

**DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE  
OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS HORNOS  
COLMENA DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS  
S.A.S**

**SILVIA LUCIA MANTILLA PARRA**

**LORENZO ARDILA SANCHEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2011**

**DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE  
OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS HORNOS  
COLMENA DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS  
S.A.S.**

**SILVIA LUCIA MANTILLA PARRA**

**LORENZO ARDILA SANCHEZ**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director**

**CARLOS BORRÁS PINILLA**

**Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2011**

*A mí familia por el amor incondicional.*

*Silvia Lucía Mantilla Parra*

*Este logro lo dedico a mi familia y amigos por su  
consideración y amor durante todos estos años*

*Lorenzo Ardila Sánchez*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander por educarnos y formarnos para la vida.

Al Ingeniero Carlos Borrás Pinilla por el apoyo durante todo el proceso de desarrollo de este proyecto.

A la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S, especialmente al ingeniero Juan Francisco González Martínez quien estuvo atento a colaborarnos durante el proceso.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	19
<b>1. MARCO DE REFERENCIA DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.....</b>	<b>22</b>
1.1 DATOS DE LA EMPRESA .....	22
1.1.1 Ubicación.....	23
1.2 ANTECEDENTES.....	23
1.3 PRODUCTOS.....	25
<b>2. DIAGNÓSTICO DE LA PARTE OPERATIVA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS COLMENA DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.....</b>	<b>26</b>
2.1 FLUJOGRAMA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS COLMENA.....	27
2.1.1 Carga del horno.....	27
2.1.2 Etapas de quema .....	28
2.1.3 Etapas de enfriamiento y descarga.....	30
2.2 PROBLEMA EVIDENCIADOS EN EL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS COLMENA.....	30
<b>3. DIAGNÓSTICO DE LA PARTE TERMODINÁMICA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS COLMENA DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.....</b>	<b>33</b>
3.1 ANÁLISIS DEL CARBÓN .....	33
3.1.1 Determinación del contenido de humedad.....	35
3.1.2 Determinación del contenido de ceniza.....	37
3.1.3 Determinación del contenido de materia volátil .....	38
3.1.4 Determinación del poder calorífico .....	40
3.1.5 Determinación del contenido de azufre.....	42
3.1.6 Resultados .....	44
3.2 ESTUDIO DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES.....	46

3.2.1	Objetivos específicos de la medición.....	48
3.2.2	Descripción del proceso e instalación .....	48
3.2.2.1	Descripción del proceso .....	48
3.2.2.2	Descripción de la fuente de emisión.....	50
3.2.3	Descripción del programa de medición .....	51
3.2.3.1	Descripción de los equipos y procedimientos .....	51
3.2.3.2	Procedimiento de recuperación de la muestra y análisis de laboratorio .....	57
3.2.3.3	Localización del sitio de toma de muestra .....	58
3.2.4	Muestreo preliminar .....	60
3.2.5	Muestreo definitivo.....	60
3.2.5.1	Emisión de material particulado (MP).....	61
3.2.5.2	Emisión de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) .....	62
3.2.5.3	Emisión de óxidos de nitrógeno(NO <sub>x</sub> ) .....	63
3.2.5.4	Corrección por oxígeno de referencia .....	64
3.2.6	Procedimientos de control y aseguramiento de la calidad .....	65
3.2.6.1	Validación de datos.....	68
3.2.6.2	Auditoría de la medición .....	68
3.2.6.3	Reporte de errores .....	68
3.2.7	Altura de la chimenea.....	69
3.2.8	Reporte de resultados y comparación con la norma.....	69
<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS CAUSA-RAÍZ .....</b>	<b>73</b>
4.1	EL MÉTODO DEL MAPEO DE LA CAUSA EN EL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ	74
4.1.1	Mapa de causas.....	74
4.2	ANÁLISIS CAUSA RAÍZ DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS COLMENA DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.....	75
<b>5.</b>	<b>CCTA .....</b>	<b>78</b>
5.1	VENTAJAS DEL USO DEL COMBUSTIBLE CCTA .....	79
5.2	TÉCNICA DE PRODUCCIÓN DE EMULSIONES TIPO CCTA.....	79

<b>6. PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN</b> .....	81
<b>CONCLUSIONES</b> .....	83
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	85
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	87
<b>ANEXOS</b> .....	90

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagen satelital del entorno y ubicación de la planta .....	23
Figura 2. Vista exterior del horno colmena .....	25
Figura 3. Interior del horno colmena en un proceso de carga .....	27
Figura 4. Flujograma de la carga del horno colmena.....	28
Figura 5. Flujograma de las etapas de quema .....	29
Figura 6. Hornillas del horno colmena .....	31
Figura 7. Almacenamiento de carbón en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S .....	31
Figura 8. Escoria resultante de la combustión del carbón.....	32
Figura 9. Trituración manual del carbón .....	33
Figura 10. Molino de bolas.....	34
Figura 11. Muestra lista para las pruebas .....	34
Figura 12. Desecador.....	35
Figura 13. Crisoles en el horno para la prueba de contenido de humedad.....	36
Figura 14. Crisol y tapa usados en la prueba de determinación del contenido de materia volátil .....	39
Figura 15. Bomba calorimétrica.....	41
Figura 16. Diagrama general del proceso .....	49
Figura 17. Imagen de la fuente .....	51
Figura 18. Muestreador isocinético marca ÁPEX de referencia XC 572.....	53
Figura 19. Portafiltro y tren de impactadores .....	54
Figura 20. Ciclón para recuperación de muestras .....	54
Figura 21. Instrumentos de laboratorio.....	55
Figura 22. Analizador ENERAC M 500.....	55
Figura 23. Distribución de alturas en chimenas.....	58
Figura 24. Diagrama general de un muestreo isocinético .....	68

Figura 25. Concentración de contaminantes a condiciones de referencia con y sin oxígeno de referencia .....	71
Figura 26. Metodología básica para hacer un RCA.....	73
Figura 27. Relación causa-efecto, bloque constructivo .....	74
Figura 28. Mapa de causas del proceso de combustión de los hornos colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. ....	75
Figura 29. Mecanismo de formación del CCTA.....	80

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de los análisis del carbón usado en los hornos colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S .....	44
.....	
Tabla 2. Clasificación ASTM D388 de los carbones según su rango.....	45
Tabla 3. Características del la fuente monitoreada.....	46
Tabla 4. Caracterización de los gases de la chimenea por análisis de combustión .....	49
Tabla 5. Condiciones de operación de la fuente .....	50
Tabla 6. Dimensiones de la fuente evaluada .....	50
Tabla 7. Número de serial de los equipos del muestreador isocinético y laboratorio .....	52
Tabla 8. Parámetros para la localización del sitio de toma de muestras.....	59
Tabla 9. Procedimiento para validación de datos.....	68
Tabla 10. Aplicación de Buenas Prácticas de Ingeniería.....	69
Tabla 11. Estándares de emisión admisibles según Resolución 909/08.....	70
Tabla 12. Resultados de flujo másico y concentración para MP, SO <sub>2</sub> y NO <sub>x</sub> .....	70
Tabla 13. Resultados de concentración de MP, SO <sub>2</sub> y NO <sub>x</sub> con corrección de oxígeno de referencia .....	71
Tabla 14. Comparación con la normatividad y Unidades de Contaminación Atmosférica (UCA) .....	72
Tabla 15. Comparación de algunas variables de operación del CCTA con otros combustibles. ....	78

## **LISTA DE ANEXOS**

ANEXO A. Carta de satisfacción de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S .... 91

## RESUMEN

**TÍTULO:** “DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS HORNOS COLMENA DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.”\*

**AUTORES:**

SILVIA LUCÍA MANTILLA PARRA\*\*

LORENZO ARDILA SÁNCHEZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Combustión, Hornos colmena, Optimización Energética, CCTA, Carbón.

**CONTENIDO:**

Este proyecto de grado está enfocado a la necesidad de las industrias ladrilleras y cerámicas de optimizar sus procesos productivos y disminuir la contaminación producida por los mismos debido a las exigencias ambientales vigentes; por esta razón la Universidad Industrial de Santander en compañía de la empresa santandereana Ladrillos y Acabados S.A.S. estudió el proceso de combustión de carbón en los hornos tipo colmena haciendo un análisis causa raíz para determinar qué factores tienen mayor impacto en la eficiencia térmica del proceso y en la producción de emisiones contaminantes, con el fin de elaborar una propuesta de mejora para los hornos que sea viable económicamente para la empresa.

La metodología utilizada fue: realizar un análisis del carbón usado en la ladrillera, un análisis de las emisiones contaminantes producidas por los hornos, un estudio de la parte operativa del proceso y finalmente hacer un análisis causa raíz de los problemas evidenciados.

Basados en los resultados obtenidos en los estudios de la parte térmica y operativa de los hornos se llegó a la conclusión que es necesario implementar un sistema de inyección de carbón pulverizado para la quema del combustible para mejorar la eficiencia del proceso de combustión, disminuir el consumo de carbón y las emisiones contaminantes.

\*Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica.

Director: Carlos Borrás Pinilla

## ABSTRACT

**TITLE:** “DEVELOPMENT OF AN ENERGY OPTIMIZATION PROPOSAL FOR THE BEEHIVE FURNACES OF THE COMPANY LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.”\*

**AUTHORS:**

SILVIA LUCÍA MANTILLA PARRA\*\*

LORENZO ARDILA SÁNCHEZ\*\*

**KEY WORDS:** Combustion, Beehive furnaces, Energy optimization, CCTA, Coal.

**CONTENT:**

This thesis Project is focused on the need of the ceramic industries to optimize their productive processes and reduce pollution generated by the same processes, in order to achieve environmental requirements. Thus, both the Universidad Industrial de Santander and the Ladrillos y Acabados S.A.S. company from Santander studied the combustion process of coal in the beehive furnaces, using a root cause analysis to determine what factors have a higher impact on the thermal efficiency of the process and on the production of pollutant emissions, aiming to construct a proposal that states how to improve furnaces in an economically feasible way to the company.

The methodology used was: to do an analysis of the coal used in the company; an analysis of the pollutant emission produced by the furnaces; a study of the operative stage of the process and, finally, a root cause analysis of the identified problems.

Based on the obtained results from the studies of the thermal and operative part of the beehive furnaces, there was concluded that is necessary to implement a pulverized coal injection system in the fuel burning to improve the combustion process efficiency, diminish coal consumption and pollutant emissions.

\* Degree work

\*\* Faculty of Physico-mechanical engineerings, Mechanical Engineering School.

Director: Carlos Borrás Pinilla

## INTRODUCCIÓN

El tema de mayor interés en la actualidad, tanto de empresarios como de académicos, es el acelerado deterioro del planeta y el temor de causar daños irreversibles en los ecosistemas. Esto ha llevado a que las industrias grandes, medianas y pequeñas, tomen conciencia tanto en la racionalización del uso de los recursos naturales no renovables, como en la disminución del aporte de agentes contaminantes que contribuyan con este deterioro. Los gobiernos de Colombia y en general del planeta, están aplicando normatividades ambientales que implican multas que pueden hacer inviables las industrias o incluso provocar el cierre de aquellas que no cumplan con los requisitos mínimos ambientales.

El interrogante que se busca desarrollar en esta investigación es el siguiente: ¿Es posible disminuir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes en el proceso de cocción de la arcilla de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.? Esta pregunta debe contestarse dentro de un marco de viabilidad económica, de manera que las inversiones a realizar tengan un retorno razonable en el tiempo mediante la disminución en los costos de producción, costos del mantenimiento y el ahorro de las posibles multas por inconformidades a la reglamentación del Ministerio de Ambiente, Vivienda Y Desarrollo territorial.

La industria ladrillera y cerámica ha sido objetivo de investigaciones en el país, donde se ha encontrado, que este sector está constituido, en su mayoría, por pequeñas y medianas empresas, nacidas de procesos artesanales, que han visto la necesidad de tecnificarse debido a la competencia, a la aparición de productos sustitutos y al endurecimiento de las normas medioambientales.

Este proyecto de grado se enmarca dentro del propósito de la Universidad Industrial de Santander de liderar procesos de cambio, buscando el progreso y mejoramiento de la calidad de vida de la comunidad; asimismo contribuye con la generación y adaptación de los conocimientos teóricos a la industria regional.

## OBJETIVOS

### Objetivo General

Contribuir al desarrollo regional colaborando con la disminución del consumo energético y de las emisiones contaminantes de la industria ladrillera con el fin de aumentar su competitividad.

### Objetivos Específicos

Proponer una solución viable para la optimización del proceso de combustión de los hornos tipo colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S., por lo cual se deberá:

- ✓ Realizar un diagnóstico del proceso de combustión de los dos hornos colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S., ubicada en San Gil, Santander.  
Donde se revise:
  - Desde la parte operativa:
    - Identificar los problemas que se presentan actualmente, mediante un proceso de recolección de información en la planta.
    - Análisis del flujograma del proceso.
  - Desde la parte termodinámica:
    - Realizar un análisis de las propiedades del carbón usado en la ladrillera.
    - Determinar contaminantes criterio (MP, SO<sub>2</sub> , NO<sub>x</sub>) que no cumplan con la resolución 909 de 2008 y las causas de este incumplimiento.

- Verificar alturas de descarga y su cumplimiento con la norma 909 de 2008.
- ✓ Elaborar un mapa de causas-efectos de los problemas encontrados, aplicando la metodología RCA (Análisis Causa Raíz), para identificar, jerárquicamente, cuales son las causas que más impactan en el proceso de combustión y producción de ladrillo dentro de estos dos hornos.
- ✓ Presentar un análisis bibliográfico sobre el uso del combustible CCTA para la optimización de la combustión en hornos.
- ✓ Proponer una alternativa para mejorar el proceso de combustión actual que tenga en cuenta los aspectos ambientales y económicos.

