

**ANÁLISIS Y PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE
COMBUSTIÓN DEL HORNO COLMENA (CAPACIDAD 25.000 PIEZAS) DE LA
EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.**

**ZULAY DAHANNA VARGAS MUÑOZ
JOSÉ MIGUEL ORJUELA ABRIL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2013

**ANÁLISIS Y PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE
COMBUSTIÓN DEL HORNO COLMENA (CAPACIDAD 25.000 PIEZAS) DE LA
EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.**

**ZULAY DAHANNA VARGAS MUÑOZ
JOSÉ MIGUEL ORJUELA ABRIL**

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

**Director
CARLOS BORRÁS PINILLA
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA E INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2013

A mi familia por su paciencia y
colaboración, en especial a mis padres por
su lucha y esfuerzo incansable y por la
inmensa confianza que siempre
depositaron en mí.

Zulay Dahanna Vargas Muñoz

A mi familia y todas aquellas personas que
han formado parte de todo este proceso y
me han apoyado incondicionalmente.

José Miguel Orjuela Abril

AGRADECIMIENTOS

A los Ingenieros Carlos Borrás Pinilla, Juan Francisco Maradey Charris, Yineth Paola Vargas y José Francisco Caicedo por su apoyo y colaboración incondicional durante el desarrollo de este proyecto.

A la Empresa Ladrillos y Acabados S.A.S muy especialmente al Ingeniero Juan Francisco González Martínez y al Ingeniero Orlando Vargas Morales, administrador de la planta, por su acompañamiento y soporte durante todo este proceso.

A nuestras familias por todo su apoyo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. OBJETIVOS	24
1.1 OBJETIVO GENERAL	24
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
2. INTRODUCCIÓN A LA INDUSTRIA CERÁMICA Y LADRILLERA	26
3. PROCESO DE COCCIÓN EN LA INDUSTRIA CERÁMICA Y LADRILLERA	29
3.1 ORNOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA Y LADRILLERA	29
3.1.1 Hornos Intermitentes	30
3.1.2 Hornos Semi-continuos	32
3.1.3 Hornos continuos	32
3.2 EL CARBÓN MINERAL COMO ENERGETICO DEL PROCESO DE COCCIÓN EN LA INDUSTRIA CERÁMICA Y LADRILLERA	34
3.2.1 Clasificación del carbón	36
3.2.2 Análisis del carbón	36
3.2.3 Propiedades físicas del carbón	37
3.3 PROCESO DE COMBUSTIÓN EN HORNOS LADRILLEROS	37
3.3.1 Combustión del carbón.	39
3.3.2 Quemadores de carbón	42
3.4 EFICIENCIA EN HORNOS LADRILLEROS	44
3.4.1 Energía del combustible (Ec)	45
3.4.2 Energía útil (Eu)	46
3.4.3 Pérdidas de Energía	48
3.5 ASPECTOS AMBIENTALES	51
3.5.1 Emisiones durante la combustión de carbón	51
3.5.2 Normas ambientales	52

4. GENERALIDADES DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.	54
4.1 DATOS DE LA EMPRESA	54
4.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLANTA	54
4.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.	56
4.3.1 Preparación de la materia prima	56
4.3.2 Conformado	57
4.3.3 Secado	58
4.3.4 Cargue del horno	59
4.3.5 Cocción	59
4.3.6 Extracción de calor	60
4.3.7 Enfriamiento	60
4.3.8 Descarga	60
4.3.9 Revisión y despacho	60
5. ESTUDIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS	62
5.1 MUESTREO ISOCINÉTICO	62
5.1.1 Métodos usados en el muestreo Isocinético	63
5.1.2 Descripción de los equipos usados	64
5.1.3 Procedimiento de toma de muestras	66
5.1.4 Muestreo preliminar	69
5.1.5 Muestreos definitivos	69
5.1.6 Descripción de la fuente de emisión	70
5.1.7 Resultados del muestreo Isocinético	72
5.2 ANÁLISIS DE GASES DE CHIMENEA	75
5.2.1 Descripción del proceso de medición de los contaminantes en los gases de chimenea en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S	75
5.2.2 Consolidación de la información recopilada	77
6. ANÁLISIS PROXIMO A UNA MUESTRA DEL CARBÓN USADO EN LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.	84
6.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD	87

6.1.1 Descripción del procedimiento de determinación del contenido de humedad. Para la realización de la prueba es necesario:	87
6.2 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CENIZAS	90
6.2.1 Descripción del procedimiento de determinación del contenido de cenizas	90
6.3 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE MATERIAL VOLATIL	92
6.3.1 Descripción del procedimiento de determinación del contenido de material volátil	92
6.4 ANÁLISIS % CARBONO FIJO	94
6.5 DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO	94
6.5.1 Descripción del procedimiento de determinación del poder calorífico	95
6.6 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AZUFRE	96
6.6.1 Descripción del procedimiento de determinación del contenido de azufre.	96
6.7 RESULTADOS	97
6.7.1 Clasificación del carbón según su análisis próximo	98
6.7.2 Comparación de resultados con el análisis realizado en el año 2011 al carbón usado por la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S	99
7. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE COCCIÓN EN EL HORNO COLMENA DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.	101
7.1 BALANCE DE MASA Y ENERGIA DEL HORNO COLMENA USADO EN LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.	104
7.1.1 Balance de masa en el horno colmena	106
7.1.2 Balance de energía en el horno colmena	111
7.1.3 Distribución de la energía aportada por el combustible en el horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S	129
7.2 EFICIENCIA DEL HORNO COLMENA USADO EN LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.	130
7.2.1 Cálculo de la eficiencia del horno	131
7.3 PROGRAMA DE CÁLCULOS	132
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS	135
9. PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN	138

9.1 ALTERNATIVA 1: USO DE OTRO TIPO DE COMBUSTIBLE PARA LA COMBUSTIÓN EN EL HORNO COLMENA	138
9.1.1 Descripción del gas natural	139
9.2 ALTERNATIVA 2: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA OVERFIRE-AIR	140
9.2.1 Funcionamiento del OVERFIRE-AIR	140
9.3 ALTERNATIVA 3: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA CARBOJET	142
9.3.1 Funcionamiento del CARBOJET	143
9.4 PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEFINITIVA	144
9.4.1 Características físicas del sistema CARBOJET	147
9.4.2 Distribución en planta del sistema CARBOJET	149
9.4.3 Análisis económico de la propuesta	157
10. CONCLUSIONES	159
11. RECOMENDACIONES	162
BIBLIOGRAFÍA	163
ANEXOS	166

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Horno de llama invertida	31
Figura 2. Carbón mineral	34
Figura 3. Consumo mundial de energía primaria por tipo de combustible	35
Figura 4. Esquema ilustrativo de las diferentes etapas de la combustión de carbón	41
Figura 5. Distribución de la Energía del Combustible	46
Figura 6. Esquema de los puntos de interés en el horno colmena para el balance de masa y energía	49
Figura 7. Planta de la empresa Ladrillos y Acabados	55
Figura 8. Cantera de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.	56
Figura 9. Banda transportadora de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.	57
Figura 10. Extrusora de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.	58
Figura 11. Horno colmena Ladrillos y Acabados S.A.S.	59
Figura 12. Proceso productivo de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S	61
Figura 13. Muestreador Isocinético marca APEX, referencia XC 572	65
Figura 14. Analizador de gases de combustión LANCOM	66
Figura 15. Instalación del soporte del equipo muestreador en la chimenea	67
Figura 16. Encendido y calibración del equipo del muestreo Isocinético	68
Figura 17. Instalación de la sonda, caja caliente y caja fría en la chimenea	68
Figura 18. Temperaturas tomadas en la chimenea de Ladrillos y Acabados S.A.S.	73
Figura 19. Adecuación de la sonda del analizador de gases LANCOM en la chimenea	76
Figura 20. Captura de información a través del analizador de gases LANCOM	76

Figura 21. Concentración de Monóxido de Carbono (CO) en los gases productos de la combustión	78
Figura 22. Concentración de Dióxidos de azufre (SO ₂) en los gases productos de la combustión	78
Figura 23. Concentración de Oxígeno (O ₂) en los gases productos de la combustión	79
Figura 24. Concentración de Monóxido de Nitrógeno (NO) en los gases productos de la combustión	79
Figura 25. Concentración de Óxidos de (H ₂ S) en los gases productos de la combustión	80
Figura 26. Concentración de Dióxido de Carbono (CO ₂) en los gases productos de la combustión	80
Figura 27. Concentración de Óxidos de Nitrógeno (NO _x) en los gases productos de la combustión	81
Figura 28. Temperatura del horno durante la etapa de análisis	82
Figura 29. Molino de mandíbulas	84
Figura 30. Carbón en bloque	85
Figura 31. Carbón triturado	85
Figura 32. Molino de bolas	86
Figura 33. Carbón pulverizado	86
Figura 34. Tamiz de 100 hilos por cm ²	87
Figura 35. Desecador	88
Figura 36. Balanza	88
Figura 37. Horno	89
Figura 38. Horno de alta temperatura	91
Figura 39. Crisoles con sus tapas	93
Figura 40. Bomba calorimétrica	95
Figura 41. Temperaturas alcanzadas en el horno colmena.	102
Figura 42. Flujograma global del proceso de cálculos para la caracterización del proceso de cocción	103

Figura 43. Volumen de control en el horno colmena	104
Figura 44. Distribución de la energía, aportada por el carbón, en el horno colmena	129
Figura 45. Cálculos de energía útil y eficiencia en el horno colmena	133
Figura 46. Cálculo de las pérdidas de energía en la combustión del horno colmena	134
Figura 47. Sistema OVERFIRE-AIR en un horno colmena	141
Figura 48. Sistema de aire de un OVERFIRE-AIR	142
Figura 49. Carbojet	143
Figura 50. Carbojet empresa MAQUIGAR'S	147
Figura 51. Distribución del Carbón por Carbojet en el horno colmena	149
Figura 52. Carbojet en el horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.	150
Figura 53. Molino triturador de carbón	151
Figura 54. Salidas del Carbojet	152
Figura 55. Tapa de la hornilla adecuada para el Carbojet	153
Figura 56. Válvula en las salidas del Carbojet	153
Figura 57. Plano 1: distribución en planta del Carbojet	155
Figura 58. Plano 2: distribución en planta del Carbojet	156

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Clasificación de carbones según la ASTM D388	36
Tabla 2. Tipos de reacciones de combustión	39
Tabla 3. Recolección de datos en puntos estratégicos para el balance de energía en Hornos	49
Tabla 5. Descripción de los equipos usados en el laboratorio INTEGRAL LAB S.A.S.	66
Tabla 6. Características de la chimenea de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S	70
Tabla 7. Condiciones de trabajo del horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.	71
Tabla 8. Condiciones de operación de la fuente evaluada	71
Tabla 9. Caracterización de los gases de chimenea de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.	71
Tabla 10. Emisión de la fuente evaluada de MP, SO y NOX a condiciones locales	72
Tabla 11. Concentración de contaminantes sin y con corrección de oxígeno de referencia 18 %	72
Tabla 12. Emisión admisible para industrias de fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y arcilla a condiciones de referencia y con oxígeno de referencia 18%	74
Tabla 13. Concentración de contaminante contra Resolución 909 de 2008	75
Tabla 14. Análisis próximo del carbón usado en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.	98
Tabla 15. Clasificación del carbón usado en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. Según ASTM D388	99

Tabla 16. Resultado análisis próximo años 2011 y 2013	100
Tabla 17. Análisis próximo y último del carbón promedio en la zona de Boyacá	105
Tabla 18. Productos en una quema del horno colmena	106
Tabla 19. Pesos totales de obra y combustible en una quema del horno colmena	106
Tabla 20. Masas relacionadas en el proceso de cocción del horno colmena	107
Tabla 21. Concentraciones halladas en los gases de chimenea según el análisis de gases realizado al horno de Ladrillos y Acabados S.AS.	115
Tabla 22. Concentraciones porcentuales de los gases de chimenea del horno colmena	116
Tabla 23. Ecuaciones estequiométricas para la combustión del carbón	117
Tabla 24. Valores de los índices en ecuación estequiométrica de la combustión del carbón	118
Tabla 25. Ecuaciones balanceadas para la combustión del carbón	119
Tabla 26. Relación en peso de cada elemento presente en los gases de combustión	121
Tabla 27. Valores de los índices de la ecuación usada para el cálculo del Cp de gases comunes	122
Tabla 28. Calor específico para los gases de combustión	123
Tabla 29. Valores aproximados de los coeficientes de transferencia de calor total para varias diferencias de temperatura entre la pared del horno y el medio que la rodea	126
Tabla 30. Pérdida de energía por presencia de inquemados	128
Tabla 31. Cantidades de energía presente en el horno colmena durante una quema	131
Tabla 32. Análisis de resultados	135
Tabla 33. Comparación de características Overfire-air y CARBOJET	144
Tabla 34. Características de producción medidas en hornos colmena que usan CARBOJET	148
Tabla 35. Costo de instalación del equipo	158

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Inversión económica del proyecto de grado	166
ANEXO B. Cotización Maquigar´S	167

RESUMEN

TÍTULO: “ANÁLISIS Y PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN DEL HORNO COLMENA (CAPACIDAD 25000 PIEZAS) DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.”*

AUTORES: ZULAY DAHANNA VARGAS MUÑOZ**
JOSÉ MIGUEL ORJUELA ABRIL**

PALABRAS CLAVES: Combustión, Carbón, Horno colmena, Emisiones contaminantes, Balance de masa y energía, Eficiencia, Carbojet.

CONTENIDO:

En este proyecto de grado se analiza la combustión del carbón presente en un horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S con el propósito de optimizar las condiciones de operación del mismo y así obtener mejores productos, aumentar la eficiencia del proceso y cumplir con la normatividad medioambiental que regula a la industria cerámica y ladrillera por medio de la reducción de las concentraciones de contaminantes generadas en el proceso de combustión que son expulsadas al ambiente a través de los gases de escape.

Para el desarrollo de este proyecto se realiza el balance de masa y energía al horno colmena, para lo cual se requiere conocer todas las características y factores que influyen en el proceso de combustión, como son: las cantidades de obra a cocer, el consumo de carbón, las temperaturas en el horno, en los gases, la composición del carbón y la concentración de contaminantes en los gases de escape.

Se documenta el monitoreo Isocinético en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S., para verificar que cumpla con las normas medioambientales vigentes, establecidas por la resolución 909 de 2008 del Ministerio de Minas, Vivienda y Desarrollo territorial.

Con base en los resultados obtenidos de este análisis se propone la implementación de un sistema dosificador de carbón o Carbojet que mejore las condiciones de combustión en el horno, haciéndola más uniforme y controlada y por ende mucho más eficiente y con menos impacto ambiental.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico – Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Ing. Carlos Borrás Pinilla, PhD.

ABSTRACT

TITLE: “ANALYSIS AND PROPOSAL OF COMBUSTION PROCESS OPTIMIZATION THE BEEHIVE FURNACE (25000 PIECES CAPACITY) OF THE COMPANY LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.”

AUTHORS: ZULAY DAHANNA VARGAS MUÑOZ**
JOSÉ MIGUEL ORJUELA ABRIL**

KEY WORDS: Combustion, Coal, Beehive furnace, contaminants emissions, Mass and energy balance, Efficiency, Carbojet.

CONTENT:

In this graduation project is analyzed the coal combustion present in a beehive oven in the Ladrillos y Acabados SAS Company in order to optimizing the operating conditions of the same and get better products, increase process efficiency and comply with the environmental regulations regulating the ceramic industry and bricked by means of reducing the concentrations of contaminants generated in the combustion process which are expelled to atmosphere through the exhaust gases.

For the development of this project is performed of balance of mass and energy to beehive oven, for which is required to know all the features and factors affecting the combustion process, such as: the amount of raw material to cook, coal consumption, temperatures in the furnace and the gases, coal composition and the concentration of pollutants in the exhaust gases.

Monitoring Isokinetic is performed in the company Ladrillos y Acabados S.A.S., to verify that the company complies with environmental standards established by resolution 909 of 2008 of the Ministry of Mines, Housing and Territorial Development.

Based on the results of this analysis we propose the implementation of a coal dosing system or Carbojet that improves the combustion conditions in the furnace, making it more uniform and controlled and therefore much more efficiently and with less environmental impact.

* Degree work

** Faculty of physico-mechanical engineerings, Mechanical Engineering School Director: Ing. Carlos Borrás Pinilla, PhD.

INTRODUCCIÓN

La industria cerámica y ladrillera desarrolla su proceso productivo en tres etapas básicas, que son: la preparación de la materia prima, la obtención del producto terminado y la distribución de los mismos; la etapa de mayor interés a nivel energético y medioambiental de este proceso productivo, es la etapa de obtención del producto terminado cuya fase crítica es la cocción de los mismos, la cual se realiza por medio de la combustión, principalmente de carbón, en diferentes tipos de hornos.

A causa de la gran cantidad de contaminantes emitidos por todos los procesos basados en algún tipo de combustión, diferentes entidades medioambientales en todo el mundo y, en este caso en particular, el Gobierno Colombiano han estado regulando dichas industrias para conseguir el menor daño posible al ambiente y la mejora de las condiciones operativas de las empresas, obligando a estas a certificar su proceso operativo manteniendo sus índices de emisiones contaminantes en los estándares establecidos y catalogados como de menor riesgo y por lo tanto permisibles.

La empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. es una empresa localizada en el municipio de San Gil (Santander) dedicada a la fabricación y venta de ladrillos y otros materiales cerámicos por medio del uso de hornos colmena; esta pequeña empresa está creciendo de manera sostenible para lo cual ha optado por mejorar sus procesos de la mano de nuevas tecnologías, investigación e innovación, lo anterior ha llevado a la empresa a estrechar vínculos con la academia, prueba de ello y con el fin de generar una propuesta de optimización energética de los hornos colmena, se realizó, en el año 2011, un estudio por parte del grupo DICBOT de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de

Santander con el objeto de analizar el estado de la empresa¹. Gracias a este estudio se evidenció que la empresa no está cumpliendo todas las normas medioambientales que regulan este sector industrial, lo cual afecta directa y gravemente su efectividad y competitividad en la industria ladrillera.

Este proyecto de grado se desarrolla con el propósito de contribuir con La empresa LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S. en busca de conseguir dicha certificación medioambiental y de mejorar la eficiencia de su proceso de combustión de carbón para lograr mayores rendimientos y ser más competitiva en el mercado de la industria cerámica y ladrillera. Con el fin de cumplir dicho propósito se necesita optimizar las condiciones de funcionamiento presentes en el horno colmena de capacidad 25000 piezas usado por la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S., él cual es el más crítico del proceso productivo de la misma, para lo cual se requiere analizar cada uno de los aspectos relacionados con el proceso de cocción del ladrillo y material cerámico y sus posibilidades de mejora.

¹ Desarrollo de una propuesta de optimización energética de los hornos colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir al desarrollo misional de la Universidad industrial de Santander, el cual es fomentado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión a través de proyectos de investigación que brinda apoyo a empresas como Ladrillos y Acabados S.A.S. donde se busca obtener procesos más eficientes y de menor impacto medio ambiental.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Apoyar y acompañar a la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. en su búsqueda por disminuir las emisiones contaminantes generadas en sus procesos de cocción del material cerámico y así conseguir la licencia medioambiental exigida por la ley, para lo cual se realizarán las siguientes actividades:

- ✓ Documentar el proceso de monitoreo Isocinético que se realizará en la Empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. conforme a lo exigido por la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS) para conceder a la Empresa su Licencia Ambiental cuyo fundamento está referido en la Resolución número 909 del 05 de Junio del año 2008, expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- ✓ Caracterizar el proceso de cocción del ladrillo y material cerámico del horno tipo colmena (capacidad 25000 piezas) de la Empresa ladrillos y Acabados S.A.S.
 - Conocer las características físicas y químicas del carbón utilizado por la empresa.

- Realizar la toma de datos y/o variables presentes en el proceso de cocción del material cerámico, necesarios para la ejecución del balance de masa y energía del Horno Colmena.
 - Realizar el balance de masa y energía del Horno Colmena en la Empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.
 - Analizar los resultados obtenidos por medio del balance de masa y energía realizado al Horno Colmena de la Empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.
 - Realizar un análisis donde se relacionen las principales variables que intervienen en el proceso de combustión del carbón, como son: la temperatura, el consumo de carbón, el porcentaje de oxígeno y el tiempo en el proceso de cocción.
 - Evaluar la eficiencia del proceso de combustión de carbón del horno tipo colmena de la empresa Ladrillos y acabados S.A.S.
- ✓ Proponer la implementación de un sistema de optimización que mejore la combustión presente dentro del horno colmena y que puede constar de elementos como:
- Un molino o pulverizador
 - Un sistema de inyección neumático - soplador
 - Red de distribución
 - Quemador
- ✓ Diseñar la distribución en planta del sistema de optimización propuesto para la Empresa Ladrillos y Acabados S.A.S., incluyendo todas las especificaciones necesarias para su posterior implementación.

2. INTRODUCCIÓN A LA INDUSTRIA CERÁMICA Y LADRILLERA

La cerámica ha tenido un papel importante en el mundo desde las primeras civilizaciones, quienes trabajaban el barro en forma manual para fabricar recipientes en los cuales almacenar sus alimentos y enseres; con el paso del tiempo han aparecido técnicas y nuevas aplicaciones de la arcilla (ladrillos, tejas, baldosa, loza, etc.) lo cual ha generado el crecimiento de la industria cerámica y ladrillera en todo el mundo.

El proceso de producción de la industria cerámica y ladrillera está conformado por tres diferentes grupos de operaciones, como son: la preparación de la materia prima, la obtención del producto acabado y la distribución y comercialización de dicho producto; todas estas etapas son igualmente importantes, pero en la etapa de obtención del producto acabado la fase de cocción de los productos es la más crítica; la cocción se lleva a cabo en hornos mediante el aprovechamiento del calor generado por la combustión del combustible usado, el cual normalmente es carbón, la temperatura en este proceso puede alcanzar hasta los 1000 °C.

La materia prima usada en la fabricación de productos cerámicos es una materia prima natural que se puede clasificar en plástica o no plástica, de acuerdo a su función:

- ✓ **Materia prima plástica:** es la arcilla esencialmente, la cual es una roca sedimentaria formada por partículas finas y se considera plástica ya que al mezclarse con agua y exponerse a secado y calor se endurece nuevamente, esta propiedad es dada por su contenido de silicatos y algunos minerales asociados, como: la calcita, la piritita y el cuarzo.

- ✓ **Materia prima no plástica:** reduce la plasticidad, mejora la permeabilidad y facilita la defloculación (minimización de la aglomeración de partículas lo cual genera una viscosidad adecuada de la mezcla de la materia prima con agua).

La selección del tipo de materia prima a usar depende de la disponibilidad de la materia prima y el producto deseado, cabe resaltar que comúnmente se usa el tipo de materia prima de acuerdo sólo a la disponibilidad de la misma.

Los productos obtenidos en la industria cerámica y ladrillera se pueden clasificar de acuerdo a la temperatura alcanzada durante el proceso de cocción, así:

- ✓ **Productos de color o cerámica estructural:** temperatura máxima de 850 °C a 1100 °C. Los productos en esta clasificación son todos los tipos de ladrillos y tejas.
- ✓ **Productos de cocción blanca:** temperatura máxima de 1100 °C a 1250°C. Estos productos son la loza y las porcelanas.
- ✓ **Productos refractarios:** temperatura máxima de 1400°C aproximadamente. Estos productos son los ladrillos refractarios y algunos productos especiales usados en cohetes, reactores, piezas de laboratorio, etc.

El creciente desarrollo de la industria cerámica y ladrillera en todo el mundo, también se evidenció en Colombia principalmente en la década de los años 90, cuando los pequeños industriales empezaron a tecnificar sus procesos buscando aumentar su producción, mejorar la calidad de sus productos y disminuir costos; esta tecnificación se dio a través de:

- ✓ Implementación de máquinas de extrusión de mayor capacidad y eficiencia.
- ✓ Implementación de secaderos artificiales.
- ✓ Instalación de hornos más eficientes.

A pesar de la implementación estas mejoras por algunas empresas en los últimos años, hoy en día la mayoría de pequeñas y medianas empresas productoras de ladrillos y otros cerámicos en Colombia, siguen en la búsqueda de optimizar sus procesos mediante la disminución de sus consumos energéticos para lograr ser más eficientes y competitivos en el mercado de esta industria.

3. PROCESO DE COCCIÓN EN LA INDUSTRIA CERÁMICA Y LADRILLERA

El proceso de cocción en la industria cerámica y ladrillera es la fase más importante y delicada de todo el proceso de fabricación de esta industria ya que es en éste donde se le confieren las propiedades (resistencia, porosidad, absorción de humedad, etc.) deseadas a las piezas en fabricación y se evalúa el correcto desarrollo de la fase precedente (preparación de la materia prima). Este proceso se desarrolla por medio de la utilización de hornos donde se aprovecha la energía entregada en la reacción de combustión presente en él; al interior del horno la materia prima pasa por tres etapas básicas, que son:

- ✓ **Secado y precalentamiento:** etapa en la cual el material no incrementa su temperatura, el calor suministrado por el combustible es empleado para eliminar la humedad residual en el material. En esta etapa se debe evitar un secado muy rápido ya que se pueden presentar rupturas en el material, cuando el material está seco empieza a ganar calor sensible aumentando gradualmente su temperatura, hasta aproximadamente 200 °C.
- ✓ **Quema:** la temperatura máxima alcanzada en la quema es aproximadamente 1000 °C, el tiempo de quema y el incremento de temperatura incide notablemente en las propiedades de los productos terminados.
- ✓ **Enfriamiento:** el enfriamiento debe hacerse gradualmente, no se recomienda una velocidad de enfriamiento superior a los 15°C/h.

3.1 ORNOS EN LA INDUSTRIA CERÁMICA Y LADRILLERA

Los Hornos son equipos muy importantes en la industria cerámica y ladrillera, ya que en ellos se lleva a cabo el proceso de cocción que es un tratamiento térmico por medio del cual se dan las adecuadas propiedades al material trabajado en el horno.

En la industria ladrillera existen gran variedad de hornos los cuales son clasificados, según el tipo de funcionamiento, en los siguientes:

1. Hornos Intermitentes
2. Hornos Semi-continuos
3. Hornos Continuos

3.1.1 Hornos Intermitentes. Hornos de cámaras individuales donde durante todas las etapas del proceso el material se encuentra en una posición fija. El proceso de este tipo de hornos consta de las siguientes fases:

- ✓ Entrada del producto
- ✓ Pre calentamiento del producto
- ✓ Cocción del producto
- ✓ Enfriamiento del producto
- ✓ Salida del producto

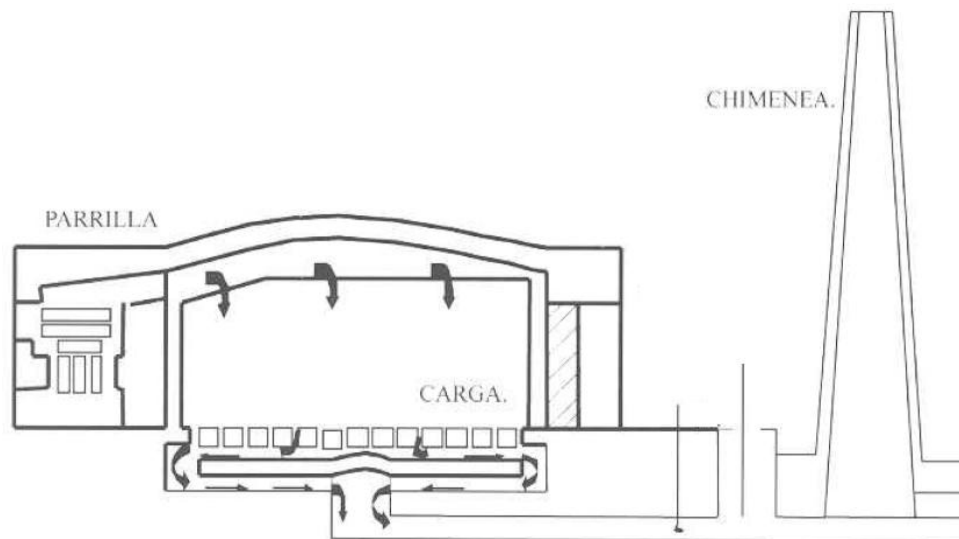
3.1.1.1 Horno de fuego dormido: También conocido como horno cilíndrico; es un horno artesanal cuyo endague se realiza cargando una capa de carbón y otra de ladrillo y consecutivamente una capa de carbón y otra de ladrillo, hasta llenar el horno. Estos son hornos muy ineficientes y por ende generan gran cantidad de contaminantes.

3.1.1.2 Horno Pampa: Hornos rectangulares descubiertos en la parte superior que disponen de bóvedas en la parte inferior para introducir el combustible; su gran desventaja es la dificultad para cocer adecuadamente los ladrillos que se encuentran en la parte más elevada del horno.

