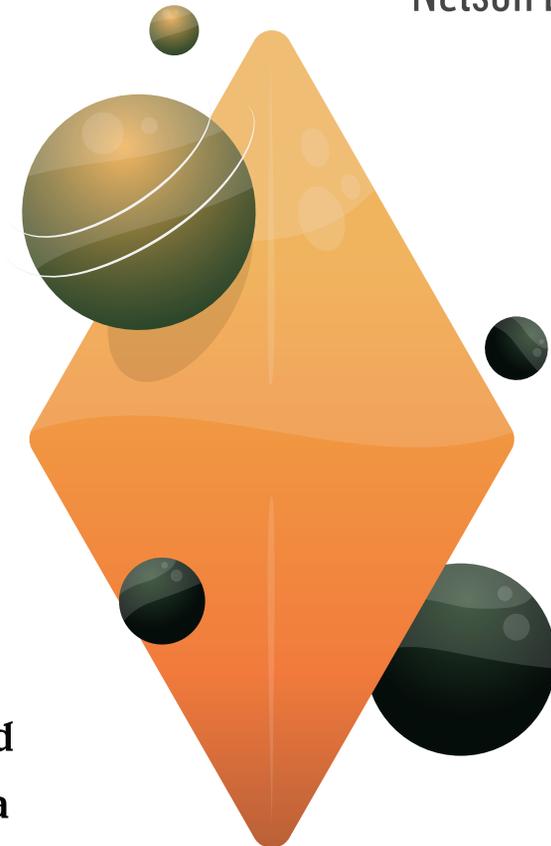


# EFICIENCIA ENERGÉTICA EN HORNOS DE PRODUCCIÓN DE MATERIALES CERÁMICOS

---

Gustavo Guerrero Gómez  
Carlos Humberto Acevedo Peñaloza  
Nelson Escobar Mora



Universidad  
Pontificia  
Bolivariana



**Gustavo**  
Guerrero Gómez

Ingeniero mecánico de la Universidad Francisco de Paula Santander, Especialista en Práctica Docente de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Magíster en Sistemas Energéticos Avanzados de la Universidad de Santander Bucaramanga.

Profesor Asistente de la Universidad Francisco de Paula Santander, desempeñando cargos como Coordinador Plan de Estudios de Ingeniería Mecánica, Jefe de Departamento Ingeniería Mecánica y Coordinador de Bienestar Universitario de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, ha impartido las cátedras: Estática, Dinámica, Resistencia de materiales, Diseño de Máquinas, Mecánica de Fluidos, Máquinas Hidráulicas y Transferencia de Calor. Es autor de varios artículos y ponente en eventos nacionales e internacionales y miembro del grupo de investigación en Tecnología y Desarrollo en Ingeniería GITYD de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, categoría B.



**Carlos Humberto**  
Acevedo Peñaloza

Ingeniero mecánico de la Universidad Francisco de Paula Santander, Magíster en Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes (Bogotá D.Colombia) Diplomado en elementos finitos de la Universidad Oscar Luecro Moya (Holguín—Cuba) y Doctor en In-

geniería Mecánica de la Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona—España).

Profesor titular de la Universidad Francisco de Paula Santander, con más de 20 años de experiencia, ha impartido las cátedras: Estática, Dinámica, Resistencia de materiales, Mecánica de Fluidos, Diseño de Máquinas y Teoría de vibraciones. Es autor de varios artículos y ponente en eventos nacionales e internacionales y miembro del grupo de investigación Diseño Mecánico y Mantenimiento de la Universidad Francisco de Paula Santander, categoría A.



**Nelson Javier**  
Escobar Mora

Ingeniero mecánico de la Universidad INCCA de Colombia, Magíster en Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes Bogotá D.C.

Profesor titular de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín e Investigador Senior de Colciencias, con más de 15 años de experiencia se ha desempeñado como Director de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería, Coordinador del Grupo de Investigación en Bioingeniería, Líder de la Línea de Ingeniería Clínica y actualmente Coordinador de los Laboratorios de Ingeniería Química y de Operaciones Unitarias de la Universidad Pontificia Bolivariana, ha impartido las cátedras: Física, Dibujo Técnico, Mecánica de Fluidos y Reología, Termodinámica, Uso Racional de la Energía, Refrigeración y Aire acondicionado, Transferencia de Calor, Diseño de Equipos. Es autor y coautor de varios artículos y ponente en eventos nacionales e internacionales y miembro del Grupo de investigación en Bioingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana, categoría B.

# EFICIENCIA ENERGÉTICA EN HORNOS DE PRODUCCIÓN DE MATERIALES CERÁMICOS

Gustavo Guerrero Gómez  
Carlos Humberto Acevedo Peñaloza  
Nelson Escobar Mora

620.142  
G934

Guerrero Gómez, Gustavo, autor  
Eficiencia energética en hornos de producción de materiales cerámicos / Gustavo  
Guerrero Gómez, Carlos Humberto Acevedo Peñaloza y Nelson Escobar Mora--  
Medellín : Universidad Pontificia Bolivariana, 2018. -- (Monografías y Tesis)  
98 p: 19 x 24 cm.  
ISBN: 978-958-764-559-0

1. Industria cerámica - Ocaña (Norte de Santander, Colombia) - 2. Buenas prácticas  
manufactureras - 3. Emisiones - I. Acevedo Peñaloza, Carlos Humberto, autor - II.  
Escobar Mora, Nelson, autor - III. Título - (Serie)

CD-MdUPB / spa / rda  
SCDD 21 / Cutter-Sanborn

© Gustavo Guerrero Gómez  
© Carlos Humberto Acevedo Peñaloza  
© Nelson Escobar Mora  
© Editorial Universidad Pontificia Bolivariana  
Vigilada Mineducación

#### **Eficiencia energética en hornos de producción de materiales cerámicos**

ISBN: 978-958-764-559-0  
Primera edición, 2018  
Escuela de Ingenierías  
Facultad de Ingeniería Química

**Gran Canciller UPB y Arzobispo de Medellín:** Mons. Ricardo Tobón Restrepo

**Rector General:** Pbro. Julio Jairo Ceballos Sepúlveda

**Vicerrector Académico:** Álvaro Gómez Fernández

**Decano Escuela Ingenierías:** Roberto Carlos Hincapié Reyes

**Editor:** Juan Carlos Rodas Montoya

**Coordinación de Producción:** Ana Milena Gómez Correa

**Diagramación:** Geovany Snehider Serna Velásquez

**Corrección de Estilo:** Pablo Cuartas

#### **Dirección Editorial**

Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2018  
E-mail: editorial@upb.edu.co  
www.upb.edu.co  
Telefax: (57)(4) 354 4565  
A.A. 56006 - Medellín - Colombia

**Radicado:** 1694-06-04-18

Prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier medio o para cualquier propósito, sin la autorización  
escrita de la Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.

## Tabla de contenido

<b>Introducción.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Problemática en la industria de la arcilla en Ocaña .....</b>	<b>13</b>
<b>2. Antecedentes del problema .....</b>	<b>14</b>
2.1 Marco contextual.....	14
<b>3. Descripción de las ladrilleras seleccionadas.....</b>	<b>18</b>
3.1 Descripción ladrillera El Recreo 2 .....	18
3.1.1 Proceso de producción .....	19
3.2 Descripción ladrillera Ocaña .....	22
3.2.1 Proceso de producción .....	22
3.3 Evaluación energética en los hornos de la ladrillera El Recreo 2 y la ladrillera Ocaña .....	24
3.3.1 Calor de entrada.....	28
3.3.2 Acumulación de calor en mampostería.....	29
3.3.3 Calor por carga del material a cocer .....	38
3.3.4 Calor para sacar la humedad del material.....	42
3.3.5 Calor necesario para la descomposición química de la arcilla .....	43
3.3.6 Calor por humedad del carbón.....	45
3.3.7 Calor por agua formada en la combustión .....	46
3.3.8 Calor por humedad del aire .....	48
3.3.9 Calor por inquemados .....	51
3.3.10 Pérdida de calor por las paredes .....	52
3.3.11 Calor por humos .....	56
3.3.12 Pérdidas intangibles.....	58
3.3.13 Rendimiento del horno .....	59

3.4	Requerimientos energéticos y de aire necesario para la combustión .....	60
3.5	Emisiones atmosféricas .....	66
3.5.1	<i>Corrección a condiciones de referencia</i> .....	67
3.5.2	<i>Exceso de aire</i> .....	70
3.5.3	<i>Eficiencia de la combustión</i> .....	71
<b>4.</b>	<b>Análisis de la energía en los hornos de la ladrillera El Recreo 2 y la ladrillera Ocaña .....</b>	<b>72</b>
4.1	Analogía curvas de cocción en el proceso .....	79
<b>5.</b>	<b>Mejoras en los procesos de producción de cerámicos por la implementación de buenas prácticas .....</b>	<b>83</b>
5.1	Factores de influencia en el mejoramiento de la producción de cerámicos .....	83
5.1.1	<i>Ubicación de la planta productora</i> .....	84
5.1.2	<i>Materia prima</i> .....	84
5.1.3	<i>Tipo de combustible utilizado</i> .....	84
5.1.4	<i>Tecnología de fabricación empleada preparación de ladrillo crudo, mezcla y moldeo</i> .....	84
5.1.5	<i>Tecnología de proceso empleada en la cocción</i> .....	85
5.1.6	<i>Gestión de recursos</i> .....	85
5.1.7	<i>Higiene, seguridad y protección personal</i> .....	85
5.1.8	<i>Adecuaciones</i> .....	85
<b>6.</b>	<b>Análisis y síntesis.....</b>	<b>87</b>
<b>7.</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>91</b>

## Lista de figuras

Figura 1.	Horno ladrillera El Recreo 2.....	19
Figura 2.	Preparación de la arcilla.....	20
Figura 3.	Moldeo del ladrillo .....	20
Figura 4.	Secado de los ladrillos .....	20
Figura 5.	Cargue del ladrillo y combustible.....	21
Figura 6.	Sellado de la puerta de cargue y descargue de productos .....	21
Figura 7.	Esquema horno Hoffman .....	22
Figura 8.	Banda transportadora .....	22
Figura 9.	Desterronador .....	23
Figura 10.	Amasadora.....	23
Figura 11.	Cortadora automática .....	23
Figura 12.	Configuración apile de bloques.....	24
Figura 13.	Ubicación termopares en hornos de las ladrilleras El Recreo 2 y Ocaña.....	26
Figura 14.	Perfiles de temperaturas en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña.....	27
Figura 15.	Puerta de cargue y descargue de productos.....	30
Figura 16.	Dimensiones en centímetros .....	30
Figura 17.	Cámaras de combustión en el horno.....	33
Figura 18.	Dimensiones sección transversal del horno Hoffman.....	34
Figura 19.	Dimensiones puerta de cargue y descargue de productos en el horno Hoffman.....	34
Figura 20.	Ubicación de orificios de inyección de combustible entre apiles de productos .....	35
Figura 21.	Sección transversal cámaras de combustión, agujeros de inyección y apiles de productos.....	35

Figura 22. Balance termodinámico en la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña .....	77
Figura 23. Curva de cocción real y teórica del producto en la ladrillera El Recreo 2.....	80
Figura 24. Curva de cocción real y teórica del producto en la ladrillera Ocaña.....	80
Figura 25. Curva de cocción real y teórica del producto en la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña.....	81
Figura 26. Adecuaciones a los hornos a cielo abierto .....	87
Figura 27. Recirculación gases producto de la combustión.....	87

## Lista de tablas

Tabla 1. Inventario de las empresas dedicadas a la explotación y transformación de arcilla en el municipio Ocaña.....	15
Tabla 2. Temperatura media de la pared y el piso del horno.....	29
Tabla 3. Temperatura media de los puntos de medición.....	33
Tabla 4. Peso promedio productos al ingreso y salida del horno .....	40
Tabla 5. Peso promedio productos al ingreso y salida del horno .....	41
Tabla 6. Composición química del carbón del norte de Santander .....	47
Tabla 7. Número de moles constituyentes del carbón en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y la ladrillera Ocaña. ....	66
Tabla 8. Coeficientes de balanceo en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y la ladrillera Ocaña.....	66
Tabla 9. Emisiones de gases en la ladrillera Ocaña .....	68
Tabla 10. Emisiones de gases en la ladrillera El Recreo 2.....	69
Tabla 11. Acumulación de calor en mampostería de los productos de la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña.....	73
Tabla 12. Calor por carga del material a cocer de los productos de la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña.....	73
Tabla 13. Calor para sacar la humedad del material a cocer de los productos de la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña.....	74

Tabla 14. Calor necesario para la descomposición química de la arcilla de los productos de la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña .....	74
Tabla 15. Otros calores presentes en el proceso de cocción en la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña.....	75
Tabla 16. Pérdida de calor en las paredes y techo en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña .....	75
Tabla 17. Balance termodinámico en la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña.....	76

## Introducción

En el municipio de Ocaña, departamento de norte de Santander, en Colombia, se ha desarrollado una industria cerámica importante en producción, aunque muy rudimentaria desde el punto de vista tecnológico.

La industria cerámica promueve una cantidad significativa de empleos directos y tiene capacidad para producir 1.027.600 de productos anuales, entre los cuales se cuentan ladrillos, bloques y tejas. Sin embargo, a pesar de los volúmenes de producción, su nivel tecnológico es limitado y encuentra, en este aspecto, su peor enemigo.

La falta de controles en los procesos de combustión, los altos índices de emisiones, la no generación de nuevos productos y, en creación, la falta de tecnología que mejore sus procesos de producción, tienen en crisis a la industria cerámica de la región. La competencia se torna compleja y los organismos de gobierno exigen con mayor rigor el cumplimiento de normativas ambientales en cuanto a la emisión de material particulado.

Este trabajo inicia identificando la problemática que viven las industrias cerámicas del municipio de Ocaña. En primer lugar, identificamos las empresas ladrilleras dedicadas a la producción de materiales cerámicos en el municipio de Ocaña y se realiza una descripción de la línea de producción en las ladrilleras seleccionadas; seguidamente, realizamos una adquisición de datos de temperaturas en el proceso de cocción y enfriamiento, determinamos la energía necesaria para el proceso de cocción, evaluamos el requerimiento de aire para la combustión, medimos las emisiones producto de la combustión y planteamos algunas mejoras en los procesos de producción, recomendaciones en el diseño de los hornos desde el punto de vista estructural. Se espera que todos estos procedimientos puedan desembocar en una significativa disminución en la emisión de contaminantes, en la mejora de la eficiencia energética y en un incremento de la rentabilidad.

## 1. Problemática en la industria de la arcilla en Ocaña

El sector cerámico en Colombia no cuenta con tecnificación en sus procesos de producción, conduciendo a que su proceso de combustión sea deficiente y provoque problemas ambientales y de salud por sus emisiones contaminantes, así como ocasionando costos innecesarios para las empresas. Un inadecuado proceso de combustión requiere la utilización de mayores cantidades de combustibles y expone a las empresas al pago de multas si no se acatan las normas ambientales vigentes.

En la actualidad, la industria de la arcilla del municipio de Ocaña debe cumplir con las exigencias de ley establecidas por las entidades ambientales, las cuales vienen creando y aplicando medidas más estrictas en lo referente al control de las emisiones atmosféricas emitidas desde sus procesos, como por ejemplo lo estipulado en la resolución 909 del 5 de junio de 2008 del Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial y el protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica ocasionada por fuentes fijas de octubre de 2010, por mencionar algunas de interés.

## 2. Antecedentes del problema

### 2.1 Marco contextual

En el municipio de Ocaña, se encuentran gran cantidad de empresas pertenecientes a la industria de la arcilla, las cuales, en su gran mayoría, desarrolla los procesos productivos de forma artesanal, por su bajo costo de construcción y mantenimiento y régimen de operación intermitente, excepto la ladrillera Ocaña que ha tecnificado sus procesos y su régimen de operación es continuo.

Las pequeñas ladrilleras poseen hornos de fuego dormido a cielo abierto, estos son hornos artesanales construidos en forma circular, originando una especie de bóveda circular abierta. Se construyen de cámaras individuales o en grupos, en los que el cargue de los productos y el enfriamiento quedan en posición fija durante la totalidad del proceso. Además, cuentan con una puerta lateral por donde se carga el material.