# **1. MARCO DE REFERENCIA DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.**

## **1.1 DATOS DE LA EMPRESA**

**NOMBRE:** LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S. San Gil

**NIT:** 804015143-7

**Planta:** Vereda Campohermoso. San Gil

**Oficina:** Calle 6 No. 9-70 San Gil. Tel. 724-2990 Fax. 724-2942

**Gerente:** Mauricio Berardinelli González.; E.mail. mauberar@gmail.com

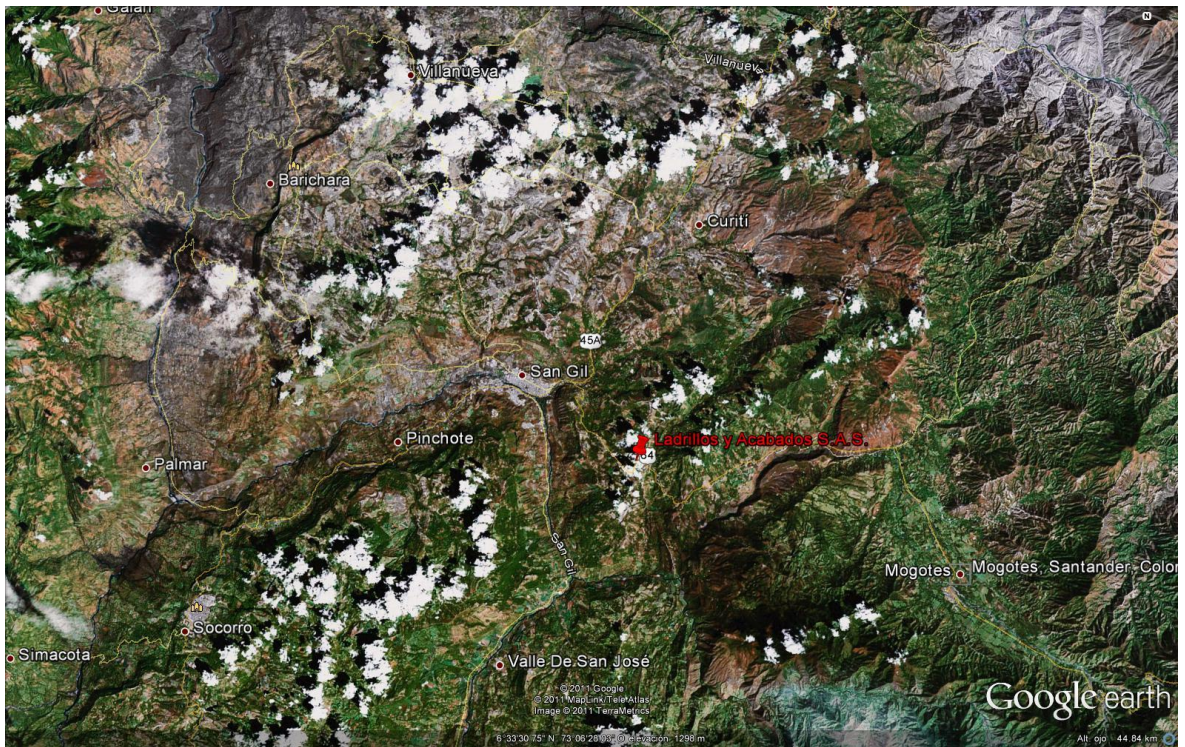
**Subgerente:** Juan Francisco González M; E.mail: gonzalez.juanf@gmail.com

**Clasificación de la empresa:** PEQUEÑA EMPRESA (PYME). 11-50 Empleados,  
**ACTIVOS TOTALES:** Entre 501 y 5001 SMMLV.

### 1.1.1 Ubicación

En la Figura 1. se muestra una imagen satelital con la ubicación de la planta de LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.:

Figura 1. Imagen satelital del entorno y ubicación de la planta



Fuente: Google Earth

### 1.2 ANTECEDENTES

Por escritura pública No. 687 de 2003/04/07 de la notaría 02 del círculo de San Gil, inscrita en la Cámara de Comercio de Bucaramanga el 2003/04/25 bajo el No. 54075 del libro 9, se constituyó la sociedad denominada **LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S. MATRICULA MERCANTIL: 05-102885-03 DEL 2003/04/25.**

Ladrillos y Acabados S.A.S fue comprada a LADRILLERA SAN GIL, chircal que fabricaba ladrillos de arcilla en condiciones precarias de infraestructura tanto de equipos como locativas. A partir del año 2003 los nuevos dueños proyectaron una

reconversión de la infraestructura y fue así que se programan y se ejecutan las siguientes obras:

- Durante los años 2004 y 2005 se construyen 2.500 mts.2 de cubiertas y se construyen dos hornos colmena sustituyendo el horno tipo pampa y se construyen tres secaderos artificiales con un área de 16x.5 m cada uno (240 m<sup>2</sup> en total ). También se adquiere en leasing una retroexcavadora Caterpillar modelo 426 D para la explotación de la mina.
- En el año 2007 se negocia la compra de todos los equipos de la línea de producción que incluye desterronador, cajón mezclador, laminador, extrusora, cortadora y las bandas transportadores que interconectan estos equipos. Todos estos equipos fueron adquiridos a Souza- Brasil. La nueva línea de producción entró en funcionamiento en enero del 2008.

El volumen de Producción antes del montaje de los nuevos equipos es decir desde el 2003 hasta el 2007 fue en promedio de 80.000 piezas mensuales. A partir de febrero del 2008 la producción aumenta a un promedio de 100.000 unidades/mes y se mejora sustancialmente la calidad de los productos fabricados. Sin embargo a pesar del incremento de la producción los costos de producción se han incrementado, los precios se han contraído por la oferta de los Competidores en la Región Guanentina.

- A mediados del año 2008, la Empresa realiza un análisis DOFA y se define implementar como estrategia para ejecución a corto y mediano plazo el desarrollo de productos de valor agregado, igualmente se define implementar un programa de mejoramiento continuo que permita mejorar procesos, reducir costos y mejorar la calidad de los productos. Para dar inicio a éste nuevo plan entre octubre y noviembre del 2008 se pone en funcionamiento un molino de martillos, se realizan visitas a diferentes fábricas en el país y se conocen las alternativas que ofrece Colciencias para la investigación e innovación comenzando de esta forma un vínculo con la vicerrectoría de investigación y extensión de la Universidad Industrial de Santander.

### 1.3 PRODUCTOS

Los Productos de arcilla que se han fabricado tradicionalmente son:

- Ladrillos Huecos H10
- Ladrillos Huecos H12
- Ladrillos Huecos H15
- Medios de ladrillos Huecos H10,H12 y H15
- Bovedilla
- T1 Rústico
- Ladrillos macizos
- Tejas Coloniales

En el 2010 se comienzan a fabricar nuevos productos:

- Pisos tipo fato
- Pisos tipo tableta colonial
- Fachaletas
- Espacatos
- Adoquines

## 2. DIAGNÓSTICO DE LA PARTE OPERATIVA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS COLMENA DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.

“Los hornos colmena son hornos cerrados, intermitentes donde la llama se eleva contra el muro, llega hasta la bóveda, atravesando los productos de arriba hacia abajo, debido al tiro y luego sale por el ducto que comunica a la chimenea”<sup>1</sup>.

Figura 2. Vista exterior del horno colmena



Fuente: los autores del proyecto.

Para la cocción de ladrillos y otros materiales cerámicos la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S cuenta con 2 hornos colmena que producen 25.000 piezas el horno grande y 15.000 piezas el pequeño. Cada horno cuenta con 12 bocas para la

---

<sup>1</sup> MONROY, Maribel. Estudio de mecanismos de producción limpia para controlar mediante separación mecánica el material particulado producto de la combustión de carbón pulverizado tipo CCTA en hornos tipo colmena. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2006. p. 7.

alimentación del carbón, en la Figura 2. se pueden observar 3 de las bocas del horno grande, y 2 puertas para la carga y descarga de ladrillos y una chimenea para la descarga de los gases de combustión. La eficiencia energética del proceso de cocción del ladrillo actualmente se encuentra en 0,151kg de arcilla/kg de carbón consumido.

## **2.1 FLUJOGRAMA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS COLMENA**

### **2.1.1 Carga del horno**

Para la carga del horno (endague) se recoge el material desde las cámaras de secado natural y artificial y se apila en el horno teniendo en cuenta que se ponen primero los ladrillos y en la parte superior las tejas. En la Figura 3. se observan los ladrillos apilados en el interior del horno colmena.

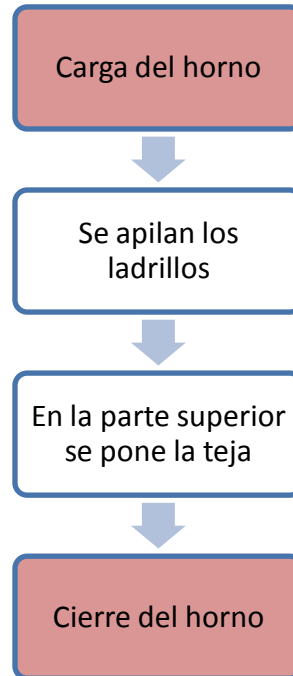
Figura 3. Interior del horno colmena en un proceso de carga



Fuente: los autores del proyecto.

En la Figura 4. se puede observar el flujograma de la carga del horno.

Figura 4. Flujograma de la carga del horno colmena



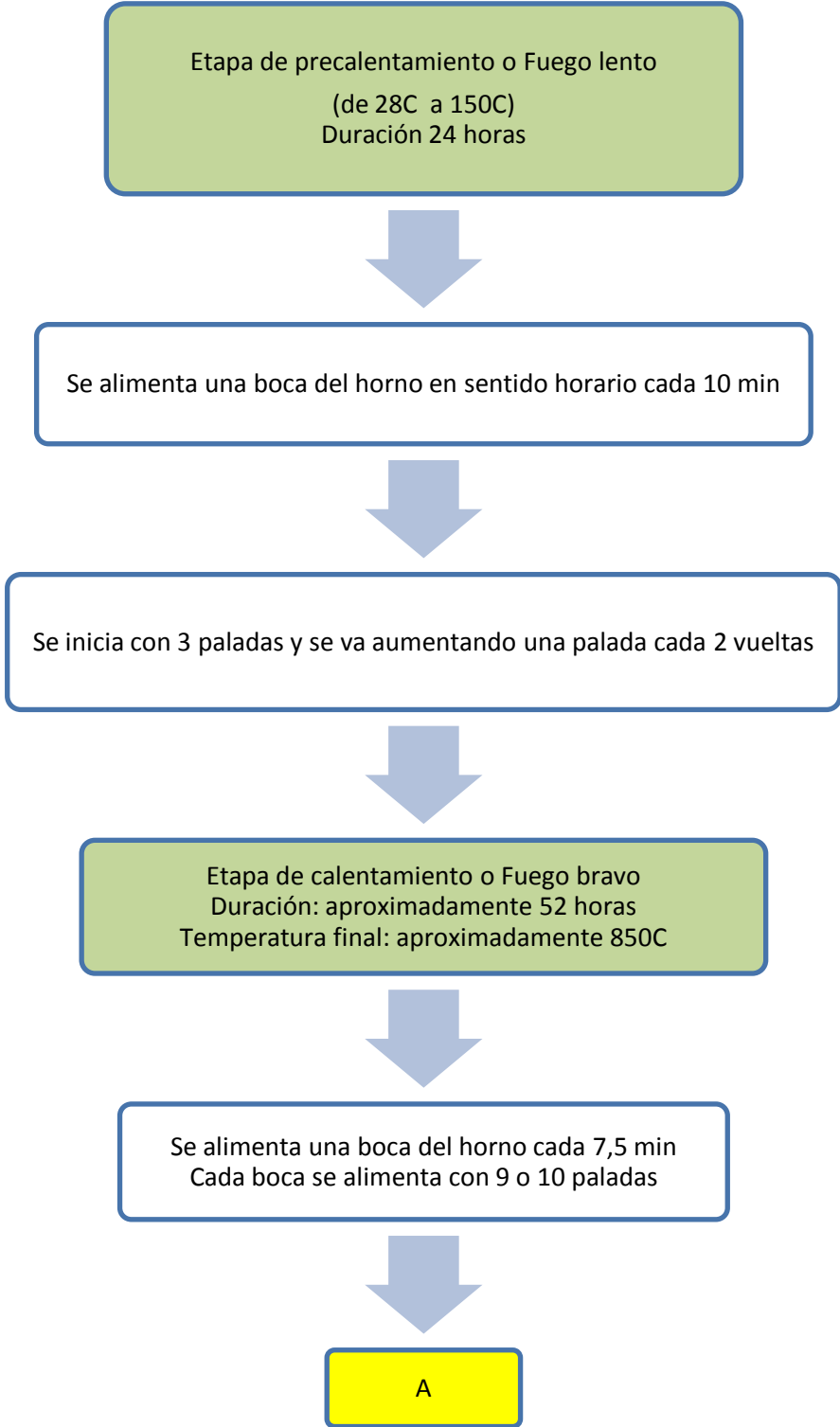
Fuente: los autores del proyecto.

### 2.1.2 Etapas de quema

La parte fundamental en el proceso de elaboración de ladrillos y cerámicos y es la etapa de quema esta se encuentra dividida en 2 etapas: la etapa de precalentamiento o fuego lento (caldeo) cuya finalidad es retirar la humedad interna del producto y la etapa de calentamiento o fuego bravo cuyo fin es dar las propiedades cerámicas al mismo. En la figura 5. se puede observar el flujograma de la etapa de quema, este proceso dura aproximadamente 76 horas.

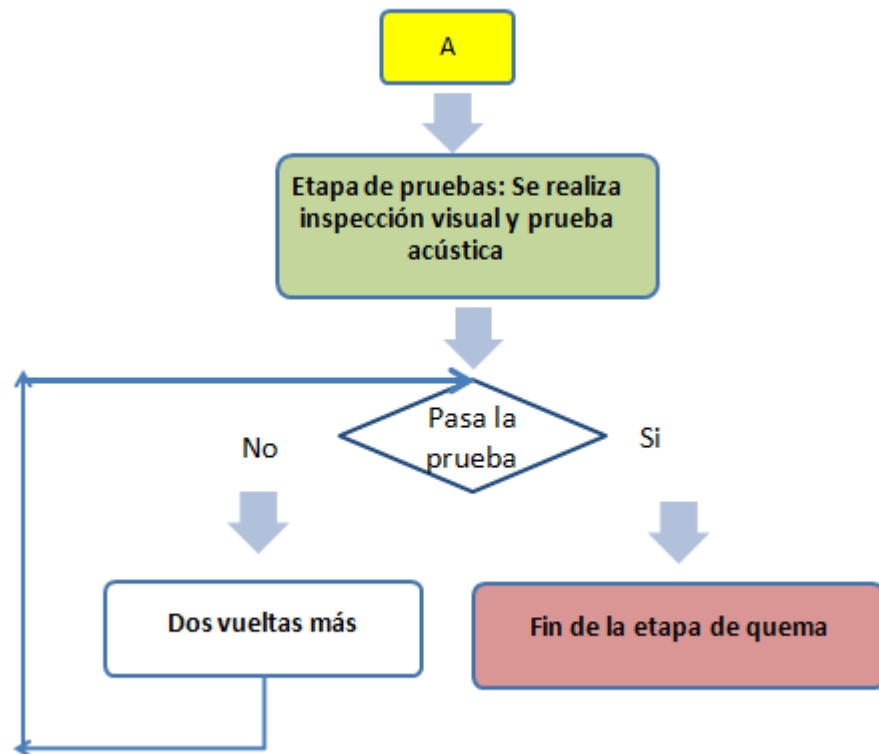
Al final de la etapa de calentamiento se realizan pruebas a unas muestras dejadas en las 2 puertas del horno para verificar que el producto esté listo. Si se verifica que no está listo se continúa el proceso durante 2 o más vueltas hasta que las muestras indiquen.