3.1.1.3 Horno Colmena: Horno cerrado en forma de cámaras circulares con paredes y techo en bóvedas de ladrillo, donde el suministro de combustible puede realizarse mediante parrillas o mediante stoker (automáticamente).

En este tipo de horno el combustible y sus residuos no están en contacto inmediato con los productos, debido a que se cuenta con una pared separadora del horno y del hogar, permitiendo así que la cocción de los productos sea homogénea; este proceso se lleva a cabo gracias a que los gases de combustión ascienden entre la pared del horno y del hogar, llegando a la parte superior para posteriormente ser evacuados por la parte inferior del hogar hacia la chimenea y así atravesar los productos y realizar su debida cocción; por esta forma de recorrido de los gases estos hornos también suelen conocerse como Hornos de llama invertida (Figura 1).

Figura 1. Horno de llama invertida



Fuente: ECOCARBON. Hornos Ladrilleros a Carbón, 1998.

Debido a la forma de alimentación de carbón, comúnmente se realiza una combustión incompleta y por ende se generan grandes cantidades de contaminantes, lo cual desfavorece la utilización de estos hornos y hace evidente la necesidad de una mejora en el sistema de alimentación de combustible.

3.1.2 Hornos Semi-continuos. Hornos donde la carga de los productos se realiza por medio de vagones pero el cargue de éstos restringe su ritmo de avance a través de la galería del horno impidiendo un proceso continuo; estos tipos de hornos son comúnmente agrupaciones de hornos intermitentes.

3.1.2.1 Horno vagón: Consta de 1 o 2 cámaras rectangulares donde se introduce un vagón con la carga a cocer y cuya alimentación es lateral; el tiro es realizado por el lado opuesto a la zona de quema. El tiempo de quema en estos tipos de horno dura aproximadamente 36 horas.

3.1.2.2 Horno rápido intermitente: Horno que cuenta con dos cámaras de tal forma que se aprovecha el aire de enfriamiento de una para precalentar la otra. Estos hornos son modulares (permiten su reubicación) pero solo se conocen dos hornos de este tipo en el país.

3.1.3 Hornos continuos. Su funcionamiento se basa en un desarrollo ininterrumpido de la cocción y de sus diferentes etapas sin variar el ritmo de producción; operan 24 horas al día, los 365 días del año. Tienen una gran producción pero su costo de implementación es elevado.

3.1.3.1 Horno Hoffman: Horno con 2 galerías paralelas formadas por compartimientos contiguos en cuyos extremos se unen por un pasafuegos; el fuego se mueve a través del horno en dirección opuesta a las manecillas del reloj. Cada galería cuenta con varias cámaras cada una con sus puertas de cargue y descargue y un canal de salida de los gases que conduce al colector que va hacia

la chimenea. La alimentación de combustible se realiza en la parte superior del horno de forma manual o por medio de un carbojet (sistema neumático). Hornos de alta eficiencia térmica y gran productividad.

3.1.3.2 Horno Túnel: En este tipo de horno el producto a cocer se desplaza en vagonetas a través de tres sectores del horno: “precalentamiento”, “cocción” y “enfriamiento”, cuya longitud puede ser hasta de 100 metros. La gran ventaja de estos hornos es la posibilidad de recuperar el calor de los gases de combustión para precalentar la carga que entra y la utilización del calor de los ladrillos que se enfrían para calentar el aire de combustión o secar productos, contribuyendo a la obtención de altas eficiencias.

3.1.3.3 Horno de rodillos. Es una modificación del horno tipo túnel, no cuenta con vagonetas sino con rodillos cerámicos para el transporte del producto y el tipo de combustible utilizado es gas.

3.1.3.4 Horno de cámaras múltiples: Horno que cuenta con cámaras individuales conectadas entre sí (hasta 20 cámaras). Inicialmente se realiza el encendido de la primera cámara y se hace pasar el calor residual a las siguientes para precalentar y completar el secado, cuando la primera cámara alcanza la temperatura de cocción, la segunda ya se encuentra en 300 o 400 °C y se realiza su encendido y así se sigue completando el ciclo con las demás cámaras. Cada cámara consta de la zona de combustión, endague o arrume y laberintos de tiro y succión - conducción del aire a la siguiente cámara.

3.2 EL CARBÓN MINERAL COMO ENERGETICO DEL PROCESO DE COCCIÓN EN LA INDUSTRIA CERÁMICA Y LADRILLERA

El carbón mineral (Figura 2) es un combustible fósil que se origina por la descomposición de materia vegetal, debido a las transformaciones físicas y químicas que ésta sufre por los movimientos tectónicos de la tierra y a las altas presiones y temperaturas a la que es sometida; la composición del carbón mineral varía notoriamente debido a los diferentes agentes presentes en su formación o carbonificación la cual puede durar miles de años, pero está compuesto principalmente de Carbono, Hidrogeno, Oxígeno, Nitrógeno y algunos sulfuros.

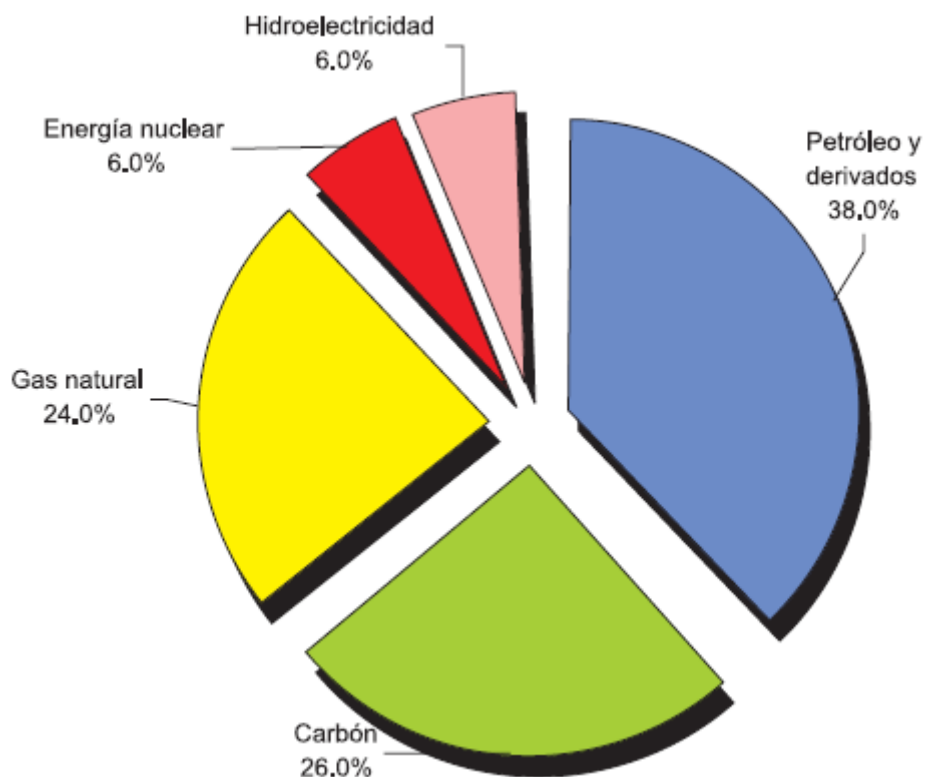
Figura 2. Carbón mineral



Fuente: <http://www.artinaid.com/2013/04/carbon-mineral>

El carbón mineral es considerado, después del petróleo, como la fuente de energía más importante en todo el mundo debido a su gran uso en diferentes sectores industriales, como: generación eléctrica, producción de acero, fabricación de cemento, producción de cerámicos y otros procesos industriales. En la Figura 3 se presenta el consumo mundial de energía de diversos combustibles, donde se evidencia la importancia del carbón en el mundo.

Figura 3. Consumo mundial de energía primaria por tipo de combustible



Fuente: UPME. La cadena del carbón.

3.2.1 Clasificación del carbón. La clasificación del carbón más común es la establecida por la American Society of Testing Materials (ASTM) que está basada en la cantidad de Carbono fijo y poder calorífico presentes en el carbón (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación de carbones según la ASTM D388

Clase	Grupo	Límite de Carbono fijo (dmmf)		Límite de Materia Volátil (dmmf)		Límite de Poder Calorífico (btu/lb (mmf))	
		Igual o		Igual o		Igual o	
		Mayor a	Menor a	Mayor	Menor a	Mayor a	Menor a
Anthracito	Meta-anthracito	98	-	-	2	-	-
	Anthracito	92	98	2	8	-	-
	Semianthracito	86	92	8	14	-	-
Bituminoso	Low Volatile bituminous	78	86	14	22	-	-
	Medium Volatile bituminous	69	78	22	31	-	-
	High Volatile A bituminous	-	69	31	-	14.000	-
	High Volatile b bituminous	-	-	-	-	13.000	14.000
	High Volatile C bituminous	-	-	-	-	11.500	13.000
Subbituminoso	Subbituminous A	-	-	-	-	10.500	11.500
	Subbituminous B	-	-	-	-	9.500	10.500
	Subbituminous C	-	-	-	-	8.300	9.500
Lignito	Lignite A	-	-	-	-	6.300	8.300
	Lignite B	-	-	-	-	-	6.300

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

3.2.2 Análisis del carbón. El análisis a carbones se realiza con el propósito de conocer sus características físicas, químicas y petrográficas. Generalmente se realizan dos tipos de análisis, el análisis próximo y el análisis último, los cuales se expresan en porcentaje en peso.

3.2.2.1 Análisis próximo del Carbón: El análisis próximo identifica el grado de carbonificación del carbón; con este análisis se obtiene información acerca de:

- ✓ Humedad
- ✓ Contenido de cenizas
- ✓ Poder calorífico

- ✓ Material volátil
- ✓ Carbono Fijo

3.2.2.2 Análisis último del Carbón: El análisis último proporciona información acerca del contenido de cada elemento que compone al carbón, como son: El carbono, el Hidrogeno, el Oxígeno, el Azufre y el Nitrógeno; lo cual es necesario para determinar la cantidad de aire requerido para la combustión eficiente del carbón.

3.2.3 Propiedades físicas del carbón. Las propiedades físicas del carbón varían de un tipo de carbón a otro e incluso en carbones del mismo rango ya que dependen de su composición y contenido de humedad. Las principales propiedades físicas del carbón son:

- ✓ Conductividad térmica
- ✓ Calor específico
- ✓ Porosidad
- ✓ Índice de hinchamiento
- ✓ Densidad de masa
- ✓ Distribución de tamaños

Las propiedades físicas más importantes para el proceso de combustión del carbón son: el índice de hinchamiento, las cenizas, el tamaño de partículas, la temperatura y la capacidad de aglomeración.

3.3 PROCESO DE COMBUSTIÓN EN HORNOS LADRILLEROS

La combustión es una reacción química que genera calor, en esta reacción intervienen dos componentes el combustible (gas, carbón, petróleo, etc.) y el comburente (aire) cuanto más íntima sea la unión entre éstos dos componentes

más completa es la combustión, por lo tanto se considera que el combustible más adecuado es un combustible en estado gaseoso. Para una combustión apropiada se necesita una temperatura adecuada para la ignición de las sustancias inflamables del combustible y la suficiente turbulencia y tiempo para completar el proceso.

El proceso de combustión cumple:

- ✓ El principio de conservación de la materia.
- ✓ El primer principio de la termodinámica: las reacciones químicas son transformaciones energéticas.
- ✓ El segundo principio de la termodinámica: equilibrio químico.

En el proceso de combustión la reacción del combustible con el oxígeno genera sustancias gaseosas, conocidas como productos, humos o gases de la combustión, los productos más comunes generados son:

- ✓ Vapor de agua
- ✓ Dióxido de carbono
- ✓ Nitrógeno
- ✓ Oxígeno
- ✓ Monóxido de carbono
- ✓ Hidrógeno
- ✓ Dióxidos de azufre

La cantidad generada de gases de combustión y la energía producida por ésta, depende del tipo de reacción de combustión que se presente, estos tipos de reacciones de combustión se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Tipos de reacciones de combustión

Combustión completa	Combustión incompleta
<ul style="list-style-type: none"> ➤ El combustible reacciona hasta su máximo grado posible. ➤ No hay presencia de sustancias combustibles en los humos. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ El combustible no reacciona hasta su máximo grado posible. ➤ Hay presencia de sustancias combustibles en los humos.
<p>Esta combustión puede darse por:</p>	<p>Esta combustión puede darse por:</p>
<p>Combustión estequiométrica o teórica: combustión con la cantidad mínima de aire para que no hayan sustancias combustibles en los gases y no se presenta oxígeno en los gases.</p>	<p>Combustión con defecto de aire: combustión con una cantidad de aire menor a la mínima necesaria.</p>
<p>Combustión con exceso de aire: combustión con aire superior a la cantidad mínima necesaria para garantizar reacción completa del combustible, se presenta oxígeno en los gases.</p>	

Fuente: Los autores del proyecto

En la industria cerámica y ladrillera el proceso de combustión se lleva a cabo en un horno, puede ser intermitente, continuo o semi-continuo, usando principalmente el carbón como combustible; según el tipo de horno usado y las propiedades físicas y químicas del combustible empleado se obtiene un proceso de combustión adecuado o no.

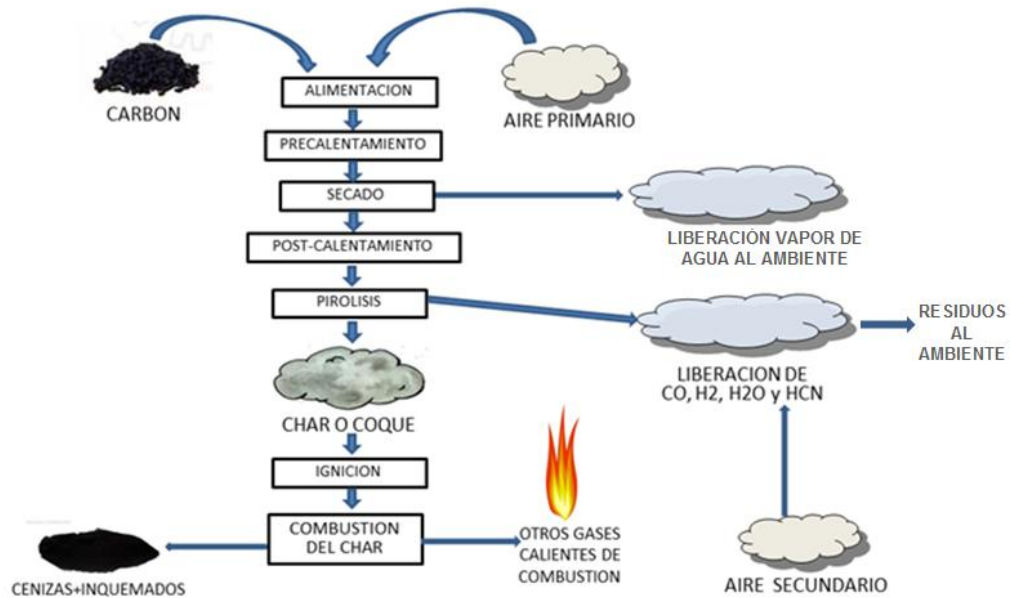
3.3.1 Combustión del carbón. La combustión es la reacción química entre los componentes de un combustible con el oxígeno del aire, esto con el fin de obtener energía útil de manera controlada. Los principales componentes de los combustibles son Carbono, Hidrogeno, agua, cenizas y otros compuestos, estos en la combustión se transforman en dióxido de carbono, vapor de agua y otros compuestos perjudiciales para el medio ambiente y los mismos equipos.

En condiciones ideales, la combustión ocurre en proporciones exactas o cantidades estequiométricas de aire y combustible, sin embargo, en la práctica no es posible la condición ideal, por lo que es necesario cantidades superiores a las estequiométricas, utilizándose exceso de aire para aproximarse a una combustión completa.

En el proceso de combustión del carbón se deben cumplir ciertas etapas para liberar la mayor energía posible de éste y perjudicar menos al medio ambiente, estas etapas se muestran en la Figura 4.

3.3.1.1 Calentamiento del carbón: El aumento de temperatura del carbón genera cambios tanto físicos como químicos de éste, en cuanto a los físicos se altera el grado de plasticidad y aumenta el tamaño del carbón produciendo una estructura porosa llamada Coque o Char, y en cuanto a la parte química, está la producción de gases, vapores y residuos sólidos compuestos en su mayoría por carbono. Los cambios químicos del carbón durante la combustión son muy dependientes de la velocidad de calentamiento y la temperatura, hasta temperaturas de 2000 C y baja presión existe una baja desvolatilización y se libera vapor de agua, alrededor de 3000 C hay una alta desvolatilización y se producen alquitranes e hidrocarburos gaseosos, estos productos reaccionan con el oxígeno aumentando la temperatura.

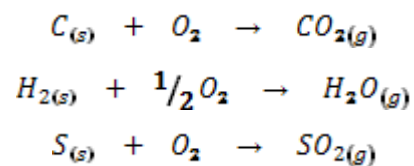
Figura 4. Esquema ilustrativo de las diferentes etapas de la combustión de carbón



Fuente: Los autores del proyecto

3.3.1.2 Reacciones de combustión y requerimientos de aire: Las principales reacciones de la combustión del carbón corresponden a las de la formación de los productos como el agua, dióxidos de carbono y azufre, y el aire requerido es el necesario para suplir la cantidad de aire primario y secundario. El oxígeno mínimo requerido, según las ecuaciones principales de la combustión del carbón, representa la cantidad de aire estequiométrico necesario para la reacción del carbono, hidrogeno y azufre, estas se utilizan para calcular la cantidad de aire teórico.

Reacciones principales en la combustión del carbón:



3.1.3.3 Inquemados producidos en la combustión del carbón: En los procesos inadecuados de combustión, se obtienen productos como monóxido de carbón (CO) e hidrocarburos, que aún son combustibles y se encuentran presentes en los residuos de la combustión, estos son llamados quemados. La producción de estos quemados disminuye la energía obtenida en la combustión y se debe a diferentes factores como deficiencia de oxígeno para la combustión, mala granulometría del carbón, mala distribución y alimentación del carbón, tecnologías inapropiadas entre otras. Estos quemados están presentes en los escapes o chimeneas, residuos bajo los hogares de combustión, ciclones y filtros de las talegas.

3.3.2 Quemadores de carbón. En la industria ladrillera, el carbón se quema sobre parrillas, estas pueden ser alimentadas manual o automáticamente. Cuando se tiene una alimentación manual, la eficiencia del horno depende principalmente de la persona a cargo de su funcionamiento, el diseño de estas parrillas depende de la capacidad del horno, de la cantidad de combustible a quemar, de su calidad, tamaño y composición. En los quemadores con alimentación automática, el carbón entra por debajo de la parrilla de forma uniforme gracias a esto es menor el consumo del carbón debido a una mejor distribución y alimentación del mismo, ajustando frecuentemente la alimentación con base a la calidad del combustible.

3.3.2.1 Alimentación del carbón: Es importante tener en cuenta que antes de la alimentación del carbón a los quemadores, éste debe tener una preparación previa en busca de las mejores condiciones en cuanto a su tamaño de grano principalmente, ya que si el tamaño del combustible no es el apropiado para la combustión, de acuerdo al tipo de quemador y a la calidad del carbón, se generan gran cantidad de quemados y por ende gran desperdicio de combustible.

La alimentación del carbón puede darse de forma manual o automática. La alimentación manual requiere de mucha experiencia por parte del operador encargado ya que se debe alimentar la cantidad y tamaño de carbón apropiado, tener una distribución y suministro uniforme del combustible y controlar las entradas de aire en exceso; todas estas condiciones no tan fáciles de controlar hacen que la alimentación en forma manual del combustible lleve a un proceso poco eficiente.

La alimentación de carbón en forma automática es más eficiente que el sistema de alimentación manual ya que se tiene mayor control sobre el flujo de carbón suministrado. Algunos de los equipos más usados en este tipo de alimentación son:

- ✓ **Tornillo sin fin:** el carbón se desplaza a través de un canal mediante un impulsor rotatorio (hélice) y es alimentado por debajo de la parrilla a la cámara de combustión. El tamaño del tornillo depende la granulometría del carbón y de la cantidad necesaria a suministrar.
- ✓ **Alimentador de mesa:** mesa o disco rotativo sobre el cual se alimenta el carbón, de la velocidad de rotación depende del flujo de alimentación del combustible.
- ✓ **Alimentador de banda o correa:** el carbón se suministra por medio de una banda que rueda sobre rodillos y la velocidad de estos determina el flujo de suministro del combustible.
- ✓ **Alimentador por impulsor:** el carbón se extrae de la tolva de almacenamiento y se transporta a la parrilla por medio de eyectores (impulsores).

3.3.2.2 Sistemas de combustión de carbón: En los procesos de combustión de carbón existen principalmente dos sistemas de combustión de acuerdo al tipo de quemador usado, que son: los de quemadores de lecho fijo y los de lecho pulverizado.

Quemadores de lecho fijo. Estos tipos de quemadores usan parrillas, esto principalmente en hornos de llama invertida; la granulometría del carbón usado está entre 2.5 cm y 5 cm, es muy importante evitar tamaños de grano más pequeños. Estos quemadores se clasifican en:

- ✓ **Quemadores de retorta simple:** Carbones bituminosos y antracitas
- ✓ **Quemadores de retorta múltiple:** carbones con material volátil entre 20 y 30 % y contenido de cenizas del 6 al 8%.

Quemadores de lecho pulverizado. Este tipo de quemador también es conocido como Carbojet donde el carbón se maneja en partículas muy finas para ser transportadas al interior del hogar por una corriente de aire, cuya velocidad depende de las condiciones del hogar y del carbón usado.

Este equipo reúne las siguientes condiciones:

- ✓ Mantiene una proporción del aire primario mínima para asegurar la ignición.
- ✓ Retrasa la mezcla con el aire secundario hasta que sea estable el encendido.
- ✓ Posibilita al máximo el aprovechamiento de los gases.

3.4 EFICIENCIA EN HORNOS LADRILLEROS

La eficiencia del horno cuantifica la energía del combustible que se puede aprovechar en el proceso.

La eficiencia termodinámica del horno puede hallarse por dos métodos: el método directo y el método indirecto.

Método directo: es la relación entre el flujo de energía útil (E_u) y la energía aportada por el combustible (E_c).

$$\eta = \frac{Eu}{Ec} * 100\%$$

Método indirecto: calculando las pérdidas totales (P), que son las pérdidas por chimenea, por paredes, por inquemados, etc.

$$\eta = \left(1 - \frac{P}{Ec}\right) * 100\%$$

$$Ec = Eu + P$$

3.4.1 Energía del combustible (Ec). Para el cálculo de la energía aportada por el combustible y aprovechada en el proceso es necesario conocer:

- ✓ La energía total contenida en cada kilogramo de combustible, conocida como el poder calorífico superior (PCS).
- ✓ La energía neta o poder calorífico inferior (PCI), que es la cantidad de energía que queda del PCS después del consumo de energía debido a la vaporización del agua producida por la combustión del Hidrógeno.
- ✓ La energía que se pierde sin ser aprovechada en el proceso.

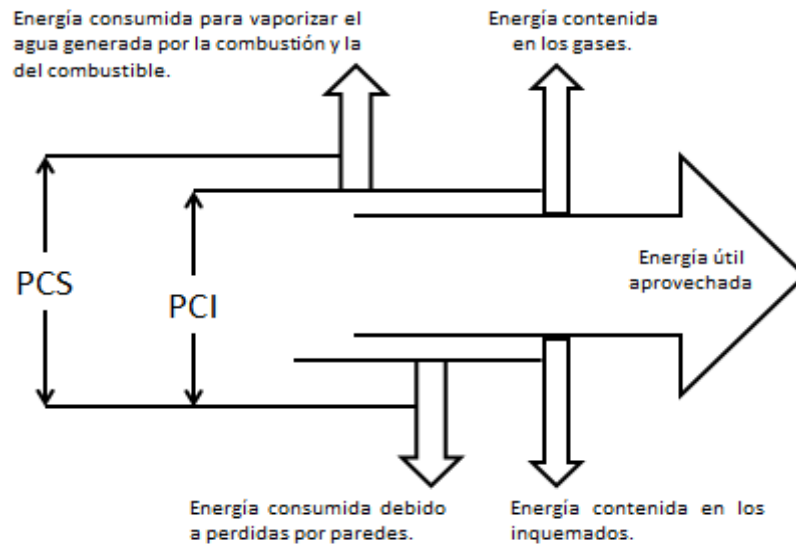
La energía aportada por el combustible, puede calcularse con base en el PCS o en el PCI, siendo el primero el más usado ya que es el valor obtenido en las pruebas de caracterización del combustible en laboratorio.

$$Ec = m_c * PCS$$

$$Ec = m_c * PCI$$

Donde m_c es el flujo de combustible en Kg/Sg y los poderes caloríficos PCS y PCI en KJ/Kg.

Figura 5. Distribución de la Energía del Combustible



Fuente: ECOCARBON. Hornos Ladrilleros a Carbón, 1998

3.4.2 Energía útil (Eu). El cálculo de la energía útil en hornos depende del proceso que estos realicen y es necesario tener en cuenta:

- ✓ La energía de calentamiento o sensible, la cual depende del aumento de temperatura.
- ✓ La energía o calor de formación, que es la energía para la transformación química.
- ✓ La energía para la transformación física o calor de cambio de fase.

La energía útil en hornos ladrilleros puede calcularse según el proceso realizado en el horno, puede ser para cocción de obra cerámica o ladrillo o para calentamiento de obra.

3.4.2.1 Horno para cocción de obra cerámica o ladrillo. La energía útil se expresa como:

$$Eu = Es + Er$$

Dónde:

- Es = Energía para secar la obra húmeda

$$Es = m_{ag.eva} * h_{eva}$$

- $m_{ag.eva}$ = Masa de agua evaporada en Kg
- h_{eva} = Entalpía de evaporación en KJ/Kg
- Er = Energía de transformación química o calor de reacción. Para **ladrillo** se puede usar como **80 Kcal/kg** de obra cocida. Para **cerámico** es **260 Kcal/Kg** de obra cocida.

3.4.2.2 Horno para calentamiento de obra. La energía útil se expresa como:

$$Eu = Es + Eca$$

Dónde:

- Eca= Energía de calentamiento

$$Eca = m_{ocr} * C_{ocr} * (T_p - T_{ref})$$

- m_{ocr} =Masa de obra cruda Kg/sg
- C_{ocr} = Calor específico de la obra cruda (cerámico 0,26 Kcal/Kg°C)
- T_p = Temperatura máxima del proceso en °C
- T_{ref} = Temperatura inicial del proceso en °C

En algunos hornos se usa aire para enfriar la obra cocida y éste se aprovecha en el horno o en secaderos; la energía asociada a este proceso es:

$$E_{WH} = m_{ar} * Cp_{ar} * (T_S - T_{ref})$$

Dónde:

- E_{WH} = Flujo de energía en el aire caliente que puede ser usado.
- m_{ar} = Masa de aire caliente usado en otro equipo en Kg
- Cp_{ar} = Capacidad calórica del aire

Esta energía debe ser tomada en cuenta como una energía útil adicional si se desea calcular el rendimiento global del horno y secadero conjuntamente, así:

$$E_{ut} = E_u + E_{WH}$$

Para el cálculo del rendimiento de la energía aportada por el combustible se tiene la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{E_c}{m_c}$$

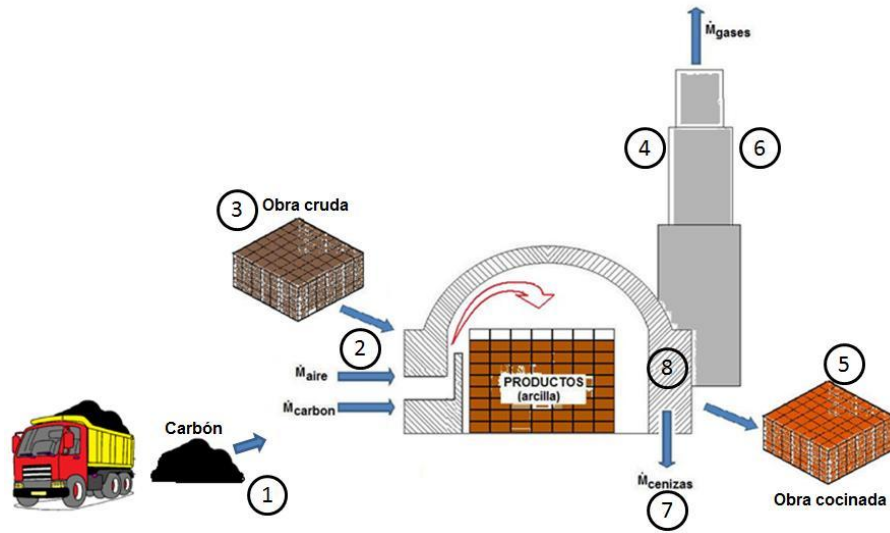
Siendo:

- E_c = Energía aportada por el combustible.
- m_c = Masa de obra cocida.

3.4.3 Pérdidas de Energía. Las pérdidas de energía se deducen por medio de un balance de masa y energía realizado en un volumen de control. Este balance es diferente si el horno es continuo o discontinuo, ya que en los continuos no se calcula la energía almacenada en las paredes.

