos de Instalación	3.707.754	288.652	203.716
Costos Directo Total (DCT)	186.095	678.511	507.771
Ingeniería	18.538	38.994	60.810
Gastos de construcción y campo	18.538	77.989	60.810
Honorarios constructor	0	38.994	30.405
Inicio de obra	0	3.899	3.040
Prueba de rendimiento	0	3.899	3.040
Modelaje			6.081
Contingencias	5.561	11.698	9.121
Costos Indirectos de Instalación (IC)	42.639	175.477	173.311
Inversión de Capital Total (TCI)	231.735	853.988	681.081
Costo Total Anual (TAC) -Método EUAC (Cifras en Pesos \$000)			
Mano de Obra de Operación	0	6.705	3.352
Mano de Obra de Supervisión	0	1.006	503
Mantenimiento (Mano de Obra y materiales)	3.688	9.219	1.117
Servicios (Energía)	23.151	18.092	3.040
Tratamiento de residuos	0	0	7.670
Repuestos		14.593	0
Costo Directo Anual (DC)	26.838	49.615	15.683
Gastos Generales	2.212	10.158	1.827
Cargos Administrativos	4.634	17.079	13.621
Prediales	2.317	8.539	6.810
Seguros	2.317	8.539	6.810
Recuperación de Capital	32.988	121.568	96.954
Total Costos Indirectos (IC)	42.260	155.738	126.026
Costo Total Anual (TAC)	69.098	205.353	141.709

Anexo 4. Procedimiento para estimar la cantidad de combustible requerido en la caldera

A continuación se describe la metodología desarrollada por CAIA Ingeniería para calcular la cantidad de combustible requerido para la generación de vapor en una planta de beneficio.

Descripción general

El procedimiento para estimar la cantidad máxima de combustible que debe ser ingresado en la caldera, a partir de una estimación de consumo de vapor, establece los pasos por seguir para calcular en terreno las necesidades reales de vapor o la capacidad máxima de producción de cada una de las calderas y de todo el sistema de generación de vapor en conjunto, y finalmente el cálculo de combustible requerido.

Objetivo

Establecer los lineamientos para estimar la cantidad máxima de combustible que debe ser ingresado en la caldera, a partir de una estimación de consumo de vapor.

Pasos para la estimación del consumo de combustible

Dada la edad de las calderas y los cambios efectuados en las mismas, se requiere calcular en terreno las necesidades reales de vapor o la capacidad máxima de producción de cada una de las calderas y de todo el sistema de generación de vapor en conjunto. Se debe tener en cuenta, además, el nivel de producción de la planta y la cantidad de prensas en operación, para modelar todas las posibles situaciones. Para hacer este cálculo se deben dar los siguientes pasos:

- Calcular la curva de requerimientos de vapor de la planta, mediante un medidor de consumo, o mediante cálculos teóricos basados en el proceso.
- Calcular la capacidad de producción de vapor de cada una de las calderas.
- Determinar la capacidad calorífica del combustible por usar.
- Calcular la cantidad de combustible requerido.

Estimación del consumo de combustible

Para entender de manera más detallada las actividades mencionadas en el numeral 3, a continuación se presenta un ejemplo de aplicación tomando como caso de estudio la información obtenida de la evaluación de una caldera.

Consumo de vapor

El consumo de vapor de la caldera se puede medir en forma directa a través de un medidor de consumo de vapor o se puede estimar mediante de cálculos teóricos basados en el proceso.

Medidor de consumo

Cuando se usa un medidor de consumo de vapor es necesario identificar los equipos que funcionan con vapor dentro del proceso de producción e instalar medidores en los puntos de mayor consumo de vapor o un medidor a la salida de la caldera. Dependiendo del régimen de producción, se deberán tomar lecturas del medidor de flujo de vapor cada 10 minutos durante una hora, una vez el equipo esté en régimen estable de funcionamiento y encontrar una relación entre la producción y el consumo de vapor.