Figura 5. Flujograma de las etapas de quema.



Fuente: los autores del proyecto.

Figura 5. (Continuación)



Fuente: Los autores del proyecto.

### 2.1.3 Etapas de enfriamiento y descarga

Una vez se ha verificado con las muestras que el producto está listo, se esperan 6 horas aproximadamente y se extrae calor para el proceso de secado durante 3 días. Finalmente se abren las puertas del horno y se extrae calor con una turbina enfriadora durante un día y medio antes de poder comenzar la descarga del horno.

## 2.2 PROBLEMAS EVIDENCIADOS EN EL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS COLMENA

Mediante un proceso de inspección visual y diálogos con los trabajadores de la planta se pudo evidenciar:

- No existe una documentación detallada del proceso.
- No existe documento guía para el operador encargado de alimentar el horno.

- En el proceso de combustión del horno grande se evidenció que la llama sale de la hornilla produciendo pérdidas de calor y emisiones de gases contaminantes como se observa en la Figura 6.
- El carbón se encuentra apilado a la intemperie. (ver Figura 7.)
- Del proceso de combustión del carbón queda mucha escoria. (ver Figura 8.)

Figura 6. Hornillas del horno colmena



Fuente: los autores del proyecto.

Figura 7. Almacenamiento de carbón en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.



Fuente: los autores del proyecto.

Figura 8. Escoria resultante de la combustión del carbón.



Fuente: los autores del proyecto.

### 3. DIAGNÓSTICO DE LA PARTE TERMODINAMICA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS COLMENA DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.

Para evaluar la parte termodinámica del proceso se evalúan 3 puntos fundamentales: las propiedades del carbón usado en la ladrillera, las emisiones contaminantes y la altura de descarga de la chimenea.

#### 3.1 ANÁLISIS DEL CARBÓN

En esta sección se describe el procedimiento con el que se analizó el carbón que usan en los hornos colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S este carbón proviene de Tópaga Boyacá y tiene un costo de 178.000 pesos por tonelada. En el laboratorio de la planta de aceros, perteneciente a la escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander, se realizaron las pruebas de humedad, cenizas, materia volátil, poder calorífico y azufre.

Para realizar estos análisis es necesario que la muestra de carbón esté pulverizada, para esto es necesario triturarla manualmente en primera instancia como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Trituración manual del carbón.

Izquierda muestra de carbón sin triturar, derecha trituration manual



Fuente: los autores del proyecto.

Después de ser macerada, la muestra se mete al molino de bolas (ver Figura 10.) de 4 o 5 horas, teniendo la muestra pulverizada se pasa por un tamiz 100 (100 hilos por  $cm^2$ ) y finalmente la muestra está lista para las pruebas como se observa en la Figura 11.

Figura 10. Molino de bolas



Fuente: los autores del proyecto.

Figura 11. Muestra lista para las pruebas



Fuente: los autores del proyecto.

### 3.1.1 Determinación del contenido de humedad

La humedad, según la norma D3173 de la ASTM, se determina estableciendo la pérdida de peso de la muestra cuando se calienta bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo y atmósfera.

Esta prueba se realizará a dos muestras y finalmente se promedia el resultado.

A continuación se describe el procedimiento:

- Calentar los crisoles vacíos, dejarlos enfriar en un desecador de 15 a 30 minutos, como se observa en la Figura 12., y pesarlos. Agregar aproximadamente un gramo de la muestra a los crisoles y pesarlos nuevamente.

Figura 12. Desecador



Fuente: los autores del proyecto.

- Poner los crisoles en un horno precalentado a 110C, como se observa en la Figura 13. y dejarlos durante una hora. Sacar los crisoles y dejar en el desecador hasta que estos se enfríen a temperatura ambiente, pesarlos.

Figura 13. Crisoles en el horno para la prueba de contenido de humedad



Fuente: los autores del proyecto.

**Cálculos:**

***Muestra 1:***

*Peso del crisol vacío =  $m_1 = 16,68852g$*

*Peso del crisol con la muestra =  $m_2 = 17,69206g$*

*Peso de la muestra después de salir del horno =  $m_3 = 17,68288g$*

***Muestra 2:***

*Peso del crisol vacío =  $m_1 = 14,55546g$*

*Peso del crisol con la muestra =  $m_2 = 15,55687g$*

*Peso de la muestra después de salir del horno =  $m_3 = 15,54705g$*

***Ecuación para calcular el porcentaje de humedad:***

$$\% \text{ Humedad} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100\%$$

**Muestra 1:**

$$\% \text{ Humedad} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100\% = \frac{17,69206 - 17,68288}{17,69206 - 16,68852} \cdot 100\% = 0,91\%$$

**Muestra 2:**

$$\% \text{ Humedad} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100\% = \frac{15,55687 - 15,54705}{15,55687 - 14,55546} \cdot 100\% = 0,98\%$$

**Promedio = 0,94%**

### 3.1.2 Determinación del contenido de ceniza

El contenido de ceniza, según la norma D3174 de la ASTM, se determina por el peso que queda después de quemar el carbón bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo y atmósfera.

Esta prueba se realizará a dos muestras y finalmente se promedia el resultado.

A continuación se describe el procedimiento:

- Calentar los crisoles vacíos, dejarlos enfriar en un desecador de 15 a 30 minutos, como se observa en la Figura 12. y pesarlos. Agregar aproximadamente un gramo de la muestra a los crisoles y pesarlos nuevamente.
- Poner los crisoles en el horno frío y dejar calentar a una velocidad de calentamiento tal que alcance 950C en 2 horas. Dejar las muestras 2 horas más a esta temperatura.
- Dejar enfriar en el desecador hasta temperatura ambiente y pesar.

**Cálculos:**

**Muestra 1:**

*Peso del crisol vacío =  $m_1 = 16,90806g$*

*Peso del crisol con la muestra =  $m_2 = 17,94003g$*

*Peso de la muestra después de salir del horno =  $m_3 = 17,00500g$*

**Muestra 2:**

Peso del crisol vacío =  $m_1 = 16,13449g$

Peso del crisol con la muestra =  $m_2 = 17,13900g$

Peso de la muestra después de salir del horno =  $m_3 = 16,22885g$

**Ecuación para calcular el porcentaje de ceniza:**

$$\% \text{ Ceniza} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100\%$$

**Muestra 1:**

$$\% \text{ Ceniza} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100\% = \frac{17,00500 - 16,90806}{17,94003 - 16,90806} \cdot 100\% = 9,39\%$$

**Muestra 2:**

$$\% \text{ de cenizas} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100\% = \frac{16,22885 - 16,13449}{17,13900 - 16,13449} \cdot 100\% = 9,39\%$$

**Promedio = 9,39%**

### 3.1.3 Determinación del contenido de materia volátil

La materia volátil, según la norma D3175 de la ASTM, se determina estableciendo la pérdida de peso de la muestra cuando se calienta bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo y atmósfera.

Esta prueba se realizará a dos muestras y finalmente se promedia el resultado.

A continuación se describe el procedimiento:

- Calentar los crisoles vacíos y sus tapas (Figura 14.), dejarlos enfriar en un desecador de 15 a 30 minutos, como se observa en la Figura 12. y pesarlos. Agregar aproximadamente un gramo de la muestra a los crisoles y pesarlos nuevamente.

- Poner en un crisol con tapa durante 7 minutos en un horno a 950C. El porcentaje de disminución de peso menos el porcentaje de humedad es equivalente a la materia volátil.

Figura 14. Crisol y tapa usados en la prueba de determinación del contenido de materia volátil



Fuente: los autores del proyecto.

**Cálculos:**

***Muestra 1:***

*Peso del crisol vacío =  $m_1 = 20,96109g$*

*Peso del crisol con la muestra =  $m_2 = 21,96213g$*

*Peso de la muestra después de salir del horno =  $m_3 = 21,55733g$*

***Muestra 2:***

*Peso del crisol vacío =  $m_1 = 21,35756g$*

*Peso del crisol con la muestra =  $m_2 = 22,36036g$*

*Peso de la muestra después de salir del horno =  $m_3 = 21,95002g$*

***Ecuación para calcular el porcentaje de materia volátil:***

$$\% \text{ Materia Volátil} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100\% - \% \text{ Humedad}$$

***Muestra 1:***

$$\% \text{ Materia Volátil} = \frac{21,96213 - 21,55733}{21,96213 - 20,96109} \cdot 100\% - 0,94 = 39,50\%$$

***Muestra 2:***

$$\% \text{ Materia Volátil} = \frac{22,36036 - 21,95002}{22,36036 - 21,35756} \cdot 100\% - 0,94 = 39,98\%$$

***Promedio = 38,74%***

Teniendo el contenido de humedad, de ceniza y materia volátil se calcula el contenido de carbono fijo, según la norma D3172 de la ASTM, de la siguiente forma:

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

$$\% \text{ Carbono Fijo} = 100\% - 0,94\% - 9,39\% - 38,74\% = 50,93\%$$

### **3.1.4 Determinación del poder calorífico**

El poder calorífico de la muestra se determina, según la norma D5865 de la ASTM, multiplicando el aumento de temperatura ajustada por efectos externos por la capacidad calorífica de la bomba calorimétrica (ver Figura 15.) y dividida en la masa de la muestra.

A continuación se describe el procedimiento:

- Calentar el crisol vacío, dejarlo enfriar en un desecador de 15 a 30 minutos, como se observa en la Figura 12. y pesarlo. Agregar aproximadamente un gramo de la muestra al crisol y pesarlo nuevamente.
- Poner la muestra en la bomba calorimétrica y presurizar a 30 atmósferas.

- Anotar la diferencia de temperatura desde que empieza la prueba hasta que termina.

Figura 15. Bomba calorimétrica



Fuente: los autores del proyecto.

**Cálculos:**

***Ecuación para el cálculo del poder calorífico:***

$$\text{Poder Calorífico} = \frac{(t_2 - t_1) \cdot E - e_1 - e_2}{m_2 - m_1}$$

**Donde:**

$$E = \text{capacidad calorífica de la bomba} = 5088,366 \frac{\text{Btu} \cdot \text{g}}{\text{lb} \cdot \text{C}}$$

$$e_1 = \text{corrección por la formación de carbonato de sodio} = 10 \frac{\text{Btu}}{\text{ml}} \cdot \text{ml carbonato}$$

$$e_1 = 10 \frac{\text{Btu}}{\text{ml}} \cdot \text{ml carbonato} = 10 \cdot 3,6 = 36 \text{Btu}$$

$$e_2 = \text{corrección por el alambre fusible} = 0,41 \frac{\text{Btu}}{\text{mm}} \cdot \text{mm alambre quemado}$$

$$e_2 = 0,41 \frac{\text{Btu}}{\text{mm}} \cdot \text{mm alambre quemado} = 0,41 \cdot 100 = 410 \text{Btu}$$

$$t_1 = \text{temperatura inicial} = 25,31\text{C}$$

$$t_2 = \text{temperatura final} = 28,03\text{C}$$

$$m_1 = \text{Peso del crisol vacío} = 6,25900\text{g}$$

$$m_2 = \text{Peso del crisol con la muestra} = 7,26900\text{g}$$

**Reemplazando:**

$$\begin{aligned} \text{Poder Calorífico} &= \frac{(28,03 - 25,31) \cdot 5088,366 - 36 - 410}{7,26900 - 6,25900} = 13291,74 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \\ &= 7367,63 \frac{\text{Cal}}{\text{g}} \end{aligned}$$

### 3.1.5 Determinación contenido de azufre

El contenido de azufre se determina, según la norma D3177 de la ASTM, por el método de lavado de la bomba calorimétrica donde el azufre se precipita como sulfato de bario el cual se filtra se incinera y se pesa.

A continuación se describe brevemente el procedimiento:

- Remover la bomba y abrir la válvula lentamente para despresurizar.
- Abrir la bomba y buscar material sin quemar, en caso de encontrar material sin quemar repetir la prueba.

- Lavar todas las partes del interior de la bomba con agua destilada mezclada con metil naranja hasta que no se observe ninguna reacción acida.
- Recoger el agua y valorar con carbonato de sodio para obtener la corrección por ácido para el poder calorífico.
- Ajustar el PH de 5.5 a 7 con hidróxido de amonio NH<sub>4</sub>OH diluido, calentar la solución hasta que hierva.
- Filtrar la solución.
- Según el procedimiento de la norma D3177, se prepara la solución hasta obtener el sulfato de bario precipitado, el cual se recoge en un filtro y luego se incinera a 800C para obtener el sulfato de bario.

**Cálculos:**

***Ecuación para el cálculo del porcentaje de azufre:***

$$\% \text{ Azufre} = \frac{(A - B) \cdot 13,78}{C}$$

***Donde:***

*A = Gramos de BaSO<sub>4</sub> precipitados = 0,07391g*

*B = Corrección de BaSO<sub>4</sub> = 0,000622g*

*C = Gramos de muestra usada = 1,01000g*

***Reemplazando:***

$$\% \text{ Azufre} = \frac{(0,07391 - 0,000622) \cdot 13,78}{1,01000} = 1\%$$

### 3.1.6 Resultados

En la tabla 1. se encuentran los resultados del análisis del contenido del carbón y una breve explicación de lo que este contenido representa para el proceso de combustión de los hornos colmena.

Tabla 1. Resultados de los análisis del carbón usado en los hornos colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.

Propiedades	Análisis
<b>% Humedad = 0,94%</b>	Este porcentaje de humedad es bajo, produciendo un beneficio para el proceso de quema. Se debe tener en cuenta que este porcentaje aumenta si el carbón se moja en la etapa de almacenamiento.
<b>% Cenizas = 9,39%</b>	Este porcentaje representa el material incombustible del carbón, se encuentra en el rango normal de los carbones térmicos colombianos.
<b>% Materia Volátil = 38,74%</b>	Este alto contenido de materia volátil facilita la ignición del carbón y beneficia la quema.
<b>% Carbono Fijo = 50,93%</b>	Este porcentaje representa la parte que no es volátil y se quema en estado sólido. Este resultado de carbono fijo se encuentra en un valor bueno comparado con otros carbones térmicos colombianos.
<b>Poder Calorifico = <math>13291,74 \frac{Btu}{lb}</math> = <math>7367,63 \frac{Cal}{g}</math></b>	Este porcentaje representa la cantidad de calor que se libera en una combustión completa. Este valor se encuentra entre el rango promedio de carbones térmicos de Colombia.
<b>% Azufre = 1%</b>	Este porcentaje representa impurezas y genera emisiones contaminantes. El valor encontrado es bajo en comparación con otros carbones térmicos colombianos.