En la Figura 6 se muestran los puntos de interés para la toma de datos necesarios para la realización del balance de masa y energía en el horno colmena.

Figura 6. Esquema de los puntos de interés en el horno colmena para el balance de masa y energía



Fuente: los autores del proyecto

En la siguiente tabla se muestran los datos que deben registrarse en cada punto de muestreo para realizar un correcto balance y análisis del proceso.

Tabla 3. Recolección de datos en puntos estratégicos para el balance de energía en Hornos

Punto de muestreo	Datos a registrar
Combustible (1)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Flujo de combustible ✓ Análisis próximo del combustible ✓ Temperatura del combustible ✓ Poder calorífico del combustible
Aire de combustión (2)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Flujo de aire de combustión ✓ Presión atmosférica ✓ Temperatura de entrada del aire ✓ Humedad relativa
Obra cruda (3)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Flujo de obra ✓ Humedad de entrada

Punto de muestreo	Datos a registrar
	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Temperatura de entrada
Gases de chimenea (4)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Flujo de gases ✓ Temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo de los gases ✓ Composición : % en volumen de CO₂, CO y O₂
Obra cocida (5)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Flujo de obra ✓ Humedad de salida ✓ Temperatura de salida
Aire de desecho (6)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Flujo de aire de desecho ✓ Temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire ✓ Composición : % en volumen de CO₂, CO y O₂
Residuos (7)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Flujo de residuos ✓ Temperatura de residuos
Perdidas por paredes (8)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Temperaturas promedio en cada zona del horno ✓ Áreas del techo y paredes de cada zona del horno

Fuente: ECOCARBON. Hornos Ladrilleros a Carbón, 1998.

Las pérdidas de energía comprenden: la energía contenida en los gases de chimenea (E_g), la energía que se pierde por paredes (E_w) y la energía de los inquemados (E_i).

$$P = E_g + E_w + E_i$$

Según algunos análisis realizados en hornos se puede considerar que las pérdidas de energía oscilan entre un 40% y 80% del total de la energía aportada por el combustible.

3.5 ASPECTOS AMBIENTALES

En toda reacción de combustión hay producción de contaminantes, entre estos el monóxido de carbono, dióxido de carbono, dióxido de azufre entre otros. Estas sustancias producen daños en la naturaleza, reflejados principalmente en la vida acuática, daño en los bosques y corrosión en las mismas estructuras donde se da la combustión.

Otras emisiones de la combustión son los residuos sólidos los cuales se alojan en la cámara de combustión y el resto es arrojado a la atmósfera en el flujo de gases de combustión.

3.5.1 Emisiones durante la combustión de carbón. Los niveles de emisión dependen de la configuración y complejidad del quemador y de las propiedades del carbón que se utilice. En las unidades que utilizan carbón pulverizado y ciclones con extracción húmeda se tiene una menor producción de partículas sólidas. Una forma de disminuir estas partículas es reinyectar estas en sistemas de control, generalmente ciclones. Esta práctica incrementa las partículas en el interior del horno y disminuye las recogidas en los colectores mecánicos. Otros factores que afectan la producción de partículas son la carga del horno y la composición del carbón.

3.5.1.1 Emisiones de óxidos de azufre: Aproximadamente el 98% del azufre presente en el carbón es expulsado en forma de óxido de azufre en su mayoría y en menor cantidad por trióxido de azufre. Estas emisiones dependen del tipo de carbón, las condiciones y configuraciones de los quemadores tienen muy poco efecto sobre estas.

3.5.1.2 Emisiones de óxidos de nitrógeno: Los óxidos de nitrógeno son emitidos a partir del nitrógeno molecular presente en el aire de combustión y el nitrógeno presente en el combustible, la relación de estas dos emisiones, dependen de las condiciones de la combustión, tipo de horno y tipo de combustible utilizado. Las emisiones a partir del nitrógeno presente en el aire dependen de la temperatura y se origina a partir de 16000 C. El nitrógeno presente en el combustible esta entre 0.5-2% para los carbones, a pesar de la cantidad de nitrógeno con relación a la cantidad presente en el combustible es altamente reactivo y depende de las condiciones de la combustión.

3.5.1.3 Emisiones de compuestos orgánicos volátiles y CO: Estas emisiones son combustibles que no se queman, generalmente en cantidades muy pequeñas, sin embargo estos aumentan en los arranques y paradas de los sistemas de combustión.

3.5.2 Normas ambientales. Los siguientes son los principales documentos emitidos por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, estudiados para la realización de este proyecto de grado; en ellos se encuentran las normas y estándares que regulan las emisiones a la atmósfera generadas por diferentes fuentes y sus niveles admisibles por las entidades reguladoras:

- ✓ **Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas.**
- ✓ **Resolución 909 del 5 de Junio de 2008:** Normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones.

- ✓ **Resolución 601 del 4 de Abril de 2006:** Norma de calidad del aire o nivel de inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.

- ✓ **Resolución 610 del 24 de Marzo de 2010:** Por la cual se modifica la Resolución 601 de 2006

- ✓ **Resolución 650 del 29 de marzo de 2010:** Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y seguimiento de la Calidad del aire.

- ✓ **Resolución 2154 del 2 de Noviembre de 2010:** Por la cual se ajusta el Protocolo para el Monitoreo y seguimiento de la Calidad del aire.

4. GENERALIDADES DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.

4.1 DATOS DE LA EMPRESA

- ✓ **Nombre:** LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.
- ✓ **NIT:** 804015143-7
- ✓ **Clasificación:** Pequeña empresa (PYME). 11-50 Empleados, activos totales entre 501 y 5001 SMMLV.
- ✓ **Dirección Oficina:** Carrera 17 N° 29-36. San Gil
- ✓ **Gerente:** Mauricio Berardinelli González;
E-mail: mauberar@gmail.com
- ✓ **Subgerente:** Juan Francisco González M;
E-mail: gonzalez.juanf@gmail.com

4.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLANTA

La empresa Ladrillos y Acabados S.A.S cuenta con pequeña planta (ladrillera) para el desarrollo de su proceso productivo, la cual se muestra en la Figura 6 y a continuación se presentan sus características más importantes.

Figura 7. Planta de la empresa Ladrillos y Acabados



Fuente: Los autores de proyecto

✓ **Ubicación de la planta:** Vereda Campohermoso, San Gil.

✓ **Áreas construidas:** 2500 m² de cubiertas.

Tres secaderos artificiales de 16 m x 5 m c/u (Área total: 240 m²).

Dos Hornos Colmena (uno de 12 hornillas y otro de 8 hornillas).

Chimenea rectangular de 15,8 m de alto.

✓ **Equipos:** Retroexcavadora (Caterpillar, Modelo 426D)

Desterronador.

Cajón Mezclador.

Laminador.

Extrusora.

Cortadora.

Bandas Transportadoras.

Soplador.

4.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.

El proceso de fabricación de productos cerámicos realizado por la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. se describe brevemente a continuación:

4.3.1 Preparación de la materia prima. La materia prima es obtenida directamente de la cantera (Figura 8) ubicada en la parte posterior de la ladrillera, por medio de una retroexcavadora; esta arcilla sin tratar es dejada en el patio para su maduración y posteriormente es preparada a través de los siguientes procesos:

4.3.1.1 Molienda: Proceso mediante el cual la arcilla sin tratar es triturada por medio del desterronador para obtener el tamaño y textura de la arcilla necesarios para su posterior conformado.

Figura 8. Cantera de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.



Fuente: Los autores del proyecto

4.3.1.2 Dosificación: Con este proceso se establece una alimentación constante y regulada, por medio de una banda transportadora (Figura 8) de la arcilla al cajón mezclador.

4.3.1.3 Molturación: Este proceso se realiza por vía semi húmeda usando desintegradores y laminadores para homogeneizar la arcilla.

Figura 9. Banda transportadora de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.



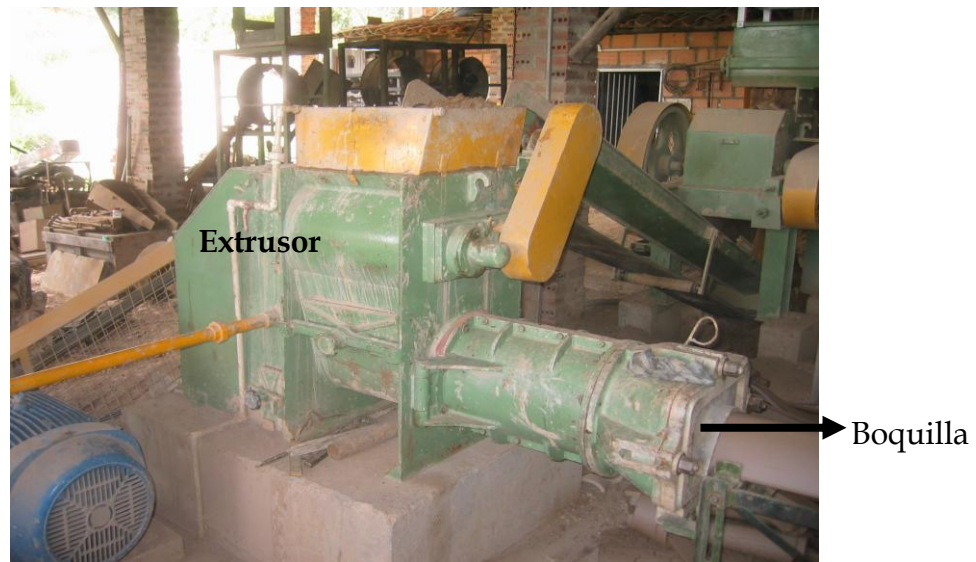
Fuente: Los autores del proyecto

4.3.2 Conformado. El proceso de conformado es la etapa en la cual la materia prima es trabajada para la formación de las piezas que posteriormente se llevarán al proceso de cocción; el conformado se lleva a cabo en dos etapas: el amasado y el moldeo.

4.3.2.1 Amasado: En el proceso de amasado se regula el contenido de agua presente en la mezcla de arcilla mediante la adición de agua a ésta; el amasado se realiza por medio de una extrusora (Figura 10) donde la mezcla de arcilla queda completamente homogénea y con una humedad aproximada del 16%.

4.3.2.2 Moldeo y corte: El moldeo se realiza por medio de unos moldes o boquillas (Figura 10) de acuerdo a la pieza que se desee fabricar (teja, ladrillo, tableta, etc.), estos se ubican a la salida de la extrusora permitiendo obtener el molde deseado; posteriormente se encuentra la cortadora y un operario se encarga de retirar las piezas cortadas.

Figura 10. Extrusora de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.



Fuente: Los autores del proyecto

4.3.3 Secado. En este proceso se reduce la humedad de las piezas antes de llevarlas al horno para su cocción; este puede darse en forma natural o artificial.

4.3.3.1 Secado natural: Se emplea el aire ambiente para retirar la mayor humedad posible a los productos, dejando estos expuestos al ambiente por unos días usando los espacios disponibles de la planta.

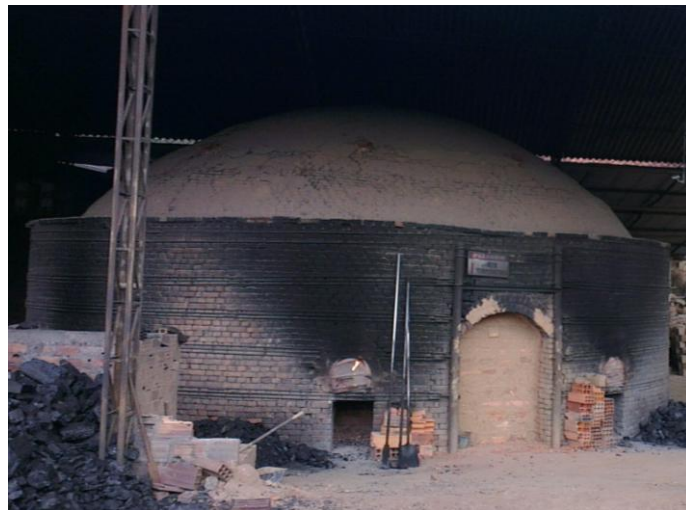
4.3.3.2 Secado artificial: La empresa cuenta con tres naves de secado artificial donde se depositan las piezas a secar y se aprovecha el calor residual del horno colmena inmediatamente después de la quema.

4.3.4 Cargue del horno. Después del secado de los productos, éstos son depositados dentro del horno colmena de forma tal que los productos más resistentes queden en la inferior del horno (ladrillos, tabletas) y en la parte superior los más frágiles (tejas)

4.3.5 Cocción. El proceso de cocción dentro del horno colmena (Figura 11) se realiza en dos etapas que son el caldeo y el fuego bravo.

4.3.5.1 Caldeo: El caldeo es la etapa inicial del proceso de cocción del horno colmena donde se retira toda la humedad presente en los productos, en esta etapa la temperatura asciende desde la ambiente a aproximadamente 150 °C en un periodo de tiempo de 24 horas.

Figura 11. Horno colmena Ladrillos y Acabados S.A.S.



Fuente: Los autores del proyecto

4.3.5.2 Fuego bravo: Esta etapa también es llamada quema plena, en ésta se da la cocción de los productos y la adquisición de sus propiedades características; la temperatura dentro del horno asciende aproximadamente a los 950 °C en un tiempo de 52 horas aproximadamente.

4.3.6 Extracción de calor. Este proceso inicia al terminar la etapa de fuego bravo en el proceso de cocción; ya que no hay más combustión de carbón los gases calientes que salen del horno a la chimenea son desviados por medio de una compuerta hacia las naves de secado artificial, en este proceso se usa un ventilador para mezclar los gases con aire ambiente con el fin de reducir la temperatura a los niveles permitidos en las naves de secado.

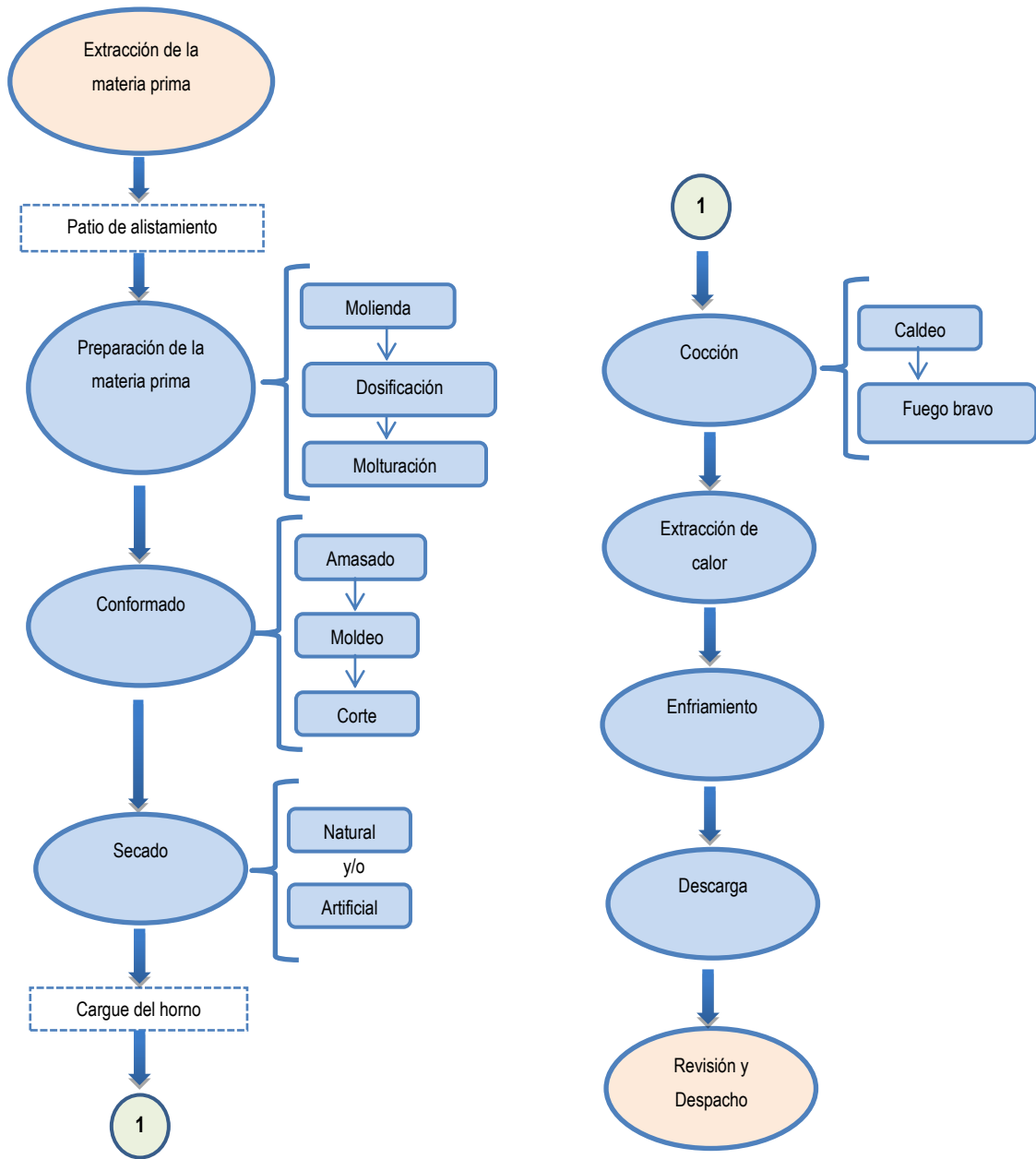
4.3.7 Enfriamiento. Para poder descargar el horno es necesario que éste se encuentre a una temperatura que no dañe al personal de la planta que realiza esta labor, para lo cual el horno es destapado y dejado en reposo durante 24 horas.

4.3.8 Descarga. Este proceso lo realiza el personal de la planta encargado y tiene una duración aproximada de 12 horas, ya que es un proceso totalmente manual.

4.3.9 Revisión y despacho. Los productos ya terminados son revisados para verificar que cumplan los estándares de calidad y se apilan sobre pellets de madera o de piezas anteriormente fabricadas en espera de su posterior despacho y distribución.

En la Figura 12 se presenta un esquema de todo el proceso descrito anteriormente.

Figura 12. Proceso productivo de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S



Fuente: los autores del proyecto

5. ESTUDIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS

En busca de establecer las emisiones contaminantes producidas en el proceso de cocción del ladrillo y material cerámico y cumplir con la normatividad medio ambiental vigente, se realizó en el mes de Enero del año 2013 un muestreo Isocinético del Horno Colmena de capacidad 25000 piezas de la Empresa Ladrillos y Acabados S.A.S., ya que éste es el Horno con mayor consumo de combustible (Carbón) y por ende presentará las mayores emisiones de contaminantes al ambiente.

Este muestreo es realizado por la Empresa K2 INGENIERÍA, la cual se encuentra debidamente acreditada ante el IDEAM para desarrollar este trabajo.

5.1 MUESTREO ISOCINÉTICO

Por medio del Muestreo Isocinético se evalúan los contaminantes emitidos al aire, provenientes de la combustión y otros procesos (en este caso es combustión de carbón), tales como: material particulado (MP), dióxido de Azufre (SO_2) y óxidos de Nitrógeno (NO_x) expresados principalmente como Dióxidos de Nitrógeno (NO_2).

Las variables medidas por medio del Muestreo Isocinético, son:

- ✓ Porcentaje de Isocinetismo.
- ✓ Porcentaje de humedad.
- ✓ Gasto volumétrico en metros cúbicos por minuto (m^3/min).
- ✓ Velocidad de los gases de salida.
- ✓ Temperatura de los gases de salida.
- ✓ Composición porcentual en volumen de dióxido de carbono (CO_2), oxígeno (O_2) y monóxido de carbono (CO) en el gas.

- ✓ Emisión de partículas (MP) en kilogramos por hora (kg/h).
- ✓ Concentración de material particulado (MP) en miligramos por metro cúbico (mg/m^3).
- ✓ Emisión de dióxido de azufre (SO_2) en kilogramos por hora (kg/h).
- ✓ Concentración de dióxido de azufre (SO_2) en miligramos por metro cúbico (mg/m^3).
- ✓ Emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x) en kilogramos por hora (kg/h).
- ✓ Concentración de óxidos de nitrógeno (NO_x) en miligramos por metro cúbico (mg/m^3).

5.1.1 Métodos usados en el muestreo Isocinético. Para la realización del muestreo Isocinético se usan los métodos de muestreo y cálculo recomendados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US EPA).

Los métodos usados para el muestreo 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_2), Oxígeno (O_2), 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 Dióxido de Azufre (SO_2).
- ✓ **Método 7 (US EPA).** Determinación de emisiones de óxidos de Nitrógeno (NO_x).

Los métodos usados para el análisis en el laboratorio, son:

- ✓ **Método 5.** Análisis de material particulado, US EPA, e-CFR Título 40, parte 60, Apéndice A3.
- ✓ **Método 7.** Determinación de Óxidos de Nitrógeno (NO_x), US EPA, e-CFR Título 40, parte 60, Apéndice A.
- ✓ **Método 8.** Determinación de Dióxidos de Azufre (SO₂), US EPA, e-CFR Título 40, parte 60, Apéndice A.

5.1.2 Descripción de los equipos usados. Para la realización en campo del muestreo Isocinético y su respectivo análisis en el laboratorio de la Empresa K2 INGENIERÍA, se requieren los equipos presentados en la Tabla 4.

Tabla 4. Nombre y serial de equipos usados para el muestreo Isocinético y análisis de laboratorio.

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

Fuente: K2 INGENIERÍA. Informe Estudio de Emisiones Atmosféricas, 2013.

5.1.2.1 Consola del muestreo Isocinético: La consola usada para el muestreo Isocinético es de marca APEX referencia XC 572², la cual fue diseñada cumpliendo con las especificaciones para realizar monitoreos en fuentes fijas (Figura 13).

² <http://www.apexinst.com/products/572-series-sampling-consales>

Este equipo consta de los siguientes instrumentos: una bomba de diafragma de doble cabezal, un medidor de gas seco, una caja fría, una caja caliente y la sonda de toma de muestra; en la caja fría se encuentran cuatro impactadores o probetas de los cuales uno está vacío, dos tienen 100 ml de agua destilada y el otro contiene 200 gr de silica gel, estos deben tener una limpieza previa y un adecuado manejo para obtener muestras satisfactorias.

Figura 13. Muestreador Isocinético marca APEX, referencia XC 572



Fuente: www.apexinst.com/products/572-series-sampling-consoles

5.1.2.2 Analizador de gases de combustión: El equipo usado es un analizador de gases LANCOM³ multifuncional que puede medir concentraciones de diferentes tipos de gases, éste entrega un registro instantáneo de las lecturas de medición, (Figura 14).

5.1.2.3 Equipos de laboratorio: Para la determinación de los diferentes parámetros objetos de esta medición, realizada en el laboratorio INTEGRA LAB S.A.S., se requieren algunos equipos según el parámetro a medir, los cuales se muestran en la Tabla 5.

³ http://www.landinst.es/combustion/descarga_de_ficheros/pdf/lanc3s.pdf

Figura 14. Analizador de gases de combustión LANCOM



Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/ametech-process-instruments/analizadores-gases-combustion-portatiles>

Tabla 5. Descripción de los equipos usados en el laboratorio INTEGRA LAB S.A.S.

Parámetro a medir	Equipo de laboratorio	Funcionamiento del equipo
Material particulado	Balanza digital (OHAUS)	Mediante gravimetría se miden diferencias en peso.
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	Espectrofotómetro (GENESIS)	Gracias a la proyección de un haz de luz monocromático se mide la cantidad de luz absorbida por la sustancia de interés y con este su concentración.
pH y elaboración de soluciones	pHmetro (HANNA)	Medición de pH y temperatura simultáneamente.
Óxidos de azufre (SO ₂)	Equipos volumétricos	Análisis en concentraciones volumétricas.

Fuente: Los autores del proyecto

5.1.3 Procedimiento de toma de muestras. Para la toma de muestras en la planta de la Ladrillera Ladrillos y Acabados S.A.S., es necesaria una debida adecuación y utilización de los equipos a emplear por parte del personal de la empresa encargada de estos análisis “K2 INGENIERIA”, de acuerdo a los métodos recomendados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (US EPA). La empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. debe

proveer a K2 INGENIERIA de las instalaciones, espacios, información e instrumentos necesarios para la adecuada realización de la toma de muestras, como son: el andamio, la conexión eléctrica y la información detallada de las dimensiones de la chimenea.

5.1.3.1 Instalación de equipos: En la chimenea de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S., se debe encontrar debidamente instalado el andamio para poder acceder al punto de toma de muestra. La instalación de los equipos se lleva a cabo en el siguiente orden:

- ✓ Preparación del personal de K2 INGENIERIA con sus respectivos equipos de seguridad para la realización de la toma de muestras.
- ✓ Montaje de rieles en la chimenea para el soporte de la sonda, caja caliente y caja fría (Figura 15).

Figura 15. Instalación del soporte del equipo muestreador en la chimenea



Fuente: Los autores del proyecto

- ✓ Realización de las conexiones de la consola de muestreo.
- ✓ Encendido del equipo de muestreo (Figura 16).
- ✓ Calibración del equipo a las condiciones ambientales por aproximadamente media hora (Figura 16).

- ✓ Preparación del portafiltro y las probetas o impactadores que se ubican en la caja caliente y caja fría.
- ✓ Ubicación de la sonda, caja caliente y caja fría en la chimenea (Figura 17).
- ✓ Empiezan las tomas de muestras

Figura 16. Encendido y calibración del equipo del muestreo Isocinético



Fuente: Los autores del proyecto

Figura 17. Instalación de la sonda, caja caliente y caja fría en la chimenea



Fuente: Los autores del proyecto

5.1.4 Muestreo preliminar. Se realiza sólo un muestreo preliminar que dura alrededor de una hora registrando datos cada cinco minutos, con el fin de verificar y estabilizar los equipos de medición y también para conocer algunos parámetros del flujo de gases de la chimenea, como son:

- ✓ Presión absoluta en chimenea (P_s)
- ✓ Presión de medición (P_m)
- ✓ Volumen de gases medidos a condiciones estándar (V_{mst})
- ✓ Volumen de vapor de agua en impactadores y silica gel a condiciones estándar (V_{wst})
- ✓ Contenido de humedad en los gases de chimenea (B_{ws})
- ✓ Peso molecular del gas en condiciones de chimenea (M_s)
- ✓ Diámetro de la boquilla (ϕ_n)
- ✓ Constante isocinética de trabajo (K)

5.1.5 Muestras definitivos. Se realizan tres muestreos definitivos cada uno con una duración de una hora tomando datos cada cinco minutos, de estos tres muestreos se obtiene un valor promedio de los parámetros de interés; con los datos obtenidos por las muestras y los posteriores 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 a condiciones estándar (V_{mst})
- ✓ Volumen de vapor de agua en impactadores y silica gel a 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 de gases secos en condiciones de referencia (Q_{crd})
- ✓ Volumen secos de gases muestreados a condiciones de referencia (V_{mcr})
- ✓ Concentración de partículas a 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})

5.1.6 Descripción de la fuente de emisión. De la Tabla 6 a la Tabla 9 se presentan los valores de las condiciones de funcionamiento de la fuente evaluada, en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S., necesarios para la realización de los cálculos y análisis de laboratorio por parte de la empresa K2 INGENIERÍA.

Tabla 6. Características de la chimenea de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S

Característica	Unidades	Valor
Altura ducto de descarga	m	17
Diámetro del ducto	m	0.74
Longitud niples	m	0.015
Geometría chimenea	-	Rectangular
Cercanía con perturbaciones antes del punto de toma de muestras	m	9.5
Cercanía con perturbaciones después del punto de toma de muestras	m	7.5

Fuente: Informe Isocinético.K2 INGENIERIA

Tabla 7. Condiciones de trabajo del horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.

Característica	Unidades	Valor
Horas de trabajo por día	H/día	24
Días de trabajo por semana	Día/sem	7
Combustible utilizado	-	Carbón térmico tipo B
Consumo Combustible	Ton/Carga	21
Poder Calorífico	Cal/gr	7367.63

Fuente: Informe Isocinético, K2 INGENIERÍA

Tabla 8. Condiciones de operación de la fuente evaluada

Característica de los gases	Unid	HORNO TIPO COLMENA
Caudal	m ³ /s	1.27
Velocidad	m/s	6.68
Humedad	%	8.76
Temperatura	°C	233.14
Presión absoluta	mmHg	625.88

Fuente: Informe Isocinético, K2 INGENIERÍA

Tabla 9. Caracterización de los gases de chimenea de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.