Los hornos se cargan con una capa de carbón, posteriormente una de ladrillos y consecutivamente una de carbón y otra de ladrillos y así sucesivamente hasta que se alcanza el tope o altura del horno. Una vez se ha terminado el cargue de productos se enciende el horno. La cocción dura aproximadamente entre 3 y 30 días y la producción de ladrillos es de 3.000 a 20.000 ladrillos por hornada. Estos hornos no poseen controles ni de temperatura, ni de aire y mucho menos de combustible. Son de baja producción y baja eficiencia, la cual está afectada por grandes pérdidas de calor en su operación. Por otra parte, son hornos de elevada contaminación debido a una quema no homogénea y a una combustión incompleta. El material producido es de baja calidad, pues algunos ladrillos se pasan de horneo y quedan requemados, mientras otros no alcanzan el punto de cocción y en consecuencia quedan crudos.

La población objeto de este trabajo está constituida por 20 chircales activos que se encuentran en el municipio de Ocaña, departamento Norte de Santander, los cuales están ubicados en diferentes zonas del casco urbano de la ciudad, producen aproximadamente 1.027.600 productos/mes, los cuales se caracterizan por emplear procesos manuales y rudimentarios en las diferentes etapas para la fabricación de estas piezas de mampostería.

Para el desarrollo del proyecto se consultó la información sobre la producción de materiales cerámicos, suministrada por la oficina de la Planeación y la unidad Técnica Ambiental UTA de la alcaldía municipal de Ocaña (ver tabla 1), así como la realización de visitas de campo en las que se observó el estado actual de funcionamiento de los hornos ubicados en el municipio de Ocaña<sup>1</sup>.

**Tabla 1.** Inventario de las empresas dedicadas a la explotación y transformación de arcilla en el municipio Ocaña

Nombre del Chircal	Tipo de Horno	Total	Capacidad (Ladrillo-teja)	Cantidad de Producto Transformado Mensual
Bolívar	Cuadrado y circular	4	4.000 – 9.000 – 12.000	20.000
La palma	Cuadrado	3	5.000 – 6.000	10.000
Sánchez	Cuadrado	3	10.000 – 15.000	15.000
Los espineles	Circular	1	4.000	12.000
Bética	Cuadrado	2	6.000	10.000
Los Lemus	Cuadrado	4	8.000 – 10.000	20.000
Los Sánchez	Cuadrado	5	5.000 – 6.000	10.000

<sup>1</sup> (Alcaldía Municipal de Ocaña, 2011)

Nombre del Chircal	Tipo de Horno	Total	Capacidad (Ladrillo-teja)	Cantidad de Producto Transformado Mensual
La pradera	Cuadrado	6	8.000	16.000
Los raros	Cuadrado	2	8.000 – 10.000	16.000
Pasos abajo del terminal	Cuadrado	2	4.000 – 8.000	8.000
Los raros	Cuadrado	2	5.000 – 7.000	12.000
Granito de oro	Cuadrado	1	9.000	9.000
Las violetas	Cuadrado	1	3.000	3.000
El Recreo 2	Circular	1	4.300	8.600
Los mellos	Cuadrado	2	7.000-9.000	16.000
El Recreo	Cuadrado	3	6.000 – 15.000	21.000
Los Guayabos	Circular	2	5.000	10.000
Estanco	Cuadrado y circular	4	7.000 – 4.000 – 11.000	15.000
Estanco 1	Cuadrado	4	7.000–12.000 – 16.000	28.000
Estanco 2	Cuadrado	3	9.000 – 10.000	19.000
Estanco 3	Circular	3	6.000 – 10.000- 16.000	26.000
Ocaña	Hoffman	1	986 Apiles	611.320
El Bosque	Cuadrado y circular	2	10.000	10.000
San Antonio	Cuadrado	1	10.000 – 20.000	20.000
El Líbano	Cuadrado	2	4.000 – 5.000	10.000
Los Pinos	Cuadrado	3	4.000	12.000
San Fernando	Cuadrado y circular	4	5.000 – 10.000	10.000
Villa Venecia	Cuadrado	2	8.000 – 12.000	32.000
El tejar	Circular	2	3.000 – 5.000	5.000
Buenvista	Circular	3	6.000-7000	13.000

Fuente: Alcaldía Municipal de Ocaña, Plan Básico de Ordenamiento Territorial PBOT

Las empresas ladrilleras o chircales que operan en la región poseen hornos a cielo abierto con capacidades de producción de bloque común, ladrillo H-10 y tejas que oscilan entre 5.000 a 20.000 ladrillos, excepto la ladrillera Ocaña que posee un horno continuo con una producción de 611.320 bloques.

Los hornos tradicionales utilizados en el municipio de Ocaña no fueron construidos con materiales refractarios y aislantes, lo que produce grandes pérdidas de calor al medio ambiente cuando se operan, pérdida que ocurre por la parte superior y en las paredes de la cámara de cocción, quemándose más combustible de lo que se requiere e incrementando el tiempo de operación. En la cámara de cocción no hay una distribución uniforme de temperatura, existiendo un gradiente apreciable de la misma. Además, no poseen controles de temperatura, ni del proceso de combustión ni para los controles de aire y combustible.

El combustible que se utiliza es carbón mineral sin procesar o aserrín, cuya alimentación se hace en forma manual. Los hornos no queman completamente el combustible, es decir, no existe combustión completa por falta de oxígeno, originado por la ausencia de chimenea que mejoraría el tiro en el horno, razón por la cual no se aprovecha eficientemente el combustible. Los gases producidos por la combustión salen directamente al ambiente; algunos de estos tejares se ubican en áreas cercanas a las zonas urbanas, ocasionando problemas de salud, de convivencia y afectando el paisaje.

Por otra parte, las ladrilleras presentan un inadecuado manejo de residuos sólidos, pues

no poseen lugares especialmente acondicionados para depositar los residuos sólidos de cenizas, ladrillos y tejas rotas. Tampoco hay programas para el reciclaje de estos materiales que pueden ser usados como abonos, en el caso de las cenizas y como insumos de la misma industria cerámica.

Como consecuencia de las quemas deficientes se ofertan productos de baja calidad, pues la mezcla de cerámica no llega a la quema completa, quedando con un alto nivel de porosidad, baja resistencia al golpe, cizallamiento, abrasión y tracción. Sin contar la presencia de gránulos calcáreos o caliche que al quemarse generan nódulos de cal que por higroscopia rompen las estructuras de los ladrillos<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> (Cuéllar Henríquez, 2011)

## 3. Descripción de las ladrilleras seleccionadas

### 3.1 Descripción ladrillera El Recreo 2

La ladrillera El Recreo 2 está ubicada en el municipio de Ocaña, departamento Norte de Santander, Colombia, a una altitud de 1.227 metros sobre el nivel del mar, bajo las coordenadas N 1073980 y W 1402088 y una temperatura ambiente de 21°C. El horno es de sección transversal circular y tiene un diámetro interior de 2,12 metros y una altura de 4,52 metros con espesor de pared de 0,24 metros; la cantidad de ladrillos por quema es de 4.300 y tiene un consumo de carbón de 1.500 kg por cada cocción (ver figura 1).

Figura 1. Horno ladrillera El Recreo 2



Fuente: S. A. Jácome Manzano

#### 3.1.1 Proceso de producción

En el horno de la ladrillera El Recreo 2 el proceso de producción se realiza de forma artesanal. El proceso inicia con la preparación de la arcilla en la que se utiliza una pileta con tierra seca y luego se deposita cierta cantidad de agua y se deja reposar por un determinado tiempo para que el material se logre humedecer. El proceso de mezclado utilizado es colocar a caminar caballos por un tiempo de dos horas (ver figura 2), para lograr que la arcilla quede en su punto adecuado para luego ser almacenada y moldeada.

Para el moldeo del ladrillo, la arcilla preparada es llevada a un molde de forma manual (ver figura 3), la cual se compacta manualmente, garantizando que no quede con espacios interiores que puedan dañar el bloque a la hora de la quema).

Para el secado de los ladrillos, como no se cuenta con secaderos artificiales los ladrillos se dejan a la exposición directa al sol, (ver figura 4), que por obvias razones puede durar varios días dependiendo de las condiciones climatológicas.

**Figura 2.** Preparación de la arcilla



Fuente: S. A. Jácome Manzano

**Figura 3.** Moldeo del ladrillo



Fuente: S. A. Jácome Manzano

**Figura 4.** Secado de los ladrillos



Fuente: S. A. Jácome Manzano

**Figura 5.** Cargue del ladrillo y combustible



Fuente: S. A. Jácome Manzano

En el cargue del ladrillo y combustible, a medida que se llena el horno con ladrillos de forma ordenada, se deposita el combustible necesario para la combustión en los espacios que quedan entre los ladrillos (ver figura 5).

En el proceso de cocción, al terminar de cargar el horno se sella la puerta de cargue y descargue de productos a través de una pared de ladrillos (ver figura 6). Se da inicio a la combustión inyectándole aire por medio de un ventilador, hasta que se haya quemado todo el carbón mineral. Luego se abre la puerta del horno y se deja un periodo de enfriamiento para poder sacar el ladrillo.

**Figura 6.** Sellado de la puerta de cargue y descargue de productos



Fuente: S. A. Jácome Manzano

### 3.2 Descripción ladrillera Ocaña 3.2.1 Proceso de producción

La ladrillera Ocaña está ubicada en el municipio de Ocaña, departamento Norte de Santander, Colombia, a una altitud de 1.212 metros sobre el nivel del mar, en las coordenadas N 1075629 y W 1402587 y una temperatura ambiente de 21°C. La ladrillera Ocaña está dedicada a la producción en serie de bloques para la construcción. Para ello cuenta con un horno tipo Hoffman de proceso continuo, compuesto por 24 cámaras o puertas dispuestas en ambos lados (ver figura 7).

En cada puerta se introducen hasta 5 apiles de 620 ladrillos aproximadamente por apile, con una separación de 60 cms entre cada apile de ladrillos. El combustible utilizado para la cocción del material es carbón pulverizado, con un consumo de carbón mensual de 170 toneladas.

El proceso de producción en el horno Hoffman de la ladrillera Ocaña es mecanizado. El proceso inicia transportando la materia prima de la mina a la tolva de alimentación, para luego ser dosificado en proporciones establecidas a la extrusora y, así, por medio de bandas transportadoras, son guiadas por rodillos. En estos rodillos se transportan entre 11 a 16 toneladas/ hora de materia prima (ver figura 8).

La disminución de tamaño de grano de la arcilla la realizan en el desterronador y el desintegrador. Estos equipos transforman la materia prima en granulometrías entre 5 y 20 mm y prepara de 15 a 30 toneladas de arcilla por hora (ver figura 9).

Figura 7. Esquema horno Hoffman



Fuente: S. A. Jácome Manzano



Fuente: S. A. Jácome Manzano

Figura 8. Banda transportadora



Figura 9. Desterronador

Fuente: S. A. Jácome Manzano



Figura 10. Amasadora

Fuente: S. A. Jácome Manzano

Para la homogenización y mezclado de la arcilla se utilizan dos amasadoras (ver figura 10), que conducen la arcilla a la extrusora.

Para la extrusión de los bloques, la mezcla de arcilla cae por la parte superior de la extrusora, compuesta de un sistema de dos ejes paralelos con paletas y un tornillo sin fin que reciben la mezcla y se encargan de impulsarla para la extrusión de la arcilla en un ladrillo compacto.



Figura 11. Cortadora automática

Fuente: S. A. Jácome Manzano

Para cortar el material se utiliza una cortadora automática, encargada de realizar el corte del material ya extruido, capaz de realizar 4.000 cortes/ hora (ver la figura 11). Luego estos ladrillos finalmente son llevados y almacenados en los secadores.

Después de la extrusión de los bloques, estos se llevan al secadero para disminuirles el porcentaje de humedad. Esto se realiza a través de un extractor que se encarga de inyectar o conducir los gases productos de la combustión al secadero. Luego se dispone a cargarlos en apiles en el horno bajo una configuración establecida (ver figura 12). Posteriormente se dispone a sellar las puertas con una pared provisional.

**Figura 12.** Configuración apile de bloques

Fuente: S. A. Jácome Manzano

El combustible utilizado en este horno es carbón mineral, preparado con molinos de martillos que lo transforman en partículas diminutas. Luego, un sistema de bandas transportadoras dirigen el carbón a la parte superior del horno. El carbón se inyecta al horno con dos Carbojet, los cuales son desplazados y recargados de carbón de forma manual por el operador durante una hora para el precalentamiento y requema de producto. Un carbojet inicia la inyección de carbón para el precalentamiento en dos cámaras antes de que pase el segundo Carbojet requemando el bloque. Esto lo hacen por los agujeros ubicados en la cúpula del horno, a través de mangueras metálicas que desplazan el combustible al interior del horno a razón de 8 kg a 12 kg de carbón por minuto, con el fin de mantener la temperatura requerida en el horno. Después de que el Carbojet realice la quema de cierta cantidad de apiles, se dispone a tumbar las puertas

de los apiles y a sacar el calor por medio de un ventilador, para retirar el bloque, almacenarlo y proceder a su comercialización.

### 3.3 Evaluación energética en los hornos de las ladrilleras El Recreo 2 y Ocaña

Para el balance energético se utilizó un sistema de adquisición de datos de temperatura, a partir de un ejecutable del software manejador DAQ assistant del sistema embebido compact RIO, con una tarjeta de adquisición E/S NI 9213 ensamblada al Chasis NI cDAQ-9184 y soportadas por National instruments, permitiendo el procesamiento analógico-digital de la información recibida

de los termopares instalados, para luego ser almacenadas a través del software Lab view en el reporte de adquisición y generar los perfiles de temperatura.

Los termopares utilizados para la medición de temperatura se montan en posiciones representativas para realizar posteriormente el balance termodinámico. Para registrar las temperaturas internas presentadas en el proceso de cocción de cada horno seleccionado, se instalaron termopares de bulbo de aleación de cromo aluminio tipo K con aislamiento cerámico, y para registrar las temperaturas externas en el horno se seleccionan termopares de alambre tipo K con recubrimiento fiberglass a 900 °F.

Los equipos de adquisición de temperatura en el horno de la ladrillera El Recreo 2 se instalan en la casa adyacente al horno a una distancia de 9 m de la puerta de carga y descarga de productos. Se censan para este caso 8 posiciones en el horno. Se utiliza una tarjeta o bloque de adquisición en la que se colocan 8 termopares. Para la medición de las temperaturas interiores se utilizan 4 termopares de bulbo, los cuales se instalaron simultáneamente con el proceso de carga de ladrillos en el horno y 4 termopares de alambre que registraron las temperaturas exteriores, los cuales se instalaron al mismo tiempo en que se sellaba la puerta de carga de productos.

La ubicación de los termopares fue de la siguiente manera:  $T_1$  temperatura del centro interior,  $T_2$  temperatura del piso interior,  $T_3$  temperatura de la pared interior,  $T_4$  temperatura de los gases,  $T_5$  temperatura centro exterior,  $T_6$  temperatura del piso exterior,  $T_7$  temperatura de la pared exterior y  $T_8$  temperatura ambiente (ver figura 13).

Los equipos de adquisición de temperatura en el horno de la ladrillera Ocaña se instalaron en un cuarto de monitoreo a una distancia de 10 m de la cámara de cocción seleccionada, en la cual se censaron 8 posiciones en el horno. Se hizo uso de una tarjeta o bloque de adquisición en la que se colocaron 8 termopares. Para la medición de las temperaturas interiores se utilizaron 4 termopares de bulbo, los cuales se instalaron simultáneamente con el proceso de carga de ladrillos en el horno y 4 termopares de alambre que registraron las temperaturas exteriores, los cuales, a su vez, se instalaron al mismo tiempo en que se sellaba la puerta de carga de productos. La ubicación de los termopares fue de la siguiente manera:  $T_1$  temperatura del centro interior,  $T_2$  temperatura del piso interior,  $T_3$  temperatura de la pared interior,  $T_4$  temperatura de los gases,  $T_5$  temperatura centro exterior,  $T_6$  temperatura del piso exterior,  $T_7$  temperatura de la pared exterior y  $T_8$  temperatura ambiente (ver figura 13).