Fuente: los autores del proyecto

Según la Tabla 2. el combustible utilizado por Ladrillos y Acabados S.A.S es un carbón bituminoso, alto en volátiles B. Este tipo de carbón es un carbón térmico con alto contenido energético y es apto para el proceso de cocción del ladrillo.

Tabla 2. Clasificación ASTM D388 de los carbones según su rango

Class/Group	Fixed Carbon Limits (Dry, Mineral-Matter-Free Basis), %		Volatile Matter Limits (Dry, Mineral-Matter-Free Basis), %		Gross Calorific Value Limits (Moist, <sup>B</sup> Mineral-Matter-Free Basis)				Agglomerating Character
	Equal or Greater Than	Less Than	Greater Than	Equal or Less Than	Btu/lb		Mj/kg <sup>C</sup>		
					Equal or Greater Than	Less Than	Equal or Greater Than	Less Than	
Anthracitic:									
Meta-anthracite	98	...	...	2	...	...	...	...	} nonagglomerating
Anthracite	92	98	2	8	...	...	...	...	
Semianthracite <sup>D</sup>	86	92	8	14	...	...	...	...	
Bituminous:									
Low volatile bituminous coal	78	86	14	22	...	...	...	...	} commonly agglomerating <sup>E</sup>
Medium volatile bituminous coal	69	78	22	31	...	...	...	...	
High volatile A bituminous coal	...	69	31	...	14 000 <sup>F</sup>	...	32.557	...	
High volatile B bituminous coal	...	...	...	...	13 000 <sup>F</sup>	14 000	30.232	32.557	
High volatile C bituminous coal	...	...	...	...	11 500	13 000	26.743	30.232	
					10 500	11 500	24.418	26.743	} agglomerating
Subbituminous:									
Subbituminous A coal	...	...	...	...	10 500	11 500	24.418	26.743	} nonagglomerating
Subbituminous B coal	...	...	...	...	9 500	10 500	22.09	24.418	
Subbituminous C coal	...	...	...	...	8 300	9 500	19.30	22.09	
Lignitic:									
Lignite A	...	...	...	...	6 300 <sup>G</sup>	8 300	14.65	19.30	}
Lignite B	...	...	...	...	...	6 300	...	14.65	

Fuente: ASTM International. Designation D388: Standard Classification of Coals by Rank. Pennsylvania, United States, 2011.

### 3.2 ESTUDIO DE LAS EMISIONES CONTAMINANTES

Para determinar las emisiones contaminantes producidas por el proceso se realizó un monitoreo isocinético del horno grande, debido a que los dos hornos no funcionan al mismo tiempo y el grande al tener mayor consumo de carbón presentará las emisiones más críticas del proceso.

A continuación, se relaciona la fuente fija de emisión atmosférica de la planta de la empresa LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S., ubicada en el Km 7 vía Mogotes, vereda Campo Hermoso, jurisdicción del municipio de San Gil, departamento de Santander, en la cual se realizó la evaluación isocinética de los contaminantes emitidos al aire exigidos por la normatividad vigente.

En la Tabla 3. se presentan las características de la fuente monitoreada en la planta objeto del monitoreo:

Tabla 3. Características de la fuente monitoreada

Característica	Unidades	Valor
Fuente	-	Horno tipo colmena
Proceso evaluado	-	Fabricación de productos de cerámica refractaria no refractaria y de arcilla
Tipo de proceso	-	Físico y continuo
Altura ducto de descarga	m	15.8
Diámetro equivalente del ducto	m	0.67
Longitud niples	m	0.45
Geometría chimenea	-	Rectangular
Existente según Res. 908/08	-	Si
Horas de trabajo	h/día	24
Días de trabajo	día/semana	4
Semanas de trabajo	Semana/mes	3
Combustible utilizado	-	Carbón mineral
Consumo de combustible	ton	21

Fuente: información suministrada por el cliente, datos de producción para una quema.

Los métodos de toma de muestra utilizados para el muestreo isocinético son:

- Método 1 (US EPA) Selección del sitio de muestreo, determinación del número de puntos y su localización.
- Método 2 (US EPA) Determinación de la velocidad de las emisiones y del flujo volumétrico en chimeneas o ductos con tubo pitot.
- Método 3 (US EPA) Análisis del porcentaje de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y el peso molecular seco, en los gases efluentes.
- Método 4 (US EPA) Determinación del contenido de humedad de los gases.
- Método 5 (US EPA) Determinación de emisiones de partículas.
- Método 6 (US EPA) Determinación de las emisiones de dióxidos de azufre - SO<sub>2</sub>.
- Método 7 (US EPA) Determinación de emisiones de óxidos de nitrógeno - NO<sub>2</sub>.

Durante las mediciones no se presentaron errores que alteren los resultados obtenidos.

Esta sección contiene el informe de la evaluación de los contaminantes emitidos al aire, provenientes de la combustión y otros procesos tales como material particulado (MP), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) expresados como dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), realizado el día 28 de julio de 2011 en la planta de la empresa LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S., ubicada en el km 7 vía Mogotes, vereda Campo Hermoso, jurisdicción del municipio de San Gil, departamento de Santander. El representante legal de la empresa es el Mauricio Berardinelli G. y el responsable operativo del proceso es el señor Orlando Vargas M. con identificación Cédula de Ciudadanía No. 91.070.726.

En las determinaciones se utilizaron los métodos de muestreo y de cálculo recomendados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US EPA).

Según lo establecido por el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica generada por Fuentes Fijas, el documento incluye la metodología seguida en la ejecución de los muestreos y su respectivo reporte de cálculos. De igual forma, se presenta una comparación de los resultados de las mediciones con las normas de emisión para el tipo de instalación.

### 3.2.1 Objetivos específicos de la medición

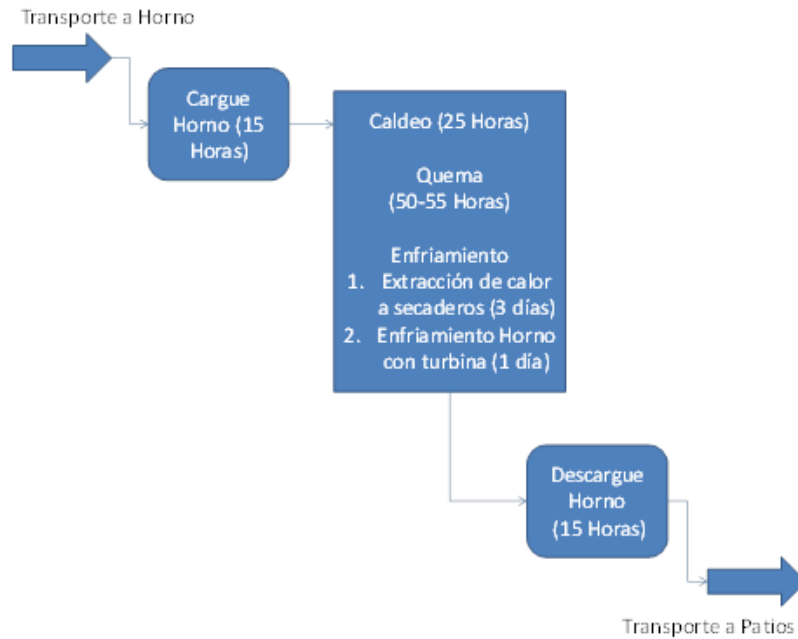
- Medir las siguientes variables por medio de muestreo Isocinético:
  - Gasto volumétrico en metros cúbicos por minuto ( $\text{m}^3/\text{min}$ ).
  - Composición porcentual en volumen de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ) y monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) en el gas efluente.
  - Porcentaje de humedad.
  - Velocidad de los gases de salida.
  - Temperatura de los gases de salida.
  - Emisión de partículas (MP) en kilogramos por hora ( $\text{kg}/\text{h}$ ).
  - Concentración material particulado (MP) en miligramos por metro cúbico ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ).
  - Emisión de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) en  $\text{kg}/\text{h}$ .
  - Concentración dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) en miligramos por metro cúbico ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ).
  - Emisión de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) en  $\text{kg}/\text{h}$ .
  - Concentración óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) en miligramos por metro cúbico ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ).
  - Porcentaje de isocinetismo.

### 3.2.2 Descripción del proceso e instalación

#### 3.2.2.1 Descripción del proceso

El tipo de proceso general de la planta es físico. En el proceso el horno es cargado y los bloques de arcilla a convertirse en ladrillo son llevados por un proceso de tres etapas, el caldeo con un tiempo aproximado de 25 horas, la quema con un tiempo aproximado de 50-55 horas, seguidos del enfriamiento y extracción de calor por medio de ventiladores; por último el horno es descargado. Figura 16. presenta un diagrama del proceso.

Figura 16. Diagrama general del proceso



Fuente: los autores del proyecto.

La descripción de las condiciones de chimenea incluyendo el flujo, velocidad, temperatura, presiones, contenido de humedad y composición de los gases de combustión se presentan a continuación:

Tabla 4. Caracterización de los gases de la chimenea por análisis de combustión

Contaminante	Concentración	Valor
CO <sub>2</sub>	%	7.92500
CO	%	0.02105
O <sub>2</sub>	%	12.50000
N <sub>2</sub>	%	79.55395

Nota: información obtenida con analizador de gases E8500.

Tabla 5. Condiciones de operación de la fuente

Característica de los gases de emisión	Unidades	Valor
Caudal de los gases en chimenea en condiciones de referencia base seca	m <sup>3</sup> /s	1.52
Velocidad	m/s	9.46
Humedad	%	5.62
Temperatura	°C	376.42
Presión absoluta	mmHg	620.77

Información obtenida en el muestro isocinético con consola Apex XC-572.

### 3.2.2.2 Descripción de la fuente de emisión

A continuación se relaciona la fuente fija de emisión atmosférica de la planta de la empresa LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S., a la cual se le realizó la evaluación isocinética de los contaminantes emitidos al aire. En la Tabla 6. se muestran las dimensiones.

Tabla 6. Dimensiones de la fuente evaluada

Característica	Unidades	Valor
Altura ducto de descarga	m	15.8
Diámetro Equivalente del ducto	m	0.67
Longitud niples	m	0.45
Geometría chimenea	-	Rectangular
Cercanía con perturbaciones antes del punto de toma de muestras	m	7.5
Cercanía con perturbaciones después del punto de toma de muestras	m	9.5

Fuente: los autores del proyecto.

La fuente evaluada no presenta sistema de control de emisiones atmosféricas. En la siguiente figura, se presenta esquema general de la chimenea.

Figura 17. Imagen de la fuente.



Fuente: los autores del proyecto.

### **3.2.3 Descripción del programa de medición**

#### **3.2.3.1 Descripción de los equipos y procedimientos**

En la presente sección es presentada una breve descripción de los equipos empleados para muestreo isocinético y análisis de laboratorio respectivo. El número de serie de cada uno de ellos se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 7. Número de serial de los equipos del muestreador isocinético y laboratorio

EQUIPO	NÚMERO DE SERIAL
Consola del muestreador isocinético APEX	0811078
Medidor de gas seco	1901037
Analizador ENERAC M500	510669
Balanza analítica digital OHAUS	8328240501
Espectrofotómetro GENESYS	2L5L366001
PHmetro HANNA	HI2211-01

Fuente: los autores del proyecto.

- **Muestreador Isocinético**

El equipo utilizado es un muestreador isocinético marca ÁPEX de referencia XC 572, la Figura 18. muestra un imagen del muestreador, el equipo ha sido diseñado cumpliendo con las especificaciones de la US EPA.

Funcionamiento: la corriente de gas es succionada a través de la boquilla (Nozzle), conducida por la sonda (Probe) hacia la caja caliente (hot box) donde las partículas pasan a través de un filtro, en donde son removidas de la corriente gaseosa, luego el gas caliente pasa a una caja fría (cold box) en donde se encuentran los impactadores. El equipo cuenta con un cordón umbilical el cual conduce el gas que sale de la caja fría hacia la consola, que contiene en su interior un manómetro para determinar la caída de presión a través de un orificio y otro que marca la diferencia de presión del tubo de Pitot en S, colocado junto con la boquilla en el interior de la chimenea; la succión para que el equipo funcione la realiza una bomba de vacío.

Figura 18. Muestreador isocinético marca ÁPEX de referencia XC 572



Fuente: Catalogo Apexinst. Disponible en  
< <http://www.apexinst.com/products/console-xc.htm> >

Los módulos de medición de gas constan de un medidor de gas seco en el cual se registra el volumen de aire succionado; cuenta con un caudal nominal de hasta 4.4 m<sup>3</sup>/h (2.6 cfm) en 25 mmH<sub>2</sub>O. La bomba con la cual cuenta el muestreador isocinético es una bomba de diafragma de doble cabezal.

La sonda de toma de muestra es estándar según el Método 5, con una longitud de 6 ft elaborada con acero inoxidable el cual resiste temperaturas máximas de 650 °C. El tren de impactadores básicamente cuenta con un total 4 impactadores (para el método 5), los dos primeros contienen cada uno 100 mililitros de agua destilada, el tercero se encuentra vacío y el ultimo contiene 200 gramos de sílice-gel. Estos impactadores se encuentran sumergidos en hielo el cual por diferencia de temperaturas causa condensación.

Otro tipo de vidriería se encuentra en el portafiltro el cual se encuentra en la caja caliente, y las conexiones entre los impactadores, los cuales deben pasar por una limpieza previa con jabón neutro. En la Figura 19. se muestra el portafiltro y los impactadores junto con sus conexiones:

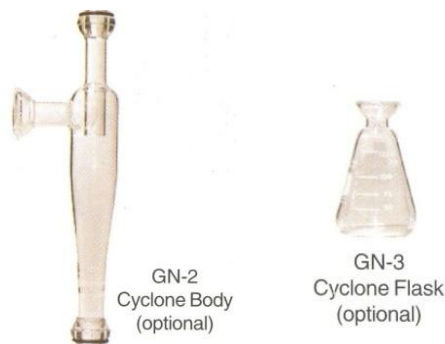
Figura 19. Portafiltro y tren de impactadores



Fuente: Ibíd.

Para la recuperación de muestras de material particulado en la sonda se emplean soluciones de lavado de alcohol isopropílico. El ciclón de vidrio es un equipo empleado ocasionalmente para recuperación de muestras de material particulado donde se presentan alto contenido de este, el ciclón se une al portafiltro con la sonda para así garantizar la seguridad del equipo:

Figura 20. Ciclón para recuperación de muestras



Fuente: Ibíd.