Contaminante	Concentración	Valor
CO ₂	%	5.3300
CO	%	0.0000
O ₂	%	13.9542
N ₂	%	80.7158

Fuente: Informe Isocinético, K2 INGENIERÍA

5.1.7 Resultados del muestreo Isocinético. De acuerdo a los cálculos y análisis realizados en laboratorio a las tres muestras recogidas en la planta de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S., se obtiene el resultado promedio de concentración de las sustancias de interés, a condiciones locales, lo cual se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Emisión de la fuente evaluada de MP, SO y NO_x a condiciones locales

Concentración MP (mg/m ³)	Concentración SO ₂ (mg/m ³)	Concentración NO _x (mg/m ³)
1258.64	1052.93	16.55

Fuente: Los autores del proyecto

Dado que los estándares máximos de emisiones de fuentes fijas, fijados por la Resolución 909 del 2008, están establecidos a condiciones de referencia (temperatura de 25°C y presión de 760 mmHg) y oxígeno de referencia (18%) es necesario corregir los resultados obtenidos (Tabla 10) a estas condiciones para así poder verificar si se encuentran las emisiones en los niveles admisibles, las concentraciones corregidas se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Concentración de contaminantes sin y con corrección de oxígeno de referencia 18 %

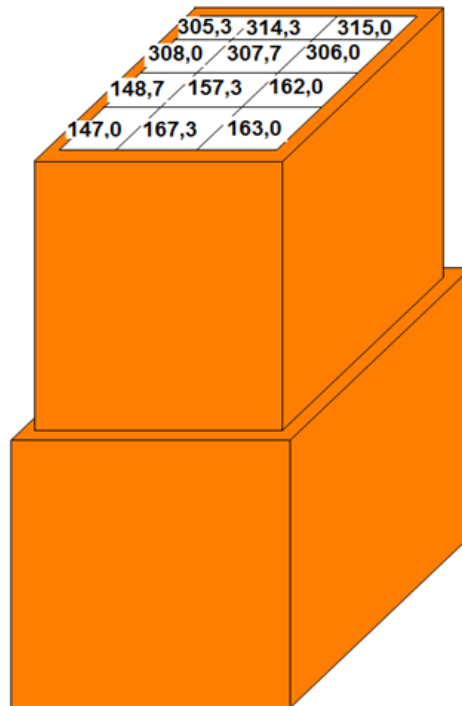
Contaminante	Concentración Sin corrección (mg/m ³)	Concentración Con corrección (mg/m ³)
MP	1258.64	551.88
SO ₂	1052.93	372.11
NO _x	16.55	6.46

Fuente: Los autores del proyecto

El cálculo de la temperatura de salida de los gases de escape también es medido a través del muestreo Isocinético, de acuerdo a lo establecido por los métodos de toma de muestras y cálculos de la US EPA, haciendo un barrido en el plano horizontal de la chimenea a la altura de la ubicación de los niples para la toma de muestras, y según los datos hallados se toma un promedio como resultado definitivo de temperatura de emisión de gases, para ser comparado con los estándares de temperatura máxima de emisión permitida según lo establecido en la Resolución 909 de 2008.

En la Figura 18 se muestran las diferentes temperaturas halladas por medio del muestreo Isocinético en la chimenea de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S, de donde el promedio de temperatura de los gases es de aproximadamente 233,14 °C.

Figura 18. Temperaturas tomadas en la chimenea de Ladrillos y Acabados S.A.S.



Fuente: Los autores del proyecto

5.1.7.1 Comparación de resultados con la Norma Resolución 909 de 2008:

Para conocer si se está cumpliendo con las normas medio ambientales referentes a la emisión de contaminantes al aire en fuentes fijas es necesario tener en cuenta la información suministrada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial en su Resolución 909 de 2008; en la Tabla 12 se presentan los valores máximos admisibles según la norma.

Tabla 12. Emisión admisible para industrias de fabricación de productos de cerámica refractaria, no refractaria y arcilla a condiciones de referencia y con oxígeno de referencia 18%

Combustible	Estándares de emisión admisibles (mg/m ³)		
	MP	SO ₂	NOx
Sólido	250	550	550
Líquido	250	550	550
Gaseoso	NO APLICA	NO APLICA	550

Fuente: MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, Resolución 909 de 2008, Artículo 30.

Conforme a los valores obtenidos y corregidos por el oxígeno de referencia (18%), y verificando con la Resolución 909 de 2008 se puede conocer si la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. cuenta con un proceso de producción que cumpla con todos los estándares medioambientales vigentes. En la Tabla 13 se evidencia que la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. en su proceso de producción de ladrillos y material cerámico está emitiendo concentraciones muy altas de material particulado (MP) en los humos de la chimenea y por la tanto no cumple con la norma medioambiental que rige este sector industrial.

Tabla 13. Concentración de contaminante contra Resolución 909 de 2008

Contaminante	Concentración	Concentración	Cumplimiento
	Norma (mg/m ³)	Con corrección (mg/m ³)	
MP	250	551.88	No Cumple
SO ₂	550	372.11	Cumple
NO _x	550	6.46	Cumple

Fuente: Los autores del proyecto

La temperatura de los gases de escape medida en aproximadamente 233,14 °C, **cumple** con la norma ya que es menor a 250°C que es el valor máximo permitido por la Resolución 909 de 2008 en su artículo 33 para hornos discontinuos, como el evaluado en este caso.

5.2 ANÁLISIS DE GASES DE CHIMENEA

Con el propósito de conocer las pérdidas de energía generadas a partir de los gases de escape en la chimenea del horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. y analizar la combustión del carbón en el horno, se realizó una medición detallada de las concentraciones de todos los contaminantes derivados de la combustión del carbón en el horno colmena y que son expulsados por la chimenea; para esto se usó un equipo analizador de gases LANCOM⁴, debidamente calibrado y certificado para estas mediciones, aprobado por la Norma ISO 9001, el cual es proporcionado por el empresa K2 INGENIERIA.

5.2.1 Descripción del proceso de medición de los contaminantes en los gases de chimenea en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. Las mediciones son realizadas en la fase de quema plena (fuego bravo) del horno ya que en esta etapa del proceso es donde hay el mayor consumo de combustible y

⁴ http://www.landinst.es/combustion/descarga_de_ficheros/pdf/lanc3s.pdf

se alcanzan las más altas temperaturas siendo ésta la fase crítica del proceso de combustión del carbón en el horno colmena.

El registro de los datos se realiza a través del analizador de gases el cual cuenta con una sonda que debe ser introducida en uno de los puntos de toma de muestras con los que cuenta la chimenea (Figura 18), el equipo que debe estar encendido antes de introducir la sonda, censa y muestra por medio de una pantalla los valores de las concentraciones de contaminantes presentes en los humos (Figura 19).

Figura 19. Adecuación de la sonda del analizador de gases LANCOM en la chimenea



Fuente: Los autores del proyecto

Figura 20. Captura de información a través del analizador de gases LANCOM



Fuente: Los autores del proyecto

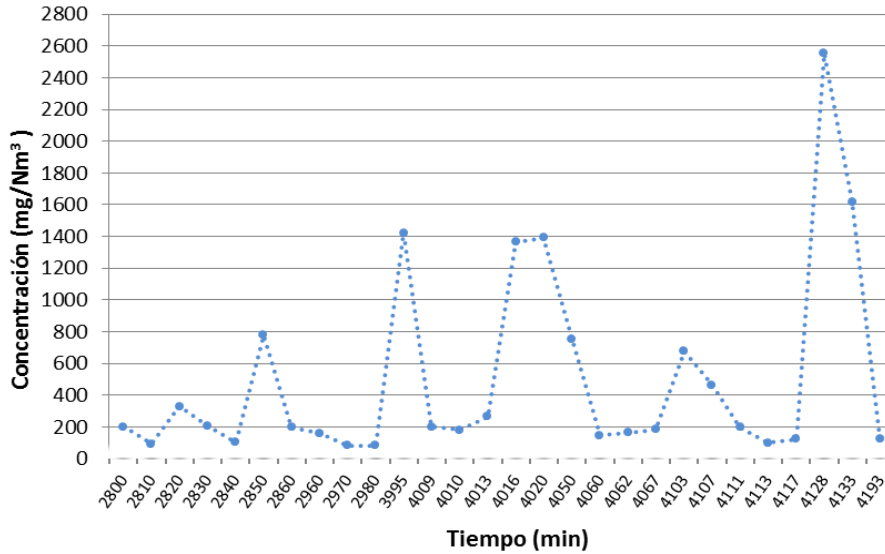
5.2.2 Consolidación de la información recopilada. Se realizan mediciones en diferentes tiempos durante el proceso de quema plena del horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. Con el fin de conocer la variabilidad de las concentraciones de los contaminantes presentes en los humos y tener mayor certeza en los posteriores cálculos de pérdidas de energía a través de los gases de combustión del carbón.

Los contaminantes medidos en los gases de escape de la combustión presente, son los siguientes:

- ✓ Monóxido de carbono (CO)
- ✓ Dióxido de azufre (SO₂)
- ✓ Oxígeno (O₂)
- ✓ Monóxido de nitrógeno (NO)
- ✓ Hidrogeno de sulfuro (H₂S)
- ✓ Dióxido de carbono (CO₂)
- ✓ Óxidos de nitrógeno (NO_x)

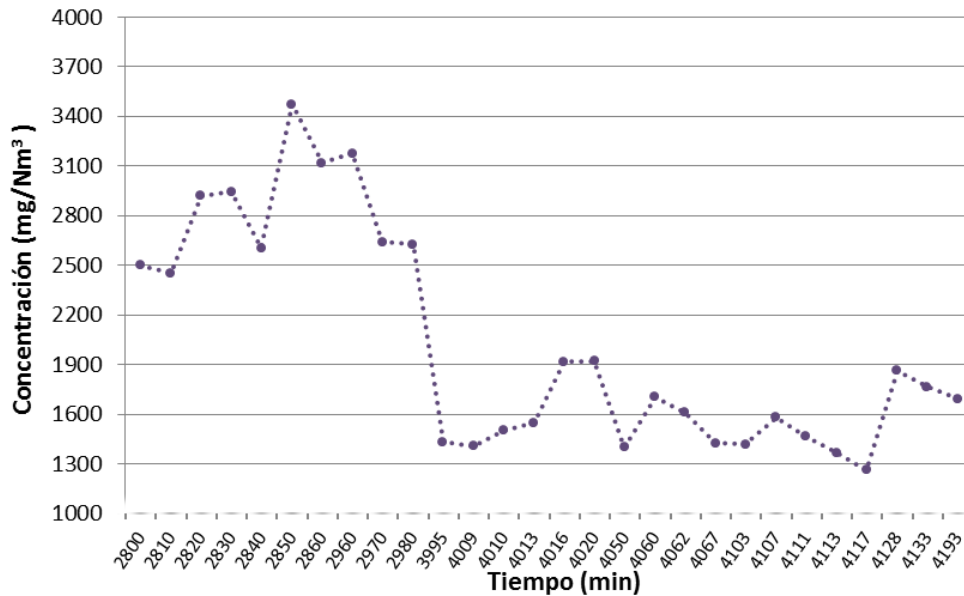
En las siguientes figuras (Figura 21 a Figura 27) se pueden apreciar las concentraciones de las sustancias anteriormente mencionadas presentes en los gases de chimenea en el lapso de tiempo de quema comprendido entre los 2800 minutos y los 4200 minutos contados a partir del inicio de la quema en el horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. período considerado como el más crítico en todo el proceso de combustión y en el cual también se realizó simultáneamente la toma de muestras para el análisis Isocinético por parte de la empresa K2 INGENIERIA.

Figura 21. Concentración de Monóxido de Carbono (CO) en los gases productos de la combustión



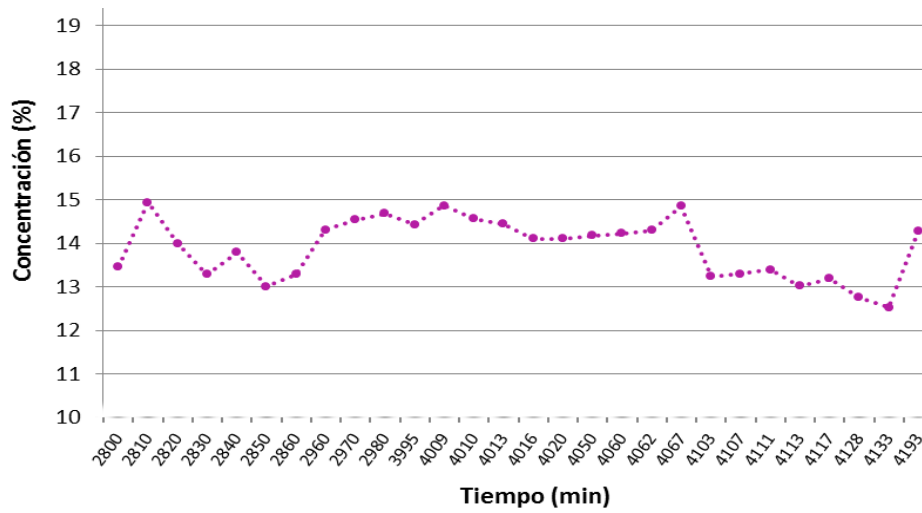
Fuente: Los autores del proyecto

Figura 22. Concentración de Dióxidos de azufre (SO2) en los gases productos de la combustión



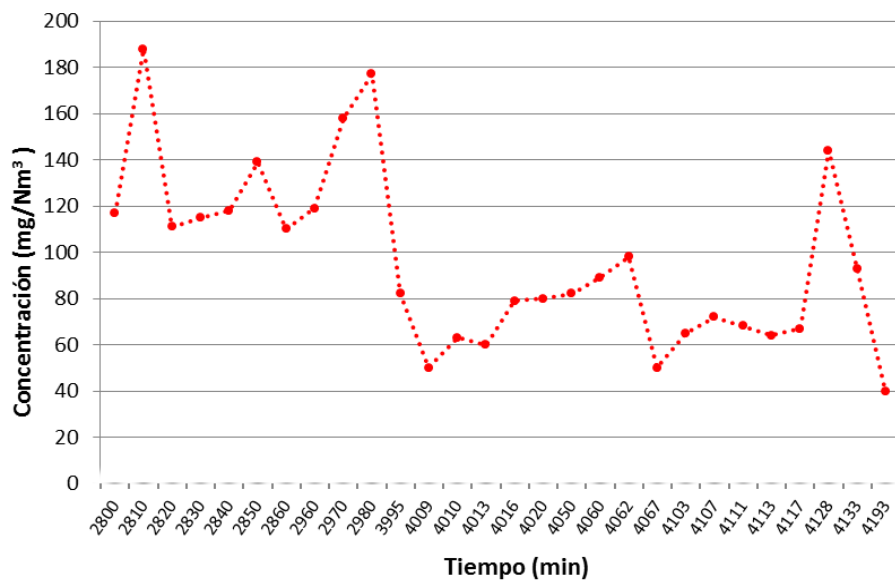
Fuente: Los autores del proyecto

Figura 23. Concentración de Oxígeno (O₂) en los gases productos de la combustión



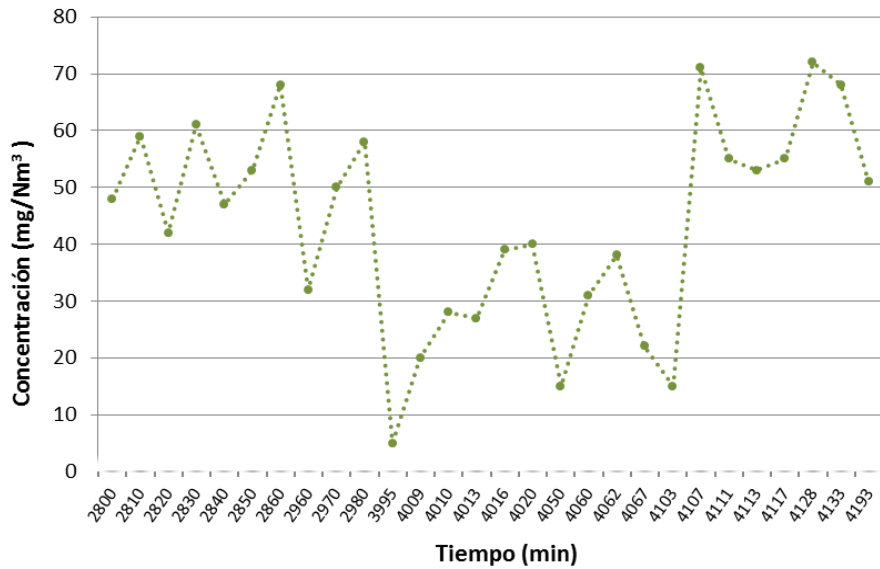
Fuente: Los autores del proyecto

Figura 24. Concentración de Monóxido de Nitrógeno (NO) en los gases productos de la combustión



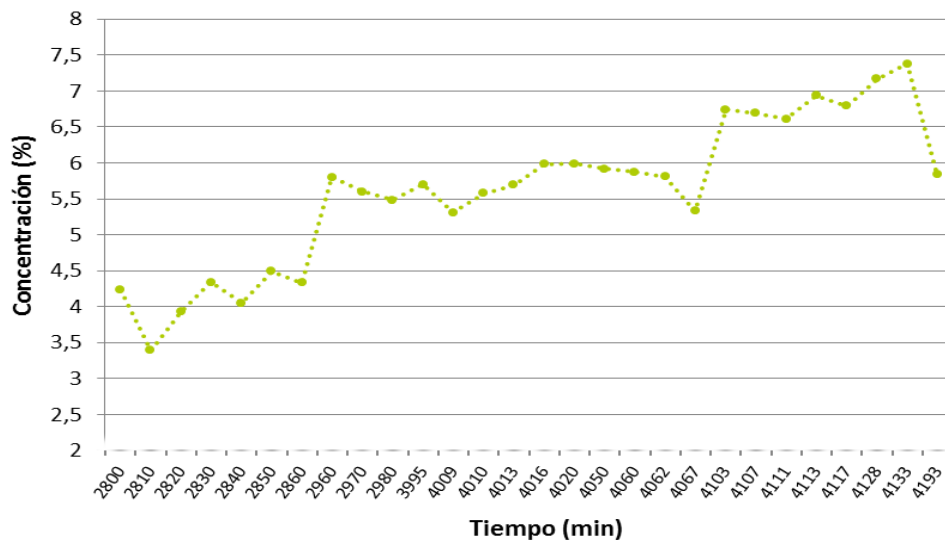
Fuente: los autores del proyecto

Figura 25. Concentración de Óxidos de (H₂S) en los gases productos de la combustión



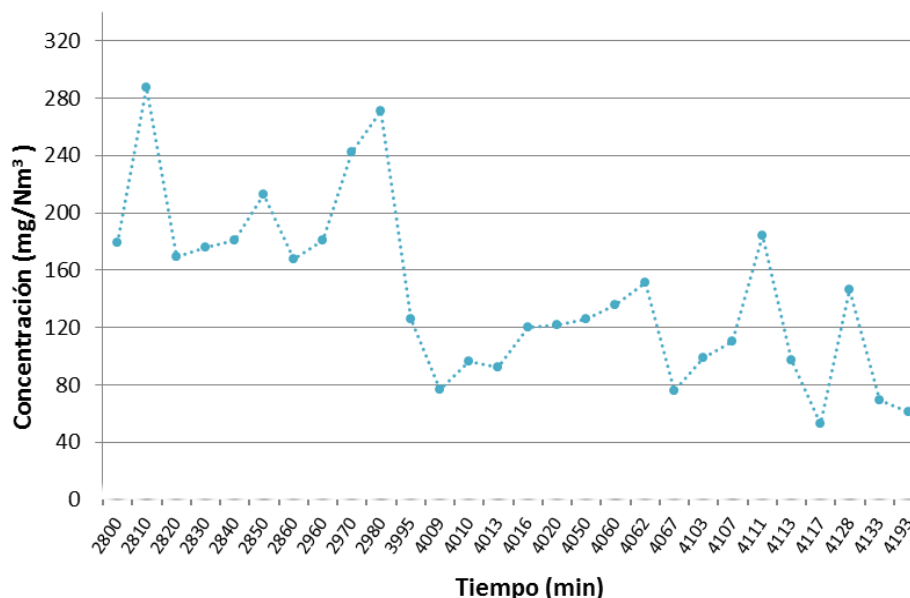
Fuente: Los autores del proyecto

Figura 26. Concentración de Dióxido de Carbono (CO₂) en los gases productos de la combustión



Fuente: Los autores del proyecto

Figura 27. Concentración de Óxidos de Nitrógeno (NOx) en los gases productos de la combustión

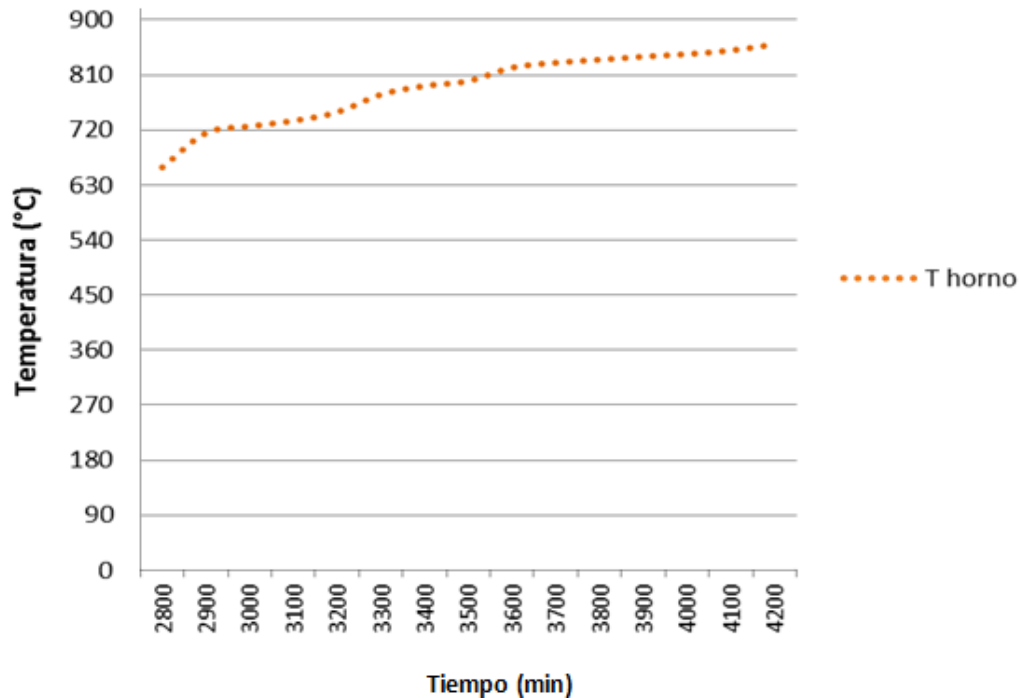


Fuente: Los autores del proyecto

Con el analizador de gases LANCOM también es posible medir la temperatura de los gases de escape, la cual es de gran interés ya que ésta se encuentra regulada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de acuerdo a lo estipulado en la Resolución 909 de 2008 (Capítulo X, Artículo 33) donde el límite de temperatura para hornos discontinuos es de 250 °C durante la etapa de máximo consumo de combustible. La temperatura promedio de los gases de combustión que salen por la chimenea, medidos con el analizador de gases y corroborados con los resultados obtenidos en el muestreo Isocinético es de 233,14 °C, el cual es un resultado favorable ya que se encuentra por debajo del límite estipulado por la norma medioambiental anteriormente mencionada.

En la Figura 28 se presentan los datos de las temperaturas dentro del horno, medidas por medio de una termocupla, durante el periodo crítico de la quema.

Figura 28. Temperatura del horno durante la etapa de análisis



Fuente: los autores del proyecto

Con base a la información recopilada, mostrada en las anteriores figuras, y al realizar un análisis de los mismos se puede apreciar que:

- ✓ Las concentraciones presentes evidencian una mala combustión ya que no debería haber presencia de monóxido de carbono en los gases, pues este contaminante es producto de combustible sin quemar.
- ✓ Las concentraciones de los contaminantes presentes en los gases de combustión muestran picos muy altos en algunos momentos del proceso lo cual demuestra la inestabilidad de la combustión del carbón en el horno colmena y la falta de control que se tiene de la misma.

- ✓ La presencia de oxígeno en los gases se da como resultado del exceso de aire presente en el interior del horno; según la resolución 909 de 2008 el máximo porcentaje de Oxígeno que se puede presentar es del 18% ya que en este proceso la concentración se encuentra alrededor del 14 %, esta concentración es admisible.

- ✓ La formación de óxidos de nitrógeno se debe principalmente a las altas temperaturas alcanzadas en el interior del horno, la emisión presente está dentro de los rangos permitidos por las entidades medioambientales que regulan este tipo de industria.

6. ANÁLISIS PROXIMO A UNA MUESTRA DEL CARBÓN USADO EN LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.

A continuación se muestra detalladamente el procedimiento realizado para analizar el carbón usado en la combustión de los hornos colmena presentes en la Empresa Ladrillos y Acabados S.A.S, este análisis se realizó en el laboratorio de piro-metalúrgica de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Industrial de Santander, donde se midieron las siguientes propiedades: humedad, cenizas, material volátil, poder calorífico y azufre.

Para llevar a cabo estos análisis se requiere que el carbón se encuentre pulverizado y dado que en la empresa lo usan en bloques (Figura 30), el carbón debe pasar por diferentes procesos para reducir su tamaño de grano, inicialmente se hace pasar a través de un molino de mandíbulas donde se tritura (Figura 29).

Figura 29. Molino de mandíbulas



Fuente: Los autores del proyecto

Figura 30. Carbón en bloque



Fuente: Los autores del proyecto

Figura 31. Carbón triturado



Fuente: Los autores del proyecto

Después de la trituración (Figura 31) el carbón se introduce en el molino de bolas (Figura 31) durante un tiempo aproximado de seis (6) horas para la reducción final del grano, teniendo el carbón pulverizado (Figura 33) se hace pasar a través de un tamiz de 100 hilos por cm^2 (Figura 34) dejando listo el carbón para realizar las pruebas.

Figura 32. Molino de bolas



Fuente: Los autores del proyecto

Figura 33. Carbón pulverizado



Fuente: los autores del proyecto

Figura 34. Tamiz de 100 hilos por cm²



Fuente: Los autores del proyecto

6.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

Esta prueba se realiza según la Norma D3173 de la ASTM, midiendo la pérdida de peso de una muestra de aproximadamente un gramo de carbón cuando ésta se calienta a condiciones controladas de temperatura, presión y tiempo. Para mayor exactitud en los resultados se hace la prueba a dos muestras y se halla el valor promedio entre ellas.

6.1.1 Descripción del procedimiento de determinación del contenido de humedad. Para la realización de la prueba es necesario:

- ✓ Calentar los crisoles vacíos
- ✓ Dejar enfriar los crisoles en un desecador (Figura 35) durante 15 minutos

Figura 35. Desecador



Fuente. Los autores del proyecto

- ✓ Pesar los crisoles en la balanza (Figura 36).
- ✓ Agregar el gramo de muestra de carbón al crisol y comprobar su peso

Figura 36. Balanza



Fuente: los autores del proyecto

- ✓ Llevar los crisoles a un horno (Figura 37), precalentado a 110°C y dejarlos aproximadamente por una hora

Figura 37. Horno



Fuente: los autores del proyecto

- ✓ Sacar los crisoles y dejarlos enfriar en el desecador
- ✓ Pesar los crisoles

Muestra 1

- ✓ **Peso crisol vacío:** $m_1 = 17.91537 \text{ g}$
- ✓ **Peso crisol con la muestra:** $m_2 = 18.91637 \text{ g}$
- ✓ **Peso del crisol con la muestra después de pasar por el horno:**
 $m_3 = 8.90886 \text{ g}$

$$\begin{aligned} \% \text{Humedad} &= \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100\% = \frac{18.91637 - 8.90886}{18.91637 - 17.91537} \cdot 100\% \\ &= 0.75\% \end{aligned}$$

Muestra 2

- ✓ **Peso crisol vacío:** $m_1 = 13.21893$ g
- ✓ **Peso crisol con la muestra:** $m_2 = 14.21880$ g
- ✓ **Peso del crisol con la muestra después de pasar por el horno:**

$$m_3 = 14.21037\text{g}$$

$$\begin{aligned} \% \text{Humedad} &= \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100\% = \frac{14.21880 - 14.21037}{14.21880 - 13.21893} \cdot 100\% \\ &= 0.84\% \end{aligned}$$

$$\text{Promedio \% Humedad} = 0.79\%$$

6.2 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE CENIZAS

Esta prueba se realiza según la Norma D3174 de la ASTM, midiendo la cantidad de carbón en una muestra cuando ésta se quema a condiciones controladas de temperatura, presión y tiempo. Para mayor exactitud en los resultados se hace la prueba a dos muestras y se halla el valor promedio entre ellas.