**Figura 13.** Ubicación termopares en hornos de las ladrilleras El Recreo 2 y Ocaña

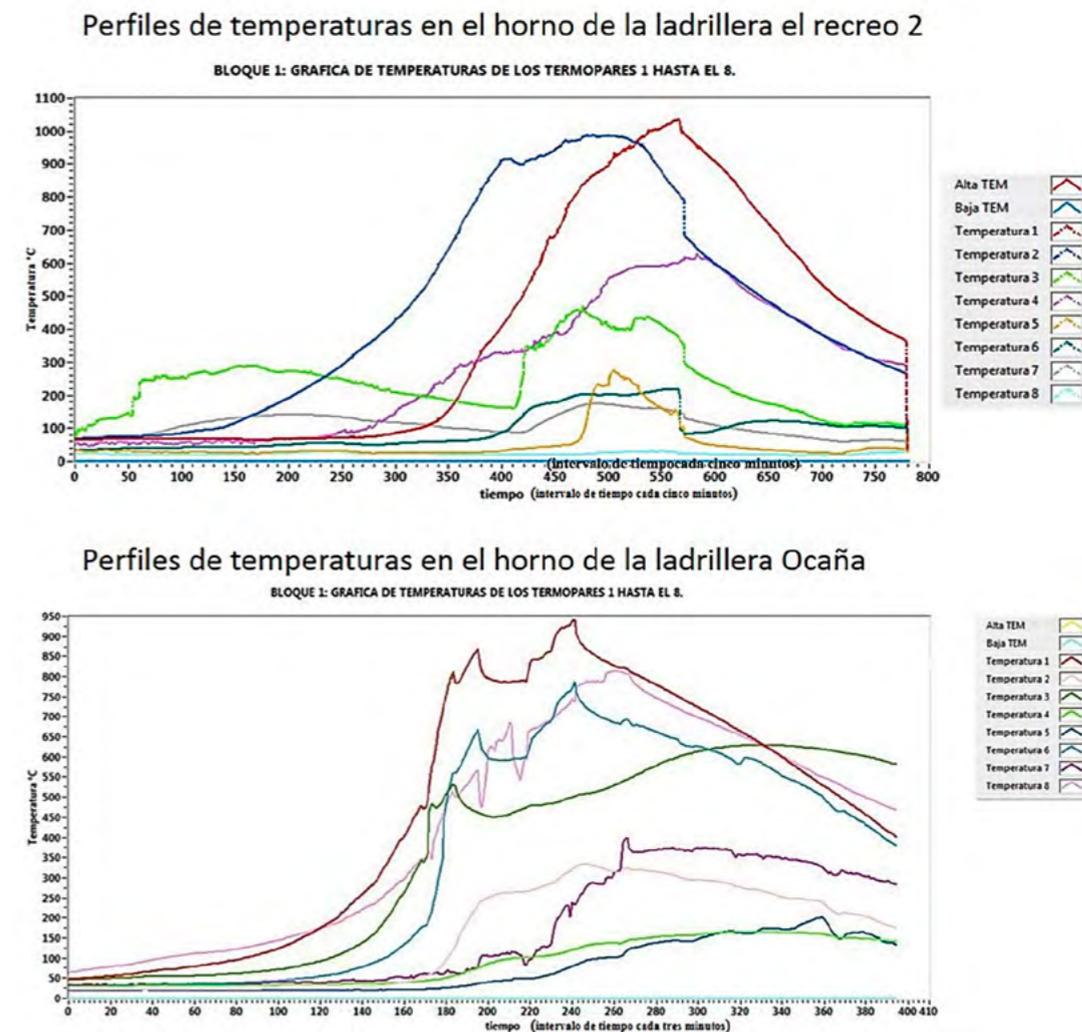


Fuente: S. A. Jácome Manzano

En el horno de la ladrillera El Recreo 2, se programó el software de adquisición para que registrara temperaturas en el intervalo de tiempo cada 5 minutos. El proceso de registro de los datos inició el día miércoles 22 de abril de 2017 a las 04:38:16 p.m., cuando empezó el proceso combustión del carbón en la parte inferior del horno y terminó hasta el final del proceso de cocción el día sábado 25 de abril de 2017 a las 12:07:32 p.m. El monitoreo en este horno tuvo una duración de 2 días y 19 horas. Para cada posición en el horno se registraron 798 datos, para un total de 6.248 registros en el proceso de cocción (ver figura 14).

En el horno de la ladrillera Ocaña se programó el software de adquisición para que registrara temperaturas cada 3 minutos. El proceso de registro de los datos inició el día sábado 25 de Marzo de 2017 a las 04:42:08 p.m. y terminó en el final del proceso de cocción, el día domingo 26 de Marzo de 2017 a las 03:18:50 p.m. El monitoreo en este horno tuvo una duración de 22 horas y 38 minutos. Para cada posición en el horno se registraron 441 datos, para un total de 7.056 registros en el proceso de cocción (ver figura 14).

**Figura 14.** Perfiles de temperaturas en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña



Fuente: S. A. Jácome Manzano

El balance energético en el horno tiene como objetivo estimar el intercambio de calor teniendo en cuenta todas las entradas y salidas de energía. Esto permite cuantificar el

calor generado por fuentes externas, tales como la combustión de combustible. Esta energía se utiliza en los hornos para calentar la carga, evaporar la humedad, propor-

cionar el calor necesario para las reacciones endotérmicas, tales como deshidroxilación caolinita y la sinterización del material cerámica<sup>3</sup>, así como para estimar la pérdida de energía en las paredes del horno.

En general, para mejorar los procesos térmicos de los hornos hay que tener en cuenta la energía suministrada por el combustible que se consume en las diferentes etapas del proceso de cocción de los hornos. El análisis se determina a partir de la siguiente expresión:

$$Q_T = Q_o + Q_{cm} + Q_{wm} + Q_{dq} + Q_{wc} + Q_{ac} + Q_{wa} + Q_i + Q_{pa} + Q_h \text{ Ec. 1}$$

Donde:

- Q<sub>T</sub> = Cantidad de calor total suministrado al horno
- Q<sub>o</sub> = Acumulación de calor en mampostería en el horno
- Q<sub>cm</sub> = Calor por carga del material a cocer
- Q<sub>wm</sub> = Calor para sacar la humedad del material
- Q<sub>dq</sub> = Calor necesario para la descomposición química de arcilla
- Q<sub>wc</sub> = Calor por humedad de carbón
- Q<sub>ac</sub> = Calor por agua formada en la combustión
- Q<sub>wa</sub> = Calor por humedad de aire
- Q<sub>i</sub> = Calor por inquemados
- Q<sub>pa</sub> = pérdida de calor por las paredes del horno
- Q<sub>h</sub> = Calor por humos

En consecuencia, lo importante es conseguir que tanto el aporte de calor para las reacciones que se producen en los productos, como la cantidad de calor perdido por los gases en la chimenea y las paredes del

horno, sea baja. Así se garantizaría una mayor eficiencia térmica, lo que equivaldría a un menor consumo de combustible.

### 3.3.1 Calor de entrada

Es la energía liberada por la combustión del carbón utilizado durante la quema, y es igual al poder calorífico del carbón multiplicado por el consumo de carbón durante el proceso de cocción. Para la evaluación de este calor, se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_H = P_c * m_c \text{ Ec. 2}$$

Donde:

- Q<sub>h</sub> = Calor de entrada (kJ)
- P<sub>c</sub> = Poder calorífico del carbón ( $\frac{kJ}{kg}$ )
- P<sub>c</sub> = 32.800,00  $\frac{kJ}{kg}$
- m<sub>c</sub> = Masa de combustible (kg)

En la ladrillera El Recreo 2 se utilizaron 15.00,00 kg de carbón y en la ladrillera Ocaña se utilizaron 10.370,76 kg.

El calor de entrada suministrado al horno de la ladrillera El Recreo 2 es:

$$Q_H = 32.800,00 \frac{kJ}{kg} * 1.500,00 \text{ kg}$$

$$Q_H = 49.200.000 \text{ kJ}$$

$$Q_H = 49,2 * 10^6 \text{ kJ}$$

<sup>3</sup> (Oba, 2011)

<sup>4</sup> (Cengel, 2009)

De igual forma se evalúa el calor de entrada suministrado al horno de la ladrillera Ocaña y su valor es Q<sub>H</sub> = 340,16 \* 10<sup>6</sup> kJ.

### 3.3.2 Acumulación de calor en mampostería

El calor liberado dentro del horno se transfiere en parte a sus paredes y al piso. La diferencia de temperaturas entre las partes exterior e interior del horno mide el calor acumulado en el horno. La influencia de este calor acumulado en el consumo de combustible, es mayor en cuanto más frecuentes son las interrupciones en el trabajo del horno o en procesos de quemados no continuos. La influencia de este calor acumulado en el horno ayuda a disminuir el consumo de combustible.

Para la evaluación de este calor en el horno de la ladrillera El Recreo 2 se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_o = Q_{opa} + Q_{opis} \text{ Ec. 3}$$

$$Q_{opa} = \rho_o * C_o * V_{pa} * T_{mpa} \text{ Ec. 4}$$

$$Q_{opis} = \rho_o * C_o * V_{pis} * T_{mpis} \text{ Ec. 5}$$

Donde:

- Q<sub>o</sub> = Acumulación de calor en mampostería (kJ)
- Q<sub>opa</sub> = Calor acumulado en la pared del horno (kJ)
- Q<sub>opis</sub> = Calor acumulado en el piso del horno (kJ)
- ρ<sub>o</sub> = Densidad volumétrica del ladrillo del horno ( $\frac{kg}{m^3}$ )
- ρ<sub>o</sub> = 1.922,00  $\frac{kg}{m^3}$
- C<sub>o</sub> = Calor específico del ladrillo del horno ( $\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K}$ )

<sup>5</sup> (Cengel, 2009)

- C<sub>o</sub> = 0,79  $\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K}$
- V<sub>pa</sub> = Volumen total de la pared del horno (m<sup>3</sup>)
- V<sub>pis</sub> = Volumen del piso del horno (m<sup>3</sup>)
- T<sub>mpa</sub> = Temperatura media de la pared del horno (°C)
- T<sub>mpis</sub> = Temperatura media del piso del horno (°C)

Para evaluar el calor sensible de los materiales se toman las temperaturas máximas durante la prueba (British Estandar Test Code, 1995)<sup>7</sup>. Con las temperaturas de la superficie exterior T<sub>7</sub> e interior T<sub>3</sub> de la pared, se evalúa la temperatura media de la pared del horno T<sub>mpa</sub>; y con las temperaturas de la superficie exterior T<sub>6</sub> e interior T<sub>2</sub> del piso, se evalúa la temperatura media del piso del horno T<sub>mpis</sub>, las cuales se calculan usando las siguientes ecuaciones y se muestran en la tabla 2:

$$T_{m pa} = \frac{T_{3máx} + T_{7máx}}{2} \text{ Ec. 6}$$

$$T_{m pis} = \frac{T_{2máx} + T_{6máx}}{2} \text{ Ec. 7}$$

Tabla 2. Temperatura media de la pared y el piso del horno

Punto de medición	Temperatura interna (°C)	Temperatura Externa (°C)	Temperatura media (°C)
Pared	468,15	140,45	304,30
Piso	986,54	217,40	601,97

Fuente: S. A. Jácome Manzano

Para evaluar el volumen del horno, compuesto por las paredes y el piso del horno, el volumen de la pared se evaluará restandole al volumen del cilindro el volumen de

<sup>6</sup> (Cengel, 2009)

<sup>7</sup> (British Estandar Test Code, 1995)

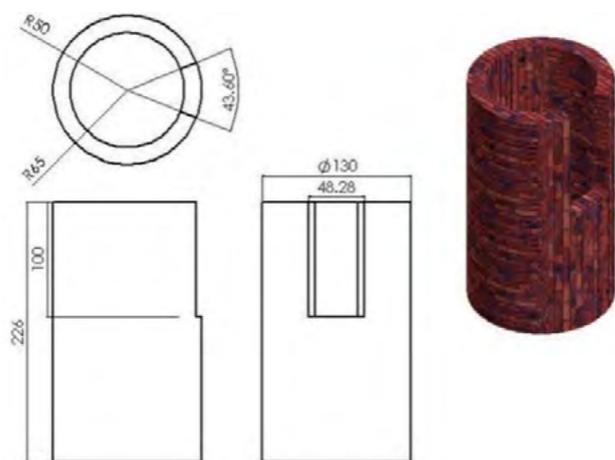
la puerta de carga y descarga de productos (ver figura 15). La pared del horno es un cilindro de diámetro interno y externo de 2,12 m y 2,60 m respectivamente, y altura de 4,40 m. La puerta de carga tiene una altura de 2,50 m y el espesor de la pared es de 0,24 m (ver figuras 15 y 16).

Figura 15. Puerta de carga y descarga de productos



Fuente: S. A. Jácome Manzano

Figura 16. Dimensiones en centímetros



Fuente: Autores

El volumen del cilindro es:

$$V_{ci} = \frac{\pi}{4} * (D_o^2 - D_i^2) * h \quad \text{Ec. 8}$$

El volumen de la puerta de carga y descarga del horno es:

$$V_{pu} = S_p * h_p * t_p \quad \text{Ec. 9}$$

El volumen del piso del horno es:

$$V_{pis} = \frac{\pi}{4} * D_o^2 * t_{pis} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

- $V_{ci}$  = Volumen del cilindro ( $m^3$ )
- $V_{pu}$  = Volumen de la puerta de carga y descarga del horno ( $m^3$ )
- $V_{pa}$  = Volumen de la pared del horno ( $m^3$ )
- $V_{pis}$  = Volumen del piso del horno ( $m^3$ )
- $D_o$  = Diámetro exterior del horno (m)
- $D_o$  = 2,60 m
- $D_i$  = Diámetro interior del horno (m)
- $D_i$  = 2,12 m
- $h$  = Altura del horno
- $h$  = 4,40 m
- $S_p$  = Longitud de arco de la puerta del horno (m)
- $h_p$  = Altura de la puerta de carga del horno (m)
- $h_p$  = 2,50 m
- $t_p$  = Espesor de la pared del horno (m)
- $t_p$  = 0,24 m
- $t_{pis}$  = Espesor del piso del horno (m)
- $t_{pis}$  = 0,12 m

La longitud de arco de la puerta del horno es:

$$S_p = r_0 * \theta \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

- $S_p$  = Longitud de arco de la puerta del horno (m)
- $r_0$  = Radio exterior del horno (m)

- $r_0$  = 1,30 m
- $\theta$  = Posición angular de la puerta del horno (rad)
- $\theta$  = 38,35°

La longitud de arco de la puerta del horno es:

$$S_p = 1,3 \text{ m} * 38,35^\circ * \frac{2\pi \text{ rad}}{360^\circ}$$

$$S_p = 0,87 \text{ m}$$

El volumen del cilindro es:

$$V_{ci} = \frac{\pi}{4} * ((2,60 \text{ m})^2 - (2,12 \text{ m})^2) * 4,40 \text{ m}$$

$$V_{ci} = 7,83 \text{ m}^3$$

El volumen de la puerta del horno es:

$$V_{pu} = 0,87 \text{ m} * 2,5 \text{ m} * 0,24 \text{ m}$$

$$V_{pu} = 0,52 \text{ m}^3$$

El volumen de la pared del horno es:

$$V_{pa} = V_{ci} - V_{pu}$$

$$V_{pa} = 7,83 \text{ m}^3 - 0,52 \text{ m}^3$$

$$V_{pa} = 7,31 \text{ m}^3$$

El volumen del piso del horno es:

$$V_{pis} = \frac{\pi}{4} * (2,60 \text{ m}^2) * 0,12 \text{ m}$$

$$V_{pis} = 0,64 \text{ m}^3$$

El calor acumulado en la pared del horno es:

$$Q_{opa} = 1.922,00 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} - ^\circ\text{K}} * 7,31 \text{ m}^3 * 577,30 ^\circ\text{K}$$

$$Q_{opa} = 6.407.659,26 \text{ kJ}$$

$$Q_{opa} = 6,41 * 10^6 \text{ kJ}$$

El calor acumulado en el piso del horno es:

$$Q_{opis} = 1.922,00 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} - ^\circ\text{K}} * 0,64 \text{ m}^3 * 874,97 ^\circ\text{K}$$

$$Q_{opis} = 850.263,65 \text{ kJ}$$

$$Q_{opis} = 0,85 * 10^6 \text{ kJ}$$

La acumulación de calor en mampostería en el horno de la ladrillera El Recreo 2 es:

$$Q_o = 6,41 * 10^6 \text{ kJ} + 0,85 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_o = 7,26 * 10^6 \text{ kJ}$$