### • Instrumentos de laboratorio

Para la determinación del material particulado se utiliza una balanza digital OHAUS, en el cual mediante gravimetría se calcula la diferencia en peso con el fin de determinar posteriormente la concentración de material particulado. Para el análisis de soluciones de NO<sub>x</sub> según el método US EPA 7, se emplea un espectrofotómetro GENESYS el cual tiene la capacidad de proyectar un haz de luz monocromática a través de una muestra y medir la cantidad de luz que es absorbida por ésta, lo que permite indicar qué cantidad de la sustancia de interés está presente en la muestra. De igual manera, para el acondicionamiento del pH en

el análisis y elaboración de soluciones, se emplea de un pHmetro HANNA que tiene la capacidad de medir pH y temperatura simultáneamente, para la titulación en el análisis de soluciones de SO<sub>2</sub> según el método US EPA 8 se usan equipos volumétricos.

Figura 21. Instrumentos de laboratorio: a) Balanza Analítica, b) Espectrofotómetro y c) pHmetro



Fuente: ibíd.

- **Equipo analizador de gases de combustión**

Es un instrumento multifuncional, compacto tipo palm para la medición de diferentes tipos de gases. El equipo contiene un microprocesador que permite analizar el flujo de gas y un monitor de salida de resultados. Cuenta con dos sensores electroquímicos internos que miden la concentración del oxígeno y monóxido de carbono del gas. La temperatura del gas y del aire es usada para el análisis del gas con el fin de calcular la eficiencia, el exceso de aire y la concentración de CO.

Figura 22. Analizador ENERAC M 500



- **Métodos de toma de muestra y análisis**

Los métodos empleados para toma de muestras en el presente estudio fueron:

- Método 1 (US EPA) Selección del sitio de muestreo, determinación del número de puntos y su localización.
- Método 2 (US EPA) Determinación de la velocidad de las emisiones y del flujo volumétrico en chimeneas o ductos con tubo pitot.
- Método 3 (US EPA) Análisis del porcentaje de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), Oxígeno (O<sub>2</sub>), Monóxido de Carbono (CO) y el peso molecular seco, en los gases efluentes.
- Método 4 (US EPA) Determinación del contenido de humedad de los gases.
- Método 5 (US EPA) Determinación de emisiones de partículas.
- Método 6 (US EPA) Determinación de las emisiones de dióxidos de azufre - SO<sub>2</sub>.
- Método 7 (US EPA) Determinación de emisiones de óxidos de nitrógeno.

Los métodos empleados para análisis de laboratorio en el presente estudio fueron:

- Análisis de material particulado, US EPA, e-CFR, Título 40, Parte 60, Apéndice A3: Método 5
- Determinación de SO<sub>2</sub>, US EPA e-CFR Título 40, Parte 60, Apéndice A: Método 8
- Determinación de NO<sub>x</sub>, US EPA, e-CFR Título 40, Parte 60, Apéndice A: Método 7

La determinación y cálculos respectivos se inician con la verificación del cumplimiento de la localización de los toma muestras por parte del usuario, se sigue con la aplicación del método 1 US EPA y se continua con la determinación del peso molecular del gas.

En los siguientes numerales se describen los procedimientos de cálculo para el muestreo preliminar y definitivo con el fin de demostrar la trazabilidad de los valores obtenidos, según lo recomendado en los métodos citados.

### 3.2.3.2 Procedimiento de recuperación de la muestra y análisis de laboratorio

- **Material particulado**

Cada muestra debe estar previamente rotulada. Tras una inspección visual previa, cada filtro debe ser sometido a un proceso de acondicionamiento de 24 horas a condiciones ambiente controladas. Los filtros son posteriormente pesados en la balanza analítica y por el método de gravimetría se determina el peso de la muestra recolectada. Cada filtro debe ser debidamente almacenado en una caja de Petri antes y después del análisis. Método de referencia: análisis de material particulado, US EPA, e-CFR, Título 40, Parte 60, Apéndice A3: Método 5.

- **Análisis de soluciones en laboratorio**

Cada muestra debe ser rotulada. Para determinar la concentración de  $\text{SO}_2$ , se sigue mediante titulación en presencia de torina con equipo volumétrico. Para determinar la concentración de  $\text{NO}_x$ , se emplea el espectrofotómetro.

- **Estándares, blancos de campo y de análisis de control**

Para  $\text{SO}_2$  es realizado un blanco durante el análisis de la muestra, la titulación se realiza por duplicado, al repetir la titulación se verifica que las mediciones no difieran en más de 0.2 ml. El blanco se elabora con la misma cantidad y tipo de reactivo sólo que sin el analito.

Para  $\text{NO}_x$ , se preparan estándares 100, 200, 300 y 400  $\mu\text{g}$ , para calibrar el espectrofotómetro y calcular el factor de calibración. Se emplean patrones de control para verificar los resultados de la calibración en el espectrofotómetro.

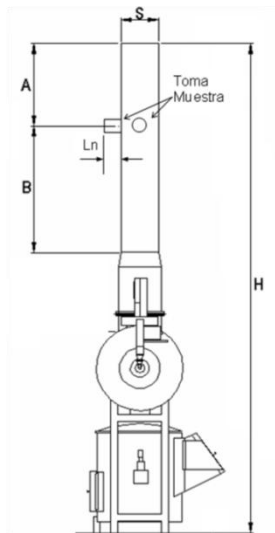
Para material particulado, se realiza el pesaje de filtro hasta peso constante (gravimetría), la diferencia entre los duplicados de cada pesaje no debe superar el 1% del pesaje inicial.

### 3.2.3.3 Localización del sitio de toma de muestra

La localización de los toma muestras (Niples) de las chimeneas evaluadas basan en los siguientes datos necesarios para calcular la ubicación adecuada de los toma muestras:

- S*: Diámetro equivalente de la chimenea.
- A*: Tramo recto desde los toma muestras hasta la última perturbación o cambio del flujo (en este caso la salida de los gases de la chimenea).
- B*: Tramo recto entre la última perturbación después de la salida de los gases de la fuente y los toma muestras.
- H*: Altura total de la chimenea, desde el piso.

Figura 23. Distribución de alturas en chimeneas



A partir de los datos anteriores, se puede calcular:

$$A_i = \frac{A}{S} \quad B_i = \frac{B}{S}$$

Dónde:

$A_i$ : Tramo recto, expresado en número de diámetros internos de chimenea, entre los toma-muestras y la última perturbación o cambio de dirección de flujo.

$B_i$ : Tramo recto, expresado como número de diámetros internos, entre la última perturbación después de la salida de los gases del hogar y los toma-muestras.

De la Tabla se toman los valores necesarios para la validación de la ubicación de los toma muestras en cada fuente evaluada, los cálculos se presentan en la Tabla

Tabla 8. Parámetros para la localización del sitio de toma de muestras

Parámetro	Unidades	Valor
H	m	15.8
S	m	0.67
B	m	7.5
A	m	9.5
$B_i$	-	11.19
$A_i$	-	14.18

Fuente: los autores del proyecto.

Basados en  $A_i$  y  $B_i$  se encuentra el número de puntos de muestreo en cada fuente evaluada como se observa en el Anexo 1 siguiendo el método 1 US EPA; en este también se establece como medida inicial que los toma muestras deben ser instalados a una distancia superior a 8 diámetros después de la última perturbación ( $B_i > 8$ ) o cambio de dirección de flujo, y 2 diámetros antes de la última perturbación o cambio de dirección de flujo ( $A_i > 2$ ), para la determinación del número de puntos aplicando la sección 11.2.1.1 del método 1 US EPA; pero cuando este requerimiento no se puede alcanzar en la fuente a ser medida se aplica la sección 11.2.1.2 del citado método y se corrobora la ausencia de flujo ciclónico.

### 3.2.4 Muestreo preliminar

En el muestreo preliminar para cada fuente evaluada se calculan los siguientes parámetros:

- Presión Absoluta en chimenea ( $P_s$ )
- Presión de medición ( $P_m$ )
- Volumen de gases medidos condiciones estándar ( $V_{mst}$ )
- Volumen vapor agua en impactadores y Sílice gel condiciones estándar ( $V_{wst}$ )
- Contenido de humedad en gases de chimenea ( $B_{ws}$ )
- Peso molecular del gas en condiciones de chimenea ( $M_s$ )
- Diámetro de la boquilla ( $\phi_n$ )
- Constante isocinética de trabajo ( $K$ )

### 3.2.5 Muestreo definitivo

Con base en el muestreo preliminar y el cálculo de variables se procede a realizar el muestreo isocinético definitivo.

Con base en los datos de campo obtenidos en el muestreo definitivo y los resultados de laboratorio, se procede a calcular los siguientes parámetros:

- Presión Absoluta en chimenea ( $P_s$ )
- Presión de medición ( $P_m$ )
- Volumen de gases medidos condiciones estándar ( $V_{mst}$ )
- Volumen vapor agua en impactadores y sílice gel condiciones estándar ( $V_{wst}$ )
- Contenido de humedad en gases de chimenea ( $B_{ws}$ )
- Peso molecular del gas en condiciones de chimenea ( $M_s$ )
- Velocidad del gas en la chimenea

- Porcentaje de isocinetismo
- Caudal de gases en condiciones de chimenea ( $Q_s$ )
- Caudal de gases húmedos en condiciones estándar ( $Q_{sts}$ )
- Caudal gases secos en condiciones de referencia ( $Q_{crd}$ )
- Volumen seco de gases muestreados y a condiciones de referencia ( $V_{mcr}$ )
- Concentración partículas en condiciones estándar ( $C_{st}$ )
- Peso de partículas recogidas en el filtro ( $M_f$ )
- Peso de partículas recogidas en lavado de sonda y material de vidrio ( $M_l$ )
- Concentración seca de partículas en condiciones de referencia ( $C_{crd}$ )

### 3.2.5.1 Emisión de material particulado (MP)

- **Concentración de partículas en base seca**

Para calcular la concentración de material particulado (MP) se utilizó el procedimiento contenido en el método 5 de la US EPA. Según el método citado, la concentración de MP se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{pst_{crd}} = \frac{M_n}{V_{mcr}}$$

Donde:

$C_{pst_{crd}}$ :	Concentración de MP a condiciones de referencia, en base seca en mg/m <sup>3</sup>
$M_n$ :	Masa neta de partículas contenida en el filtro más la contenida en el lavado de sonda en mg
$V_{crd}$ :	Volumen de la muestra de gas que pasó a través del medidor de gas seco a condiciones de referencia en m <sup>3</sup>

- **Emisión de MP en base seca y condiciones de referencia**

La emisión de MP a condiciones de referencia se encuentra aplicando la expresión:

$$E_{(pst)_{crd}} = \frac{C_{(pst)_{crd}} \times Q_{crd}}{1000000}$$

Q<sub>crd</sub>: Caudal a condiciones de referencia para el muestreo isocinético definitivo.

### 3.2.5.2 Emisión de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)

- **Concentración de SO<sub>2</sub> en base seca**

Para calcular la concentración de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) se utilizó el procedimiento contenido en el método 8 de la US EPA. Según el método citado, la concentración de SO<sub>2</sub> se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{(SO_2)_{crd}} = \frac{1}{1000} \cdot \frac{m_{SO_2}}{V_{mcrd}}$$

Donde:

$C_{(SO_2)_{crd}}$  : Concentración de SO<sub>2</sub> a condiciones de referencia, en base seca en mg/m<sup>3</sup>

$m_{SO_2}$  : Masa de SO<sub>2</sub> reportada por el laboratorio en g

$V_{mcrd}$  : Volumen de la muestra de gas que pasó a través del medidor de gas seco a condiciones de referencia en m<sup>3</sup>

- **Emisión de SO<sub>2</sub> en base seca y condiciones de referencia**

La emisión de SO<sub>2</sub> a condiciones de referencia se encuentra aplicando la expresión:

$$E_{(SO_2)_{crd}} = \frac{C_{(SO_2)_{crd}} \times Q_{crd}}{1000000}$$

$Q_{crd}$  : es el caudal a condiciones de referencia para el muestreo isocinético definitivo.

### 3.2.5.3 Emisión de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)

- **Concentración de NO<sub>x</sub> en base seca**

Para calcular la concentración de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) se utilizó el procedimiento contenido en el método 7 de la US EPA. Según el método citado, la concentración de NO<sub>x</sub> se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{(NO_x)crd} = 10^3 \frac{mg \times ml}{m^3 \times \mu g} \times \frac{m}{V_{crd}}$$

Donde:

$C_{(NO_x)crd}$  : Concentración de NO<sub>x</sub> a condiciones de referencia, en base seca en mg/m<sup>3</sup>

10<sup>3</sup> : Factor de conversión, en mg\*ml/m<sup>3</sup>\*μg

$m$  : Peso de la muestra de NO<sub>x</sub> analizada, en μg

$V_{crd}$  : Volumen muestra de gas a condiciones de referencia y base seca en ml

El volumen de gas a condiciones de referencia y base seca se calcula con la ecuación:

$$V_{crd} = \frac{T_{cr}}{P_{cr}} \times (V_{fr} - V_{ab}) \times \left[ \frac{P_f}{T_f} - \frac{P_i}{T_i} \right]$$

$T_{cr} = 25 \text{ °C ó } 537 \text{ °R.}$

$P_{cr} = 29.92 \text{ inHg.}$

Entonces  $V_{cr}$  es:

$$V_{crd} = (17,95 \frac{^{\circ}R}{\text{pulg. Hg}}) \times (V_{fr} - V_{ab}) \times \left[ \frac{P_f}{T_f} - \frac{P_i}{T_i} \right]$$

$V_{fr}$  : Volumen recipiente de muestreo y válvula en ml = 2345 ml

$V_{ab}$  : Volumen de la solución absorbente en ml

$P_f$  : Presión absoluta inicial en el recipiente de muestreo en inHg

$P_i$  : Presión absoluta final en el recipiente de muestreo en inHg

$T_f$  : Temperatura absoluta final en el recipiente de muestreo en °R

$T_i$  : Temperatura absoluta inicial en el recipiente de muestreo en °R

- **Emisión de  $\text{NO}_x$  en base seca y condiciones de referencia**

Para determinar la emisión de contaminantes se utiliza la siguiente ecuación:

$$E_{(\text{NO}_x)_{crd}} = \frac{C_{(\text{NO}_x)_{crd}} \times Q_{crd}}{1000000}$$

Donde:

$Q_{crd}$  : Caudal a condiciones de referencia

### 3.2.5.4 Corrección por oxígeno de referencia

Una vez calculadas las concentraciones a las condiciones de referencia de 25°C y 760 mmHg, éstas son corregidas por oxígeno de referencia que aplica en cada caso, para cada proceso evaluado establecido en la Resolución 909 de 2008 del MAVDT, en el Artículo 88 el cual establece la ecuación que debe emplearse como sigue:

$$C_{CR(O_2ref)} = C_{CR(X\%)} \times \left( \frac{21 - \%O_2 ref}{21\% - X\%} \right)$$

Donde:

$C_{CR(O_2ref)}$ : Concentración del contaminante a condiciones de referencia con la corrección de oxígeno, basado en el oxígeno de referencia de conformidad con lo establecido en la resolución.