6.2.1 Descripción del procedimiento de determinación del contenido de cenizas. Para la realización de la prueba es necesario:

- ✓ Calentar los crisoles vacíos
- ✓ Dejar enfriar los crisoles en un desecador durante 15 minutos (Figura 35)
- ✓ Pesar los crisoles en la balanza
- ✓ Agregar el gramo de muestra de carbón al crisol y comprobar su peso (Figura 36)

- ✓ Llevar los crisoles a un horno de altas temperaturas (Figura 38) que se encuentre frío y poner a calentar hasta llegar a una temperatura de 950 °C, mantener en esta temperatura por dos horas más.
- ✓ Dejar enfriar en el desecador
- ✓ Pesar los crisoles

Figura 38. Horno de alta temperatura



Fuente: los autores del proyecto

Muestra 1

- ✓ **Peso crisol vacío:** $m_1 = 12.85931 \text{ g}$
- ✓ **Peso crisol con la muestra:** $m_2 = 13.86003 \text{ g}$
- ✓ **Peso del crisol con la muestra después de pasar por el horno:**

$$m_3 = 12.93700 \text{ g}$$

$$\begin{aligned} \%Cenizas &= \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100\% = \frac{12.93700 - 12.85931}{13.86003 - 12.85931} \cdot 100\% \\ &= 7.76\% \end{aligned}$$

Muestra 2

- ✓ **Peso crisol vacío:** $m_1 = 11.5015 \text{ g}$
- ✓ **Peso crisol con la muestra:** $m_2 = 12.15041 \text{ g}$
- ✓ **Peso del crisol con la muestra después de pasar por el horno:**

$$m_3 = 11.25132 \text{ g}$$

$$\begin{aligned} \% \text{Cenizas} &= \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100\% = \frac{11.25132 - 11.5015}{12.15041 - 11.5015} \cdot 100\% \\ &= 10.11\% \end{aligned}$$

Promedio % Ceniza= 8.93%

6.3 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE MATERIAL VOLÁTIL

Esta prueba se realiza según la Norma D3175 de la ASTM, midiendo la pérdida de peso de una muestra cuando ésta se calienta a condiciones controladas de temperatura, presión y tiempo. Para mayor exactitud en los resultados se hace la prueba a dos muestras y se halla el valor promedio entre ellas.

6.3.1 Descripción del procedimiento de determinación del contenido de material volátil. Para la realización de la prueba es necesario:

- ✓ Calentar los crisoles vacíos con tapa
- ✓ Dejar enfriar los crisoles en un desecador durante 15 minutos (Figura 35)
- ✓ Pesar los crisoles en la balanza
- ✓ Agregar el gramo de muestra de carbón al crisol y comprobar su peso (Figura 36)

Figura 39. Crisoles con sus tapas



Fuente: los autores del proyecto

- ✓ Llevar los crisoles con tapa (Figura 39) a un horno de alta temperatura a 950 °C durante 7 minutos.
- ✓ Pesar los crisoles

Muestra 1

- ✓ **Peso crisol vacío:** $m_1 = 21.37071$ g
- ✓ **Peso crisol con la muestra:** $m_2 = 22.52851$ g
- ✓ **Peso del crisol con la muestra después de pasar por el horno:**

$$m_3 = 22.05075 \text{ g}$$

$$\begin{aligned} \%MV &= \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100\% - \%H \\ &= \frac{22.52851 - 22.05075}{22.52851 - 21.37071} \cdot 100\% - 0.79 = 40.47\% \end{aligned}$$

Muestra 2

✓ **Peso crisol vacío:** $m_1 = 24.15980$ g

✓ **Peso crisol con la muestra:** $m_2 = 25.16246$ g

✓ **Peso del crisol con la muestra después de pasar por el horno:**

$$m_3 = 24.81239 \text{ g}$$

$$\begin{aligned} \%MV &= \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \cdot 100\% - \%H \\ &= \frac{25.16246 - 24.81239}{25.16246 - 24.15980} \cdot 100\% - 0.79 = 34.12\% \end{aligned}$$

Promedio %MV = 37.29%

6.4 ANÁLISIS % CARBONO FIJO

Este cálculo se realiza según la Norma D3172 de la ASTM, así:

%Carbono fijo = 100% - %Humedad - %Ceniza - %Material Volátil

%Carbono fijo = 100% - 0.79% - 8.93% - 37.29%

%Carbono fijo = 52.99%

6.5 DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO

Esta prueba se realiza según Norma D5865 de la ASTM, multiplicando el aumento de temperatura ajustada por factores externos por la capacidad calórica de la bomba calorimétrica y dividiendo en la masa de la muestra de carbón.

6.5.1 Descripción del procedimiento de determinación del poder calorífico.

Para la realización de la prueba es necesario:

- ✓ Calentar el crisol vacío
- ✓ Dejar enfriar el crisol en un desecador durante 15 minutos (Figura 35)
- ✓ Pesar el crisol en la balanza
- ✓ Agregar el gramo de muestra de carbón al crisol y comprobar su peso (Figura 36)
- ✓ Llevar el crisol a la bomba calorimétrica (Figura 40).

Figura 40. Bomba calorimétrica



Fuente: Los autores del proyecto

- ✓ Presurizar la bomba calorimétrica a 30 atmosferas
- ✓ Registrar los cambios de temperatura durante todo el procedimiento

Muestra 1

- ✓ **Temperatura ambiente:** $t_1=24.38^{\circ}\text{C}$
- ✓ **Temperatura máxima alcanzada por el agua:** $t_2=26.83^{\circ}\text{C}$
- ✓ **E:** capacidad calorífica = $5088.366 \frac{\text{Btu}\cdot\text{g}}{\text{lb}\cdot^{\circ}\text{C}}$
- ✓ **m :** masa de carbón = 1 g
- ✓ **e₁ :** corrección por la formación de carbonato de sodio = $10 \frac{\text{Btu}}{\text{ml}} \cdot \text{ml carbonato}$

$$e_1 = 10 \frac{\text{Btu}}{\text{ml}} \cdot 3.6 \text{ml} = 36 \text{ Btu}$$

✓ e_2 : corrección por el alambre fusible = $0.41 \frac{\text{Btu}}{\text{mm}} \cdot \text{mm alambre}$

$$e_2 = 0.41 \frac{\text{Btu}}{\text{mm}} \cdot 100 \text{mm} = 410 \text{ Btu}$$

$$\text{Poder Calorifico} = \frac{(t_2 - t_1) \cdot E - e_1 - e_2}{1}$$

$$\begin{aligned} \text{Poder Calorifico} &= \frac{(26.83 - 24.38) 5088.36 - 36 - 410}{1} = 12020 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \\ &= 6678.04 \frac{\text{Cal}}{\text{g}} \end{aligned}$$

6.6 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AZUFRE

Esta prueba se realiza según Norma D3177 de la ASTM, por el método de lavado de la bomba calorimétrica donde el azufre se precipita como sulfato de bario, se filtra, se incinera y se pesa.

6.6.1 Descripción del procedimiento de determinación del contenido de azufre. Para la realización de la prueba es necesario:

- ✓ Despresurizar el equipo
- ✓ Abrir la bomba calorimétrica y verificar que no haya material sin quemar, de lo contrario se debe repetir la prueba de determinación del poder calorífico
- ✓ Lavar con agua destilada mezclada con metil naranja el interior de la bomba calorimétrica, hasta que no haya ninguna reacción acida

- ✓ Valorar el agua recogida con carbonato de sodio para obtener la corrección por ácido
- ✓ Ajustar el PH con hidróxido de amonio diluido
- ✓ Calentar la solución hasta la ebullición
- ✓ Filtrar la solución
- ✓ Recoger el material filtrado e incinerar a 800 °C para obtener el sulfato de bario

Muestra 1

- ✓ **A:** Gramos de Sulfato de Bario precipitados = 0.06465 g
- ✓ **B:** Corrección del sulfato de Bario = 0.000622
- ✓ **C:** Gramos de muestra = 1, 02 g

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

$$\%Azufre = \frac{(0.06465 - 0.000622) \cdot 13,78}{1,02} = 0.87 \%$$

6.7 RESULTADOS

En la Tabla 14 se presentan los resultados hallados en las distintas pruebas realizadas en el análisis próximo a una muestra del carbón usado por empresa LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.

Tabla 14. Análisis próximo del carbón usado en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.

PROPIEDAD	VALOR
Humedad	0.79 %
Cenizas	8.93%
Material Volátil	37.29%
Carbono fijo	52.99%
Poder calorífico	12020 (Btu/lb)
Azufre	0.87%

Fuente: los autores del proyecto

6.7.1 Clasificación del carbón según su análisis próximo. La clasificación del tipo de carbón se realiza de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis próximo realizado a la muestra del carbón usado por la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S., según la norma ASTM D388.

Conforme a los resultados obtenidos en el análisis próximo realizado a la muestra de carbón usado por la Empresa Ladrillos y Acabados S.A.S (Tabla 14) y según la ASTM D388 (Tabla 15) se encuentra que el carbón usado por la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S es un **Carbón Bituminoso Alto en Volátiles C**; esta clasificación permite considerar este carbón como apto para procesos térmicos como lo es la cocción del ladrillo y material cerámico, aunque sería ideal trabajar con un carbón de mayor rango, ya que así se tendría más energía disponible para la combustión, que es la condición más importante para los procesos térmicos como el de esta industria.

Tabla 15. Clasificación del carbón usado en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. Según ASTM D388

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

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

6.7.2 Comparación de resultados con el análisis realizado en el año 2011 al carbón usado por la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. En el año 2011 se realizó como parte del proyecto de grado titulado “Desarrollo de una propuesta de optimización energética de los hornos colmena de la empresa Ladrillos y acabados S.A.S.” un análisis próximo al carbón empleado para las quemas y los resultados obtenidos en éste análisis son los que actualmente la empresa tiene como referencia del tipo de carbón que usan en su proceso de cocción; con el nuevo análisis próximo realizado en este proyecto al carbón empleado actualmente por la empresa se desea corroborar si se está empleando el mismo tipo de carbón y sino cuales son las propiedades del mismo. En la Tabla 16 se muestran los resultados de los dos análisis.

Tabla 16. Resultado análisis próximo años 2011 y 2013

Propiedades	Resultados año 2011	Resultados año 2013
% Humedad	0.94	0.79
% Cenizas	9.39	8.93
% Material Volátil	38.74	37.29
% Carbono fijo	50.93	52.99
Poder calorífico (Btu/lb)	13291.74	12020
% Azufre	1	0.87
Clasificación ASTM	Carbón Bituminoso Alto en Volátiles B	Carbón Bituminoso Alto en Volátiles C

Fuente: Los autores del proyecto

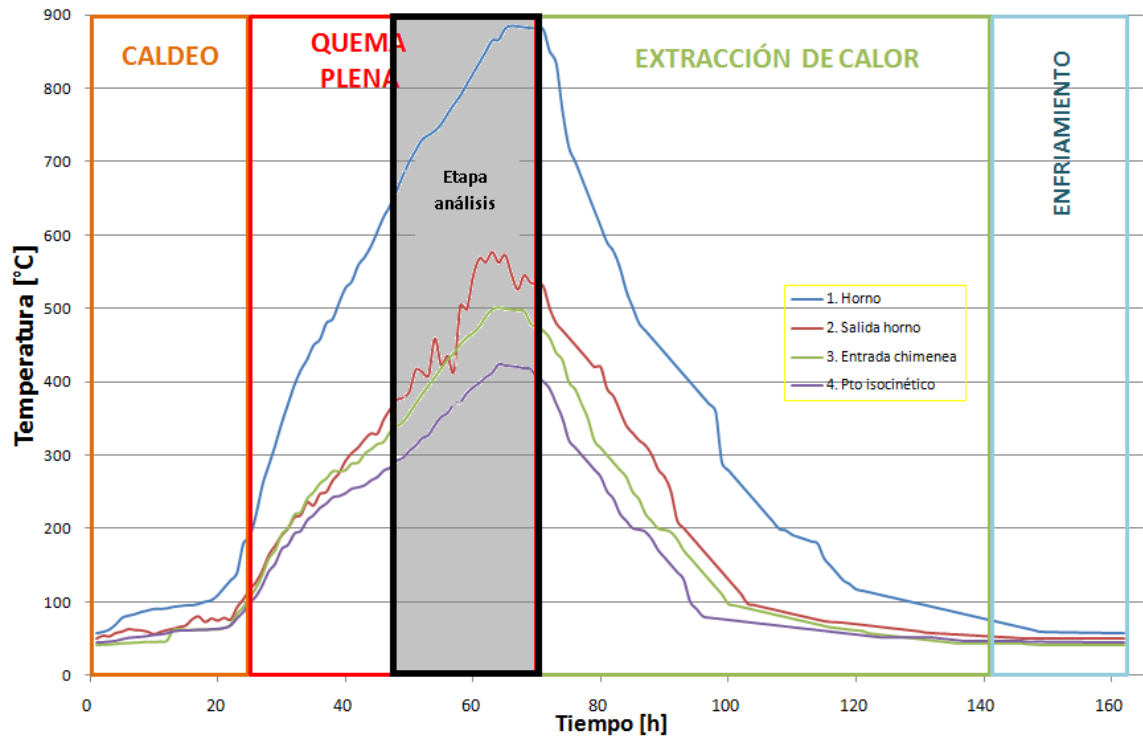
7. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE COCCIÓN EN EL HORNO COLMENA DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.

La caracterización del proceso de cocción del ladrillo y material cerámico del horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. requiere estudiar todos y cada uno de los factores presentes en este proceso de producción para lo cual se hace necesaria, entre otras cosas, la realización de un balance de masa y energía que también permite identificar si el proceso de combustión del horno colmena es eficiente y que rendimiento energético se presenta en él.

Para el desarrollo de este modelo de cálculo se deben tener en cuenta las siguientes condiciones:

- ✓ El análisis se realiza a la etapa final del proceso de cocción en el horno colmena, ya que ésta es la etapa más crítica y de mayor interés medioambiental principalmente por las altas temperaturas que se presentan, de acuerdo a lo establecido por “*El Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas*” del Ministerio de Ambiente, Vivienda y desarrollo territorial, como se muestra en la Figura 41.
- ✓ El tiempo de la etapa analizada es el comprendido entre la hora 47 y la hora 70 medidas a partir del inicio de la quema en el horno; donde la temperatura del horno asciende de 610°C a 860°C aproximadamente.
- ✓ Se asume para el análisis estado estable.
- ✓ La cantidad de carbón empleada durante la etapa en estudio se calcula aproximadamente en 7430,769 Kg.
- ✓ Consideramos que los cambios de temperatura en la arcilla al interior del horno son equivalentes a los cambios de temperatura del horno.

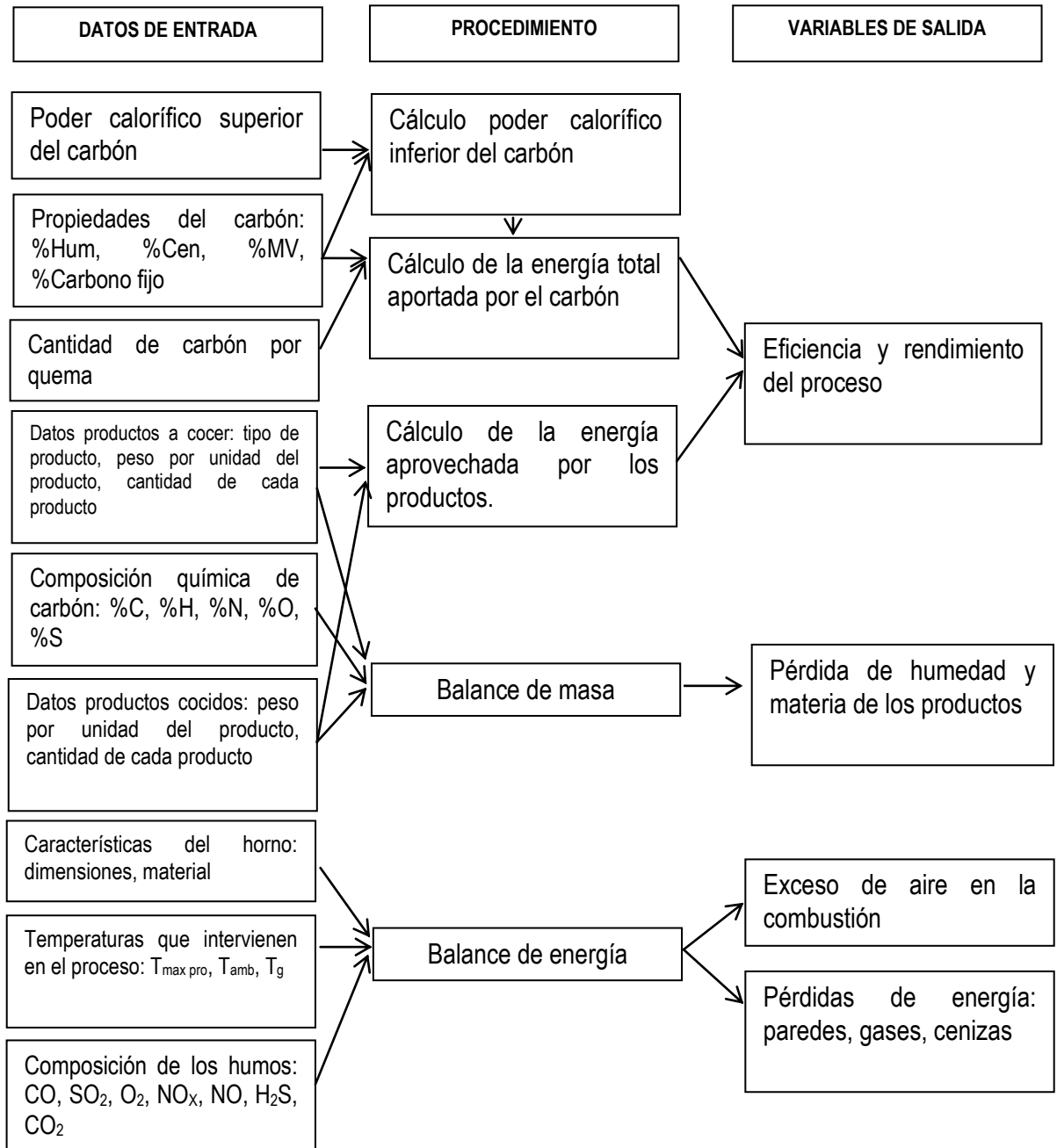
Figura 40. Temperaturas alcanzadas en el horno colmena.



Fuente: Diseño de un sistema para la recuperación en los gases de combustión de los hornos colmena en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.

En la Figura 42 se presenta el flujograma general de todo el proceso que se debe realizar para poder conocer las características de la combustión en el horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S y seguidamente se presenta el desarrollo detallado de todos los cálculos. Con base en este flujograma también se desarrolla un pequeño programa en Matlab que facilita y agiliza todo el proceso de cálculos.

Figura 41. Flujoograma global del proceso de cálculos para la caracterización del proceso de cocción

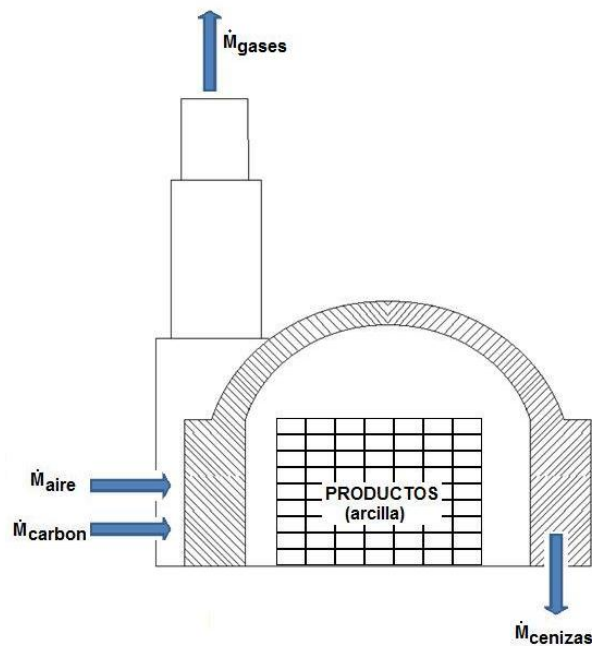


Fuente: los autores del proyecto

7.1 BALANCE DE MASA Y ENERGIA DEL HORNO COLMENA USADO EN LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.

Para la realización del balance de masa y energía es necesario conocer todas las características del combustible y de la materia prima usada, como son: la cantidad del combustible usado por quema, el análisis próximo y último del carbón, el poder calorífico superior e inferior del carbón, las temperaturas del proceso y del ambiente, la cantidad de materia prima a cocer, las propiedades de dicha materia prima, la composición de los gases producto de la combustión, etc. Este balance debe realizarse a un volumen de control como el mostrado en la Figura 43.

Figura 42. Volumen de control en el horno colmena



Fuente: Los autores del proyecto

Dado que el carbón usado por la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. es traído de una mina ubicada en el departamento de Boyacá – Colombia para efectos de cálculos son usados los datos promedio de acuerdo a la zona de extracción del

carbón, con esto se logra conocer el análisis último del carbón y corroborar la similitud de los datos obtenidos en el análisis próximo realizado en el laboratorio con los datos promedio a nivel nacional.

Tabla 17. Análisis próximo y último del carbón promedio en la zona de Boyacá

ANALISIS PROXIMO	
% Humedad	5,19
% Cenizas	11,55
% Material volátil	35,36
% Carbono fijo	47,89
Poder calorífico (Kcal/ Kg)	6678,04
ANALISIS ULTIMO	
% C	66,41
% H	5,04
% N	1,5
% O	10,19
% S	1,4

Fuente: Ecocarbón. Hornos Ladrilleros a Carbón.

En la Tabla 18 se presentan las características y cantidades de la materia prima usada en la quema del horno colmena de la empresa Ladrillos y acabados S.A.S en estudio.

Tabla 18. Productos en una quema del horno colmena

Producto	Peso/unidad cruda (kg)	Peso/unidad cocida (kg)	Cantidad (unidades)
Ladrillo h10	5,7	5,2	14.556
Ladrillo h12	6,6	6	3.583
Ladrillo h15	8,5	6	1.188
Teja	2,8	2,4	3.311

Fuente: Empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.

7.1.1 Balance de masa en el horno colmena. El balance de masa se realiza con el fin de identificar las cantidades de masa del combustible (carbón) y el producto a cocer (arcilla) que intervienen dentro del sistema (horno colmena) y sus condiciones físicas y químicas. Las cantidades másicas de combustible y materia prima usadas en una quema en el horno se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19. Pesos totales de obra y combustible en una quema del horno colmena

Peso total obra cruda (Kg)	Peso total obra cocida (Kg)	Disminución en peso (Kg)
125.958,8	112.263,6	13.722,2
Carbón promedio usado en una quema (Kg)		19.500

Fuente: los autores del proyecto

Las masas que intervienen en el volumen de control seleccionado (horno colmena), están representadas en la siguiente ecuación:

$$m_c + m_a + m_{ocr} = m_g + m_{ce} + \Delta m_o + m_{oc}$$

(A)

Dónde:

✓ m_c es la masa de combustible

- ✓ m_a es la masa de aire
- ✓ m_{ocr} es la masa de obra a cocer
- ✓ m_g es la masa de gases
- ✓ m_{ce} es la masa de cenizas
- ✓ m_{oc} es la masa de obra cocida
- ✓ Δm_o es la masa de obra perdida más la humedad de la obra cruda, lo que es equivalente a la masa de obra cruda menos la masa de obra cocida.

En función de la ecuación (A) y teniendo el contenido medio de humedad de la arcilla en la entrada del horno, de aproximadamente 8%, se puede conocer la masa de agua evaporada, la masa de arcilla seca y la pérdida de masa de arcilla cargada en el horno colmena, como se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20. Masas relacionadas en el proceso de cocción del horno colmena

Masa de arcilla seca (Kg)	Masa de agua evaporada m_{agua} eva (Kg)	Pérdida de masa de arcilla (Kg)
115.906,93	10.078,86	3.643,34

Fuente: los autores del proyecto

7.1.1.1 Cálculo de algunas propiedades del carbón según los resultados del análisis próximo y análisis último. Por medio del análisis próximo realizado al carbón se logra conocer el poder calorífico superior del mismo, pero debido a la humedad presente en el combustible al momento de realizar la combustión parte de ese poder calorífico es usado para evaporar dicha humedad, por lo cual la energía neta del carbón que puede ser aprovechada en la combustión es menor al poder calorífico superior y se conoce como poder calorífico inferior y es hallado a través de la siguiente fórmula:

$$PCI = PCS - (m_{\text{agua}} \times \lambda_{25^{\circ}\text{C}})$$

Dónde:

- ✓ m_{agua} es la cantidad de agua contenida en el combustible
- ✓ $\lambda_{25^{\circ}\text{C}}$ es el calor latente de vaporización del agua a 25 °C.

$$\lambda_{25^{\circ}\text{C}} = \frac{2440\text{Kj}}{\text{Kg}} = \frac{582,78\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

Para el cálculo del poder calorífico inferior del carbón se debe tomar como referencia 1 Kg de carbón y conocer:

- ✓ % Humedad: 5,19 %
- ✓ % Hidrogeno: 5,04 %
- ✓ Poder calorífico superior (PCS) : 6678,04 Kcal/ Kg

Con los anteriores datos se pueden conocer los kilogramos de Hidrogeno presentes en 1 Kg de carbón, así:

$$\frac{0,9481 \text{ Kg(base seca)}}{1\text{Kg de carbón}} \times \frac{0,05 \text{ Kg de Hidrogeno}}{1 \text{ Kg(Base seca)}} = 0,0474 \text{ Kg de H/Kg Carbon}$$

Y a partir de esto conocer la cantidad de agua generada por el Hidrógeno presente:

$$\begin{aligned} 0,0474 \frac{\text{Kg de H}}{\text{Kg de Carbón}} &\times \frac{1 \text{ Kmol de H}_2}{2 \text{ Kg de H}} \times \frac{1 \text{ Kmol de H}_2\text{O}}{1 \text{ Kmol de H}_2} \times \frac{18 \text{ Kg de H}_2\text{O}}{1 \text{ Kmol de H}_2\text{O}} \\ &= 0,4266 \frac{\text{Kg de H}_2\text{O}}{\text{Kg de Carbón}} \end{aligned}$$

El agua total contenida en el combustible es la suma del agua generada a partir del Hidrógeno y el agua presente por la humedad del combustible, así:

$$\text{Agua total} = H_2O \text{ a partir de H} + \text{Humedad}$$

$$\text{Agua total} = (0,0519 + 0,4266) \frac{\text{Kg de } H_2O}{\text{Kg de Carbón}}$$

$$\text{Agua total} = 0,4785 \frac{\text{Kg de } H_2O}{\text{Kg de Carbon}} = m_{\text{agua}}$$

Poder calorífico inferior (PCI)

$$PCI = PCS - (m_{\text{agua}} \times \lambda_{25^\circ C})$$

$$PCI = 6678,04 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} - \left(0,4785 \frac{\text{Kg } H_2O}{\text{Kg Carbon}} \times 582,78 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \right)$$

$$PCI = 6399,179 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$$

Otro factor es la cantidad de Carbono que realmente está presente en el carbón, ya que en las cenizas del carbón se encuentra Carbono que no es usado en la combustión, para lo cual se realiza un análisis de la carbonilla en las cenizas contenidas en el carbón, como sigue:

$$\% \text{ Carbono} = \% C = 66,45 = 664,5 \text{ gr Carbono/Kg Carbón}$$

$$\% \text{ Ceniza} = \% Cz = 11,5 = 115 \text{ gr Cz/Kg Carbón}$$

Los porcentajes de Carbono y ceniza presentes en el combustible se muestran en la Tabla 16 y dependen del tipo de carbón usado.

De acuerdo a la siguiente ecuación se conoce la cantidad de Carbono presente en la carbonilla:

$$\frac{C + r}{c + C_z} = 0,15$$

5

Dónde:

- ✓ C son los gramos de carbono que contiene un kilogramo de carbón.
- ✓ Cz son los gramos de cenizas que contiene un kilogramo de carbón.
- ✓ c son los gramos de carbono en la carbonilla.
- ✓ r es la fracción de la carbonilla que no es carbono.

Para la anterior expresión se asume por el tipo de carbón usado que esta relación es de un 15%.

$$\frac{c}{r} = \frac{C}{C_z} = \frac{664,5}{115} = 5,75$$

Donde $\frac{c}{r}$ es la relación del contenido de Carbono presente en las cenizas, despejando y realizando el cálculo:

$$c = 16,92gr = \text{cantidad de C contenido en la carbonilla}$$

Entonces la cantidad útil de Carbono por Kg de Carbón es:

$$664,5 - 16,92 = 647,6 \frac{\text{gr de C}}{\text{Kg carbon}}$$

⁵ MARADEY CHARRIS, Juan Francisco. Termodinámica Aplicada. Capítulo 4, Combustión.

7.1.2 Balance de energía en el horno colmena. El balance de energía permite conocer las cantidades de energía que intervienen en el proceso de combustión de carbón en el horno colmena, su aprovechamiento y sus pérdidas.

El balance de energía dentro del volumen de control (horno colmena), se muestra básicamente en la siguiente ecuación:

$$E_c = E_g + E_{ce} + E_p + E_{oc}$$

Dónde:

- ✓ E_c es la energía aportada por el combustible en el proceso de combustión con el aire
- ✓ E_g es la energía arrastrada por los gases
- ✓ E_{ce} es la energía pérdida en las cenizas
- ✓ E_p energía en las paredes
- ✓ E_{oc} energía aprovechada por los productos en su proceso de cocción.