El horno Hoffman de la ladrillera Ocaña es continuo y de alta productividad, capaz de operar las 24 horas del día y los 365 días del año. Por lo tanto, tiene una clara ventaja respecto a los hornos tradicionales utilizados para la transformación de material cerámico en el municipio de Ocaña, ya que aprovecha el calor residual proveniente de la quema de las cámaras anteriores del horno<sup>8</sup>, es empleado por las cámaras contiguas para conseguir un precalentamiento a la cámara de combustión del horno y secado de los productos cargados en esta cámara, ahorrando tiempo y energía en

esta etapa inicial de la quema y generando un ahorro en el consumo de combustible en las etapas de precalentamiento y secado. Para la evaluación de este calor se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_o = Q_{opa} + Q_{otec} + Q_{opis} \text{ Ec. 12}$$

$$Q_{opa} = \rho_o * C_o * V_{pa} * T_{mpa} \text{ Ec. 13}$$

$$Q_{otec} = \rho_o * C_o * V_{tec} * T_{mtec} \text{ Ec. 14}$$

$$Q_{opis} = \rho_o * C_o * V_{pis} * T_{mpis} \text{ Ec. 15}$$

Donde:

$Q_o$  = Acumulación de calor en mampostería en el horno

$Q_{opa}$  = Calor acumulado en la pared del horno

$Q_{otec}$  = Calor acumulado en el techo del horno

$Q_{opis}$  = Calor acumulado en el piso del horno

$V_{pa}$  = Volumen de la pared del horno

$V_{tec}$  = Volumen del techo del horno

$V_{pis}$  = Volumen del piso del horno

$T_{mpa}$  = Temperatura media de la pared del horno

$T_{mtec}$  = Temperatura media del techo del horno

$T_{mpis}$  = Temperatura media del piso del horno

Con las temperaturas de la superficie exterior  $T_7$  e interior  $T_3$  de la pared, se evalúa la temperatura media de la pared del horno  $T_{mpa}$ . Con las temperaturas de la superficie exterior  $T_8$  e interior  $T_4$  del techo del horno, se evalúa la temperatura media del techo del horno  $T_{mtec}$ . Y con las temperaturas de la superficie exterior  $T_6$  e interior  $T_2$  del piso del horno, se evalúa la temperatura media del piso del horno  $T_{mpis}$ . Se calculan las temperaturas medias usando las expresiones descritas a continuación y se muestran en la tabla 3:

$$T_{mpa} = \frac{T_{3m\acute{a}x} + T_{7m\acute{a}x}}{2} \text{ Ec. 16}$$

$$T_{mtec} = \frac{T_{4m\acute{a}x} + T_{8m\acute{a}x}}{2} \text{ Ec. 17}$$

$$T_{mpis} = \frac{T_{2m\acute{a}x} + T_{6m\acute{a}x}}{2} \text{ Ec. 18}$$

Tabla 3. Temperatura media de los puntos de medición

Punto de medición	Temperatura interna (°C)	Temperatura externa (°C)	Temperatura media (°C)
Pared	788,25	202,14	495,20
Techo	814,14	398,62	606,38
Piso	629,39	165,35	397,37

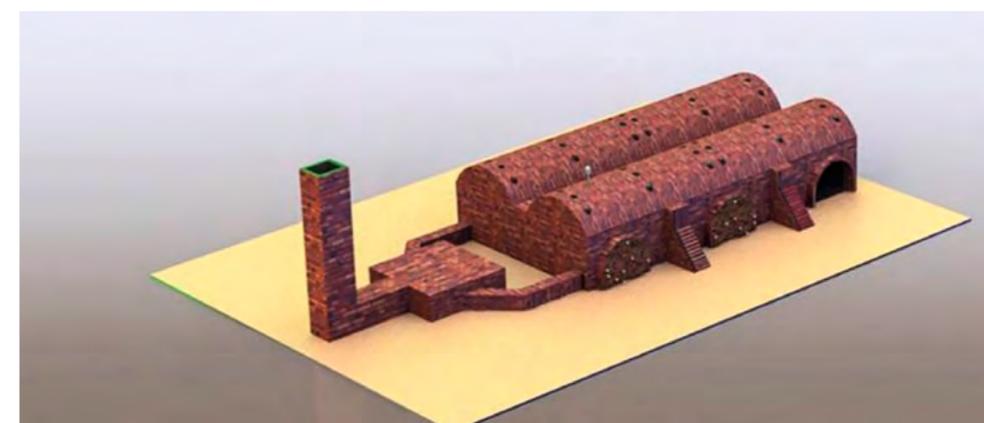
Fuente: S. A. Jácome Manzano

El horno Hoffman está compuesto por dos cámaras de combustión para poder recircular y utilizar los gases producidos en la combustión (ver figura 17).

Para el análisis se toma una longitud de trabajo de 44,10 m. La sección transversal del horno está compuesta por una pared exterior de altura 1,80 m y un espesor 0,90 m, donde se ubican 9 puertas de cargue e igual número de puertas de extracción de gases. Una pared central maciza de espesor 1,20 m y una cúpula elíptica de 2,70 m de semieje mayor y 1m de la mitad del semieje menor. Desde donde empieza la cúpula hasta la parte superior donde termina el horno hay una altura de 1,90 m recubierta de ladrillo (ver figuras 18 y 19).

En el techo del horno existen unos orificios por donde se inyecta combustible al horno. En total para el análisis, son 168 agujeros de diámetro 0,165 m y longitud promedio de 1,21m, mientras que el piso del horno tiene un ancho de 2,70 m y un espesor de 0,15 m (ver figuras 20 y 21).

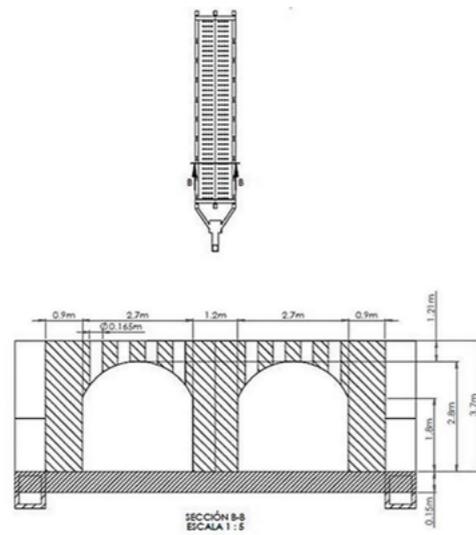
Figura 17. Cámaras de combustión en el horno



Fuente: Autores

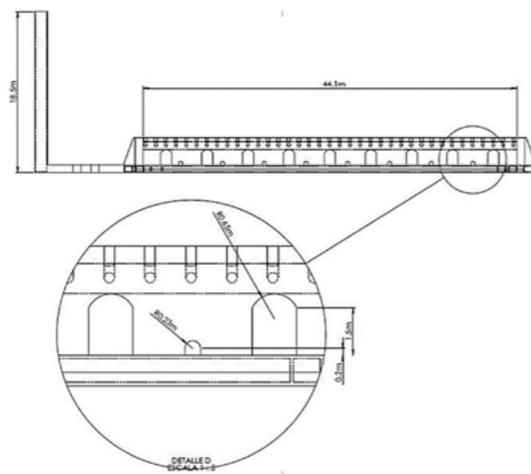
<sup>8</sup> (Dadam, 2005)

**Figura 18.** Dimensiones sección transversal del horno Hoffman



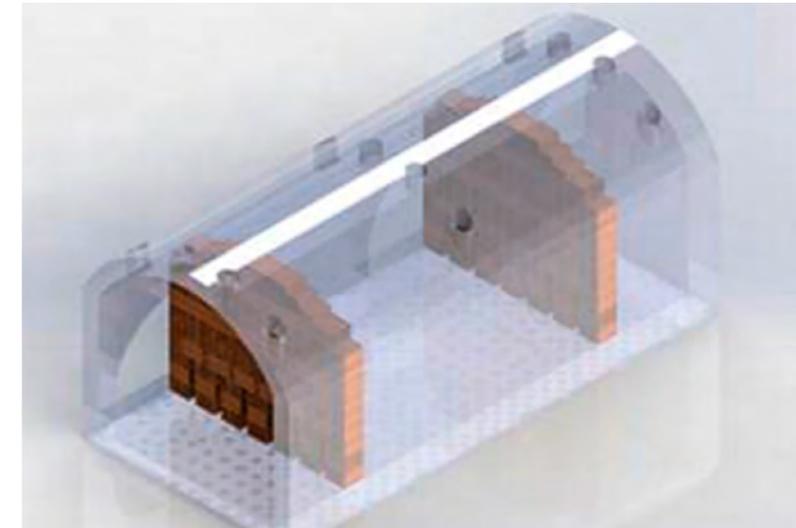
Fuente: Autores

**Figura 19.** Dimensiones puerta de carga y descarga de productos en el horno Hoffman



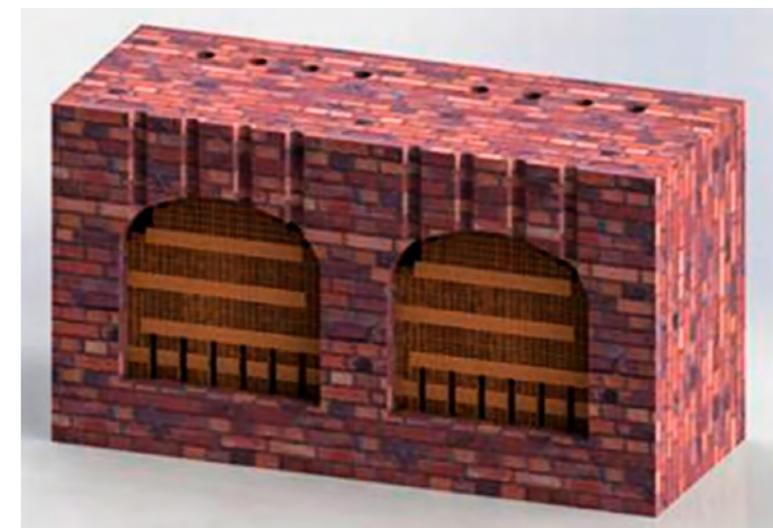
Fuente: Autores

**Figura 20.** Ubicación de orificios de inyección de combustible entre apiles de productos



Fuente: Autores

**Figura 21.** Sección transversal cámaras de combustión, agujeros de inyección y apiles de productos



Fuente: Autores

El volumen de la pared exterior se evaluará restándole al volumen de esta el volumen de las 9 puertas de cargue y descargue de productos y las 9 puertas de humos.

El volumen de la pared del horno es:

$$V_{pa} = V_{pe} + V_{pc} - V_{pu} - V_{ph} \text{ Ec. 19}$$

Donde:

$V_{pa}$  = Volumen de la pared del horno ( $m^3$ )

$V_{pe}$  = Volumen de la pared exterior del horno ( $m^3$ )

$V_{pc}$  = Volumen de la pared central del horno ( $m^3$ )

$V_{pu}$  = Volumen de las puertas de cargue y descargue de productos ( $m^3$ )

$V_{ph}$  = Volumen de las puertas de humos ( $m^3$ )

El volumen de la pared exterior del horno es:

$$V_{pe} = L * h * t_{pe} \text{ Ec. 20}$$

El volumen de la pared central del horno es:

$$V_{pc} = L * h * t_{pc} \text{ Ec. 21}$$

El volumen de la pared de la puerta de cargue y descargue del horno es:

$$V_{pu} = a * H * t_{pe} \text{ Ec. 22}$$

El volumen de la pared de la puerta de humos es:

$$V_{ph} = b * z * t_{pe} \text{ Ec. 23}$$

Donde:

$V_{pe}$  = Volumen de la pared exterior del horno ( $m^3$ )

$V_{pc}$  = Volumen de la pared central del horno ( $m^3$ )

$V_{pu}$  = Volumen de las puertas de cargue y descargue de productos ( $m^3$ )

$V_{ph}$  = Volumen de las puertas de humos ( $m^3$ )

$L$  = Longitud de trabajo del horno (m)

$L$  = 44,10 m

$h$  = Altura de la pared del horno (m)

$h$  = 1,80 m

$t_{pe}$  = Espesor de la pared exterior (m)

$t_{pe}$  = 0,90 m

$t_{pc}$  = Espesor de la pared central (m)

$t_{pc}$  = 1,20 m

$a$  = Ancho de la puerta de cargue y descargue del horno (m)

$a$  = 1,30 m

$H$  = Altura de la puerta de cargue y descargue del horno (m)

$H$  = 1,50 m

$b$  = Ancho de la puerta de humos (m)

$b$  = 0,46 m

$z$  = Altura de la puerta de humos (m)

$z$  = 0,20 m

El volumen de la pared exterior del horno es:

$$V_{pe} = 44,10 \text{ m} * 1,80 \text{ m} * 0,90 \text{ m}$$

$$V_{pe} = 71,44 \text{ m}^3$$

El volumen de la pared central del horno es:

$$V_{pc} = 44,10 \text{ m} * 1,80 \text{ m} * 1,20 \text{ m}$$

$$V_{pc} = 95,26 \text{ m}^3$$

El volumen de la pared de la puerta de cargue y descargue del horno es:

$$V_{pu} = 1,30 \text{ m} * 1,50 \text{ m} * 0,90 \text{ m}$$

$$V_{pu} = 1,76 \text{ m}^3$$

El volumen de la pared de la puerta de humos es:

$$V_{ph} = 0,46 \text{ m} * 0,20 \text{ m} * 0,90 \text{ m}$$

$$V_{ph} = 0,083 \text{ m}^3$$

El volumen de la pared del horno es:

$$V_{pa} = 71,44 \text{ m}^3 + 95,26 \text{ m}^3 - 9 * 1,76 \text{ m}^3 - 9 * 0,083 \text{ m}^3$$

$$V_{pa} = 150,11 \text{ m}^3$$

El volumen del techo del horno es:

$$V_{tec} = V_{sup} - V_{cup} - V_{tub} \text{ Ec. 24}$$

Donde:

$V_{tec}$  = Volumen del techo del horno ( $m^3$ )

$V_{sup}$  = Volumen de la parte superior del horno ( $m^3$ )

$V_{cup}$  = Volumen de la cúpula del horno ( $m^3$ )

$V_{tub}$  = Volumen de los tubos de alimentación de combustible ( $m^3$ )

El volumen de la parte superior del horno es:

$$V_{sup} = L * h_{sup} * d_{sup} \text{ Ec. 25}$$

El volumen de la cúpula del horno es:

$$V_{cup} = \frac{\pi * a_{cup} * b_{cup} * L}{2} \text{ Ec. 26}$$

El volumen de los tubos de alimentación de combustible es:

$$V_{tub} = \pi * r^2 * L_t * n \text{ Ec. 27}$$

Donde:

$V_{sup}$  = Volumen de la parte superior del horno ( $m^3$ )

$V_{cup}$  = Volumen de la cúpula del horno ( $m^3$ )

$V_{tub}$  = Volumen de los tubos de alimentación de combustible ( $m^3$ )

$L$  = Longitud de trabajo del horno (m)

$L$  = 44,10 m

$h_{sup}$  = Altura de la pared superior del horno (m)

$h_{sup}$  = 1,90 m

$d_{sup}$  = Ancho de la sección transversal del horno (m)

$d_{sup}$  = 4,80 m

$a_{cup}$  = Semieje mayor parábola de la cúpula (m)

$a_{cup}$  = 1,35 m

$b_{cup}$  = Semieje menor parábola de la cúpula (m)

$b_{cup}$  = 1,00 m

$r$  = Radio de los tubos de alimentación de combustible (m)

$r$  = 0,165 m

$L_t$  = Longitud de los tubos de alimentación de combustible (m)

$L_t$  = 1,21 m

$n$  = Número de tubos de alimentación de combustible

$n$  = 168,00 m

El volumen de la parte superior del horno es:

$$V_{sup} = 44,10 \text{ m} * 1,90 \text{ m} * 4,80 \text{ m}$$

$$V_{sup} = 402,19 \text{ m}^3$$

El volumen de la cúpula del horno es:

$$V_{cup} = \frac{\pi * 1,35 \text{ m} * 1,00 \text{ m} * 44,10 \text{ m}}{2}$$

$$V_{cup} = 93,52 \text{ m}^3$$

El volumen de los tubos de alimentación de combustible es:

$$V_{tub} = \pi * (0,165 \text{ m})^2 * 1,21 \text{ m} * 168,00$$

$$V_{tub} = 17,39 \text{ m}^3$$

El volumen del techo del horno es:

$$V_{\text{tec}} = 402,19 \text{ m}^3 - 93,52 \text{ m}^3 - 17,39 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{tec}} = 291,28 \text{ m}^3$$

El volumen del piso del horno es:

$$V_{\text{pis}} = L * s * t_{\text{pis}} \text{ Ec. 28}$$

Donde:

$V_{\text{pis}}$  = Volumen del piso del horno ( $\text{m}^3$ )

$L$  = Longitud de trabajo del horno (m)

$L$  = 44,10 m

$s$  = Ancho de la sección transversal del piso en el horno (m)

$s$  = 2,70 m

$t_{\text{pis}}$  = Espesor del piso del horno (m)

$t_{\text{pis}}$  = 0,15 m

El volumen del piso del horno es:

$$V_{\text{pis}} = 44,10 \text{ m} * 2,70 \text{ m} * 0,15 \text{ m}$$

$$V_{\text{pis}} = 17,86 \text{ m}^3$$

El calor acumulado en la pared del horno es:

$$Q_{\text{opa}} = 1.922,00 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} * 150,11 \text{ m}^3 * 768,20 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$Q_{\text{opa}} = 175.091.233,50 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{opa}} = 175,09 * 10^6 \text{ kJ}$$

El calor acumulado en el techo del horno es:

$$Q_{\text{otec}} = 1.922,00 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} * 291,28 \text{ m}^3 * 879,38 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$Q_{\text{otec}} = 388.926.669,50 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{otec}} = 388,93 * 10^6 \text{ kJ}$$

El calor acumulado en el piso del horno es:

$$Q_{\text{opis}} = 1.922,00 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} * 17,86 \text{ m}^3 * 670,37 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$Q_{\text{opis}} = 18.179.272,51 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{opis}} = 18,18 * 10^6 \text{ kJ}$$

La acumulación de calor en mampostería en el horno de la ladrillera Ocaña es:

$$Q_o = 175,09 * 10^6 \text{ kJ} + 388,93 * 10^6 \text{ kJ} + 18,18 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_o = 582,20 * 10^6 \text{ kJ}$$

### 3.3.3 Calor por carga del material a cocer

Es el calor necesario para la cocción de los productos. Para la evaluación de este calor por carga de los productos que se cargaron en el horno de la ladrillera El Recreo 2, se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{\text{cm}} = Q_{\text{cm b}} + Q_{\text{cm L}} \text{ Ec. 29}$$

$$Q_{\text{cm b}} = m_{\text{se b}} * C_{\text{om}} * (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}) \text{ Ec. 30}$$

$$Q_{\text{cm L}} = m_{\text{se L}} * C_{\text{om}} * (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}) \text{ Ec. 31}$$

Donde:

$Q_{\text{cm}}$  = Calor por carga a cocer (kJ)

$Q_{\text{cm b}}$  = Calor por carga a cocer de los bloques (kJ)

$Q_{\text{cm L}}$  = Calor por carga a cocer de los ladrillos (kJ)

$m_{\text{se b}}$  = Masa seca de los bloques (kg)

$m_{\text{se L}}$  = Masa seca de los ladrillos (kg)

$C_{\text{om}}$  = Calor específico del material del bloque y ladrillo ( $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}}$ )

$$C_{\text{om}} = 0,79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}}$$

$T_{\text{máx}}$  = Temperatura de salida de los materiales ( $^\circ\text{C}$ )

$$T_{\text{máx}} = 1034,53 \text{ }^\circ\text{C}$$

$T_{\text{mín}}$  = Temperatura de entrada de los materiales ( $^\circ\text{C}$ )

$$T_{\text{mín}} = 47,77 \text{ }^\circ\text{C}$$

La masa seca de los bloques y los ladrillos respectivamente es:

$$m_{\text{se b}} = (1 - y_{\text{m b}}) * m_{\text{t b}} \text{ Ec. 32}$$

$$m_{\text{se L}} = (1 - y_{\text{m L}}) * m_{\text{t L}} \text{ Ec. 33}$$

Donde:

$m_{\text{se b}}$  = Masa seca de los bloques (kg)

$m_{\text{se L}}$  = Masa seca de los ladrillos (kg)

$y_{\text{m b}}$  = Humedad del bloque (%)

$y_{\text{m L}}$  = Humedad del ladrillo (%)

$m_{\text{t b}}$  = Masa total de los bloques (kg)

$m_{\text{t L}}$  = Masa total de los ladrillos (kg)

La humedad de los bloques es:

$$y_{\text{m b}} = \left( \frac{m_{\text{h b}} - m_{\text{s b}}}{m_{\text{s b}}} \right) * 100\% \text{ Ec. 34}$$

Donde:

$y_{\text{m b}}$  = Humedad del bloque (%)

$m_{\text{h b}}$  = Masa húmeda de los bloques (kg)

$m_{\text{h b}}$  = 4,10 kg

$m_{\text{s b}}$  = Masa seca de los bloques (kg)

$m_{\text{s b}}$  = 3,80 kg

La humedad de los bloques es:

$$y_{\text{m b}} = \left( \frac{4,10 - 3,80}{3,80} \right) * 100\%$$

$$y_{\text{m b}} = 7,90 \%$$

La humedad de los ladrillos es:

$$y_{\text{m L}} = \left( \frac{m_{\text{h L}} - m_{\text{s L}}}{m_{\text{s L}}} \right) * 100\% \text{ Ec. 35}$$

Donde:

$y_{\text{m L}}$  = Humedad del ladrillo (%)

$m_{\text{h L}}$  = Masa húmeda de los ladrillos (kg)

$m_{\text{h L}}$  = 9,35 kg

$m_{\text{s L}}$  = Masa seca de los ladrillos (kg)

$m_{\text{s L}}$  = 9,14 kg

La humedad de los ladrillos es:

$$y_{\text{m L}} = \left( \frac{9,35 - 9,14}{9,14} \right) * 100\%$$

$$y_{\text{m L}} = 2,30 \%$$

La masa seca de los bloques es:

$$m_{\text{se b}} = (1 - 0,079) * 16.400,00 \text{ kg}$$

$$m_{\text{se b}} = 15.104,40 \text{ kg}$$

La masa seca de los ladrillos es:

$$m_{\text{se L}} = (1 - 0,023) * 2.805,00 \text{ kg}$$

$$m_{\text{se L}} = 2.740,49 \text{ kg}$$

Los pesos promedios de cada uno de los productos al momento de ingresar y salir del horno<sup>10</sup> pueden verse en la tabla 4.

<sup>9</sup> (Cengel, 2009)

<sup>10</sup> (Jácome Manzano, 2015)

**Tabla 4.** Peso promedio productos al ingreso y salida del horno

Ítem	Tipo de material	Cantidad	Masa Húmeda por producto (kg)	Humedad y <sub>m</sub> (%)	Masa Seca total (kg)
1	Bloque	4.000,00	4,10	7,90	15.200,00
2	Ladrillo H-10	300,00	9,35	2,30	2.742,00
	Total	4.300,00	Peso total de carga		17.942,00

Fuente: S. A. Jácome Manzano

El calor por carga del material a cocer de los bloques es:

$$Q_{cm,b} = 15.104,40 \text{ kg} * 0,79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} * (1.034,53 - 47,77) ^\circ\text{K}$$

$$Q_{cm,b} = 11.774.490,02 \text{ kJ}$$

$$Q_{cm,b} = 11,78 * 10^6 \text{ kJ}$$

El calor por carga del material a cocer de los ladrillos es:

$$Q_{cm,L} = 2.740,49 \text{ kg} * 0,79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} * (1.034,53 - 47,77) ^\circ\text{K}$$

$$Q_{cm,L} = 2.136.3322,67 \text{ kJ}$$

$$Q_{cm,L} = 2,14 * 10^6 \text{ kJ}$$

El calor por carga del material a cocer en el horno de la ladrillera El Recreo 2 es:

$$Q_{cm} = 11,78 * 10^6 \text{ kJ} + 2,14 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_{cm} = 13,92 * 10^6 \text{ kJ}$$

Mientras que para evaluar el calor por carga de los productos en el horno de la ladrillera Ocaña, se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{cm} = Q_{cm,L1} + Q_{cm,L2} \text{ Ec. 36}$$

$$Q_{cm,L1} = m_{se,L1} * C_{om} * (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) \text{ Ec. 37}$$

$$Q_{cm,L2} = m_{se,L2} * C_{om} * (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) \text{ Ec. 38}$$

Donde:

$Q_{cm}$  = Calor por carga a cocer (kJ)

$Q_{cm,L1}$  = Calor por carga a cocer de ladrillo H10x30 (kJ)

$Q_{cm,L2}$  = Calor por carga a cocer de ladrillo H10x40 (kJ)

$m_{se,L1}$  = Masa seca de ladrillos H10x30 (kg)

$m_{se,L2}$  = Masa seca de ladrillos H10x40 (kg)

$C_{om}$  = Calor específico del material del ladrillo ( $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}}$ )

$C_{om} = 0,79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}}$ <sup>11</sup>

$T_{m\acute{a}x}$  = Temperatura de salida de los materiales (°C)

$T_{m\acute{a}x} = 941,63 ^\circ\text{C}$

$T_{m\acute{i}n}$  = Temperatura de entrada de los materiales (°C)

$T_{m\acute{i}n} = 26,71 ^\circ\text{C}$

La masa seca de los ladrillos H10x30 y H10x40 respectivamente es:

$$m_{se,L1} = (1 - y_{m,L1}) * m_{t,L1} \text{ Ec. 39}$$

$$m_{se,L2} = (1 - y_{m,L2}) * m_{t,L2} \text{ Ec. 40}$$

Donde:

$m_{se,L1}$  = Masa seca de los ladrillos H10x30 (kg)

$m_{se,L2}$  = Masa seca de los ladrillos H10x40 (kg)

$y_{m,L1}$  = Humedad del ladrillo H10x30 (%)

$y_{m,L2}$  = Humedad del ladrillo H10x40 (%)

$m_{t,L1}$  = Masa total de los ladrillos H10x30 (kg)

$m_{t,L2}$  = Masa total de los ladrillos H10x40 (kg)

<sup>11</sup> (Cengel, 2009)

La humedad del ladrillo H10x30 es:

$$y_{m,L1} = \left( \frac{m_{h,L1} - m_{s,L1}}{m_{s,L1}} \right) * 100\% \text{ Ec. 41}$$

Donde:

$y_{m,L1}$  = Humedad del ladrillo H10x30 (%)

$m_{h,L1}$  = Masa húmeda del ladrillo H10x30 (kg)

$m_{h,L1} = 5,34 \text{ kg}$

$m_{s,L1}$  = Masa seca del ladrillo H10x40 (kg)

$m_{s,L1} = 5,03 \text{ kg}$

La humedad del ladrillo H10x30es:

$$y_{m,L1} = \left( \frac{5,34 - 5,03}{5,03} \right) * 100\%$$

$$y_{m,L1} = 6,16 \%$$

La humedad del ladrillo H10x40 es:

$$y_{m,L2} = \left( \frac{m_{h,L2} - m_{s,L2}}{m_{s,L2}} \right) * 100\% \text{ Ec. 42}$$

Donde:

$y_{m,L2}$  = Humedad del ladrillo H10x40 (%)

$m_{h,L2}$  = Masa húmeda del ladrillo H10x40 (kg)

$m_{h,L2} = 6,98 \text{ kg}$

$m_{s,L2}$  = Masa seca del ladrillo H10x40 (kg)

$m_{s,L2} = 6,78 \text{ kg}$

La humedad del ladrillo H10x40 es:

$$y_{m,L2} = \left( \frac{6,98 - 6,78}{6,78} \right) * 100\%$$

$$y_{m,L2} = 2,95 \%$$

La masa seca de los ladrillos H10x30 es:

$$m_{se,L1} = (1 - 0,0616) * 144.500,40 \text{ kg}$$

$$m_{se,L1} = 135.599,18 \text{ kg}$$

La masa seca de los ladrillos H10x40 es:

$$m_{se,L2} = (1 - 0,0295) * 13.820,40 \text{ kg}$$

$$m_{se,L2} = 13.412,70 \text{ kg}$$

Los pesos promedios de cada uno de los productos al momento de ingresar y salir del horno pueden verse en la tabla 5.

**Tabla 5.** Peso promedio productos al ingreso y salida del horno

Ítem	Tipo de material	Cantidad	Masa humedad por producto (kg)	Humedad y <sub>m</sub> (%)	Masa seca total (kg)
1	Ladrillo H-10*30	27.060,00	5,34	6,16	136.111,80
2	Ladrillo H-10*40	1.980,00	6,98	2,95	13.424,40
	Total	29.040,00	Peso total de carga		149.536,20

Fuente: S. A. Jácome Manzano

El calor por carga del material a cocer de los ladrillos H10x30 es:

$$Q_{cm,L1} = 135.599,18 \text{ kg} * 0,79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} * (941,63 - 26,71) ^\circ\text{K}$$

$$Q_{cm,L1} = 98.009.297,39 \text{ kJ}$$

$$Q_{cm,L1} = 98,01 * 10^6 \text{ kJ}$$

El calor por carga del material a cocer de los ladrillos H10x40 es:

$$Q_{cm,L2} = 13.412,70 \text{ kg} * 0,79 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} * (941,63 - 26,71) ^\circ\text{K}$$

$$Q_{cm,L2} = 9.694.522,51 \text{ kJ}$$

$$Q_{cm,L2} = 9,70 * 10^6 \text{ kJ}$$

El calor por carga del material a cocer en el horno de la ladrillera Ocaña es:

$$Q_{cm} = 98,01 * 10^6 \text{ kJ} + 9,70 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_{cm} = 107,71 * 10^6 \text{ kJ}$$

### 3.3.4 Calor para sacar la humedad del material

El material a cocer en el horno debe ser calentado a una temperatura predeterminada. Parte de este calor es necesario para evaporar el agua del proceso, que se ha quedado después del secado. Esta energía se elimina sin ser reutilizada, por lo que debe ser calculada como una pérdida en el balance energético.

Para evaluar el calor requerido para evaporar el agua de los productos, se toma la entalpía del vapor de agua a la temperatura de 150 °C y la energía interna del material a cocer a 20 °C<sup>12</sup>.

Para la evaluación de este calor en el horno de la ladrillera El Recreo 2, se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{wm} = Q_{wm b} + Q_{wm L} \text{ Ec. 43}$$

$$Q_{wm b} = m_{tb} * y_{mb} * (h_g - u_m) \text{ Ec. 44}$$

$$Q_{wm L} = m_{tL} * y_{mL} * (h_g - u_m) \text{ Ec. 45}$$

Donde:

$Q_{wm}$  = Calor para sacar la humedad del material a cocer (kJ)

$Q_{wm b}$  = Calor para sacar la humedad de los bloques (kJ)

$Q_{wm L}$  = Calor para sacar la humedad de los ladrillos (kJ)

$m_{tb}$  = Masa total de los bloques (kg)

$m_{tb}$  = 16.400,00 kg

$m_{tL}$  = Masa total de los ladrillos (kg)

$m_{tL}$  = 2.805,00 kg

$y_{mb}$  = Humedad del bloque (%)

$y_{mb}$  = 7,90 %

$y_{mL}$  = Humedad del ladrillo (%)

$y_{mL}$  = 2,30 %

$h_g$  = Entalpía del vapor de agua ( $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ )

$h_g$  = 2.587,75  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ <sup>13</sup>

$u_m$  = Energía interna del agua dentro del material a la temperatura de 20 °C ( $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ )

$u_m$  = 83,95  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ <sup>14</sup>

El calor para sacar la humedad de los bloques es:

$$Q_{wm b} = 16.400,00 \text{ kg} * 0,079 * (2.587,75 - 83,95) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{wm b} = 3.243.923,28 \text{ kJ}$$

$$Q_{wm b} = 3,24 * 10^6 \text{ kJ}$$

El calor para sacar la humedad de los ladrillos es:

$$Q_{wm L} = 2.805,00 \text{ kg} * 0,023 * (2.587,75 - 83,95) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{wm L} = 161.532,66 \text{ kJ}$$

$$Q_{wm L} = 0,16 * 10^6 \text{ kJ}$$

El calor para sacar la humedad del material a cocer en el horno de la ladrillera El Recreo 2 es:

$$Q_{wm} = 3,24 * 10^6 + 0,16 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_{wm} = 3,40 * 10^6 \text{ kJ}$$

Mientras que para la evaluación de este calor en el horno de la ladrillera Ocaña se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{wm} = Q_{wm L1} + Q_{wm L2} \text{ Ec. 46}$$

$$Q_{wm L1} = m_{tL1} * y_{mL1} * (h_g - u_m) \text{ Ec. 47}$$

$$Q_{wm L2} = m_{tL2} * y_{mL2} * (h_g - u_m) \text{ Ec. 48}$$

Donde:

$Q_{wm}$  = Calor para sacar la humedad del material a cocer (kJ)

$Q_{wm L1}$  = Calor para sacar la humedad de los ladrillos H10x30 (kJ)

$Q_{wm L2}$  = Calor para sacar la humedad de los ladrillos H10x40 (kJ)

$m_{tL1}$  = Masa total de los ladrillos H10x30 (kg)

$m_{tL2}$  = Masa total de los ladrillos H10x40 (kg)

$y_{mL1}$  = Humedad del ladrillo H10x30 (%)

$y_{mL2}$  = Humedad del ladrillo H10x40 (%)

$h_g$  = Entalpía del vapor de agua ( $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ )

$h_g$  = 2.587,75  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ <sup>15</sup>

$u_m$  = Energía interna del agua dentro del material a la temperatura de 20 °C ( $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ )

$u_m$  = 83,95  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ <sup>16</sup>

El calor para sacar la humedad de los ladrillos H10x30 es:

$$Q_{wm L1} = 144.500,40 \text{ kg} * 0,0616 * (2.587,75 - 83,95) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{wm L1} = 22.286.886,25 \text{ kJ}$$

$$Q_{wm L1} = 22,29 * 10^6 \text{ kJ}$$

El calor para sacar la humedad de los ladrillos H10x40 es:

$$Q_{wm L2} = 13.820,40 \text{ kg} * 0,0295 * (2.587,75 - 83,95) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{wm L2} = 1.020.803,77 \text{ kJ}$$

$$Q_{wm L2} = 1,02 * 10^6 \text{ kJ}$$

El calor para sacar la humedad del material a cocer en el horno de la ladrillera Ocaña es:

$$Q_{wm} = 22,29 * 10^6 + 1,02 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_{wm} = 23,31 * 10^6 \text{ kJ}$$

### 3.3.5 Calor necesario para la descomposición química de la arcilla

Es el calor que se requiere para la descomposición química de los carbonatos ( $\text{CaCO}_3$ )<sup>17</sup> y la evaporación del agua combinada presentes en la arcilla.