$C_{CR(X\%)}$ : Concentración del contaminante a condiciones de referencia.

$\%O_2ref$ : Oxígeno de referencia de la medición, de conformidad con lo establecido en la resolución, en (%).

$X\%$ : Oxígeno medido a la salida de los gases, en (%).

### 3.2.6 Procedimientos de control y aseguramiento de la calidad

Para la determinación de material particulado se siguieron los métodos 1 a 5 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US EPA<sup>2</sup>). Antes de toda medición se realiza la calibración de la consola de medición (medidor de gas seco) por medio de un set de orificios certificados, la calibración se realiza según el procedimiento del método 5 de la US EPA.

En el proceso desarrollado se obtuvieron los siguientes resultados:

- Coeficiente del medidor de gas seco "Y Promedio"<sup>3</sup> = 0.977
- Constante del orificio del medidor " $\Delta H@$ " = 49.415 mmH<sub>2</sub>O

$$METRIC K' = \frac{0.3858 V_m Y (P_{bar} + \frac{\Delta H}{13.6}) \sqrt{T_{amb} + 273}}{P_{bar} (T_m + 273) \theta}$$

$$\Delta H@' = \frac{0.0319 \Delta H T_m \theta^2}{P_{bar} Y^2 V_m^2}$$

<sup>2</sup>Siglas en inglés de United States Environmental Protection Agency

<sup>3</sup> La tolerancia para valores individuales del factor de calibración Y es de  $\pm 0.02$

$$V_{m(std)} = \frac{K_1 V_m (P_{bar} + \frac{\Delta H}{13.6})}{T_m}$$

$$Y = \frac{V_{cr(std)}}{V_{m(std)}}$$

$$V_{cr(std)} = \frac{K' P_{bar} \theta}{T_{amb}}$$

Donde:

- K': Coeficiente del orificio certificado en (m<sup>3</sup>\*K<sup>1/2</sup>)/(mmHg\*min)
- V<sub>m</sub>: Volumen medido en el medidor de gas seco (MGS) en m<sup>3</sup>
- Y: Factor de calibración del MGS adimensional
- P<sub>bar</sub>: Presión barométrica en mmHg
- ΔH: Diferencia de presión del MGS en mmH<sub>2</sub>O
- T<sub>amb</sub>: Temperatura ambiente en °C
- T<sub>m</sub>: Temperatura del MGS en °C
- θ: Tiempo de medición en min
- ΔH@: Constante del orificio del MGS en mmH<sub>2</sub>O
- V<sub>m(std)</sub>: Volumen medido en el MGS a condiciones estándar en m<sup>3</sup>
- K1: 0.3858 K/mmHg para unidades métricas
- V<sub>cr(std)</sub>: Volumen de gas que paso a través del orificio crítico corregido a condiciones estándar en m<sup>3</sup>

- La relación entre el factor de calibración (Y) versus la tasa de flujo estandarizada y corregida.
- La relación entre la caída de presión del orificio del medidor de gas seco versus la tasa de flujo estandarizada y corregida.

Seguido de la calibración se precisó la localización del sitio de muestreo y luego se determinó la distribución y número de puntos a muestrear por diámetro interno de chimenea según el método 1 de la US EPA. Posteriormente se realizaron de manera

paralela los métodos 2 (que consiste en la determinación de la velocidad de las emisiones y del flujo volumétrico en chimeneas o ductos con tubo Pitot) y 4 de la US EPA (que consiste en la determinación del contenido de humedad en los gases de la chimenea), para conocer las condiciones de trabajo, estableciendo así los parámetros necesarios y obtener condiciones de isocinetismo.

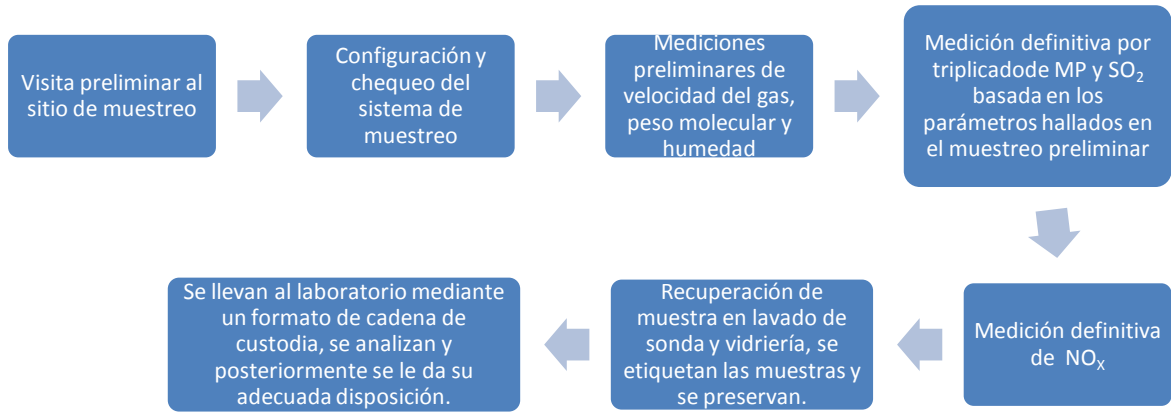
Precisadas las condiciones de trabajo se procedió a realizar el muestreo definitivo en cada punto en que se dividió hipotéticamente el diámetro del ducto de la chimenea, se hicieron mediciones para tiempos de muestreo de cinco (5) minutos, para un tiempo total aproximado de sesenta (60) minutos.

El porcentaje de isocinetismo determinó la validez de los muestreos. Se aceptan como muestreos isocinéticos válidos aquellos cuyos porcentajes se encuentren entre 90% y 110%.

La humedad de los gases se midió por condensación y recolección en agua destilada y absorción en sílice gel. Al igual que en los muestreos preliminares, en los muestreos definitivos la humedad se determinó aplicando el método 4 de la US EPA. La determinación de dióxido de azufre  $\text{SO}_2$  se realiza simultánea a la medición de material particulado como lo indica la sección 6.1.1 del método 6 US EPA, para la medición de  $\text{NO}_x$  se desarrolló el muestreo no isocinético usando 4 balones.

A continuación, es presentado un diagrama general donde se incluyen actividades específicas para la recuperación, etiquetado, manipulación, control y preservación de las muestras, así como análisis y almacenamiento.

Figura 24. Diagrama general de un muestreo isocinético



Fuente: los autores del proyecto.

### 3.2.6.1 Validación de datos

Para validar los datos suministrados tras la medición se sigue:

Tabla 9. Procedimiento para validación de datos

ACTIVIDAD	SI	NO
Comparación de los datos diligenciados en campo y los enviados en digital	X	
Visita preliminar o de inspección	X	
Verificación del % de Isocinetismo	X	
Verificación de variables de calibración (dentro del rango de calibración)	X	
Verificar que no falte información en los formatos de campo y que sea veraz	X	

Fuente: los autores del proyecto.

### 3.2.6.2 Auditoria de la medición

Los chequeos realizados antes durante y después de la medición son satisfactorios, los datos de campo fueron verificados y no se obtuvieron hallazgos para las mediciones que se reportan en este informe.

### 3.2.6.3 Reporte de errores

Durante el muestreo y el tiempo posterior a la medición, no se reportan errores por pérdida o alteración de la muestra, los filtros se encontraban en buen estado, se realizó el lavado de sonda en cada determinación, los reactivos usados fueron del

grado de pureza adecuado y no se presentaron eventos que provocaran pérdida o contaminación de las muestras.

El porcentaje de isocinetismo se mantuvo dentro de los rangos establecidos, todos los equipos y procedimientos usados se encuentran acordes a las exigencias de los métodos citados y las muestras fueron tomadas a un porcentaje de operación acorde con las exigencias de la Resolución 909 de 2008 del MAVDT. El laboratorio no reporta errores durante el análisis.

### 3.2.7 Altura de la chimenea

De acuerdo al Artículo 70 de la Resolución 909 del 2008, se adopta la aplicación de Buenas Prácticas de Ingeniería (BPI) para la determinación de la altura de la chimenea, metodología que obedece al análisis de diferentes variables que involucran las condiciones del entorno de la fuente de emisión. Dentro de estas condiciones, la empresa objeto del presente estudio aplica para el caso de procesos o instalaciones existentes, donde la altura resultante de la aplicación se determina mediante la siguiente ecuación:

$$H_T = 2.5 \times H_e$$

Dónde:

HT: Altura de la chimenea medida desde el nivel del terreno en la base de la chimenea hasta el borde superior de la misma.

He: Altura de la estructura en el punto en el cual se encuentra ubicado el ducto o chimenea.

Para la fuente muestreada, las relaciones en altura son:

Tabla 10. Aplicación de Buenas Prácticas de Ingeniería

$H_T$ (m)	$H_e$ (m)	Relación $H_T/H_e$ según BPI	Relación $H_T/H_e$ obtenida	Altura proyectada de la chimenea (m)	Cumplimiento metodología
17.0	7.0	2.5	2.43	17.5	NO

Fuente: los autores del proyecto.

### 3.2.8 Reporte de resultados y comparación con la norma

En la Tabla . Se presentan los estándares de emisión admisibles según la actividad evaluada y el contaminante requerido.

Tabla 11. Estándares de emisión admisible según Resolución 909/08

Artículo	Actividad Industrial	Oxígeno de referencia	Combustible	Contaminante según Res. 909/08	Norma [mg/m <sup>3</sup> ]
Artículo 30	Fabricación de productos de cerámica refractaria no refractaria y de arcilla	18%	Sólido	MP	250
				SO <sub>2</sub>	550
				NO <sub>x</sub>	550

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución número 909: 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. Colombia, 2008. p.17.

Dado que todos los estándares máximos en la Resolución 909 de 2008 están establecidos a condiciones de referencia de 25°C, 760 mmHg y oxígeno de referencia que depende del tipo de actividad industrial; los resultados obtenidos a condiciones locales fueron corregidos a dichas condiciones.

A continuación se muestran los resultados de flujo másico y concentración obtenidos a condiciones de referencia para MP (material particulado), SO<sub>2</sub> (dióxido de azufre) y NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno) de la fuente evaluada, las concentraciones presentadas en la Tabla no se encuentran corregidas por oxígeno de referencia.

Para la fuente evaluada, los resultados de SO<sub>2</sub> no son presentados por reportarse en el laboratorio cantidades inferiores al Límite de Detección del Método (LDM).

Tabla 12. Resultados de flujo másico y concentración para MP, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>

Concentración MP <sub>(ref)</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Flujo Másico MP <sub>(ref)</sub> [kg/h]	Concentración SO <sub>2(ref)</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Flujo Másico SO <sub>2(ref)</sub> [kg/h]	Concentración NO <sub>x(ref)</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	Flujo Másico NO <sub>x(ref)</sub> [kg/h]
930.24	5.10	<LDM	<LDM	64.24	0.35

Fuente: los autores del proyecto.

En la Tabla 13. se muestran las concentraciones de cada uno de los contaminantes MP, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> con la corrección de oxígeno de referencia aplicable.

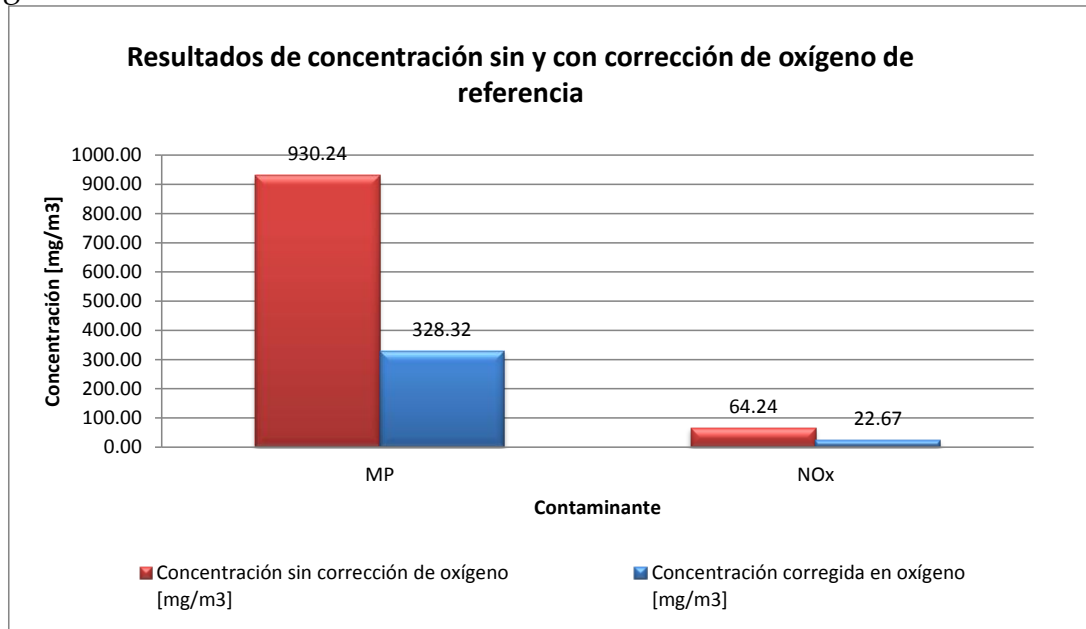
Tabla 13. Resultados de concentración de MP, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> con corrección de oxígeno de referencia

Fuente	Concentración MP. [mg/m <sup>3</sup> ]	Concentración SO <sub>2</sub> . [mg/m <sup>3</sup> ]	Concentración NO <sub>x</sub> . [mg/m <sup>3</sup> ]
Horno colmena	328.32	<LDM	22.67

Fuente: los autores del proyecto.

En la Figura 25. se observan de manera gráfica las concentraciones de los contaminantes MP y NO<sub>x</sub> a condiciones de referencia sin y con corrección de oxígeno de referencia para la fuente evaluada, los resultados de SO<sub>2</sub> no son presentados por reportarse en el laboratorio cantidades inferiores al Límite de Detección del Método (LDM), este límite es 137,5 mg/m<sup>3</sup>.

Figura 25. Concentración de contaminantes a condiciones de referencia y con y sin oxígeno de referencia



Fuente: los autores del proyecto.

Mediante la caracterización de los gases de chimenea a través del análisis de combustión, la fuente reporta un 12.5% de oxígeno en promedio, valor menor comparado con el porcentaje de oxígeno de referencia del 18% establecido en el Artículo 30° de la Resolución 909 de 2008. Este valor presentado en el gas de emisión disminuye las concentraciones de los contaminantes en un 64.7% cuando son corregidas por el oxígeno de referencia respecto al valor sin corrección por oxígeno de referencia, como se observa en la Figura 23.