7.1.2.1 Energía total del carbón entregada en el proceso de combustión. La energía total del carbón usada en el proceso de combustión del horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.AS es directamente proporcional a la cantidad de carbón empleada en la quema y al poder calorífico inferior de éste, como se muestra:

$$E_T = m_{carbon} * PCI$$

Dónde:

- ✓ E_T es la energía entregada por el carbón.

- ✓ m_{carbon} es la masa total de carbón empleada en la etapa en estudio (7430,769 Kg).
- ✓ PCI es el poder calorífico inferior del carbón.

Realizando el cálculo se encuentra que:

$$E_T = 7430,769 \text{ Kg} * 6399,179 \text{ Kcal/Kg}$$

$$E_T = 47'550.822,4 \text{ Kcal}$$

7.1.2.2 Energía total requerida por la arcilla. La energía total requerida por la arcilla para su proceso en el horno colmena es la suma de la energía necesaria para evaporar la humedad de la arcilla y la energía para cocer la arcilla sin humedad.

$$E_u = E_{ar} + E_{agua\ eva}$$

Dónde:

- ✓ E_u es la energía total usada en el proceso
- ✓ E_{ar} es la energía necesaria para cocer la arcilla
- ✓ $E_{agua\ eva}$ es la energía necesaria para retirar la humedad

Dado que la fase en estudio es en la etapa de quema plena o fuego bravo del horno, la arcilla en ese momento del proceso ya no cuenta con humedad, ya que esta es retirada en la etapa de caldeo, por esto la energía en interés es la necesaria para cocer la arcilla.

Energía requerida por la arcilla. La energía requerida por la arcilla es la energía que se requiere aprovechar del combustible para cocer la arcilla sin tener en cuenta la humedad presente en la masa de arcilla, para lo cual se usa la siguiente expresión matemática:

$$E_{ar} = m_{ar} \times C_{ar} \times \Delta T$$

Dónde:

- ✓ E_{ar} es la Energía requerida por la arcilla
- ✓ m_{ar} es la masa de la arcilla sin humedad
 $m_{ar} = 115.906,93 \text{ Kg}$
- ✓ C_{ar} es el calor específico de la arcilla
 $C_{ar} = 0.26 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$
- ✓ ΔT es la diferencia de temperaturas entre la temperatura máxima alcanzada y la temperatura inicial.
 $\Delta T = (T_m - T_i)$
- ✓ T_i es la temperatura inicial
 $T_i = 610 \text{ }^\circ\text{C}$
- ✓ T_m es la temperatura máxima
 $T_m = 860^\circ\text{C}$

Llevando los datos a la formula, se encuentra:

$$E_{ar} = 115.906,93 \text{ Kg} * 0,26 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C} * (860 - 610)^\circ\text{C}$$

$$E_{ar} = 7'533.950,45 \text{ Kcal}$$

7.1.2.3 Energía perdida en el horno colmena. Las pérdidas de energía en el horno colmena se deducen gracias al balance de masa y energía, estas se deben

al flujo de energía que llevan los gases de chimenea, a la pérdida de energía por paredes y a los inquemados.

7.1.2.4 Energía perdida en los gases productos de la combustión. Para calcular la energía perdida por los gases productos de la combustión se debe usar el análisis de gases donde se conocen las concentraciones de las diferentes sustancias que componen los gases.

El cálculo de la pérdida de energía específica en los gases se realiza según la siguiente ecuación:

(I)

$$e_g = [X_{CO} \times Cp_{CO} + X_{SO_2} \times Cp_{SO_2} + X_{O_2} \times Cp_{O_2} + X_{NO} \times Cp_{NO} + X_{H_2S} \times Cp_{H_2S} + X_{CO_2} \times Cp_{CO_2} + X_{N_2} \times Cp_{N_2}] \times [T_g - T_a]$$

Dónde:

- ✓ e_g es la pérdida de energía específica de los gases de combustión
- ✓ C_p es el calor específico para cada uno de los gases de combustión
- ✓ X es la relación en peso de los gases con el combustible
- ✓ T_g es la temperatura de salida de los gases
- ✓ T_a es la temperatura del ambiente

Entonces para realizar este cálculo de pérdida de energía se hace necesario conocer cada uno de los factores presentes en la Ecuación (I), dichos procedimientos se presentan a continuación.

En el análisis de gases realizado en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. se llevaron a cabo mediciones en distintos momentos de la etapa de quema plena y debido a la inestabilidad de las condiciones de la combustión se evidencia una

gran dispersión en los valores obtenidos de las concentraciones, para efectos de cálculo se tomó un valor medio de estas.

Tabla 21. Concentraciones halladas en los gases de chimenea según el análisis de gases realizado al horno de Ladrillos y Acabados S.AS.

Sustancia	Concentración (mg/Nm ³)
CO	724,5
SO ₂	2289
NO	113,5
H ₂ S	36,5
NO _x	166
O ₂	14,05 %
CO ₂	5,33 %

Fuente: los autores del proyecto

7.1.2.5 Composición porcentual de los gases de chimenea. Dado que las concentraciones de todos los componentes del gas se encuentran en unidades de miligramo por metro cubico normalizado (mg/Nm³), excepto el oxígeno (O₂) y el dióxido de carbono (CO₂) que están en valor porcentual, se debe hacer la conversión de unidades para llevar todos los valores a porcentaje; para esto puede usarse la siguiente expresión:

(1)

$$\begin{aligned}
 & \text{Componente} \left[\frac{mg}{Nm^3} \right] \\
 & = \left(\frac{21 - \%O_{ref}}{21 - \%O_{gas}} \right) \times \text{Componente} [PPM] \times \frac{\text{Peso Molecular}}{22,4}
 \end{aligned}$$

6

⁶ Unidades de medida. Academia TESTO. www.academiatesto.com.ar

Para el cálculo de la composición de los gases se debe tener en cuenta que un mol de cualquier gas ideal a condiciones normales ocupa un volumen de 22,4 litros y este dato es usado en la ecuación (1).

✓ **Cálculo tipo:**

Para el CO, usando la ecuación (1) se tiene:

$$724,5 \text{ mg}/Nm^3 = \left(\frac{21 - 18}{21 - 14,5} \right) \times CO [PPM] \times \frac{28}{22,4}$$

$$CO [PPM] = 1342,74$$

Para su equivalente en porcentaje se divide en 10000, así:

$$CO[\%] = 0,134$$

Tabla 22. Concentraciones porcentuales de los gases de chimenea del horno colmena

Sustancia	Concentración (%)
CO	0,134
SO ₂	0,185
O ₂	14,05
NO	0,019
H ₂ S	0,0056
CO ₂	5,33
N ₂	80,27

Fuente: Los autores del proyecto

7.1.2.6 Balance estequiométrico de la combustión. El balance estequiométrico de la combustión se realiza de acuerdo a las ecuaciones presentes en la Tabla 23 y tomando como referencia que se producen cien (100) moles de humos o gases de escape.

Tabla 23. Ecuaciones estequiométricas para la combustión del carbón

Elemento de la combustión	Ecuación estequiométrica
Combustible	$a \left[\frac{647,6}{12} C + \frac{50,4}{1} H + \frac{101,9}{16} O + \frac{15}{14} N + \frac{14}{32} S \right]$
Aire	$b [O_2 + 3,77N_2]$
Humos	$0,134 CO + 0,185 SO_2 + 14,05 O_2 + 0,019 NO + 0,0056 H_2S + 5,33 CO_2 + 80,27 N_2 + c H_2O$

Fuente: Los autores del proyecto

Planteando la ecuación de combustión según los datos de la Tabla 23 y simplificando, se obtiene:

(2)

$$\begin{aligned}
 & a[53,9 C + 50,4H + 6,37O + 1,07N + 0,44S] + b[O_2 + 3,77N_2] \\
 & = [0,134CO + 0,185SO_2 + 14,05O_2 + 0,019NO + 0,0056H_2S \\
 & + 5,33CO_2 + 80,27N_2 + cH_2O]
 \end{aligned}$$

Con base en la anterior ecuación balanceando para cada componente se hallan los valores de los índices **a**, **b** y **c**.

✓ **Cálculo tipo:**

Balanceando la ecuación (2) para el Carbono (C), se tiene:

$$a \times 53,9 = 0,134 + 5,33$$

$$a = 0,101$$

Entonces: se requieren $0,101 \times 53,9 = 5,44 \text{ gr}$ de C para producir 100 moles de humos

Tabla 24. Valores de los índices en ecuación estequiométrica de la combustión del carbón

<i>a</i>	0,101
<i>b</i>	20,59
<i>c</i>	2,539

Fuente: los autores del proyecto

De acuerdo a los resultados obtenidos de los índices de la ecuación estequiométrica de la combustión del carbón, mostrados en la Tabla 24, se conocen las ecuaciones de la combustión ya balanceadas (Tabla 25)

Tabla 25. Ecuaciones balanceadas para la combustión del carbón

Elemento de la combustión	Ecuación estequiométrica balanceada
Combustible	$5,44 \times C + 5,1 \times H + 0,64 \times O + 0,11 \times N + 0,044 \times S$
Aire	$20,59 O_2 + 77,62 N_2$
Humos	$0,134 CO + 0,185 SO_2 + 14,05 O_2 + 0,02 NO + 0,0056 H_2S$ $+5,33 CO_2 + 80,27N_2 + 2,54 H_2O$

Fuente: Los autores del proyecto

7.1.2.7 Exceso de aire presente en la combustión. Para hallar el exceso de aire presente en la combustión es necesario conocer la relación estequiométrica y real aire – combustible, pues el exceso de aire es la relación entre los dos, así:

$$\text{exceso de aire} = \frac{A}{A^\circ} \times 100\%$$

Dónde:

- ✓ A es la relación real aire – combustible
- ✓ A° es la relación estequiométrica aire – combustible

La relación real aire – combustible se calcula con base en la siguiente ecuación:

$$A = \frac{b \times 138.3}{a \times m_{\text{carbon}}}$$

De la cual todos los térmicos están identificados, por lo tanto la relación real aire – combustible es:

$$A = \frac{20.59 \times 138.3}{0.101 \times 1000} = 28.19 \text{ Kg aire / Kg carbon}$$

La relación estequiométrica aire – combustible se calcula con base en la composición del carbón hallada en el análisis último, usando la siguiente ecuación:

$$A^{\circ} = 1.44 \times (8 \times 0.664 + 24 \times 0.05 + 3 \times 0.014 - 3 \times 0.1019)$$

$$A^{\circ} = 1.44 \times (8 \times C + 24 \times H + 3 \times S - 3 \times O)$$

$$A^{\circ} = 9$$

Con lo anterior la relación entre el aire real y el aire estequiométrico en la combustión es igual a:

El anterior resultado muestra que el exceso de aire presente en la combustión del carbón en el horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S es del **213.2%**.

7.1.2.8 Relación en peso de los gases con el combustible. Para calcular esta relación para cada elemento presente en los gases productos de la combustión se usa la siguiente ecuación:

$$X_{\text{elemento}} = \frac{0,134 \times \text{Peso molecular del elemento}}{\text{Peso combustible}}$$

Es necesario conocer el peso del combustible, el cual es hallado usando la ecuación estequiométrica del combustible relacionado en la Tabla 25 y el peso molecular de cada elemento, así:

$$\begin{aligned}
 \text{peso combustible} &= \\
 &5,44 \times C + 5,1 \times H + 0,64 \times O + 0,11 \times N + 0,044 \times S \\
 &5,44 \times 12 + 5,11 \times 1 + 0,64 \times 16 + 0,11 \times 14 + 0,044 \times 32 \\
 \text{peso combustible} &= 83,57 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

✓ **Cálculo tipo:**

Para el monóxido de carbono (CO)

$$X_{co} = \frac{0,134 \times \text{Peso molecular CO}}{\text{Peso combustible}}$$

$$X_{co} = 0,045 \text{ Kg CO / Kg carbon}$$

Tabla 26. Relación en peso de cada elemento presente en los gases de combustión

Sustancia	Relación X (Kg sustancia/ Kg carbón)
CO	0,045
SO ₂	0,142
O ₂	5,38
NO	0,007
H ₂ S	0,002
CO ₂	2,81
N ₂	26,9
H ₂ O	0,55

Fuente: los autores del proyecto

7.1.2.9 Calor específico Cp de los gases de combustión. Para el cálculo del calor específico Cp de los gases producto de la combustión del carbón a las condiciones de salida de estos por la chimenea se requiere usar la siguiente ecuación:

$$(3) C_p = a + b \times T + c \times T^2 + d \times T^3$$

La ecuación (3) está en función de la temperatura de salida de los gases de combustión por la chimenea en grados Kelvin, y las variables *a*, *b*, *c* y *d* dependen también de la temperatura de los gases y son particulares para cada gas de interés, en la Tabla 27 se encuentran los valores de estas variables para varios gases comunes entre los que se encuentran los gases en estudio.

Tabla 27. Valores de los índices de la ecuación usada para el cálculo del Cp de gases comunes

Sustancia	Fórmula	a	b	c	d	Rango de temp., K	% de error	
							Máx.	Prom
Acetileno	C ₂ H ₂	21.8	9.2143 × 10 ⁻²	-6.527 × 10 ⁻⁵	18.21 × 10 ⁻⁹	273-1500	1.46	0.59
Aire	—	28.11	0.1967 × 10 ⁻²	0.4802 × 10 ⁻⁵	-1.966 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.72	0.32
Amoniaco	NH ₃	27.568	2.5630 × 10 ⁻²	0.99072 × 10 ⁻⁵	-6.6909 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.91	0.36
Azufre	S ₂	27.21	2.218 × 10 ⁻²	-1.628 × 10 ⁻⁵	3.986 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.99	0.38
Benceno	C ₆ H ₆	-36.22	48.475 × 10 ⁻²	-31.57 × 10 ⁻⁵	77.62 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.34	0.20
i-Butano	C ₄ H ₁₀	-7.913	41.60 × 10 ⁻²	-23.01 × 10 ⁻⁵	49.91 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.25	0.13
n-Butano	C ₄ H ₁₀	3.96	37.15 × 10 ⁻²	-18.34 × 10 ⁻⁵	35.00 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.54	0.24
Cloruro de hidrógeno	HCl	30.33	-0.7620 × 10 ⁻²	1.327 × 10 ⁻⁵	-4.338 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.22	0.08
Dióxido de azufre	SO ₂	25.78	5.795 × 10 ⁻²	-3.812 × 10 ⁻⁵	8.612 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.45	0.24
Dióxido de carbono	CO ₂	22.26	5.981 × 10 ⁻²	-3.501 × 10 ⁻⁵	7.469 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.67	0.22
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	22.9	5.715 × 10 ⁻²	-3.52 × 10 ⁻⁵	7.87 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.46	0.18
Etano	C ₂ H ₆	6.900	17.27 × 10 ⁻²	-6.406 × 10 ⁻⁵	7.285 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.83	0.28
Etanol	C ₂ H ₆ O	19.9	20.96 × 10 ⁻²	-10.38 × 10 ⁻⁵	20.05 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.40	0.22
Etileno	C ₂ H ₄	3.95	15.64 × 10 ⁻²	-8.344 × 10 ⁻⁵	17.67 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.54	0.13
n-Hexano	C ₆ H ₁₄	6.938	55.22 × 10 ⁻²	-28.65 × 10 ⁻⁵	57.69 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.72	0.20
Hidrógeno	H ₂	29.11	-0.1916 × 10 ⁻²	0.4003 × 10 ⁻⁵	-0.8704 × 10 ⁻⁹	273-1800	1.01	0.26
Metano	CH ₄	19.89	5.024 × 10 ⁻²	1.269 × 10 ⁻⁵	-11.01 × 10 ⁻⁹	273-1500	1.33	0.57
Metanol	CH ₄ O	19.0	9.152 × 10 ⁻²	-1.22 × 10 ⁻⁵	-8.039 × 10 ⁻⁹	273-1000	0.18	0.06
Monóxido de carbono	CO	28.16	0.1675 × 10 ⁻²	0.5372 × 10 ⁻⁵	-2.222 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.89	0.37
Nitrógeno	N ₂	28.90	-0.1571 × 10 ⁻²	0.8081 × 10 ⁻⁵	-2.873 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.59	0.34
Óxido nítrico	NO	29.34	-0.09395 × 10 ⁻²	0.9747 × 10 ⁻⁵	-4.187 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.97	0.36
Óxido nitroso	N ₂ O	24.11	5.8632 × 10 ⁻²	-3.562 × 10 ⁻⁵	10.58 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.59	0.26
Oxígeno	O ₂	25.48	1.520 × 10 ⁻²	-0.7155 × 10 ⁻⁵	1.312 × 10 ⁻⁹	273-1800	1.19	0.28
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	6.774	45.43 × 10 ⁻²	-22.46 × 10 ⁻⁵	42.29 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.56	0.21
Propano	C ₃ H ₈	-4.04	30.48 × 10 ⁻²	-15.72 × 10 ⁻⁵	31.74 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.40	0.12
Propileno	C ₃ H ₆	3.15	23.83 × 10 ⁻²	-12.18 × 10 ⁻⁵	24.62 × 10 ⁻⁹	273-1500	0.73	0.17
Trióxido de azufre	SO ₃	16.40	14.58 × 10 ⁻²	-11.20 × 10 ⁻⁵	32.42 × 10 ⁻⁹	273-1300	0.29	0.13
Vapor de agua	H ₂ O	32.24	0.1923 × 10 ⁻²	1.055 × 10 ⁻⁵	-3.595 × 10 ⁻⁹	273-1800	0.53	0.24

Fuente: Tablas y diagramas de termodinámica, Universidad de los Andes, Facultad de ingenierías, Escuela de Ingeniería Mecánica.

✓ **Cálculo tipo:**

La temperatura promedio de los gases de combustión a su salida por la chimenea es 233,14 °C y su equivalente en Kelvin es **506,29 K**

Para el monóxido de carbono (CO), usando la Tabla 27 se encuentra que:

$$a=25,78$$

$$b=5,795 \times 10^{-2}$$

$$c=-3,812 \times 10^{-5}$$

$$d=8,612 \times 10^{-9}$$

Solucionando en la Ecuación (3):

$$C_{p_{co}} = 30,54 \frac{Kj}{Kmol \text{ } ^\circ K} \times 1 \frac{Kmol}{28 Kg_{co}}$$

$$C_{p_{co}} = 1,090 \frac{Kj}{Kg \text{ } ^\circ K}$$

Tabla 28. Calor específico para los gases de combustión

Sustancia	Calor específico (KJ/Kg°K)
CO	1,090
SO ₂	0,75
O ₂	1,006
NO	1,04
H ₂ S	1
CO ₂	1,063
N ₂	1,077

Fuente: los autores del proyecto

7.1.2.10 Cálculo de la energía perdida por los gases de combustión. La pérdida de energía específica de los gases de combustión se halla de acuerdo a la Ecuación (I) y usando la información presentada en las Tablas 26 y 28, así:

$$e_g = [X_{CO} \times Cp_{CO} + X_{SO_2} \times Cp_{SO_2} + X_{O_2} \times Cp_{O_2} + X_{NO} \times Cp_{NO} + X_{H_2S} \times Cp_{H_2S} + X_{CO_2} \times Cp_{CO_2} + X_{N_2} \times Cp_{N_2}] \times [T_g - T_a]$$

$$e_g = 0,045 \times 1,090 + 0,142 \times 0,75 + 5,38 \times 1,006 + 0,007 \times 1,04 + 0,002 \times 1 + 2,81 \times 1,063 + 26,9 \times 1,077 \times (200)$$

$$e_g = 8633,15 \text{ KJ} / \text{Kg carbon}$$

Las pérdidas de energía específica en los gases de combustión no incluyen la energía perdida debido a la masa de agua evaporada, incluyendo éstas la energía total perdida por gases es:

$$E_g = [e_g + M_{H_2O} \times h_{H_2O}] \times m_{carbon}$$

Dónde:

- ✓ E_g es la energía total perdida por los gases de combustión
- ✓ e_g es la pérdida de energía específica de los gases de combustión
- ✓ M_{H_2O} masa de agua en los gases (Tabla 25)
- ✓ h_{H_2O} es la entalpia del vapor de agua a la temperatura y presión de los gases, que son: $P = 626\text{mmHg}$ y $T = 233,14^\circ\text{C}$

$$h_{H_2O} = 2938,26 \text{ KJ/Kg}$$

Entonces:

$$E_g = [e_g + M_{H_2O} \times h_{H_2O}] \times m_{carbon}$$

$$E_g = \left[8633,15 \frac{KJ}{Kg_{carbón}} + 0,55 \frac{Kg}{Kg_{carbón}} * 2938,26 \frac{KJ}{Kg} \right] * 7430,769 Kg_{carbón}$$

$$E_g = 76'159.385,62 KJ = 18'190.356,74 Kcal$$

La pérdida de energía total por los gases de combustión con relación a la energía entregada por el combustible E_T es:

$$\% Pérdidas = \frac{E_g}{E_T} * 100 \%$$

$$\% Pérdidas = \frac{18'190.356,74}{47'550.822,4} * 100$$

$$\% Pérdidas = 38,25 \%$$

7.1.2.11 Energía perdida por las paredes del horno colmena. Las pérdidas de energía a través de las paredes del horno colmena se dan debido a la diferencia de temperatura entre las paredes y el medio circundante, para su cálculo se usa la siguiente ecuación

$$E_w = hA(T_w - T_A) * t$$

Dónde:

- ✓ E_w es la energía perdida por paredes
- ✓ A total expuesta a transferencia de calor
- ✓ h es el coeficiente total de transferencia de calor
- ✓ T_w es la temperatura de la pared
- ✓ T_a la temperatura del ambiente
- ✓ t es el tiempo de la etapa en estudio

El coeficiente total de transferencia de calor se halla usando la Tabla 29 de acuerdo a la diferencia de temperatura entre la pared del horno y la temperatura ambiente.

Debido a las variaciones en el espesor y temperatura de las paredes del horno, se estima para efectos de cálculo una temperatura promedio de pared de 200°C.⁷

Dado que la temperatura ambiente medida fue de 25°C, la diferencia de temperatura entre la pared y el ambiente es de 175°C, dato con el cual se halla según la Tabla 29 el valor del coeficiente total de transferencia de calor.

Tabla 29. Valores aproximados de los coeficientes de transferencia de calor total para varias diferencias de temperatura entre la pared del horno y el medio que la rodea

Diferencia de Temperatura (°C)	Pared horizontal caliente arriba h (W/m ² C)	Pared horizontal caliente abajo h (W/m ² C)	Pared cilíndrica vertical h (W/m ² C)	Pared cilíndrica horizontal h (W/m ² C)
25	10,5	7,8	10,1	10,3
75	14,6	10,0	13,5	13,7
125	18,0	12,4	16,6	19,9
175	21,5	15,1	19,9	20,3
225	25,2	18,3	23,5	24,0
275	29,4	22,0	27,6	28,0
325	34,1	26,1	32,2	32,6
375	38,3	30,9	37,2	37,8
425	45,0	36,3	43,0	43,4

Fuente: ECOCARBON. Hornos Ladrilleros a Carbón, 1998

El área total de transferencia de calor de las paredes del horno es, de acuerdo a las dimensiones del mismo, de 177 m².

⁷ Asesoría de experto. NotiArcilla.

El tiempo correspondiente a la etapa en estudio (etapa crítica del horno) es de 82800 segundos (23 horas).

Entonces:

$$E_w = hA(T_w - T_A) * t$$

$$E_w = 19,9 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \times 177 m^2 \times 175 ^\circ C \times 82800 \text{ sg}$$

$$E_w = 51038127 \text{ KJ} = 12'190.247,2 \text{ Kcal}$$

La pérdida de energía total por las paredes con relación a la energía total entregada por el combustible E_T es:

$$\% \text{ pérdidas paredes} = \frac{E_w}{E_T} \times 100\%$$

$$\% \text{ pérdidas paredes} = \frac{12190247,2}{47550822,4} \times 100\%$$

$$\% \text{ pérdidas paredes} = 25,63\%$$

7.1.2.12 Energía perdida por inquemados. Los inquemados presentes en el proceso de combustión representan una porción de energía perdida ya que son combustible no quemado.

En la Tabla 30 se muestra por cada elemento posible presente sin quemar la cantidad de energía desaprovechada

Tabla 30. Pérdida de energía por presencia de inquemados

Elemento presente en los residuos y en los gases	Pérdida de energía	
	Kcal/Kg de elemento	KJ/Kg de elemento
Combustible sin variar	6000	29080
Carbono	7834	32762
Hidrógeno	28899	120798
CO (Inquemado gaseoso)	2415,6	10092,2

Fuente: ECOCARBON. Hornos Ladrilleros a Carbón, 1998

Calculando las pérdidas de energía por combustible sin variar y monóxido de carbono presente en los gases se tiene que:

$$E_c = m_{c_{sv}} \times 6000 + m_{co} \times 2415,6$$

Dónde:

- ✓ E_c es la energía perdida por quemados
- ✓ $m_{c_{sv}}$ es la cantidad de Carbono contenido en las cenizas por kilogramo de carbón considerando la cantidad de carbón usado.
- ✓ m_{co} es la relación en peso del CO presente en los gases por kilogramo de carbón considerando la cantidad de carbón usado.

Entonces:

$$m_{c_{sv}} = \frac{16,92gr}{1000gr \text{ carbon}} \times 7430,769Kg = 125,73 Kg$$

$$m_{co} = 0,045 \frac{Kg CO}{Kg carbon} \times 7430,769 Kg = 334,38 Kg CO$$

$$E_c = 125,73 \times 6000 + 334,38 \times 2415,6$$

$$E_c = 1'562.108,328 Kcal$$

La pérdida de energía total aproximada por los inquemados con relación a la energía total entregada por el combustible E_T es:

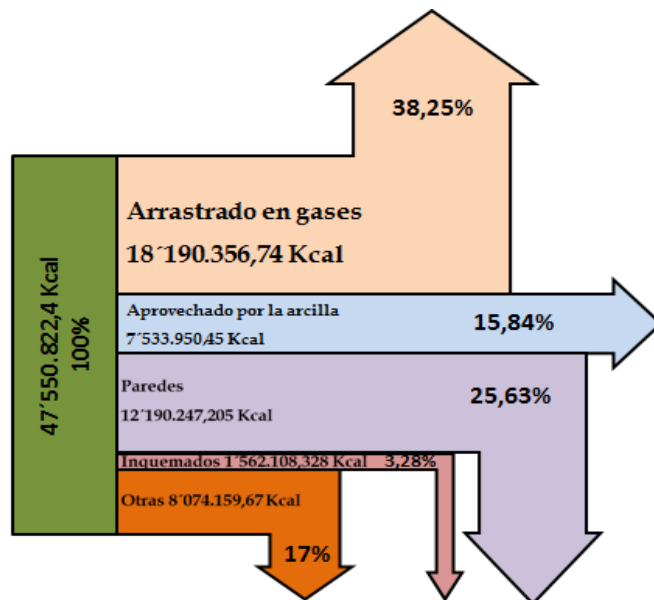
$$\% \text{ pérdidas por inquemados} = \frac{E_C}{E_T} \times 100\%$$

$$\% \text{ pérdidas por inquemados} = \frac{1'562.108,328 \text{ Kcal}}{47'550.822,4 \text{ Kcal}} * 100$$

$$\% \text{ pérdidas por inquemados} = 3,28\%$$

7.1.3 Distribución de la energía aportada por el combustible en el horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. En la Figura 44 se presenta la distribución de la energía entregada por el carbón dentro del horno colmena de la Empresa Ladrillos y Acabados S.A.S., de acuerdo a los cálculos realizados en el balance de masa y energía en la etapa crítica del proceso.

Figura 43. Distribución de la energía, aportada por el carbón, en el horno colmena



Fuente: Los autores del proyecto

7.2 EFICIENCIA DEL HORNO COLMENA USADO EN LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.

La eficiencia del horno determina el estado energético del mismo ya que cuantifica la energía suministrada por el combustible que realmente es aprovechada en el proceso.

La eficiencia del horno puede calcularse por dos métodos, el método directo y el método indirecto.

- ✓ **Método directo:** este método de cálculo de la eficiencia se basa en la relación entre la energía aprovechada por la materia prima a cocer (arcilla) y la energía total disponible del combustible (Carbón), así:

$$\eta = \frac{E_u}{E_T} \times 100\%$$

Dónde:

- η es la eficiencia del horno
- E_u es la energía total requerida por la arcilla o energía útil
- E_T es la energía total suministrada por el combustible

- ✓ **Método indirecto:** este método de cálculo de la eficiencia relaciona las pérdidas totales de energía presentes en el horno con la energía total disponible del combustible (Carbón), así:

$$\eta = \left(1 - \frac{P}{E_T}\right) \times 100\%$$

Dónde:

- η es la eficiencia del horno
- P es la energía total perdida en el horno colmena
- E_T es la energía total suministrada por el combustible

7.2.1 Cálculo de la eficiencia del horno. Para el cálculo de la eficiencia del horno por cualquiera de los métodos posibles se requiere la información energética del horno mostrada en la Figura 44, los cuales están consolidados en la Tabla 31.