<sup>12</sup> (British Estandar Test Code, 1995)

<sup>13</sup> (Cengel, 2009)

<sup>14</sup> (Cengel, 2009)

<sup>15</sup> (Cengel, 2009)

<sup>16</sup> (Cengel, 2009)

<sup>17</sup> (Chandía Moraga, 2004)

Para evaluar el calor necesario para romper la estructura molecular de la arcilla y liberar el agua de combinación de materiales se calculará a la temperatura de 600 °C<sup>18</sup>.

Para la evaluación de este calor se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{dq} = Q_{dq\ b} + Q_{dq\ L} \text{ Ec. 49}$$

$$Q_{dq\ b} = m_{se\ b} * C_{dq} \text{ Ec. 50}$$

$$Q_{dq\ L} = m_{se\ L} * C_{dq} \text{ Ec. 51}$$

Donde:

$Q_{dq}$  = Calor necesario para la descomposición de la arcilla (kJ)

$Q_{dq\ b}$  = Calor necesario para la descomposición de la arcilla de los bloques (kJ)

$Q_{dq\ L}$  = Calor necesario para la descomposición de la arcilla de los ladrillos (kJ)

$m_{se\ b}$  = Masa seca de los bloques (kg)

$m_{se\ b}$  = 15.104,40 kg

$m_{se\ L}$  = Masa seca de los ladrillos (kg)

$m_{se\ L}$  = 2.740,49 kg

$C_{dq}$  = Calor específico por la combustión del

$CaCO_3$  ( $\frac{kJ}{kg}$ )  
 $C_{dq} = 393,56 \frac{kJ}{kg}$ <sup>19</sup>

El calor necesario para la descomposición de la arcilla de los bloques es:

$$Q_{dq\ b} = 15.104,40 \text{ kg} * 393,56 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{dq\ b} = 5.944.487,66 \text{ kJ}$$

$$Q_{dq\ b} = 5,95 * 10^6 \text{ kJ}$$

El calor necesario para la descomposición de la arcilla de los ladrillos es:

$$Q_{dq\ L} = 2.740,49 \text{ kg} * 393,56 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{dq\ L} = 1.078.547,24 \text{ kJ}$$

$$Q_{dq\ L} = 1,08 * 10^6 \text{ kJ}$$

El calor necesario para la descomposición de la arcilla para sacar la humedad del material a cocer es:

$$Q_{dq} = 5,95 * 10^6 \text{ kJ} + 1,08 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_{dq} = 7,03 * 10^6 \text{ kJ}$$

Para la evaluación de este calor se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{dq} = Q_{dq\ L1} + Q_{dq\ L2} \text{ Ec. 52}$$

$$Q_{dq\ L1} = m_{se\ L1} * C_{dq} \text{ Ec. 53}$$

$$Q_{dq\ L2} = m_{se\ L2} * C_{dq} \text{ Ec. 54}$$

Donde:

$Q_{dq}$  = Calor necesario para la descomposición de la arcilla (kJ)

$Q_{dq\ L1}$  = Calor necesario para la descomposición de la arcilla de los ladrillos H10x30 (kJ)

$Q_{dq\ L2}$  = Calor necesario para la descomposición de la arcilla de los ladrillos H10x40 (kJ)

$m_{se\ L1}$  = Masa seca de los ladrillos H10x30 (kg)

$m_{se\ L2}$  = Masa seca de los ladrillos H10x40 (kg)

$C_{dq}$  = Calor específico por la combustión del  $CaCO_3$  ( $\frac{kJ}{kg}$ )

$C_{dq} = 393,56 \frac{kJ}{kg}$ <sup>20</sup>

El calor necesario para la descomposición de la arcilla de los ladrillos H10x30 es:

$$Q_{dq\ L1} = 135.599,18 \text{ kg} * 393,56 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{dq\ L1} = 53.366.413,28 \text{ kJ}$$

$$Q_{dq\ L1} = 53,37 * 10^6 \text{ kJ}$$

El calor necesario para la descomposición de la arcilla de los ladrillos H10x40 es:

$$Q_{dq\ L2} = 13.412,70 \text{ kg} * 393,56 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{dq\ L2} = 5.301.300,43 \text{ kJ}$$

$$Q_{dq\ L2} = 5,30 * 10^6 \text{ kJ}$$

El calor necesario para la descomposición de la arcilla para sacar la humedad del material a cocer es:

$$Q_{dq} = 53,37 * 10^6 \text{ kJ} + 5,30 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_{dq} = 58,67 * 10^6 \text{ kJ}$$

### 3.3.6 Calor por humedad del carbón

Cuando se quema carbón se puede asumir que la humedad contenida en él es calentada a la temperatura de ebullición de 100°C, evaporada y, finalmente, recalentada a la temperatura de los gases de escape, por lo que es una pérdida de calor debida a la humedad del carbón.

Para la evaluación del calor necesario para evaporar el agua del proceso se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{wc} = m_c * y_c * (h_{ga} - u_c) \text{ Ec. 55}$$

Donde:

$Q_{wc}$  = Calor por humedad del carbón (kJ)

$m_c$  = Masa de carbón consumida en cada período de tiempo (kg)

$m_c = 11,11 \text{ kg}$

$y_c$  = Humedad del carbón (%)

$y_c = 3,67 \%^{21}$

$h_{ga}$  = Entalpía del vapor de agua a la temperatura de los gases de la chimenea ( $\frac{kJ}{kg}$ )

$u_c$  = Energía interna del agua en el carbón ( $\frac{kJ}{kg}$ )

$u_c = 83,95 \frac{kJ}{kg}$ <sup>22</sup>

Desde el inicio al final de la cocción transcurrieron 2 días y 19 horas, con un intervalo de tiempo de 30 minutos para efectos de evaluar el calor por humedad del carbón en la que se evaluaron 135 pérdidas de calor por humedad del carbón en todo el proceso y se utilizó un total de 1.500 Kg para el consumo total de combustible, dando como resultado un resultando de consumo de combustible de 11,11 kg cada 30 minutos.

El calor por humedad del carbón para el primer instante es:

$$Q_{wc\ 1} = 11,11 \text{ kg} * 0,0367 * (2.587,75 - 83,95) \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{wc\ 1} = 1.020,89 \text{ kJ}$$

Se inicia el cálculo del calor por humedad del carbón para el primer instante de adquisición del proceso de cocción a las 4:38:16 p.m., arrojando un valor de temperatura de

<sup>18</sup> (British Estandar Test Code, 1995)

<sup>19</sup> (Serrano Trillos, 1999)

<sup>20</sup> (Serrano Trillos, 1999)

<sup>21</sup> (Vera Duarte, 2003)

<sup>22</sup> (Cengel, 2009)

los gases en la chimenea de 47,77 °C y una entalpía de los gases de  $h_{ga} = 2.587,75 \frac{kJ}{kg}$ .

Las pérdidas de calor debidas a la humedad contenida en el carbón son:

$$Q_{wc} = 160.323,53 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_{wc} = 0,16 * 10^6 \text{ kJ}$$

Para la evaluación de este calor se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{wc} = m_c * y_c * (h_{ga} - u_c) \text{ Ec. 56}$$

Donde:

- $Q_{wc}$  = Calor por humedad del carbón (kJ)
- $m_c$  = Masa de carbón consumida en cada período de tiempo (kg)
- $m_c = 458,88 \text{ kg}$
- $y_c$  = Humedad del carbón (kg)
- $y_c = 3,67 \%^{23}$
- $h_{ga}$  = Entalpía del vapor de agua a la temperatura de los gases de la chimenea ( $\frac{kJ}{kg}$ )
- $u_c$  = Energía interna del agua en el carbón ( $\frac{kJ}{kg}$ )
- $u_c = 83,95 \frac{kJ}{kg}^{24}$

Desde el inicio hasta el final de la cocción transcurrieron 22 horas y 38 minutos. Se considera un intervalo de una (1) hora para evaluar el calor por humedad del carbón, por lo que se evaluaron 23 pérdidas de calor por humedad del carbón en todo el proceso y donde el consumo total de combustible es de 10.370,76 kg, resultando un consumo de combustible de 458,88 kg cada hora.

<sup>23</sup> (Vera Duarte, 2003)  
<sup>24</sup> (Cengel, 2009)

El calor por humedad del carbón para el primer instante es:

$$Q_{wc1} = 458,88 \text{ kg} * 0,0367 * (2.600,10 - 83,95) \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{wc1} = 42.374,22 \text{ KJ}$$

Se inicia el cálculo del calor por humedad del carbón para el primer instante de adquisición del proceso de cocción a las 4:42:08 p.m., en la que la temperatura de los gases en la chimenea es de 55,00 °C y la entalpía de los gases en esta es  $h_{ga} = 2.600,10 \frac{kJ}{kg}$ .

Las pérdidas de calor debidas a la humedad contenida en el carbón son:

$$Q_{wc} = 1.033.561,86 \text{ kJ}$$

$$Q_{wc} = 1,03 * 10^6 \text{ kJ}$$

### 3.3.7 Calor por agua formada en la combustión

Este es el calor que absorbe el agua producto de la combustión con el hidrógeno del combustible, para efectos de calentarse, evaporarse y sobrecalentar hasta la temperatura a la cual son expulsados los humos.

Para la evaluación de este calor se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{ac} = m_{cu} * m_{ac} * (h_g - u_m) \text{ Ec. 57}$$

Donde:

- $Q_{ac}$  = Calor por agua formada en la combustión (kJ)
- $m_{cu}$  = Masa de carbón consumida por período de evaluación (kg)

- $m_{cu} = 11,11 \text{ kg}$
- $m_{cu}$  = Masa del agua formada en la combustión
- $h_g$  = Entalpía del vapor de agua en todo el proceso ( $\frac{kJ}{kg \text{ Comb.}}$ )
- $u_m$  = Energía interna del agua dentro del material a la temperatura de 20 °C ( $\frac{kJ}{kg}$ )
- $u_m = 83,95 \frac{kJ}{kg}^{25}$

La masa del agua formada en la combustión es:

$$m_{ac} = 9 * (H_2 - \frac{O_2}{8}) \text{ Ec. 58}$$

Donde:

- $m_{ac}$  = Masa del agua formada en la combustión ( $\frac{kg \text{ H}_2\text{O}}{kg \text{ Comb.}}$ )
- $H_2$  = Porcentaje de hidrógeno en el carbón (%)
- $H_2 = 5,80 \%^{26}$
- $O_2$  = Porcentaje de oxígeno en el carbón (%)
- $O_2 = 6,60 \%^{27}$

Para la composición elemental del carbón se eligen factores de emisión de los combustibles colombianos, relacionados por la Unidad de Planeación Minero Energética, (ver tabla 6).

La masa del agua formada en la combustión es:

$$m_{ac} = 9 * (0,058 - \frac{0,060}{8})$$

$$m_{ac} = 0,46$$

<sup>25</sup> (Cengel, 2009)  
<sup>26</sup> (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, 2003)  
<sup>27</sup> (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, 2003)

**Tabla 6.** Composición química del carbón del norte de Santander

Composición	Porcentaje (%)
C	78,00
H2	5,80
O2	6,60
N2	1,60
S	1,00
Cenizas	7,00
Humedad	0,00
<b>Total</b>	<b>100</b>

Fuente: F. y. N. Academia Colombiana de Ciencias Exactas

El calor por agua formada en la combustión para el primer instante es:

$$Q_{ac1} = 11,11 \text{ kg} * 0,46 \frac{kg \text{ H}_2\text{O}}{kg \text{ comb.}} * (2.587,75 - 83,95) \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{ac1} = 12.795,92 \text{ kJ}$$

Se indica el cálculo del calor por el agua formada en la combustión para el primer instante de adquisición del proceso de cocción a las 04:38:16 p.m., y para la cual la temperatura de los gases en la chimenea corresponde a 47,77 °C, mientras que la entalpía de los gases en esta es de  $h_{ga} = 2.587,75 \frac{kJ}{kg}$ .

Las pérdidas de calor por agua formada en la combustión son:

$$Q_{wc} = 2.009.504,68 \text{ kJ}$$

$$Q_{wc} = 2,01 * 10^6 \text{ kJ}$$

Para la evaluación de este calor, se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{ac} = m_{cu} * m_{ac} * (h_g - u_m) \quad (64)$$

Donde:

- $Q_{ac}$  = Calor por agua formada en la combustión (kJ)
- $m_{cu}$  = Masa de carbón consumida en cada período de tiempo (kg)
- $m_{cu} = 458,88$  kg
- $m_{ac}$  = Masa del agua formada en la combustión  $\left(\frac{kg H_2O}{kg Comb.}\right)$
- $m_{ac} = 0,46 \frac{kg H_2O}{kg Comb.}$
- $h_g$  = Entalpía del vapor de agua en todo el proceso  $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$
- $u_m$  = Energía interna del agua dentro del material a la temperatura de 20 °C  $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$
- $u_m = 83,95 \frac{kJ}{kg}$

El calor por agua formada en la combustión para el primer instante es:

$$Q_{ac1} = 458,88 \text{ kg} * 0,46 \frac{kg H_2O}{kg comb.} * (2.600,10 - 83,95) \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{ac1} = 531.121,02 \text{ KJ}$$

Se inicia el cálculo del calor por humedad del carbón para el primer instante de adquisición del proceso de cocción a las 04:42:08 p.m. del proceso, en la que la temperatura de los gases en la chimenea es de 55,00 °C y la entalpía de los gases en esta es  $h_{ga} = 2.600,10 \frac{kJ}{kg}$ .

Las pérdidas de calor por agua formada en la combustión son:

<sup>28</sup> (Cengel, 2009)

$$Q_{wc} = 12.954.726,32 \text{ kJ}$$

$$Q_{wc} = 12,96 * 10^6 \text{ kJ}$$

### 3.3.8 Calor por humedad del aire

Es el calor que se requiere para sacar la humedad que presenta el aire, la humedad depende de las condiciones atmosféricas del lugar, este calor produce una pérdida de energía cuando se realiza la combustión.