Estimación del consumo de vapor

Para hacer los cálculos teóricos del consumo de vapor, se deben identificar y caracterizar los equipos que funcionan con vapor dentro del proceso de producción y obtener el poder calorífico de la materia por procesar, para este caso, biomasa. Para calcular el consumo teórico de vapor para cada equipo se puede hacer uso de la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{m}_p C_p (T_{max} - T_{in})}{\eta_e h_{v@T_v, P_v}}$$

Donde,

\dot{m}_v = flujo másico de vapor [kg/h]

\dot{m}_p = flujo másico de producto [kg/h]

C_p = calor específico de la materia por procesar [kJ/kg K]

T_{max} = temperatura máxima del proceso [K]

T_{in} = temperatura de entrada de la materia por procesar [K]

$h_{v@T_v, P_v}$ = entalpía del vapor de agua²⁷ calculada a T y P de servicio del vapor [kJ/kg]

η_e = eficiencia del equipo.

Otra alternativa consiste en calcular la capacidad de producción de vapor de cada una de las calderas a partir del consumo de agua de la caldera. En este

27 Para calcular la entalpía (h_v), se usa una herramienta en el siguiente portal de internet:

<http://spiraxsarco.com/resources/steam-tables.asp>. En la página, ingresa en la opción Dry Saturated Steam Line y posteriormente pone el valor de la presión en la casilla Pressure. En la casilla Specific Enthalpy of Steam (hg) pone las unidades en kJ/kg usando la lista desplegable que está al lado; finalmente hace click en la casilla Calculate y el valor obtenido en Specific Enthalpy of Steam (hg), será el valor correspondiente a h_v .

caso se debe conocer el flujo de agua que consume y la presión y temperatura del vapor a la salida de la misma. Aplicando la ley de conservación de masa, se obtiene la siguiente relación para el flujo de vapor generado:

$$\dot{V}_l * \rho_l = \dot{V}_v * \rho_v$$

$$\dot{V}_v * \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)_{@T,P} * \dot{V}_l$$

Donde,

\dot{V}_l = flujo volumétrico del agua en estado líquido [m³/s]

\dot{V}_v = flujo volumétrico del vapor de agua [m³/s]

ρ_l = densidad del agua a la entrada de la caldera [kg/ m³]

ρ_v = densidad del vapor de agua a la salida de la caldera [kg/ m³]

Cuando no se cuente con información sobre la cantidad de vapor requerido por el sistema, se puede encontrar el flujo máximo de combustible requerido a través de la capacidad máxima de producción de vapor de la caldera.

Cantidad de combustible requerido

La ecuación que se debe utilizar para calcular el flujo de combustible requerido para todo el proceso a partir de un consumo determinado de vapor se muestra a continuación.

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{\dot{m}_{v\ total} (h_v - h_l)}{\eta' LHV}$$

Donde,

$\dot{m}_{v\ total}$ = flujo másico de vapor requerido por cada equipo [Kg/h]

h_v = entalpía del vapor de agua producido por la caldera [KJ/kg]

h_l = entalpía del agua líquida a la entrada de la caldera [KJ/kg]²⁸

LHV = poder calorífico del combustible [KJ/kg]

η = eficiencia térmica de la caldera [%]

28 Para calcular la entalpía (h_l), se usa una herramienta en el siguiente portal de internet:

<http://spiraxsarco.com/resources/steam-tables.asp>. En la página se debe ingresar en la opción Sub Saturated Water Region, en la casilla Inputs poner la opción Pressure and Temperature usando la lista desplegable; posteriormente ingresar el valor correspondiente en la casilla Pressure y Temperature. Tenga en cuenta que debe indicar al lado de cada casilla las unidades con las que está trabajando. En la casilla Specific Enthalpy of Water (hf) se ponen las unidades en kJ/kg usando la lista desplegable que está al lado; finalmente se hace clic en la casilla Calculate y el valor obtenido en Specific Enthalpy of Water (hf) será el valor correspondiente a h_l.

Foto: Villegas-Fedepalma.
C.I. Tequendama



Federación Nacional de Cultivadores
de Palma de Aceíte, Fedepalma

Carrera 10A N° 69A - 44 | PBX: (1) 313 86 00
www.fedepalma.org | Bogotá, D.C., Colombia