En la Tabla 14. se presenta la comparación *Indicativa* de los resultados con la normatividad vigente, las Unidades de Contaminación Atmosférica (UCA) y la frecuencia de evaluación de los contaminantes evaluados, acatando las disposiciones de la Resolución 909 de 2008 y el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica generada por Fuentes Fijas versión 2.

Tabla 14. Comparación con la normatividad y Unidades de Contaminación Atmosférica (UCA)

Fuente	Cont.	Conc. Prom. [mg/m <sup>3</sup> ]	Norma [mg/m <sup>3</sup> ]	UCA	Comparación respecto a la norma [%]	Frecuencia de monitoreo [Año]	Cumple
Horno colmena	MP	328.32	250.00	1.3133	131.33	½ (6 meses)	NO CUMPLE
	SO <sub>2</sub>	<LDM	550.00	<0.25	ND	3	CUMPLE
	NO <sub>x</sub>	22.67	550.00	0.0412	4.12	3	CUMPLE

Fuente: los autores del proyecto.

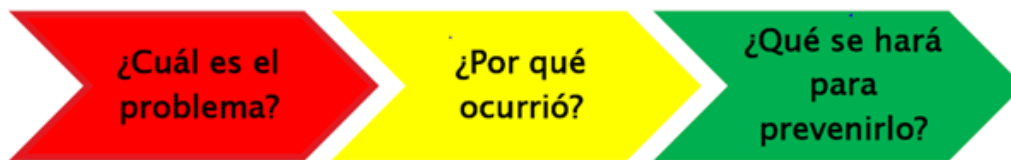
## 4. ANÁLISIS CAUSA-RAÍZ

El análisis causa-raíz es una secuencia lógica de pasos que llevan al investigador a través del proceso de aislar los hechos que rodean un evento o problema. Una vez el problema este definido, el análisis sistemáticamente determina el mejor curso de acción para resolver el problema.

“La práctica de la RCA se basa en el supuesto de que los problemas se resuelven mejor al tratar de corregir o eliminar las causas raíz, en vez de simplemente tratar los síntomas evidentes de inmediato.”<sup>4</sup>

“Dentro de una organización, la resolución de problemas, la investigación de incidentes y el análisis de causa raíz están conectados fundamentalmente por tres preguntas básicas:”<sup>5</sup>

Figura 26. Metodología básica para hacer un RCA



Fuente: ESPINOSA, Fernando. Análisis Causa Raíz (RCA).

A pesar de la aparente disparidad en cuanto al propósito y la definición entre las diferentes “escuelas” de análisis de causa raíz, Fernando Espinosa plantea algunos principios generales que podrían ser considerados como universales.

- Realizar la ejecución de medidas de mejoramiento en las causas raíz es más efectivo que simplemente tratar los síntomas de un problema.
- Para ser eficaz, el RCA debe realizarse de forma sistemática, con conclusiones y causas respaldadas por pruebas documentadas.
- Generalmente hay más de una causa potencial de un determinado problema.
- Para ser eficaz, el análisis, debe establecer todas las relaciones causales conocidas entre la causa(s) y el problema definido.

<sup>4</sup> ESPINOSA, Fernando. Análisis Causa Raíz (RCA) [en línea]. [Citado 7 abril, 2011]. Disponible en < [http://ing.utalca.cl/~fepinoso/ANALISIS%20CAUSA%20RAIZ%20%20\(RCA\).pdf](http://ing.utalca.cl/~fepinoso/ANALISIS%20CAUSA%20RAIZ%20%20(RCA).pdf) >.

<sup>5</sup> Ibíd.

- Análisis de causa raíz transforma una antigua cultura que reacciona a los problemas a una nueva cultura que resuelve los problemas antes de que se intensifiquen, creando una reducción de la variabilidad y una actitud para evitar riesgos.

#### 4.1 EL MÉTODO DEL MAPEO DE LA CAUSA EN EL ANÁLISIS CAUSA RAÍZ

Este método está enfocado en trabajar todas las causas sin enfocarse en una sola. Obteniendo como resultado un mapa de causas que proporciona una explicación visual simple de todas las causas del problema

Existen tres pasos básicos para usar este método<sup>6</sup>:

- a. Definir el problema por su impacto a las metas globales.
- b. Analizar las causas en un mapa visual.
- c. Prevenir o mitigar cualquier impacto negativo en los objetivos seleccionando las soluciones más eficaces.

##### 4.1.1 Mapa de causas

Un Mapa de Causas proporciona una explicación visual de por qué se produjo un incidente (Figura 27.). Conecta una relación individual causa-efecto para revelar el conjunto de causas de un problema. Un Mapa de causa puede ser muy básico y puede ser muy detallado en función del asunto en cuestión.

Figura 27. Relación causa-efecto, bloque constructivo



Fuente: ESPINOSA, Fernando. Análisis Causa Raíz (RCA).

---

<sup>6</sup> Ibíd.

Para leer un mapa de causas se inicia por la izquierda. Leer hacia la derecha diciendo que "fue causada por" en lugar de las flechas. La investigación de una falla comienza con el problema y luego se retrocede hacia las causas por las preguntas "¿Por qué?".

#### 4.2 ANÁLISIS CAUSA RAÍZ DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS COLMENA DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.

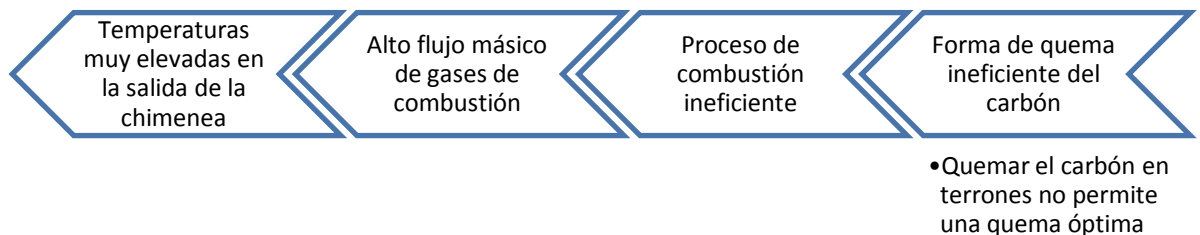
En esta sección se realiza un análisis causa-raíz de los problemas evidenciados en proceso de combustión de los hornos colmena.

Figura 28. Mapa de causas del proceso de combustión de los hornos colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.

- a. Problema: Incumplimiento de la norma por altas emisiones de material particulado.



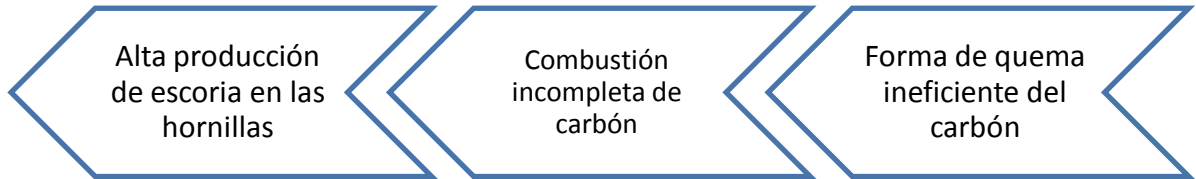
- b. Problema: Incumplimiento de la norma por temperaturas muy elevadas en la salida de la chimenea.



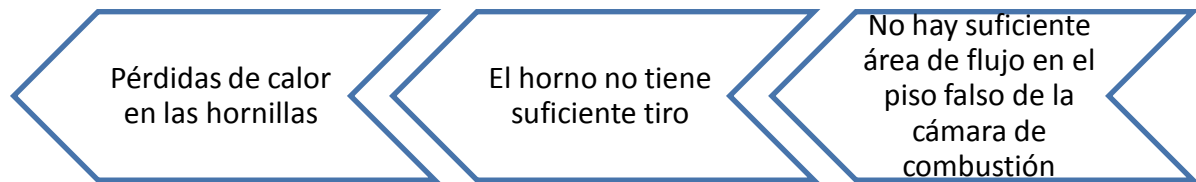
Fuente: los autores del proyecto

Figura 28.(Continuación)

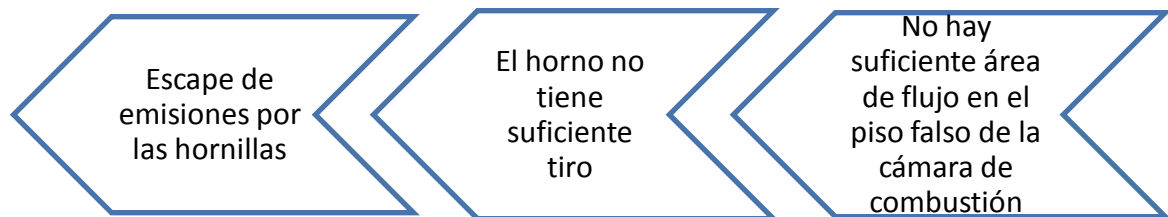
c. Problema: Alta producción de escoria en las hornillas de alimentación.



d. Problema: Pérdidas de calor en las hornillas, este problema solo se evidenció en el horno grande.



e. Problema: Escape de emisiones por las hornillas de alimentación del horno este problema solo se evidenció en el horno grande.



Fuente: los autores del proyecto

De lo anterior se obtiene que las causas principales de los problemas del proceso de combustión de los hornos colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. son: la forma como se está quemando el combustible (quema del carbón en pedazos grandes), y la restringida área de flujo para la salida de los gases de combustión de la cámara. En el capítulo 6. se propondrá una alternativa para la mejora del proceso.

## 5. CCTA

Una alternativa para lograr tecnologías más limpias que mejoren tanto la eficiencia, (aumentando la cantidad de energía aprovechada de cada tonelada de combustible) como la tolerancia ambiental en el uso del carbón, es la obtención de un combustible no convencional como el CCTA (mezcla densa de carbón pulverizado disperso en emulsiones de combustóleo o crudo pesado y agua).

Este nuevo combustible, comprende mezclas de fuel oil y carbón pulverizado en una proporción de 70:30 respectivamente, lo que corresponde al 70% total de la mezcla y el 30% restante es agua, el tensoactivo utilizado es de 3000 ppm. La reducción de tamaño del carbón se trabaja en un sistema de molienda en circuito cerrado en húmedo, en forma bimodal, para asegurar tamaños de partícula menores de 74  $\mu\text{m}$  (micras).<sup>7</sup>

Tabla 15. Comparación de algunas variables de operación del CCTA con otros combustibles.

VARIABLE	CCTA	CRUDO DE CASTILLA	FUEL OIL
Velocidad del flujo (m <sup>2</sup> /min)*100	1 9682	1 7461	1 2112
Energía generada (Mjoule/h)	3,270,6 2	3,692,64	3,270,62
Temperatura ambiente de horno (K)	1,573 - 1,623	1,573 - 1,723	1,523 - 1,623
Oxígeno residual (%)	1 - 2,0	2	3,5
Presión diferencial (kPa)	172,37	68,95	103,42
Temperatura de combustible (K)	299	333	358
Temperatura de combustible de la hornilla	299	373	393
Longitud de la llama (m)	0,91 - 1,52	0,91 - 1,52	0,91 - 1,52
Presión de vapor en la hornilla (kPa)	496,42	675,68	703,26
Presión de vapor de combustión en la hornilla (kPa)	324,05	606,73	599,84

Fuente: CT&F Ciencia Tecnología y Futuro Vol.1Núm. 5, Dic. 1999.

<sup>7</sup>Revista Energética. Diagnóstico técnico de carbones térmicos para la obtención del combustible CCTA en Boyacá. Medellín. Julio,2007, no. 37. ISSN 01209833.

## 5.1 VENTAJAS DEL USO DEL COMBUSTIBLE CCTA

- No se autoinflama en el almacenamiento.
- No genera partículas al transportarlo
- En un proceso de combustión disminuyen las temperaturas en el horno, el combustible sin quemar y las emisiones de NOx.

## 5.2 TÉCNICA DE PRODUCCIÓN DE EMULSIONES TIPO CCTA

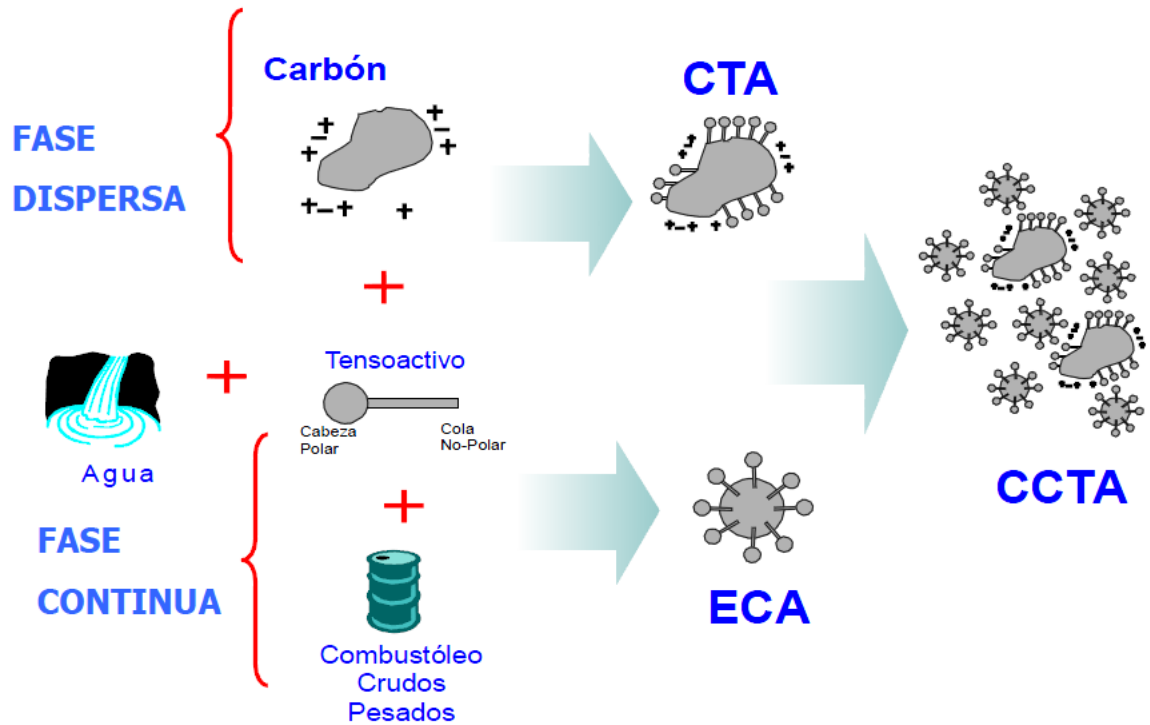
Según el trabajo de grado: Estudio de factibilidad técnico-económico para la utilización de combustible líquido CCTA, a partir de carbones de las minas de San Luis (Santander), como combustible sustituto de los hidrocarburos empleados en las calderas de la Gerencia Complejo Barrancabermeja<sup>8</sup>, la técnica de las emulsiones incluye 5 etapas:

- **Formulación:** determinar las relaciones óptimas de hidrocarburos, fijar la cantidad de aditivo y establecer el tamaño de partícula y porcentaje en peso adecuado (30-40%) de carbón pulverizado; de igual manera determinar el rango de temperatura adecuado para la preparación con el fin de garantizar una emulsión estable.
- **Formación:** El proceso de formación de la emulsión involucra diversos métodos de mezclado que garantizan bajas viscosidades, distribución y tamaño de partículas:
  - Mezclado estático o dinámico en línea.
  - Mezclado dinámico en tanques.
  - Sistemas mixtos de mezclado.