Para la evaluación de este calor se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{wa} = m_{wa} * m_{rm} * m_{cu} * (h_g - h_{wa}) \quad \text{Ec. 59}$$

Donde:

- $Q_{wa}$  = Calor por humedad del aire (kJ)
- $m_{wa}$  = Masa de humedad del aire  $\left(\frac{kg H_2O}{kg Aire}\right)$
- $m_{rm}$  = Masa de aire seco  $\left(\frac{kg Aire}{kg Comb.}\right)$
- $m_{cu}$  = Masa de carbón consumida en cada período de tiempo (kg)
- $m_{cu} = 11,11$  kg
- $h_g$  = Entalpía del vapor de agua  $\left(\frac{kJ}{kg}\right)$
- $h_{wa}$  = Entalpía del agua  $\left(\frac{kJ}{kg Aire}\right)$

El horno está ubicado en la ciudad de Ocaña, ciudad con una humedad relativa de  $\phi = 75,30$  %. La temperatura de bulbo seco de  $T_{bs} = 27,60$ , con estos valores en el diagrama psicrométrico se encuentra la masa de humedad del aire, que corresponde  $m_{wa} = 0,0175 \frac{kg H_2O}{kg Aire seco}$ <sup>29</sup>, mientras que, la entalpía del agua  $h_{wa} = 71,20 \frac{kJ}{kg Aire seco}$ .

<sup>29</sup> (Muller, 2010)

Para la combustión del carbón, el oxígeno teórico en volumen es:

$$O_{ov} = \left[ \frac{C}{12} + \frac{H_2}{4} + \frac{S-O_2}{32} \right] * 22,4 \frac{m^3 n O_2}{kg Comb.} \quad \text{Ec. 60}$$

Donde:

- $O_{ov}$  = Oxígeno teórico en volumen  $\left(\frac{m^3 n O_2}{kg Comb.}\right)$
- $C$  = Porcentaje de carbono en el carbón (%)
- $C = 78,00$  %<sup>30</sup>
- $H_2$  = Porcentaje de hidrógeno en el carbón (%)
- $H_2 = 5,80$  %<sup>31</sup>
- $S$  = Porcentaje de azufre en el carbón (%)
- $S = 1,00$  %<sup>32</sup>
- $O_2$  = Porcentaje de oxígeno en el carbón (%)
- $O_2 = 6,60$  %<sup>33</sup>

El oxígeno teórico en volumen es:

$$O_{ov} = \left[ \frac{0,78}{12} + \frac{0,058}{4} + \frac{0,010 - 0,066}{32} \right] * 22,4 \frac{m^3 n O_2}{kg Comb.}$$

$$O_{ov} = 1,74 \frac{m^3 n O_2}{kg Comb.}$$

El volumen de humos para el oxígeno teórico es:

$$V_g O_o = \left[ \frac{C}{12} + \frac{H_2}{4} + \frac{S}{32} + \frac{N_2}{28} + \frac{W}{18} \right] * 22,4 \frac{m^3 n humos}{kg Comb.} \quad \text{Ec. 61}$$

Donde:

- $V_g O_o$  = Volumen de humos para el oxígeno teórico  $\left(\frac{m^3 n humos}{kg Comb.}\right)$
- $C$  = Porcentaje de carbono en el carbón (%)

<sup>30</sup> (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, 2003)  
<sup>31</sup> (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, 2003)  
<sup>32</sup> (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, 2003)  
<sup>33</sup> (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, 2003)

- $C = 78,00$  %<sup>34</sup>
- $H_2$  = Porcentaje de hidrógeno en el carbón (%)
- $H_2 = 5,80$  %<sup>35</sup>
- $S$  = Porcentaje de azufre en el carbón (%)
- $S = 1,00$  %<sup>36</sup>
- $N_2$  = Porcentaje de nitrógeno en el carbón (%)
- $N_2 = 1,60$  %<sup>37</sup>
- $W$  = Porcentaje de humedad en el carbón (%)

El volumen de humos para el oxígeno teórico es:

$$V_g O_o = \left[ \frac{0,78}{12} + \frac{0,058}{4} + \frac{0,010}{32} + \frac{0,016}{28} + \frac{0}{18} \right] * 22,4 \frac{m^3 n humos}{kg Comb.}$$

$$V_g O_o = 1,91 \frac{m^3 n humos}{kg Comb.}$$

El volumen de humos de aire teórico es:

$$V_g A_o = V_g O_o + 3,76 * O_{ov} \frac{m^3 n humos}{kg Comb.} \quad \text{Ec. 62}$$

Donde:

- $V_g A_o$  = Volumen de humos de aire teórico  $\left(\frac{m^3 n humos}{kg Comb.}\right)$
- $V_g O_o$  = Volumen de humos para el oxígeno teórico  $\left(\frac{m^3 n humos}{kg Comb.}\right)$
- $O_{ov}$  = Oxígeno teórico en volumen  $\left(\frac{m^3 n O_2}{kg Comb.}\right)$

El volumen de humos de aire teórico es:

$$V_g A_o = 1,91 + 3,76 * 1,74 \frac{m^3 n humos}{kg Comb.}$$

$$V_g A_o = 8,45 \frac{m^3 n humos}{kg Comb.}$$

<sup>34</sup> (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, 2003)  
<sup>35</sup> (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, 2003)  
<sup>36</sup> (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, 2003)  
<sup>37</sup> (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, 2003)

El factor de aire es:

$$\lambda = 1 + \frac{(V_g A_r - V_g A_0)}{4,762 \cdot O_{ov}} \quad \text{Ec. 63}$$

Donde:

$\lambda$  = Factor de aire  $\left(\frac{m^3 \text{ n humos}}{\text{kg Comb.}}\right)$

$V_g A_r$  = Volumen de humos de aire real  $\left(\frac{m^3 \text{ n humos}}{\text{kg Comb.}}\right)$

$V_g A_0$  = Volumen de humos de aire teórico

$\left(\frac{m^3 \text{ n humos}}{\text{kg Comb.}}\right)$

$O_{ov}$  = Oxígeno teórico en volumen  $\left(\frac{m^3 \text{ n humos}}{\text{kg Comb.}}\right)$

El volumen recomendado real medido en hornos ladrilleros es:

$$V_g A_r = 14,75 \frac{m^3 \text{ n humos}}{\text{kg Comb.}} \quad \text{Ec. 64}$$

El factor de aire es:

$$\lambda = 1 + \frac{(14,75 - 8,45)}{4,762 \cdot 1,74}$$

$$\lambda = 1,76$$

La masa de aire teórico es:

$$m_{om} = \left[ \frac{C}{12} + \frac{H_2}{4} + \frac{S-O_2}{32} \right] \cdot \frac{32}{0,23} \quad \text{Ec. 65}$$

Donde:

$m_{om}$  = Masa de aire teórico  $\left(\frac{\text{kg Aire}}{\text{kg Comb.}}\right)$

$C$  = Porcentaje de carbono en el carbón (%)

$C = 78,00 \%$ <sup>39</sup>

$H_2$  = Porcentaje de hidrógeno en el carbón (%)

$H_2 = 5,80 \%$ <sup>40</sup>

$S$  = Porcentaje de azufre en el carbón (%)

$S = 1,00 \%$ <sup>41</sup>

$O_2$  = Porcentaje de oxígeno en el carbón (%)

$O_2 = 6,60 \%$ <sup>42</sup>

La masa de aire teórico es:

$$m_{om} = \left[ \frac{0,78}{12} + \frac{0,058}{4} + \frac{0,01 - 0,066}{32} \right] \cdot \frac{32}{0,23}$$

$$m_{om} = 10,82 \frac{\text{kg Aire}}{\text{kg Comb.}}$$

La masa de aire seco es:

$$m_{rm} = \lambda \cdot m_{om} \quad \text{Ec. 66}$$

Donde:

$m_{rm}$  = Masa de aire seco  $\left(\frac{\text{kg Aire}}{\text{kg Comb.}}\right)$

$\lambda$  = Masa de aire teórico  $\left(\frac{\text{kg Aire}}{\text{kg Comb.}}\right)$

$m_{om}$  = Factor de aire

La masa de aire seco es:

$$m_{rm} = 1,76 \cdot 10,82 \frac{\text{kg Aire}}{\text{kg Comb.}}$$

$$m_{rm} = 19,04 \frac{\text{kg Aire}}{\text{kg Comb.}}$$

El calor por humedad del aire para el primer instante es:

$$Q_{wa_1} = 0,0175 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg Aire}} \cdot 19,04 \frac{\text{kg Aire}}{\text{kg Comb.}} \cdot 11,11 \text{ kg Comb.} \cdot (2.587,75 - 71,20) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{wa_1} = 9.315,90 \text{ kJ}$$

Se indica el cálculo del calor por humedad del aire para el primer instante de adquisición del proceso de cocción a las 4:38:16 p.m., en

cuyo momento la temperatura de los gases en la chimenea es de 47,77 °C y la entalpía de los gases en esta es  $h_{ga} = 2.587,75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ .

El calor por humedad de aire es:

$$Q_{wa} = 1.461.999,36 \text{ kJ}$$

$$Q_{wa} = 1,46 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$

Para la evaluación de este calor se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{wa} = m_{wa} \cdot m_{rm} \cdot m_{cu} \cdot (h_g - h_{wa}) \quad \text{Ec. 67}$$

Donde:

$Q_{wa}$  = Calor por humedad de aire (kJ)

$m_{wa}$  = Masa de humedad del aire  $\left(\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg Aire}}\right)$

$m_{wa} = 0,0175 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg Aire seco}}$

$m_{rm}$  = Masa de aire seco  $\left(\frac{\text{kg Aire}}{\text{kg Comb.}}\right)$

$m_{rm} = 19,04 \frac{\text{kg Aire}}{\text{kg Comb.}}$

$m_{cu}$  = Masa de carbón consumida en cada período de tiempo (kg)

$m_{cu} = 458,88 \text{ kg}$

$h_g$  = Entalpía del vapor de agua  $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg de agua}}\right)$

$h_{wa}$  = Entalpía del agua  $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg de agua}}\right)$

El calor por humedad de aire para el primer instante es:

$$Q_{wa_1} = 0,0175 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg Aire}} \cdot 19,04 \frac{\text{kg Aire}}{\text{kg Comb.}} \cdot 458,88 \text{ kg Comb.} \cdot (2.600,10 - 71,20) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{wa_1} = 386.665,82 \text{ kJ}$$

Se indica el cálculo del calor por humedad de aire para el primer instante de adquisición del proceso de cocción a las 4:42:08 p.m. del proceso, en la que la temperatura de los gases en la chimenea es de 55,00

°C y la entalpía de los gases en esta es  $h_{ga} = 2.600,10 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ .

El calor por humedad de aire es:

$$Q_{wa} = 9.430.514,88 \text{ kJ}$$

$$Q_{wa} = 9,43 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$

### 3.3.9 Calor por inquemados

Es el carbón que queda sin quemar en las cenizas. Esto ocurre por la no uniformidad del tamaño de las partículas del carbón y por la mala distribución de este en el horno, presentándose una combustión incompleta.

Para la evaluación de este calor se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_i = m_c \cdot C_e \cdot P_f \cdot P_{cq} \quad \text{Ec. 68}$$

Donde:

$Q_i$  = Calor por inquemados (kJ)

$m_c$  = masa total de carbón (kg)

$m_c = 1500,00 \text{ kg}$

$C_e$  = Cenizas residuales (%)

$C_e = 20,00 \%$ <sup>43</sup>

$P_f$  = Pérdida al fuego (%)

$P_f = 15,80 \%$ <sup>44</sup>

$P_{cq}$  = Poder calorífico del carbón como quemado  $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$

$P_{cq} = 29.205,60 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ <sup>45</sup>

<sup>38</sup> (Meneses Calderon, 2003)

<sup>39</sup> (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, 2003)

<sup>40</sup> (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, 2003)

<sup>41</sup> (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, 2003)

<sup>42</sup> (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, 2003)

<sup>43</sup> (Vera Duarte, 2003)

<sup>44</sup> (Vera Duarte, 2003)

<sup>45</sup> (Vera Duarte, 2003)

El calor por inquemados es:

$$Q_i = 1.500,00 \text{ kg} * 0,20 * 0,158 * 29.205,60 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_i = 1.384.345,44 \text{ kJ}$$

$$Q_i = 1,38 * 10^6 \text{ kJ}$$

### 3.3.10 Pérdida de calor por las paredes

La pérdida de calor por conducción en la pared se presenta por la diferencia de temperatura entre la pared y el medio ambiente. Para la evaluación de la pérdida del calor por conducción en las paredes se considerará el flujo de calor unidimensional, en la dirección radial y en estado transitorio. La conductividad térmica de la pared de ladrillo común se considerará como homogénea y de valor  $k = 0,72 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ <sup>46</sup>.

Para la evaluación de este calor se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{pa} = U_{pa} * (T_{3i} - T_{7e}) * t \text{ Ec. 69}$$

Donde:

$Q_{pa}$  = Pérdida de calor por las paredes del horno (kJ)

$U_{pa}$  = Coeficiente global de transferencia de calor en las paredes del horno ( $\frac{\text{W}}{\text{K}}$ )

$T_{3i}$  = Temperatura interior de la pared del horno (°C)

$T_{7e}$  = Temperatura exterior de la pared del horno (°C)

$t$  = Periodo de tiempo de trabajo (s)

$t = 1.800,00 \text{ s}$

La resistencia térmica por conducción de la pared de forma cilíndrica del horno es:

$$R_{k_{pa}} = \frac{\ln(\frac{r_o}{r_i})}{2\pi kh} \text{ Ec. 70}$$

Donde:

$R_{k_{pa}}$  = Resistencia térmica por conducción de la pared del horno ( $\frac{\text{K}}{\text{W}}$ )

$r_o$  = Radio exterior del horno (m)

$r_o = 1,30 \text{ m}$

$r_i$  = Radio interior del horno (m)

$r_i = 1,15 \text{ m}$

$h$  = Altura del horno (m)

$h = 4,40 \text{ m}$

$k$  = Conductividad térmica de la pared de ladrillo del horno ( $\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$ )

$k = 0,72 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

La resistencia térmica por conducción en la pared del horno es:

$$R_{k_{pa}} = \frac{\ln(\frac{1,30 \text{ m}}{1,15 \text{ m}})}{2\pi * 0,72 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} * 4,40 \text{ m}}$$

$$R_{k_{pa}} = 0,0062 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

El coeficiente global de transferencia de calor para la pared del horno es:

$$U_{pa} = \frac{1}{R_{k_{pa}}} \text{ Ec. 71}$$

Donde:

$U_{pa}$  = Coeficiente global de transferencia de calor para la pared del horno ( $\frac{\text{W}}{\text{K}}$ )

$R_{k_{pa}}$  = Resistencia térmica por conducción de la pared del horno ( $\frac{\text{K}}{\text{W}}$ )

$R_{k_{pa}} = 0,0062 \frac{\text{K}}{\text{W}}$

El coeficiente global de transferencia de calor para la pared del horno es:

$$U_{pa} = \frac{1}{0,0062 \frac{\text{K}}{\text{W}}}$$

$$U_{pa} = 162,36 \frac{\text{W}}{\text{K}}$$

La pérdida de calor por las paredes del horno para el primer periodo de 30 minutos es:

$$Q_{pa1} = 162,36 \frac{\text{W}}{\text{K}} * (101,17 - 63,84) \text{ °K} * 1800,00 \text{ s}$$

$$Q_{pa1} = 10.908,977,14 \text{ J}$$

$$Q_{pa1} = 0,011 * 10^6 \text{ kJ}$$

Se indica el cálculo la pérdida de calor por las paredes del horno en el periodo de tiempo comprendido entre el primer instante de adquisición del proceso de cocción a las 04:38:16 p.m. y el segundo instante de adquisición del proceso a las 05:08:16 p.m., en la que las temperaturas de la pared interna y externa corresponde a y respectivamente.