Tabla 31. Cantidades de energía presente en el horno colmena durante una quema

Energía	Cantidad (Kcal)
Energía suministrada por el carbón (E_T)	47'550.822,4
Energía requerida por la arcilla (E_u)	7'533.950,45
Energía total perdida en el horno (P)	40'016.871,95

Fuente: Los autores del proyecto

✓ **Cálculo eficiencia método directo**

$$\eta = \frac{E_u}{E_T} \times 100\%$$
$$\eta = \frac{7'533.950,45}{47'550.822,4} \times 100\%$$
$$\eta = 15,84\%$$

✓ **Cálculo eficiencia método indirecto**

$$\eta = \left(1 - \frac{P}{E_T}\right) \times 100\%$$

$$\eta = \left(1 - \frac{40'016.871,95}{47'550.822,40}\right) \times 100\%$$

$$\eta = 15,84\%$$

7.3 PROGRAMA DE CÁLCULOS

Como se mostró en los numerales anteriores la realización de los cálculos, necesarios para el balance de masa y energía y el cálculo de la eficiencia en el horno colmena, es bastante complejo por lo cual se hizo necesaria la elaboración de un pequeño programa en MATLAB que facilite la ejecución de dichos cálculos y agilice los mismos.

A continuación se muestran, en la Figura 45 y Figura 46, los resultados obtenidos a través del programa realizado.

Figura 44. Cálculos de energía útil y eficiencia en el horno colmena

DATOS INICIALES		COMPOSICION DEL CARBON		COMPOSICION QUIMICA DEL CARBON		DATOS PARA LA QUEMA	
Poder calorifico superior del carbon (cal/gr)	6678.04	Humedad (%)	5.19	Carbono (%C)	66.41	Ladrillo H10 (Unidades)	14556
Temperatura promedio de salida de los gases (°C)	233.14	Cenizas (%)	11.55	Hidrogeno (%H)	5.04	Ladrillo H12 (Unidades)	3583
Temperatura ambiente (°C)	25	MV (%)	35.36	Nitrogeno (%N)	1.5	Ladrillo H15 (Unidades)	1188
Temperatura maxima del proceso (°C)	860	Carbono Fijo (%)	47.89	Oxigeno (%O)	10.19	Teja (Unidades)	3311
Carbon utilizado en la quema (Kg)	7430.769			Azufre (%S)	1.4		
Ejecutar							
RESULTADOS DE LA QUEMA		EFICIENCIA Y RENDIMIENTO DEL HORNO		ANALISIS DE CARBONILLA Y OTROS			
Peso total obra cruda (Kg)	125985.8	Calor total utilizado (Kcal)	47550631.7877	Perdida de agua (Kg)	10078.864		
Peso total obra cocinada (Kg)	112263.6	Calor util (Kcal)	30595903.5016	Perdida de masa ceramica (Kg)	3643.336		
Peso perdido (Kg)	13722.2	Eficiencia (%)	15.8439	Masa de arcilla seca (Kg)	115906.936		
Agua total (Kg H2O/Kg carbon)	0.47855	Rendimiento (Kcal/Kg obra)	423.5623	Carbono disponible para la quema (gr C/Kg carbon)	647.2237		
Poder calorifico inferior del carbon (Kcal/Kg)	6399.1535						

Fuente: los autores del proyecto

Figura 45. Cálculo de las pérdidas de energía en la combustión del horno colmena

Programa2

DATOS DE LOS HUMOS PROMEDIO				DATOS ANEXOS				COMPOSICION QUIMICA DEL CARBON				
CO (mg/Nm3)	724.5	H2S (mg/Nm3)	36.5	Area de las paredes del horno (m2)	177	Carbon utilizado en la quema (Kg)	7430.769	Carbono (%C)	66.41	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">EJECUTAR</div> <p>ADVERTENCIA: LLENAR TODAS LAS CASILLAS ANTES DE EJECUTAR EL PROGRAMA, SI SE PROCEDE DE DIFERENTE MANERA, REINICIAR EL PROGRAMA.</p>		
SO2 (mg/Nm3)	2289	CO2 (%)	5.33	Temperatura de salida de los humos (°C)	233.14	Humedad en el carbon (%)	5.19	Hidrogeno (%H)	5.04			
O2 (%)	14.05	NOx (mg/Nm3)	166	Temperatura ambiente (°C)	25	Poder calorifico superior del carbon (cal/g)	6678.04	Nitrogeno (%N)	1.5			
NO (mg/Nm3)	113.5			Cenizas en el carbon (%)	11.55			Oxigeno (%O)	10.19			
								Azufre (%S)	1.4			

RESULTADOS!!!

PORCENTAJE EN VOLUMEN DE HUMOS		FORMULA QUIMICA		RELACION EN PESO DE GASES EN LOS HUMOS		PERDIDAS DE CALOR	
CO (%)	0.13427	Moles de combustible (mol)	0.098737	CO (Kg CO/Kg carbon)	0.044472	Calor en los Humos (Kcal)	18811959.1326
SO2 (%)	0.1856	Moles de aire (mol)	20.5694	SO2 (Kg SO2/Kg carbon)	0.14051	Perdida de calor en los humos (%)	39.5619
O2 (%)	14.05	Moles de agua en los humos (mol)	2.4826	O2 (Kg O2/Kg carbon)	5.3182	Calor en las paredes (Kcal)	12211207.5
NO(%)	0.019633	Relacion real de aire A/C (Kg aire/Kg carbon)	28.8114	NO (Kg NO/Kg carbon)	0.006967	Perdida de calor en las paredes (%)	25.6804
H2S (%)	0.0055709	Exceso de aire (%)	219.6817	H2S (Kg H2S/Kg carbon)	0.0022405	Calor en Inquemados (Kcal)	1550687.2273
N2 (%)	80.2749			N2 (Kg N2/Kg carbon)	26.5874	Perdida de calor por inquemados (%)	3.2598
CO2 (%)	5.33			CO2 (Kg CO2/Kg carbon)	2.7741		
				H2O (Kg H2O/Kg carbon)	0.52859		

Fuente: los autores del proyecto

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 32 se encuentra un resumen de los resultados obtenidos, de los factores más importantes en la combustión de carbón dentro del horno colmena, por medio del análisis de gases, del muestreo Isocinético, del análisis del carbón y del balance de masa y energía realizados al horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S, con una breve explicación de lo que cada uno de estos resultados representa en el proceso de combustión del horno colmena.

Tabla 32. Análisis de resultados

Condición medida	Resultado	Observación
Material particulado	551,88 (mg/Nm ³)	La emisión de material particulado excede el límite establecido por la Resolución 909 de 2008, que es 250 (mg/Nm ³). Si se logra tener una combustión completa y controlada en cada una de las cámaras de combustión del horno esta emisión disminuiría notoriamente.
Óxido de azufre	372,11 (mg/Nm ³)	La emisión de óxido de azufre cumple con el límite establecido por la Resolución 909 de 2008, que es 550 (mg/Nm ³).
Óxidos de nitrógeno	6,46 (mg/Nm ³)	La emisión de óxidos de nitrógeno cumple con el límite establecido por la Resolución 909 de 2008, que es 550 (mg/Nm ³).
Temperatura promedio de salida de los gases de chimenea	233,14 °C	La temperatura promedio de los gases se encuentra dentro del estándar permitido por la norma que es una temperatura máxima de emisión de gases de 250 °C

Tabla 32. (Continuación)

Condición medida	Resultado	Observación
Concentración de los gases de combustión	Los valores obtenidos de las concentraciones de los gases de combustión, medidos en diversos momentos del proceso de combustión son muy inestables.	Las sustancias medidas en los gases de combustión y su variabilidad en las concentraciones demuestran la inestabilidad presente en la combustión en el horno, ya que hay momentos de combustión incompleta (alta concentración de CO en los gases) y otros de mejores condiciones.
Clasificación del carbón usado	Carbón Bituminoso, Alto volátil C	Carbón térmico con alto contenido energético, bajas concentraciones de cenizas y azufre y por lo tanto apto para el proceso de cocción en la industria cerámica y ladrillera.
Porcentaje de oxígeno en los gases	14%	El porcentaje de oxígeno presente en los gases está directamente relacionado con la cantidad de aire en exceso, son directamente proporcionales; según la normatividad vigente el Oxígeno de referencia no debe superar el 18% en los gases, así cuanto menor sea el oxígeno presente mayor es la disminución de las concentraciones al realizar la corrección por oxígeno de referencia según la norma. Es importante resaltar que este porcentaje no debe ser inferior a aproximadamente el 6% ya que esto significaría un exceso de aire deficiente y por ende combustión incompleta.

Tabla 32. (Continuación)

Condición medida	Resultado	Observación
Exceso de aire en la combustión	213,2%	Este es un exceso de aire demasiado alto, lo cual ocasiona gran consumo de energía calentando el aire, disminuye la temperatura en el horno y genera pérdidas de calor por los gases de chimenea, los cuales arrastran grandes cantidades de material particulado.
Energía total suministrada por el combustible	47'550.822,4 Kcal	La energía suministrada por el combustible es bastante alta, lo cual proporciona la facilidad de un gran aprovechamiento de energía por medio de la cocción de grandes masas de productos.
Energía total aprovecha en el proceso de cocción	7'533.950,45 Kcal	La energía aprovechada por los productos en cocción durante el proceso es muy inferior a toda la suministrada por el combustible, lo cual se debe a las condiciones presentes en el horno.
Eficiencia	15,84%	El porcentaje de eficiencia encontrado se encuentra en un rango normal dadas las condiciones de operación del horno y de la combustión, lo cual evidencia las oportunidades de mejora que pueden ser implementadas en busca de optimizar el proceso.

Fuente: Los autores del proyecto

9. PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN

Con el propósito de optimizar las condiciones actuales de quema en el horno colmena de la Empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. se requiere analizar y definir la propuesta de optimización más adecuada y de mayor viabilidad según los requerimientos de la empresa y las condiciones de operación presentes en el horno colmena, anteriormente descritas. A continuación se describen las posibles alternativas.

9.1 ALTERNATIVA 1: USO DE OTRO TIPO DE COMBUSTIBLE PARA LA COMBUSTIÓN EN EL HORNO COLMENA

En la industria cerámica y ladrillera es común el uso de combustibles como el CCTA (mezcla densa de carbón pulverizado disperso en emulsiones de combustóleo o crudo pesado y agua) y el gas natural para el proceso de cocción de sus productos.

El uso del combustible CCTA en el horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S fue estudiado por el grupo de investigación DICBOT de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander mediante el proyecto titulado “Desarrollo de una propuesta de optimización energética de los hornos colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S” de donde se concluyó que el uso de este combustible no era viable para la empresa debido a que ésta no cuenta con los medios para producir este tipo de combustible. Por lo tanto la alternativa de cambiar el tipo de combustible está centrada en la posibilidad de usar el gas natural como combustible del horno colmena en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.

9.1.1 Descripción del gas natural. El gas natural es una mezcla de hidrocarburos livianos en estado gaseoso, constituido principalmente por metano y etano y en pequeñas proporciones por propano, butano, pentano y algunos hidrocarburos más pesados.

La combustión del gas natural está clasificada como la más limpia entre los combustibles tradicionales industriales, ya que sus emisiones de contaminantes como Material particulado, Óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre son mínimas, por lo tanto cumple con las normas ambientales más exigentes sin la necesidad de usar equipos para el tratamiento de los gases de combustión.

9.1.1.1 El gas natural en la industria cerámica y ladrillera: el uso del gas natural en la industria cerámica y ladrillera trae consigo las siguientes ventajas:

- ✓ Reducción del tiempo de los ciclos de quema en los hornos.
- ✓ Disminución del consumo energético.
- ✓ Reducción de las emisiones de óxidos de carbono, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno.
- ✓ Reducción de las partículas en suspensión en los gases de combustión.
- ✓ No se requiere preparación previa a su uso.
- ✓ Los equipos usados en el proceso de combustión de gas no se deterioran fácilmente.
- ✓ La combustión se puede iniciar o detener de forma instantánea si se requiere.
- ✓ El control del flujo de combustible es de gran precisión ofreciendo un proceso de combustión muy estable.

La implementación del gas natural como combustible del horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S, necesita el acondicionamiento del horno colmena para operar con este combustible y dada la ubicación de la planta y la

falta de una red de suministro de gas que facilite su adquisición, se deben tener en cuenta los siguientes requerimientos:

- ✓ Grupo de quemadores de alta velocidad, con control automático de temperatura.
- ✓ Equipo de transporte de gas natural.
- ✓ Batería de almacenamiento de gas.
- ✓ Equipo compresor de gas natural que garantice la presión requerida según el caudal deseado para el proceso.
- ✓ Sistema de alimentación de gas.
- ✓ Sistema de alimentación de aire.
- ✓ Sistema de mezclado del gas y el aire.
- ✓ Sistema de monitoreo y control de temperatura y presión.

9.2 ALTERNATIVA 2: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA OVERFIRE-AIR

El sistema OVERFIRE-AIR es un sistema de aire de sobre-combustión, también conocido como un sistema integrado de ventilación, cuyo fin es la optimización de los procesos de combustión principalmente en lechos fijos, por medio de la disminución de emisiones de partículas, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno, lo cual aumenta la eficiencia de la combustión en general. Este sistema puede ser empleado en la combustión de diversos tipos de combustibles, como son: carbón, biomasa, oíl y gas.

9.2.1 Funcionamiento del OVERFIRE-AIR. El sistema OVERFIRE-AIR funciona inyectando a las cámaras de combustión, en su parte superior, aire secundario precalentado en forma controlada, para así garantizar una combustión completa del carbón y su material volátil. Para el calentamiento del aire usado por el sistema se aprovecha el calor entregado por el combustible en el horno, esto mediante una

distribución adecuada del sistema de tuberías que transportan el aire permitiendo una transferencia de calor a éste.

En la Figura 47 se muestra un sistema OVERFIRE-AIR instalado en un horno colmena, donde se puede ver la distribución de la tubería alrededor del horno y su inyección sobre las boquillas principales de la cámara de combustión.

Figura 46. Sistema OVERFIRE-AIR en un horno colmena



Fuente: Ingeniería & alta eficiencia energética

Para el adecuado funcionamiento del sistema OVERFIRE-AIR se requiere:

- ✓ **Tiro inducido:** Con el tiro inducido se controla el delta de velocidad y la presión diferencial en el sistema, logrando asegurar un régimen constante de combustión lo cual permite la transferencia eficiente de energía al homogenizar la distribución de calor dentro del horno.
- ✓ **Sistema de aire:** este sistema suministra el aire secundario por medio de una turbina centrífuga, la cual debe estar conectada a un tanque de expansión para garantizar un flujo constante y equilibrado en la red de suministro, como se muestra en la Figura 48.
- ✓ **Red de suministro:** conformada por un sistema de tuberías que transporta el aire y lo distribuye en cada una de las cámaras de combustión y por las

toberas de inyección a través de las cuales el aire ingresa a las cámaras, con sus respectivas válvulas de regulación individual.

- ✓ **Cámaras de combustión:** en las cámaras de combustión no debe ingresar aire atmosférico descontroladamente, si esto sucede se recomienda modificar las cámaras para asegurar una entrada precisa y controlada de aire.

Figura 47. Sistema de aire de un OVERFIRE-AIR



Fuente: Ingeniería & alta eficiencia energética

9.3 ALTERNATIVA 3: IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA CARBOJET

Un sistema CARBOJET es una máquina dosificadora de quema a carbón o biomasa (mezcla de carbón con aserrín, retal de madera, cascarillas de café, arroz, o algodón, entre otros) que puede ser usada en cualquier tipo de horno ladrillero; su instalación y manejo es muy sencillo ya que trabaja en forma automática simulando el trabajo humano en un 90%. Los CARBOJET pueden tener 6, 8, 10 o 12 salidas hacia las cámaras de combustión según el tipo de horno en que se implemente.

Figura 48. Carbojet



Fuente: www.maquigars.com

9.3.1 Funcionamiento del CARBOJET. El equipo dosificador de quema o CARBOJET utiliza carbón o biomásas previamente molidas a un grano con diámetros inferiores a 15mm; por medio de un variador de velocidad electrónico se regula la cantidad requerida de carga al tornillo sin fin alimentador, de donde pasa a un molino de martillos incorporado en la máquina para ser completamente pulverizada y enviada a la turbina propulsora donde es arrojada por las salidas de la máquina y llevada mediante tubería o mangueras a las cámaras de combustión.

Los beneficios más relevantes que ofrece la implementación de un sistema CARBOJET son:

- ✓ Ahorro de combustible aproximadamente en un 25%
- ✓ Combustión eficiente y controlada
- ✓ Productos terminados más limpios, más homogéneos y en tonos más parejos.
- ✓ Reducción de inquemados productos de la combustión.
- ✓ Disminución en las emisiones contaminantes.

- ✓ Fácil operación de la máquina dosificadora o CARBOJET.

Es importante resaltar que para el adecuado funcionamiento del sistema CARBOJET se requiere contar con un carbón de granulometría fina, menos de 15 mm de diámetro, por lo que se hace necesario un equipo adicional que triture el combustible para poder alimentar el CARBOJET.

9.4 PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DEFINITIVA

Con base en las alternativas planteadas y descritas anteriormente se define que la opción más viable de mejora es la implementación de algún sistema que optimice el proceso de combustión presente actualmente en el horno colmena de la Empresa Ladrillos y Acabados S.A.S (combustión de carbón), ya que el cambio a otro tipo de combustible como el gas natural implica muchos gastos económicos debido principalmente a la ausencia de una red de distribución de gas que facilite su adquisición por parte de la empresa.

Para poder definir la propuesta de optimización del proceso de combustión de carbón del horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S, se hizo una comparación de las dos alternativas posibles, anteriormente presentadas, la cual es mostrada en la Tabla 33.

Tabla 33. Comparación de características Overfire-air y CARBOJET

Ítem	Overfire-air	Carbojet
Operación	Inyección de aire secundario de combustión en función de la cantidad de combustible.	Sistema de inyección controlada de mezcla aire combustible en función de la temperatura de combustión.
Rendimiento	Disminución de consumo de combustible en un 20%	Disminución del consumo combustible en un 25%
Calidad de quema	Variación lenta de temperatura.	Respuesta rápida en el control de

Ítem	Overfire-air	Carbojet
		temperatura debido a la manipulación de las variables combustible-aire respectivamente
Índices de contaminación	Reducción del volumen de gases contaminantes.	Se reducen los inquemados y las pegas por elevaciones bruscas de temperatura, la contaminación se reduce considerablemente, menos cantidad en cenizas pues el carbón pulverizado produce una llama efectiva. Al controlar el exceso de aire se reducen las emisiones de contaminantes en los gases y las altas temperaturas de los mismos.
Modificaciones necesarias en el horno	El tiro natural imposibilita mantener un régimen constante de combustión y control de la velocidad de los humos, por lo que se hace necesario instalar un sistema de tiro de inducción que garantice el control sobre estas variables. El cual es el principal problema de esta configuración. Instalación de turbina para inyección de aire, tanque de expansión y red de tubería para la distribución de aire de combustión	Es necesario modificar las cámaras de combustión de tal forma que no se permita el ingreso de aire atmosférico.

Fuente: Los autores del proyecto

De acuerdo a la información recopilada y analizada de cada una de las propuestas de optimización posibles para el horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. y conocidas todas las condiciones de operación presentes en la planta de la misma, la propuesta de optimización más viable y efectiva es la **implementación de un sistema CARBOJET**; ya que:

- ✓ Este sistema da la posibilidad de tener un control sobre la combustión del carbón en el horno y por ende disminuye la inestabilidad presente en el proceso actual, la cual es la principal causa de los problemas evidenciados en el funcionamiento del horno.
- ✓ El CARBOJET es un sistema que inyecta una la mezcla aire - carbón pulverizado a las hornillas, debido a esto hay mayor área de contacto del combustible con el aire generándose una combustión más completa y eficiente lo cual disminuye las concentraciones de los compuestos contaminantes en los gases productos de la combustión que escapan por la chimenea hacia el ambiente.
- ✓ Al mantener las hornillas cerradas durante el proceso de combustión se evita la entrada de aire innecesario a las mismas con lo que se disminuye la cantidad de calor arrastrado por los gases lo cual se evidencia en la disminución de la temperatura de salida de los mismo al ambiente.

En busca de contribuir con la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. en la adquisición e implementación de este sistema de optimización, se buscaron empresas proveedoras de estos equipos y en base a la información suministrada por ellas y verificando la más confiable y asequible se presenta la siguiente propuesta.

La empresa MAQUIGAR'S, cuyo campo de desempeño es la fabricación y comercialización de equipos como: molinos, silos, carbojet, bandas transportadoras, entre otros, todos afines a la industria cerámica y ladrillera, cotizó para este proyecto el sistema CARBOJET cuyo funcionamiento está expuesto en numerales anteriores. A continuación se describen las características más importantes del mismo

9.4.1 Características físicas del sistema CARBOJET

- ✓ Construido con plataforma metálica en lámina de 4mm y ruedas para su fácil traslado.
- ✓ Tolla de alimentación en lámina figurada de 3mm con capacidad para 220 kilogramos de carbón.
- ✓ Turbina en acero balanceada estática y dinámicamente.
- ✓ 8 salidas de la turbina con sus mangueras y llaves de paso
- ✓ Motor eléctrico de 12 HP a 3500RPM según los requerimientos de instalación en la planta.
- ✓ Molino integrado con 6 martillos en fundición de acero para pulverizar completamente el carbón.
- ✓ Controles de operación manual o automático.
- ✓ Caja de control con sus respectivos contactores térmicos, pulsadores, indicadores y reloj lector de temperatura.
- ✓ Variador de velocidad electrónico

Figura 49. Carbojet empresa MAQUIGAR'S



Fuente: MAQUIGAR'S

Adicional a las características mencionadas anteriormente para el correcto funcionamiento del CARBOJET se requiere la adquisición de un molino para disminuir el tamaño de grano del combustible dado que Ladrillos y Acabados S.A.S. maneja el carbón en bloque y así no se puede suministrar a la tolva del CARBOJET, la empresa MAQUIGAR'S también suministra este tipo de equipos; la otra posibilidad es que la empresa Ladrillos y Acabados adquiera el carbón en el tamaño requerido para el uso del CARBOJET.

En la Tabla 34 se muestran los consumos promedios de combustible medidos por la empresa MAQUIGAR'S en diferentes tipos de horno que utilizan el sistema CARBOJET y la cantidad de producto final entregado.

Tabla 34. Características de producción medidas en hornos colmena que usan CARBOJET

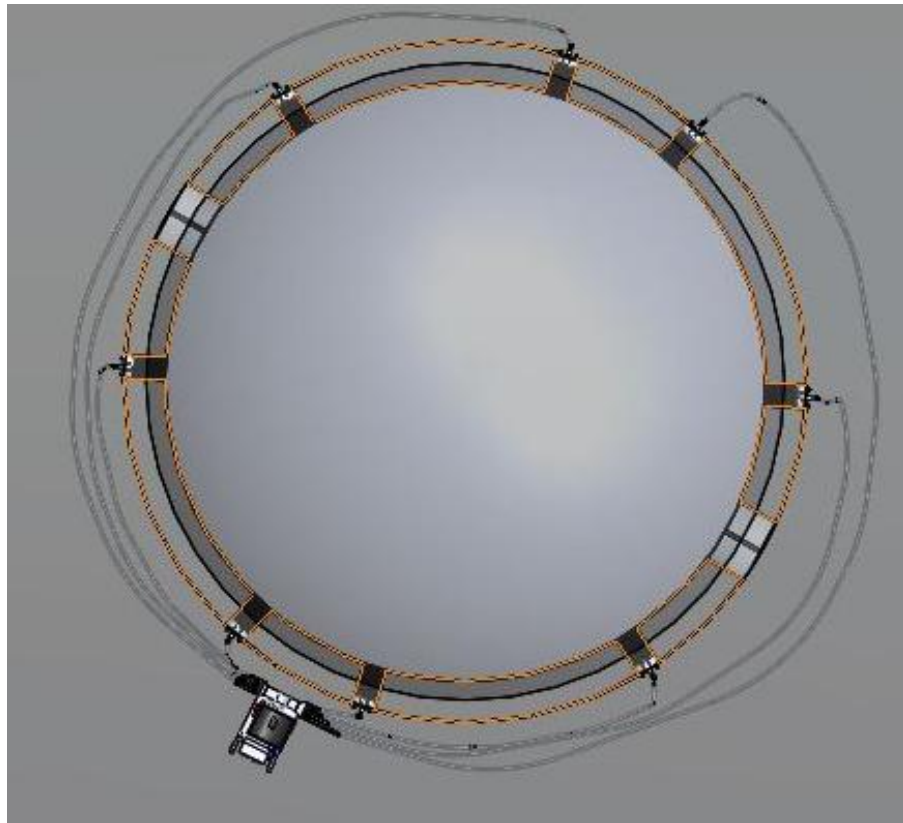
TIPO DE HORNO	CONSUMO DE CARBÓN (Kg)	PRODUCCIÓN FINAL (Kg)
Horno Túnel	390 a 450	9000
Horno Colmena	580 a 680	9000
Horno Hoffman	490 a 540	9000

Fuente: MAQUIGAR'S

De acuerdo a la Tabla 34 se evidencia un rendimiento del combustible en hornos colmena con sistema CARBOJET de entre $0.0644 \text{ Kg}_{\text{carbón}}/\text{Kg}_{\text{obra cocida}}$ hasta $0.075 \text{ Kg}_{\text{carbón}}/\text{Kg}_{\text{obra cocida}}$, esto comparado con el rendimiento medido en el horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S que es de $0.1737 \text{ Kg}_{\text{carbón}}/\text{Kg}_{\text{obra cocida}}$ evidencia una reducción en el consumo de combustible de aproximadamente un 57%, lo cual es muy significativo y contribuye notoriamente a un aumento en cuanto a la eficiencia del proceso.

9.4.2 Distribución en planta del sistema CARBOJET. El Carbojet a instalar en la planta de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S es un solo equipo con ocho salidas hacia las hornillas y sistema de distribución del combustible a través de mangueras o tuberías, según se acuerde al momento de su adquisición, (Figura 51). El equipo cuenta con válvulas para regular el caudal de combustible de cada una de las boquillas y poder así obtener una uniforme distribución de temperatura en el horno. Este procedimiento evita el cierre y apertura de la totalidad de las hornillas para una nueva distribución.

Figura 50. Distribución del Carbón por Carbojet en el horno colmena

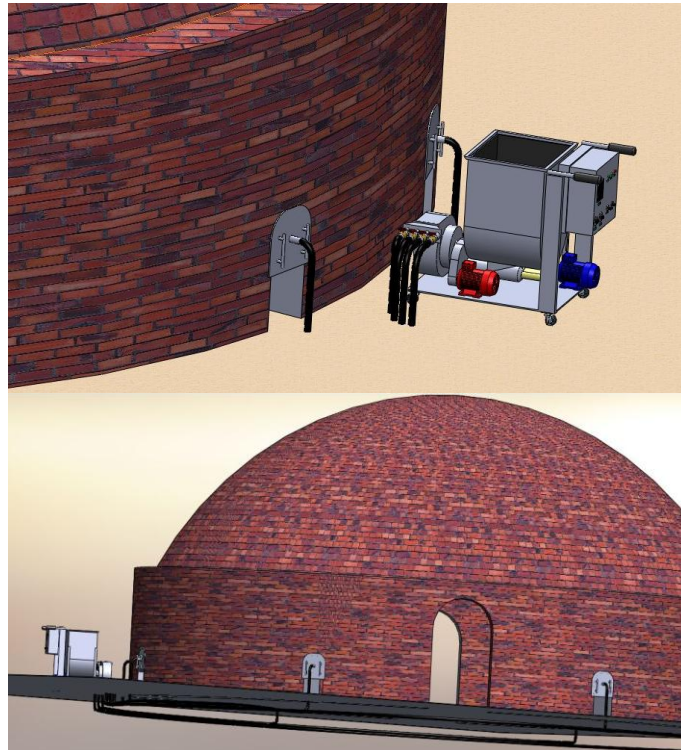


Fuente: los autores del proyecto

Para la implementación del sistema CARBOJET en la planta de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S., y su adecuada instalación se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

- ✓ Verificar la superficie del horno, evitando grietas u orificios donde se pueda presentar entrada o salida de aire en el horno y cerrar las puertas del horno completamente, ya que esto genera pérdidas de calor.