---

<sup>8</sup> MARTINEZ, Fabian y LOZA, Carlos. Estudio de factibilidad técnico-económico para la utilización de combustible líquido CCTA, a partir de carbones de las minas de San Luis (Santander), como combustible sustituto de los hidrocarburos empleados en las calderas de la Gerencia Complejo Barrancabermeja. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2007. 403 p.

Figura 29. Mecanismo de formación del CCTA



Fuente: Presentación “combustibles no convencionales para la industria”. Jorge Luís Grosso Vargas. 2004.

- **Caracterización:** esta asegura su calidad tanto en la etapa de preparación como en su utilización. Las propiedades más importantes en la caracterización de una emulsión son:
  - Relación combustóleo/agua.
  - Distribución del tamaño de la partícula.
  - Temperatura.
  - Viscosidad de la fase dispersa (mezcla de carbón y tensoactivo).
  - Densidad de la emulsión.
  - Composición de la fase continua (gotas de combustóleo y agua).
  - Tamaño de partícula del carbón pulverizado, poder calorífico y contenido de azufre del mismo.
- **Transporte:** El manejo a través de tubería y equipos de bombeo garantiza la estabilidad de la emulsión y de sus propiedades.
- **Combustión:** Para que exista una buena combustión se debe proveer un sistema de atomización óptimo.

## 6. PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN

Basados en el diagnóstico del proceso y en el análisis causa raíz se propone lo siguiente:

- **Implementar quemadores de carbón pulverizado para la quema del carbón.** El carbón que se usa actualmente es de buena calidad, pero la forma de quema en bloques grandes no permite una combustión eficiente del mismo. La implementación de carbón pulverizado aumenta el área superficial y por tanto se aumenta la eficiencia de combustión.

### **Ventajas:**

- Aumento de la eficiencia del proceso de combustión.
  - Disminución del consumo de carbón.
  - Disminución del flujo másico de gases de combustión.
  - Disminución de costos de producción al disminuir el consumo.
  - Disminución de emisiones de material particulado.
  - Disminución de la temperatura de salida de la chimenea como consecuencia de disminuir el flujo de gases de combustión.
- 
- **Aumentar el área de flujo de los gases de combustión en la cámara (piso falso).** De esta forma será posible mejorar el tiro para disminuir las emisiones de contaminantes y pérdidas de calor por las hornillas de alimentación del horno.
  - Otra alternativa para aumentar el tiro del horno grande es **implementar un sistema de tiraje artificial usando un ventilador.**
  - **Mejorar las condiciones de almacenamiento del carbón de la siguiente forma:**
    - El suelo debe estar nivelado, firme, sin grietas y drenado.
    - No apilar carbón húmedo con seco.
    - Los carbones de distinta procedencia no se deben mezclar.
    - Se deben tener pilas poco profundas con salida de gases.
    - Para el carbón pulverizado se debe tener controlada la temperatura de la pila.

- **Evaluar el plan de manejo ambiental en lo referente al tema de emisiones,** donde se deben evaluar los objetivos de la organización, planes de cumplimiento y programación de estudios de seguimiento y control.

## CONCLUSIONES

- El mayor flujo de contaminante obtenido a condiciones de referencia es el de MP con un valor de 5.10 kg/h, seguido del de NO<sub>x</sub> con un valor de 0.35 kg/h y finalmente el flujo más bajo corresponde a SO<sub>2</sub> pero su valor no se determina ya que el resultado del laboratorio reporta cantidades inferiores al límite de detección del método.
- Mediante la caracterización de los gases de chimenea a través del análisis de combustión, la fuente reporta un 12.5% de oxígeno en promedio, valor menor comparado con el porcentaje de oxígeno de referencia del 18% establecido en el Artículo 30° de la Resolución 909 de 2008. Este valor presentado en el gas de emisión disminuye las concentraciones de los contaminantes en un 64.7% cuando son corregidas por el oxígeno de referencia respecto al valor sin corrección por oxígeno de referencia, como se observa en la Figura .
- Adicional al las emisiones de contaminantes el Capítulo X de la Resolución 909 de 2008 en su Artículo 33 establece para hornos discontinuos una temperatura de salida de los gases límite de 250 °C, para el momento de la medición la temperatura de salida de los gases en la chimenea fue de 376.42 °C por lo cual la instalación presenta una temperatura de salida de los gases superior a dicho parámetro.
- Los análisis de SO<sub>2</sub> resultaron no detectables por el método lo cual concluye que no existen problemas por este contaminantes, debido al tipo de combustible, es importante aclarar que el resultado es atípico y se deberían esperar resultados de la emisión de este contaminante. Lo anterior fue revisado minuciosamente obteniendo los mismos resultados. En próximos monitoreos se debe hacer seguimiento a los resultados de esta variable.
- Los niveles de NO<sub>2</sub> presentan cumplimiento de la normatividad existente, este resultado se esperaba porque las temperaturas del horno no son tan elevadas como para favorecer la formación de este contaminante.
- Los niveles de material particulado obtenidos en la fuente presentan sobrepaso del 31% de la legislación aplicable no cumpliendo en este parámetro y generando a su vez una obligatoriedad en la realización de monitoreos cada 6 meses con reporte a la autoridad ambiental competente.

- Para determinar la altura de descarga de la fuente evaluada se aplican las BPI (Buenas Prácticas de Ingeniería), considerando la relación de alturas HT/He > 2.5 como cumplimiento en lo que respecta a las instalaciones existentes. Para la fuente evaluada, la relación de alturas se encuentra en un nivel menor al permisible respecto al criterio de Buenas Prácticas de Ingeniería para la altura de descarga.
- Durante la realización del proyecto se descartó la idea de implementar el uso del combustible CCTA debido a que la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S no cuenta con los medios para producir este tipo de combustible.
- El análisis causa-raíz (RCA) es una herramienta útil para solucionar todo tipo de problemas, sin embargo su uso no es muy común por fuera del área de mantenimiento.
- El carbón utilizado por la empresa, proveniente de Tópaga, en el departamento de Boyacá, es un carbón bituminoso alto en volátiles B con un contenido de 0,94% de humedad, 9,39% de cenizas, 38,74% de materia volátil y 1% de azufre. Además su poder calorífico neto es de 7367,63 cal/g (13291,74 Btu/lb). Estas propiedades lo hacen apto para el proceso de cocción de ladrillos usando un sistema de inyección de carbón pulverizado.

## RECOMENDACIONES

- Aunque los niveles de oxígeno presentados favorecen las emisiones es necesario ponderar si esto afecta la eficiencia del proceso luego del ajuste del mismo, lo anterior debe ser revisado realizando diferentes mediciones de oxígeno durante todas las etapas con el fin de llegar a conclusiones al respecto.
- Evaluar la implementación de un sistema o metodología que disminuyan las pérdidas de calor que se presentan en las puertas de alimentación del horno, con esto se obtendrá menores consumos de combustible y emisión de gases.
- Se debe desarrollar un manual de operación y mantenimiento del equipo que incluya:
  - ✓ Documentación del proceso donde se especifiquen las capacidades operativas del horno.
  - ✓ Planos de detalle.
  - ✓ Guías procedimentales que incluyan:
    - Alimentación y carga del horno durante el proceso de producción, en este numeral deben estar estandarizadas las rutinas de alimentación de combustible del sistema y consumos según la etapa del proceso.
    - Procedimiento de mantenimiento que incluya la programación de rutinas y frecuencias.
    - Programa de capacitación para operadores del sistema
- Con base en el uso del sistema y demanda del producto, diseñar un cronograma de operación que mejore los tiempos de proceso con el fin de determinar capacidades operativas del sistema de manera concreta y óptima.
- Implementar de un programa de seguridad industrial y salud ocupacional que mejore las condiciones de los trabajadores y disminuya la probabilidad e índices de accidentabilidad y enfermedades ocupacionales. Se recomienda realizar un panorama de riesgos de todo el proceso en conjunto con la ARP.

- Evaluar el plan de manejo ambiental en lo referente al tema de emisiones, donde se deben evaluar los objetivos de la organización, planes de cumplimiento y programación de estudios de seguimiento y control.
- Instalación de una plataforma que facilite la realización de los monitoreos isocinéticos y mejore las condiciones de seguridad de la operación.
- Implementar las recomendaciones realizadas en el estudio con el fin de garantizar un óptimo proceso que conlleve a la disminución de emisiones y menores costos de operación y mantenimiento.
- Aunque no se presentaron concentraciones de SO<sub>2</sub> detectables se debe realizar seguimiento a este contaminante luego de los ajustes a ser realizados al sistema.
- Mejorar el proceso a través de las rutinas de alimentación, funcionamiento y mantenimiento del horno, la cuales siempre deben ser monitoreadas buscando la menor concentración de oxígeno en los gases de salida.
- Realizar un análisis de las propiedades del carbón usado con mayor regularidad para asegurar el proceso de combustión.
- Evaluación de la eficiencia de combustión del sistema, el cual debe ser comparado respecto a los resultados nominales del proceso, con el fin de determinar la diferencia y posibilidades de ajuste.
- Luego de realizadas las anteriores propuestas se debe volver a monitorear el horno con el fin de determinar la disminución de concentraciones de material particulado y contar con la brecha de cumplimiento respecto a la norma.
- Evaluar la viabilidad del uso de los gases de combustión para el secado de productos.
- Evaluar la viabilidad de uso de gas natural, ACPM u otros combustibles en el proceso de cocción de ladrillos y cerámicos.

## BIBLIOGRAFÍA

- ASTM INTERNATIONAL. Designation D388: Standard Classification of Coals by Rank. Pennsylvania, United States, 2011.
- ASTM INTERNATIONAL. Designation D3172: Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. Pennsylvania, United States, 2011.
- ASTM INTERNATIONAL. Designation D3173: Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. Pennsylvania, United States, 2011.
- ASTM INTERNATIONAL. Designation D3174: Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal1. Pennsylvania, United States, 2011.
- ASTM INTERNATIONAL. Designation D3175: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. Pennsylvania, United States, 2011.
- ASTM INTERNATIONAL. Designation D3177: Standard Test Methods for Total Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke. Pennsylvania, United States, 2011.
- ASTM INTERNATIONAL. Designation D5865: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke1. Pennsylvania, United States, 2011.
- ESPINOSA, Fernando. Análisis Causa Raíz (RCA) [en línea].[Citado 7 abril, 2011].Disponible en [http://ing.usalca.cl/~fepinoso/ANALISIS%20CAUSA%20RAIZ%20%20\(RCA\).pdf](http://ing.usalca.cl/~fepinoso/ANALISIS%20CAUSA%20RAIZ%20%20(RCA).pdf).
- E. ROBERTS ALLEY & ASSOCIATES, INC .Manual de control de la calidad del aire.. McGraw-Hill, 2001.
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES. Resolución 0935 de 2011. [En línea: <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/loader.jsf?lServicio=Publicaciones&lTipo=publicaciones&lFuncion=loadContenidoPublicacion&id=696>]
- INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES IDEAM. Número de pruebas o corridas para la ejecución de los métodos para la evaluación de emisiones de contaminantes en fuentes fijas. Subdirección de estudios ambientales. Versión No. 1. Junio de 2011.

- JIMÉNEZ, Edixon Arbey y BERNAL, William. Diseño y construcción de un sistema de molienda, dosificación y combustión de carbón para modificar la generación de calor en la caldera de la empresa lácteos el rancho. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2009. 190 p.
- MARTINEZ, Fabian y LOZA, Carlos. Estudio de factibilidad técnico-económico para la utilización de combustible líquido CCTA, a partir de carbones de las minas de San Luis (Santander), como combustible sustituto de los hidrocarburos empleados en las calderas de la Gerencia Complejo Barrancabermeja. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2007. 403 p.
- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución número 909: 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. Colombia, 2008.
- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica generada por fuentes fijas versión 2. República de Colombia. Noviembre 2010. [En línea: [http://www.minambiente.gov.co//documentos/normativa/ambiente/resolucion/res\\_2153\\_021110\\_proto\\_fuentes\\_fijas.pdf](http://www.minambiente.gov.co//documentos/normativa/ambiente/resolucion/res_2153_021110_proto_fuentes_fijas.pdf)]
- MONROY, Maribel. Estudio de mecanismos de producción limpia para controlar mediante separación mecánica el material particulado producto de la combustión de carbón pulverizado tipo CCTA en hornos tipo colmena. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2006. 56 p.

- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Title 40 Part 60 Appendix A of the Code of Federal Regulations. 2008. [Disponible en línea: [http://www.access.gpo.gov/nara/cfr/waisidx\\_08/40cfr60a\\_08.html](http://www.access.gpo.gov/nara/cfr/waisidx_08/40cfr60a_08.html)]
- REVISTA ENERGÉTICA. Diagnóstico técnico de carbones térmicos para la obtención del combustible CCTA en Boyacá. Medellín. Julio,2007, no. 37. ISSN 01209833.

## **ANEXOS**

# ANEXO A: CARTA DE SATISFACCIÓN DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S



LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.  
NIT: 804015143-7

San Gil, Octubre 28 de 2011

Señores  
**COMITÉ DE TRABAJOS DE GRADO**  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Universidad Industrial de Santander

Apreciados señores

Hemos recibido una copia del trabajo de grado titulado “**DESARROLLO DE UNA PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS HORNOS COLMENA DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S**”, elaborado por los estudiantes **Silvia Lucia Mantilla Parra** código 2060922 y **Lorenzo Ardila Sánchez** código 1972413.

En relación al trabajo realizado manifiesto que nos encontramos satisfechos por el aporte que este trabajo nos da a la empresa identificando oportunidades de mejoramiento de aplicación práctica en el corto plazo

Atentamente,

**MAURICIO BERARDINELLI GONZALEZ**  
Gerente Ladrillos y Acabados S.A.S.

Planta: Finca Los Alpes, vereda Campo Hermoso San Gil.  
Mail: ladrillosyacabados@hotmail.com  
Oficinas: Calle 6 No. 9-70 Tel. 723-6011/ 724-3075 /724-2990 Fax. 724-3898 San Gil (S.S)