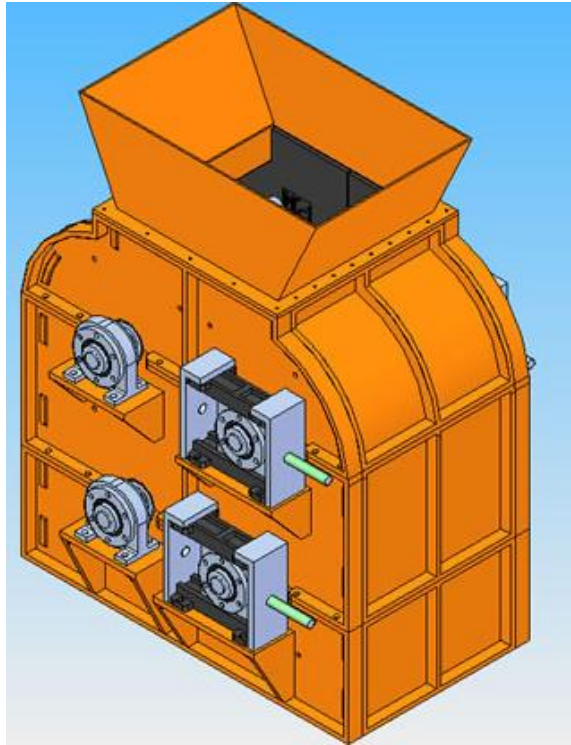
Figura 51. Carbojet en el horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.



Fuente: Los autores del proyecto

- ✓ Dado que el CARBOJET se alimenta con carbón de granulometría fina se requiere la adquisición del carbón granulado o adquirir un molino (Figura 53) para disminuir el tamaño de los bloques de carbón que usa la empresa actualmente, a un tamaño máximo de media pulgada.

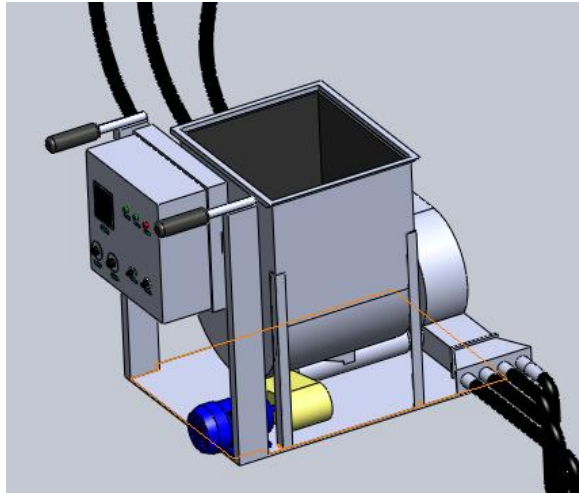
Figura 52. Molino triturador de carbón



Fuente: <http://www.aceandes.com/triturador.html>

- ✓ Por razones de capacidad y especificaciones de fábrica del equipo a instalar, el horno será alimentado a través de 8 hornillas únicamente (Figura 54), ya que éste cuenta con 12 hornillas se requiere sellar completamente 4 de ellas; esto lleva a tener un mejor rendimiento del equipo, aumentar la hermeticidad del horno y se tendría una ganancia de espacio para la cocción de más productos.
- ✓ Cambiar las parrillas por unas con una malla fina ya que se trabaja carbón pulverizado.

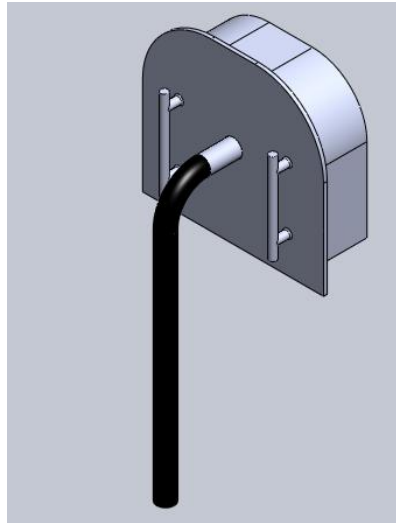
Figura 53. Salidas del Carbojet



Fuente: Los autores del proyecto

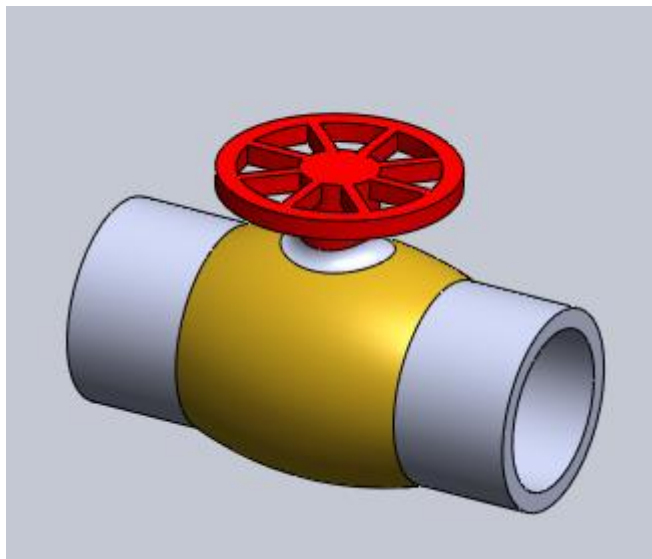
- ✓ Reformar o mejorar el sello de cada una de las tapas de las hornillas, estas deben ser removibles para poder dar inicio manual a la combustión como se hace normalmente.
- ✓ Instalar un acople en la tapa de cada hornilla para conectar con la respectiva tubería o manguera del CARBOJET, las cuales tienen un diámetro de 2" (Figura 55).
- ✓ En cada una de las salidas del Carbojet está instalada una válvula que puede ser operada manualmente para posibilitar el paso de combustible hacia las hornillas (Figura 56).

Figura 54. Tapa de la hornilla adecuada para el Carbojet



Fuente: Los autores del proyecto

Figura 55. Válvula en las salidas del Carbojet



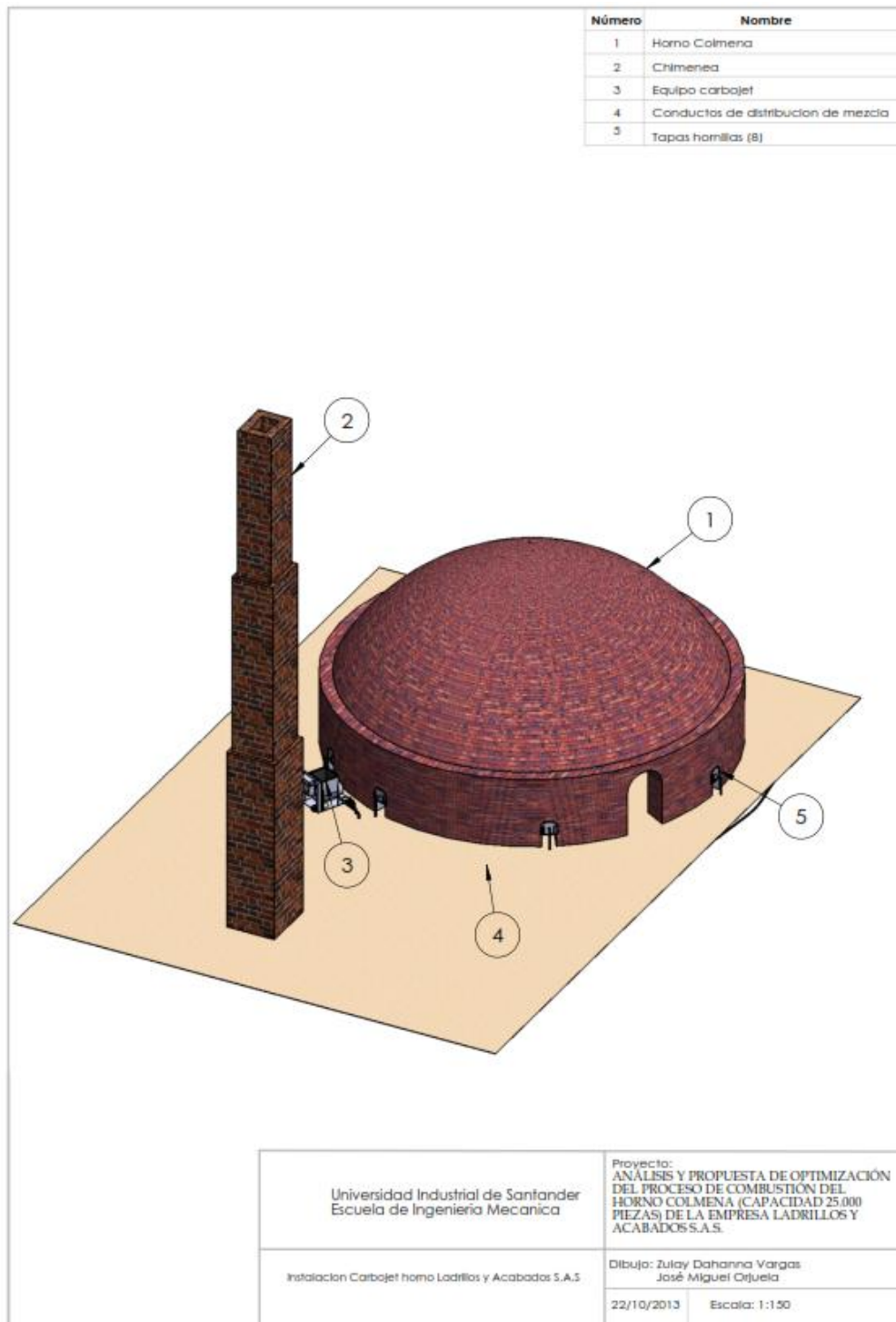
Fuente: Los autores del proyecto

- ✓ Las tuberías o mangueras del equipo deben llegar a la tapa de la hornilla sin ningún tipo de partidura ni reducción de diámetro.
- ✓ Tener conductos guías para alojar las tuberías o mangueras del equipo con el propósito que no sobresalgan por encima del nivel del suelo, esto por protección del equipo y seguridad y movilidad de los operarios.

- ✓ El CARBOJET debe ubicarse cerca al depósito de carbón para su fácil alimentación.
- ✓ La combustión debe iniciarse de forma manual, como se hace normalmente, seguidamente se cierran las tapas de las hornillas y se conectan las boquillas del carbojet a cada una de las hornillas, el equipo Carbojet viene equipado con una tolva, tornillo sin fin dosificador, impeler de propulsión, dampers y variadores de velocidad manuales los cuales garantizan un uniforme suministro de combustible a cada hogar, el equipo requiere supervisión y manipulación de un operario las 24 horas con las mismas cualificaciones de un quemador convencional en la operación del horno colmena sin equipo de quema, quien realizará los cambios en el variador de velocidad dependiendo de la temperatura registrada en el horno, inicialmente el variador de velocidad se regula a una frecuencia de 15 a 20 Hz la cual se debe mantener durante la fase de caldeo que es la fase de extracción de la mayor cantidad de humedad de la arcilla durante el ascenso lento de temperatura hasta aproximadamente 150 a 200°C, después se debe aumentar la frecuencia del variador de velocidad al 85% de su velocidad máxima (50 Hz aproximadamente), esta frecuencia se deberá mantener hasta alcanzar la temperatura máxima del proceso.

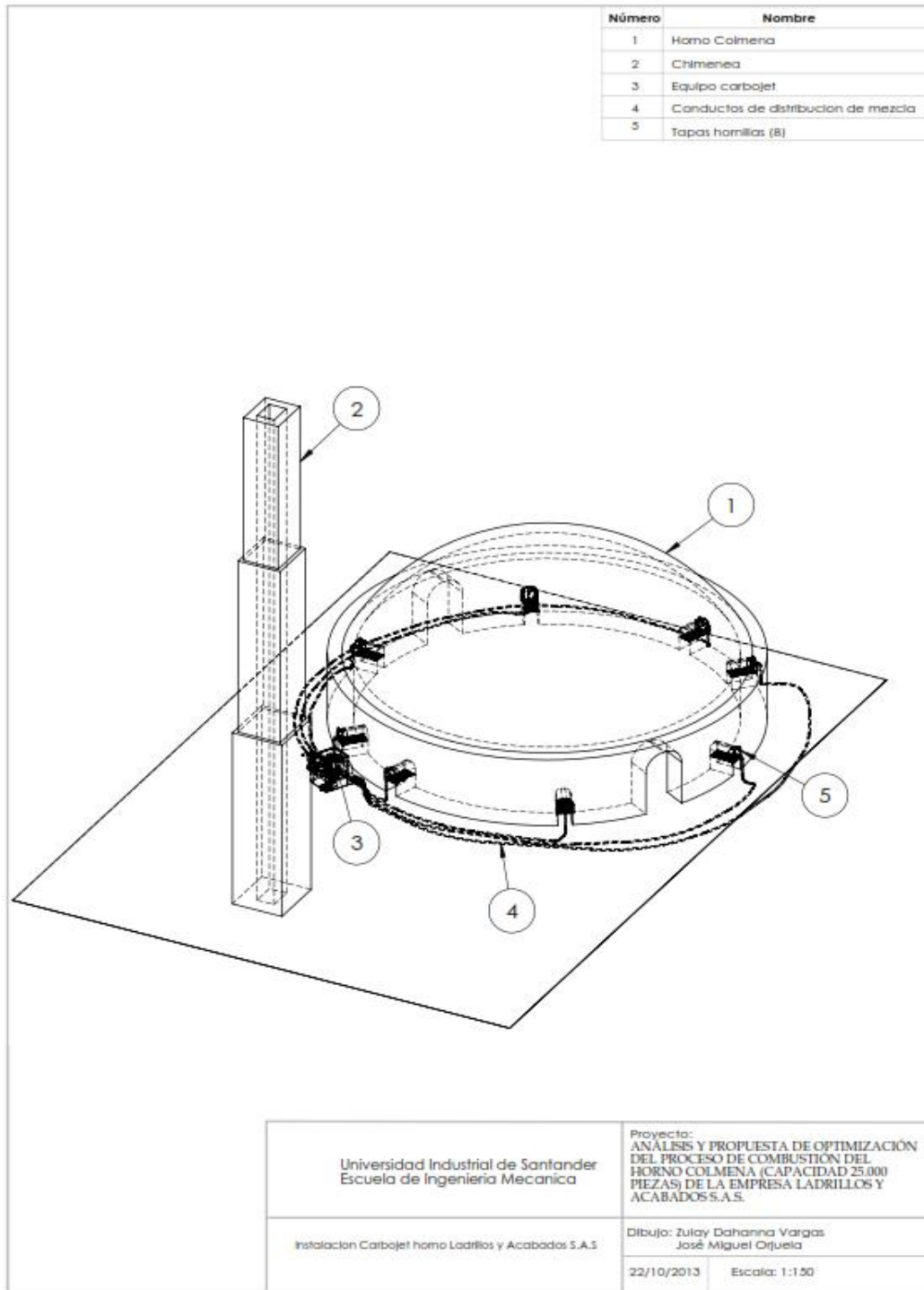
En la Figura 57 y Figura 58 se muestra como queda la distribución en la planta de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S, con el Carbojet implementado.

Figura 56. Plano 1: distribución en planta del Carbojet



Fuente: los autores del proyecto

Figura 57. Plano 2: distribución en planta del Carbojet



Fuente: Los autores del proyecto

9.4.3 Análisis económico de la propuesta. La implementación del sistema dosificador de carbón o Carbojet representa para la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S, los siguientes beneficios:

- ✓ Cumplimiento de las normas ambientales que regulan sus procesos gracias a la disminución de los contaminantes productos de la combustión del carbón en el horno colmena, evitando así una posible penalización por incumplimiento de la norma.
- ✓ Condiciones de trabajo más seguras para los operarios del horno (quemadores).
- ✓ Mejor calidad en los productos acabados debido a la combustión más eficiente y uniforme en el horno.
- ✓ Ahorro económico por la disminución del consumo de carbón.

Retorno de la inversión: para conocer en cuanto tiempo la empresa Ladrillos y acabados S.A.S recupera el dinero invertido al implementar el equipo dosificador de carbón se usa la siguiente expresión:

$$t = \frac{C_E}{(m_c \times P_c \times 24)}$$

Dónde:

- ✓ t es el tiempo en años
- ✓ C_E es el costo de instalación del equipo
- ✓ m_c es la cantidad de carbón en toneladas ahorrado en una quema
- ✓ P_c es el precio del carbón por tonelada
- ✓ La constante es la cantidad de quemas realizadas en el horno en un año

El costo del equipo dosificador de carbón o CARBOJET se muestra en la Tabla 34. El valor promedio por tonelada de carbón en Colombia es de \$140.000 pesos moneda colombiana. El carbón ahorrado por quema al implementar el Carbojet es aproximadamente el 25% del consumo actual, lo que equivale a 5 toneladas por quema.

Tabla 35. Costo de instalación del equipo

Descripción	Precio (IVA incluido)
Equipo dosificador	\$26'448.000
Sistema de control del equipo dosificador	\$7'574.800
Tapas para 8 hornilla	\$ 800.000
Adecuación del horno (tapar 4 hornillas)	\$ 550.000
SUB TOTAL	\$35'372.800
Incrementos 2,5%	\$ 884.320
TOTAL	\$36'257.120

Fuente: Los autores del proyecto

Con base en los costos mostrados en la Tabla 35 y teniendo en cuenta el precio del carbón por tonelada y que durante un año se ahorran 120 toneladas de carbón, se tiene que el tiempo de retorno de la inversión es de aproximadamente de 2 años a 3 años; como se muestre en el siguiente cálculo.

$$t = \frac{36'257.120 \text{ pesos}}{\left(5 \frac{\text{ton}}{\text{quema}} \times 140.000 \text{ pesos/ton} \times 24 \text{ quema/año}\right)}$$

$$t = 2,16 \text{ años}$$

10. CONCLUSIONES

- ✓ Se documentó el monitoreo Isocinético en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S., y con los resultados obtenidos se evidenció que la empresa no cumple con las normas medioambientales vigentes, ya que presentó una emisión de material particulado que excede el límite establecido por la resolución 909 de 2008 del Ministerio de Minas, Vivienda y Desarrollo territorial.
- ✓ La temperatura promedio de salida de los gases de combustión en la chimenea fue de 233.14 °C, esta temperatura está cumpliendo con la norma que permite una temperatura máxima de 250 °C, pero al tener una combustión más controlada se puede disminuir este valor de la temperatura pues hay más aprovechamiento del calor dentro del horno en la cocción de los productos.
- ✓ De acuerdo al análisis próximo realizado al carbón, éste se clasificó como un carbón bituminoso con altos volátiles en C, cuyo poder calorífico es 12020 Btu/Lb, lo cual lo hace apto para el proceso de cocción de ladrillo y otros materiales cerámicos.
- ✓ El cotejo de los datos obtenidos en el análisis próximo del carbón usado por la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S realizado durante este proyecto y los resultados obtenidos en el análisis próximo realizado en el año 2011, muestra que hay una disminución en la calidad del carbón empleado actualmente ya que está clasificado en un rango de menor poder calorífico; la clasificación que estaban considerando era de un carbón bituminoso con altos volátiles en B, el cual tiene un mejores características que el que actualmente se usa el cual fue clasificado como un carbón bituminoso con altos volátiles en C.
- ✓ Se realizó el análisis de los gases de escape productos de la combustión del carbón, midiendo las concentraciones de los contaminantes presentes en los

mismos, y se evidenció gran variabilidad en las concentraciones obtenidas debido a la inestabilidad de la combustión presente en el horno.

- ✓ La presencia de monóxido de carbono (CO) en los gases productos de la combustión, expulsados por la chimenea, evidencia una combustión incompleta dentro de las hornillas del horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.
- ✓ Se realizó el balance de masa y energía del horno colmena de la empresa ladrillos y acabados S.A.S., por medio del cual se conocieron las principales características del proceso de combustión del carbón en la etapa crítica de todo el proceso dentro del horno.
- ✓ La relación real de aire combustible en la combustión del horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S fue aproximadamente de 28 kg de aire por cada kg de carbón quemado, y dado que la relación estequiométrica fue estimada en 9 kg de aire por cada Kg de carbón se evidenció que hay mucho aire entrando al horno.
- ✓ Se calculó el exceso de aire presente en la combustión, encontrándose un exceso de aproximadamente 213%, el cual es muy alto y genera desperdicios de energía por arrastre de calor que escapa por la chimenea.
- ✓ La eficiencia del proceso durante la etapa en estudio fue calculada en aproximadamente un 16% y dadas las condiciones de quema presentes en el horno hay grandes posibilidades de mejora del proceso lo cual incrementa esta eficiencia, disminuye los consumos de combustible y genera mejores productos.

- ✓ Se evidenció que las pérdidas de energía en el horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S se dan en mayor medida por los gases de escape, los cuales arrastraron aproximadamente un 38% de toda la energía entregada por el combustible durante la etapa en estudio, esto se debe principalmente a la gran cantidad de aire que ingresa al horno y no es requerido en la combustión del carbón.

- ✓ Se descartó la posibilidad de implementar el gas natural como combustible en el horno colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S debido a la ausencia de una red de distribución que pudiera suministrar el combustible a la planta de la empresa, lo cual conlleva a grandes costos en transporte y almacenamiento del combustible.

- ✓ Se propuso la implementación de un sistema dosificador de carbón o CARBOJET que mejora las condiciones de combustión en el horno colmena por medio de la inyección de aire y combustible en forma controlada y uniforme en las hornillas.

11. RECOMENDACIONES

- ✓ Adquirir el carbón con una granulometría más fina, tamaño máximo de aproximadamente ½ pulgada, para poder alimentar el Carbojet sin la necesidad de adquirir un molino para disminuir el tamaño de los bloques de combustible que usa la empresa actualmente.

- ✓ Estudiar la posibilidad de adaptar el horno de menor capacidad de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S, para instalarle el sistema dosificador de carbón o Carbojet aprovechando que éste no queda anclado al horno y facilita su traslado en la planta de la empresa.

- ✓ Adecuar un espacio en la planta de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S, para el adecuado almacenamiento del combustible, de tal forma que éste no quede expuesto al ambiente ya que se pueden cambiar sus propiedades por la humedad a la que es expuesto.

- ✓ Verificar la hermeticidad del horno para evitar la entrada descontrolada de aire a éste y así garantizar la estabilidad de la combustión.

- ✓ Mantener la infraestructura del horno en condiciones óptimas para así tener un adecuado funcionamiento del mismo; por ejemplo las pantallas en el interior del horno deben mantener la altura suficiente y necesaria para facilitar el correcto recorrido de los flujos de calor a través del horno.

- ✓ Evaluar la implementación de un sistema de control SCADA (supervisión, control y adquisición de datos) para la automatización de todo el proceso de cocción del ladrillo y material cerámico en el horno colmena.

BIBLIOGRAFÍA

ARIZTIMUÑO, Alaitz; GONZALEZ, Román y RISUEÑO Alicia. El carbón como materia prima, San Sebastián, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial. 22p.

ASTM INTERNATIONAL. Designation D3172: Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. Pennsylvania, United Estates, 2011.

ASTM INTERNATIONAL. Designation D3173: Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke. Pennsylvania, United Estates, 2011.

ASTM INTERNATIONAL. Designation D3174: Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal1. Pennsylvania, United Estates, 2011.

ASTM INTERNATIONAL. Designation D3175: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. Pennsylvania, United Estates, 2011.

ASTM INTERNATIONAL. Designation D3177: Standard Test Methods for Total Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke. Pennsylvania, United Estates, 2011.

ASTM INTERNATIONAL. Designation D388: Standard Classification of Coals by Rank. Pennsylvania, United Estates, 2011.

ASTM INTERNATIONAL. Designation D5865: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke1. Pennsylvania, United Estates, 2011.

BERNAL TORRES, William y JIMENEZ SUAREZ, Edixson Arbey. 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. Bucaramanga, 2009. Trabajo de grado (Ingeniero mecánico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.

CAMPOS, Juan Carlos; FIGUEROA, Edgar; MERIÑO Lourdes; TOVAR, Iván; NAVARRO, Alfredo; CIRO, Enrique; VIDAL, Juan; LOPEZ, Yuri y CASTRILLON, Rosaura. Ahorro de energía en la industria cerámica. 28p.

Ecocarbon, empresa colombiana de carbón. Hornos ladrilleros a carbón. Medellín, Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 1998, 137p. ISBN 958-696-018-8.

FERNANDEZ DIEZ, Pedro. Combustión, 1ra edición.
<http://files.pfernandezdiez.es/Termodinamica/PDFs/16Termod.pdf>

MANTILLA, Silvia y ARDILA, Lorenzo. Desarrollo de una propuesta de optimización Energética de los hornos colmena de la empresa ladrillos y acabados S.A.S. Bucaramanga, 2011. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.

MARADEY CHARRIS, Juan Francisco, Termodinámica Aplicada. Bucaramanga, Ediciones Universidad Industrial de Santander, 2002, 641 p. ISBN 958-8187-05-2.

MEDINA, Ana Carolina. Diseño de un sistema para la recuperación del calor residual en los gases de combustión de los hornos colmena en la empresa ladrillos y acabados S.A.S. Trabajo de grado ingeniero mecánico. Bucaramanga.

Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. 2013. 153p.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, Resolución número 0909. Junio, 2008. 43p.

Programa Eficiencia energética en ladrillos artesanales- EELA, Caracterización de los hornos usados en la industria ladrillera. Bogotá D.C. Mayo, 2011

Programa Eficiencia energética en ladrillos artesanales- EELA, Estudio tecnológico para definir el tipo de tecnología de horno apropiada para la reconversión de las ladrilleras artesanales, ingeniería básica y supervisión del montaje, Nemocon, Septiembre, 2011.

Programa Eficiencia energética en ladrillos artesanales- EELA, Evaluación del desempeño térmico de un horno cerámico tipo bóveda. Rio de Janeiro, Octubre, 2011. 23p.

Unidad de Planeación Minera Energética, Determinación de la Eficiencia Energética del Subsector Industrial de Ladrillo, Vidrio y Cerámica. Octubre, 2001. 29p.

ANEXOS

ANEXO A. Inversión económica del proyecto de grado

Este proyecto de grado, titulado “Análisis y propuesta de optimización del proceso de combustión del horno colmena (capacidad 25000 piezas) de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.” se desarrolla con el propósito de dar cumplimiento a algunos de los objetivos trazados en el proyecto de Investigación "Optimización Termo-mecánica en la combustión de Hornos Colmena para la Empresa Ladrillos y Acabados S.A.S" aprobado y financiado por la Vicerrectoría de investigación y extensión VIE, de la Universidad Industrial de Santander en conjunto con la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.

Para la realización de este proyecto de grado se invirtió el siguiente presupuesto:

Tabla 1. Inversión económica del proyecto de grado

Rubro	Tiempo (meses)	Valor (IVA incluido)	Financiador
Muestreo Isocinético	-	\$9.161.268	Ladrillos y Acabados S.A.S.
Analizador de gases	-	\$1.160.000	Ladrillos y Acabados S.A.S.
Licencia programa MATLAB	2	\$14.400.000	Escuela de ingeniería mecánica UIS
Licencia programa SolidWorks	2	\$14.250.000	Escuela de ingeniería mecánica UIS
Asesorías Profesionales	8	\$15.000.000	VIE/ Ladrillos y Acabados S.A.S.
Trabajo estudiantes	8	\$30.000.000	Estudiantes
TOTAL		\$83.971.268	

Fuente: los autores del proyecto

ANEXO B. Cotización Maquigar´S

San José de Cúcuta, 03 de Agosto de 2013

Señores:

MIGUEL ORJUELA ABRIL

San Gil

ASUNTO: COTIZACION

Apreciado señor:

A continuación me permito cotizar el siguiente equipo: **Carbojet moderno o Dosificador de quema a Carbón y Biomosas.**

El equipo consta de:

- Estructura y plataforma metálica en lámina figurada de 4mm.
- Tolva de alimentación con capacidad de carga de 220 kilos de carbón.
- Turbina vertical de 600mm en acero maquinado.
- Eje de 3pulg en SAE 4340.
- Rodamientos 22210 tipo C3 y manguitos de ajustes HE 310.
- Molino de martillos incorporado de 6 unidades en fundición.
- Balanceada estática y dinámicamente.

- Motor de 10hp, 7.5hp o de 12hp eléctrico marca Siemens, Weg o Abb de 3500 rpm.
- Alimentación mediante tornillo sinfín con eje en acero.
- Rodamiento 6207 doble.
- Moto reductor eléctrico de 1.5hp acoplado mediante cadena y piñones dobles paso 40.
- Poleas tensores correas y en pintura martillada verde, azul o gris o en 2 colores.

VALOR \$22.800.000 MAS IVA PESOS COLOMBIANOS

- Caja de controladores eléctricos de 60cms x 40cms x 20cms con variador de velocidad electrónico del motor de la turbina y otro para el motor reductor eléctrico de la alimentación marca Siemens micro máster serie 420 o Yaskawa con voltajes de 440 volt o 220 volt.
- Reloj controlador de temperatura indicadores On - Off. Pulsadores, cables conectores y protectores térmicos.

VALOR \$ 6.530.000 MAS IVA PESOS COLOMBIANOS

Accesorios:

- Termocupla tipo K en acero inoxidable.
- Cables.
- Corazas metálicas o mangueras de salida.
- Abrazaderas y ruedas para su traslado.

Tiempo de Entrega: 45 a 60 días hábiles.

Formas de pago:

- **30%** Inicio del trabajo
- **30%** 15 días de iniciado el trabajo
- **30%** 30 días de iniciado el trabajo
- **10%** a la entrega del equipo

Garantía: asesoría y suministro de repuestos en el montaje.

Atentamente,

LUIS ALIRIO GARCIA CAMARGO
Gerente.