La pérdida de calor por las paredes del horno es:

$$Q_{pa} = 5.198.473,90 \text{ kJ}$$

$$Q_{pa} = 5,20 * 10^6 \text{ kJ}$$

Para la evaluación del calor a través de las paredes y techo se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{pa} = U_{pa} * (T_{3i} - T_{7e}) * t \text{ Ec. 72}$$

$$Q_{tec} = U_{tec} * (T_{4i} - T_{8e}) * t \text{ Ec. 73}$$

Donde:

$Q_{pa}$  = Pérdida de calor por las paredes del horno (kJ)

$Q_{tec}$  = Pérdida de calor por el techo del horno (kJ)

$U_{pa}$  = Coeficiente global de transferencia de calor de las paredes exterior y central del horno ( $\frac{\text{W}}{\text{K}}$ )

$U_{tec}$  = Coeficiente global de transferencia de calor del techo del horno ( $\frac{\text{W}}{\text{K}}$ )

$T_{3i}$  = Temperatura interior de la pared del horno (°C)

$T_{7e}$  = Temperatura exterior de la pared del horno (°C)

$T_{4i}$  = Temperatura interior del techo del horno (°C)

$T_{8e}$  = Temperatura exterior del techo horno (°C)

$t$  = Periodo de tiempo de trabajo (s)

$t = 7.200,00 \text{ s}$

La resistencia térmica, por conducción en las paredes planas exterior y central del horno respectivamente, es:

$$R_{k_{pa}} = R_{k_{pe}} + R_{k_{pc}} \text{ Ec. 74}$$

$$R_{k_{pa}} = \frac{t_{pe}}{K * (A_{pe} - A_{pu} - A_{ph})} + \frac{t_{pc}}{K * A_{pc}} \text{ Ec. 75}$$

$$R_{k_{pa}} = \frac{t_{pe}}{K * (h * L - H * a * n - b * z * n)} + \frac{t_{pc}}{K * h * L} \text{ Ec. 76}$$

Donde:

$R_{k_{pa}}$  = Resistencia térmica por conducción de las paredes del horno ( $\frac{\text{K}}{\text{W}}$ )

$R_{k_{pe}}$  = Resistencia térmica por conducción de la pared exterior del horno ( $\frac{\text{K}}{\text{W}}$ )

$R_{k_{pc}}$  = Resistencia térmica por conducción de la pared central del horno ( $\frac{\text{K}}{\text{W}}$ )

$A_{pe}$  = Área de la pared exterior del horno (m<sup>2</sup>)

$A_{pu}$  = Área de las puertas de cargue y descargue del horno (m<sup>2</sup>)

$A_{ph}$  = Área de las puertas de humos del horno (m<sup>2</sup>)

<sup>46</sup> (Cengel, 2009)

- $t_{p_e}$  = Espesor de la pared exterior del horno (m)
- $t_{p_e}$  = 0,90 m
- $t_{p_c}$  = Espesor de la pared central del horno (m)
- $t_{p_c}$  = 1,20 m
- $k$  = Conductividad térmica de la pared de ladrillo ( $\frac{W}{m \cdot ^\circ K}$ )
- $k = 0,72 \frac{W}{m \cdot ^\circ K}$
- $h$  = Altura de la pared del horno (m)
- $h = 1,80$  m
- $L$  = Longitud de trabajo del horno (m)
- $L = 44,10$  m
- $H$  = Altura de la puerta de cargue y descargue del horno (m)
- $H = 1,50$  m
- $a$  = Ancho de la puerta de cargue y descargue del horno (m)
- $a = 1,30$  m
- $n$  = Número de puertas de cargue y descargue y de humos del horno
- $n = 9$
- $b$  = Ancho de la puerta de humos (m)
- $b = 0,46$  m
- $z$  = Altura de la puerta de humos (m)
- $z = 0,20$  m

La resistencia térmica por conducción en las paredes exterior y central del horno da como resultado:

$$R_{k_{pa}} = \frac{0,90 \text{ m}}{0,72 \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \cdot (1,80 \text{ m} + 44,10 \text{ m} - 1,30 \text{ m} + 1,50 \text{ m} + 9 \cdot 0,46 \text{ m} + 0,20 \text{ m} \cdot 9)} + \frac{1,20 \text{ m}}{0,72 \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \cdot 1,80 \text{ m} + 44,10 \text{ m}}$$

$$R_{k_{pa}} = \frac{0,90 \text{ m}}{0,72 \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \cdot 61,00 \text{ m}^2} + \frac{1,20 \text{ m}}{0,72 \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \cdot 79,38 \text{ m}^2}$$

$$R_{k_{pa}} = 0,021 \frac{^\circ K}{W} + 0,021 \frac{^\circ K}{W}$$

$$R_{k_{pa}} = 0,042 \frac{^\circ K}{W}$$

Para determinar la resistencia térmica por conducción en el techo del horno se hace el equivalente como si la forma fuese cilíndri-

ca. Por tal razón, la resistencia térmica por conducción de la pared de forma cilíndrica del horno es:

$$R_{k_{tec}} = \frac{\ln(\frac{r_e}{r_n})}{2\pi kL} \text{ Ec. 77}$$

Donde:

- $R_{k_{tec}}$  = Resistencia térmica por conducción del techo del horno ( $\frac{^\circ K}{W}$ )
- $r_e$  = Radio exterior equivalente del techo del horno (m)
- $r_n$  = Radio interior equivalente del techo del horno (m)
- $k$  = Conductividad térmica de la pared de ladrillo del horno ( $\frac{W}{m \cdot ^\circ K}$ )
- $k = 0,72 \frac{W}{m \cdot ^\circ K}$
- $L$  = Longitud de trabajo del horno (m)
- $L = 44,10$  m

El área elíptica de la cúpula del horno es:

$$A_{cup} = \frac{\pi \cdot a_{cup} \cdot b_{cup}}{2} \text{ Ec. 78}$$

Donde:

- $A_{cup}$  = Área elíptica de la cúpula del horno (m<sup>2</sup>)
- $a_{cup}$  = Semieje mayor parábola de la cúpula (m)
- $a_{cup} = 1,35$  m
- $b_{cup}$  = Semieje menor parábola de la cúpula (m)
- $b_{cup} = 1,00$  m

El área de la cúpula del horno es:

$$A_{cup} = \frac{\pi \cdot 1,35 \text{ m} \cdot 1,00 \text{ m}}{2}$$

$$A_{cup} = 2,12 \text{ m}^2$$

El radio interior equivalente del techo del horno es:

$$A_{cup} = \frac{\pi \cdot r_n^2}{2} \text{ Ec. 79}$$

Donde:

- $A_{cup}$  = Área elíptica de la cúpula del horno (m<sup>2</sup>)
- $r_n$  = Radio interior equivalente del techo del horno (m)

El radio interior equivalente del techo del horno es:

$$r_n = \sqrt{\frac{2 \cdot 2,12 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$r_n = 1,16 \text{ m}$$

El área del techo del horno es:

$$A_{tec} = A_{sup} - A_{cup} - A_{tub} \text{ Ec. 80}$$

Donde:

- $A_{tec}$  = Área del techo del horno (m<sup>2</sup>)
- $A_{sup}$  = Área de la parte superior del horno (m<sup>2</sup>)
- $A_{cup}$  = Área de la cúpula del horno (m<sup>2</sup>)
- $A_{tub}$  = Área de los tubos de alimentación de combustible (m<sup>2</sup>)

El área del techo del horno es:

$$A_{tec} = h_{sup} \cdot d_{sup} - \frac{\pi \cdot a_{cup} \cdot b_{cup}}{2} - \pi \cdot r^2 \text{ Ec. 81}$$

Donde:

- $A_{tec}$  = Área del techo del horno (m<sup>2</sup>)
- $h_{sup}$  = Altura de la pared superior del horno (m)
- $h_{sup} = 1,90$  m
- $d_{sup}$  = Ancho de la sección transversal del horno (m)
- $d_{sup} = 4,80$  m
- $a_{cup}$  = Semieje mayor parábola de la cúpula (m)
- $a_{cup} = 1,35$  m
- $b_{cup}$  = Semieje menor parábola de la cúpula (m)
- $b_{cup} = 1,00$  m

- $r$  = Radio de los tubos de alimentación de combustible (m)
- $r = 0,165$  m
- $N$  = Número de tubos de alimentación en la sección transversal del horno
- $N = 4$

El área del techo del horno es:

$$A_{tec} = 1,90 \text{ m} \cdot 4,80 \text{ m} - \frac{\pi \cdot 1,35 \text{ m} \cdot 1,00 \text{ m}}{2} - \pi \cdot (0,165 \text{ m})^2 \cdot 4$$

$$A_{tec} = 6,66 \text{ m}^2$$

El radio exterior equivalente del techo del horno es:

$$A_{tec} = \frac{\pi \cdot r_e^2}{2} \text{ Ec. 82}$$

Donde:

- $A_{tec}$  = Área elíptica de la cúpula del horno (m<sup>2</sup>)
- $r_e$  = Radio exterior equivalente del techo del horno (m)

El radio exterior equivalente del techo del horno es:

$$r_e = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,66 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$r_e = 2,06 \text{ m}$$

La resistencia térmica por conducción del techo del horno es:

$$R_{k_{tec}} = \frac{\ln(\frac{2,06 \text{ m}}{1,16 \text{ m}})}{2\pi \cdot 0,72 \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \cdot 44,10 \text{ m}}$$

$$R_{k_{tec}} = 0,0029 \frac{^\circ K}{W}$$

<sup>47</sup> (Cengel, 2009)

El coeficiente global de transferencia de calor de las paredes exterior y central del horno es:

$$U_{pa} = \frac{1}{R_{k_{pa}}} \text{ Ec. 83}$$

$$U_{pa} = \frac{1}{0,042 \frac{m^2 \cdot K}{W}}$$

$$U_{pa} = 24,11 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

El coeficiente global de transferencia de calor del techo del horno es:

$$U_{pa} = \frac{1}{R_{k_{tec}}} \text{ Ec. 84}$$

$$U_{pa} = \frac{1}{0,0029 \frac{m^2 \cdot K}{W}}$$

$$U_{pa} = 344,83 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

La pérdida de calor por las paredes exterior y central del horno, para el primer periodo de tiempo de 1 hora es:

$$Q_{pa1} = 24,11 \frac{W}{m^2 \cdot K} * (30,39 - 19,86) \text{ } ^\circ K * 7.200,00 \text{ s}$$

$$Q_{pa1} = 1.827.923,76 \text{ J}$$

$$Q_{pa1} = 0,0018 * 10^6 \text{ kJ}$$

Para el primer periodo de tiempo de 1 hora, la pérdida de calor por las paredes exterior y central del horno es:

$$Q_{pa1} = 0,0018 * 10^6 \text{ kJ}$$

Para evaluar este flujo de calor y el de humos el periodo de tiempo es el mismo que el flujo de calor en las paredes.

La pérdida de calor por las paredes exterior y central del horno es:

$$Q_{pa} = 1.085.710,07 \text{ kJ}$$

$$Q_{pa} = 1,09 * 10^6 \text{ kJ}$$

La pérdida de calor por el techo del horno, para el primer periodo de tiempo de 1 hora es:

$$Q_{tec1} = 344,83 \frac{W}{m^2 \cdot K} * (75,05 - 32,49) \text{ } ^\circ K * 7.200,00 \text{ s}$$

$$Q_{tec1} = 105.666.946,60 \text{ J}$$

$$Q_{tec1} = 0,11 * 10^6 \text{ kJ}$$

La pérdida de calor por el techo del horno, para el primer periodo de tiempo de 1 hora, es:

$$Q_{tec1} = 0,11 * 10^6 \text{ kJ}$$

La pérdida de calor por el techo del horno es:

$$Q_{tec} = 14.452.661,17 \text{ kJ}$$

$$Q_{tec} = 14,45 * 10^6 \text{ kJ}$$

### 3.3.11 Calor por humos

Con "calor por humos" se hace referencia al calor desaprovechado de los gases de la combustión que salen del horno y son evacuados por la chimenea.

Para la evaluación de este calor se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_h = P_g * C_g * \Delta T \text{ Ec. 85}$$

Donde:

$Q_h$  = Calor por humos (kJ)

$P_g$  = Peso de gases producidos (kg)

$C_g$  = Calor específico de gases de escape ( $\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K}$ )

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura entre los gases de escape y el medio ambiente ( $^\circ K$ )

El peso de gases producidos es:

$$P_g = \frac{P_g}{t} * t \text{ Ec. 86}$$

Donde:

$P_g$  = Peso de gases producidos (kg Humos)

$\frac{P_g}{t}$  = Peso de humos producidos por unidad de tiempo ( $\frac{kg \text{ Humos}}{h}$ )

$t$  = Periodo de tiempo de trabajo (h)

$t$  = 0,50 h

El peso de humos producidos por unidad de tiempo es:

$$\frac{P_g}{t} = \frac{m_c}{t} * P_{gu} \text{ Ec. 87}$$

Donde:

$\frac{P_g}{t}$  = Peso de gases producidos en la unidad de tiempo ( $\frac{kg \text{ Humos}}{h}$ )

$P_{gu}$  = Peso de gases producidos por unidad de tiempo ( $\frac{kg \text{ Humos}}{kg \text{ Comb.}}$ )

$P_{gu} = m_{rm}$

$P_{gu} = 19,04 \frac{kg \text{ Humos}}{kg \text{ Comb.}}$

$\frac{m_c}{t}$  = Masa de carbón consumida por periodo de tiempo ( $\frac{kg \text{ Comb.}}{h}$ )

$\frac{m_c}{t} = 11,11 \frac{kg \text{ Comb.}}{h}$

El peso de humos producidos por unidad de tiempo es:

$$\frac{P_g}{t} = 11,11 \frac{kg \text{ Comb.}}{h} * 19,04 \frac{kg \text{ Humos}}{kg \text{ Comb.}}$$

$$\frac{P_g}{t} = 211,53 \frac{kg \text{ Humos}}{h}$$

El peso de humos producidos es:

$$P_g = 211,53 \left( \frac{kg \text{ Humos}}{h} \right) * 0,5 \text{ h}$$

$$P_g = 105,77 \text{ kg Humos}$$

El calor por humos para el primer periodo de 30 minutos es:

$$Q_{h1} = 105,77 \text{ kg Humos} * 0,23241 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K} * (48,23 - 20,30) \text{ } ^\circ C$$

$$Q_{h1} = 686,58 \text{ kJ}$$

El calor de los gases de escape es:

$$Q_h = 910.729,82 \text{ kJ}$$

$$Q_h = 0,91 * 10^6 \text{ kJ}$$

Para la evaluación del calor de los gases de escape se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_h = P_g * C_g * \Delta T \text{ Ec. 88}$$

Donde:

$Q_h$  = Calor por humos (kJ)

$P_g$  = Peso de gases producidos (kg)

$C_g$  = Calor específico de gases de escape ( $\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K}$ )

$\Delta T$  = Diferencia de temperatura entre los gases de escape y el medio ambiente ( $^\circ K$ )

El peso de gases producidos es:

$$P_g = \frac{P_g}{t} * t \text{ Ec. 89}$$

Donde:

$\frac{P_g}{t}$  = Peso de gases producidos (kg Humos)  
 $\frac{P_g}{t}$  = Peso de humos producidos por unidad de tiempo ( $\frac{\text{kg Humos}}{\text{h}}$ )  
 t = Período de tiempo de trabajo (h)  
 t = 1,00 h

El peso de humos producidos por unidad de tiempo es:

$$\frac{P_g}{t} = \frac{m_c}{t} * P_{gu} \text{ Ec. 90}$$

El peso de humos producidos por unidad de tiempo es:

$$\frac{P_g}{t} = \frac{m_c}{t} * P_{gu} \text{ (96)}$$

Donde:

$\frac{P_g}{t}$  = Peso de gases producidos en la unidad de tiempo ( $\frac{\text{kg Humos}}{\text{h}}$ )  
 $P_{gu}$  = Peso de gases producidos por unidad de tiempo ( $\frac{\text{kg Humos}}{\text{h}}$ )  
 $P_{gu} = m_{rm}$   
 $P_{gu} = 19,04 \frac{\text{kg Humos}}{\text{kg Comb.}}$   
 $\frac{m_c}{t}$  = Masa de carbón consumida por periodo de tiempo

$$\left(\frac{\text{kg Humos}}{\text{h}}\right) \frac{m_c}{t} = 458,88 \frac{\text{kg Comb.}}{\text{h}}$$

El peso de humos producidos por unidad de tiempo es:

$$\frac{P_g}{t} = 458,88 \frac{\text{kg Comb.}}{\text{h}} * 19,04 \frac{\text{kg Humos}}{\text{kg Comb.}}$$

$$\frac{P_g}{t} = 8.737,08 \frac{\text{kg Humos}}{\text{h}}$$

El peso de humos producidos es:

$$P_g = 8.737,08 \frac{\text{kg Humos}}{\text{h}} * 1,00 \text{ h}$$

$$P_g = 8.737,08 \text{ kg Humos}$$

El calor por humos para el primer periodo de 30 minutos es:

$$Q_{h1} = 8.737,08 \text{ kg Humos} * 0,23287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} * (57,404 - 23,60) \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$Q_{h1} = 68.769,61 \text{ kJ}$$

Para el cálculo del calor por los humos para el primer período de tiempo, en el que la temperatura de los gases de la combustión en el horno que salen por la chimenea y la temperatura ambiente en la primera hora es de 57,40 °C y 23,60 °C, respectivamente.

El calor de los gases de escape es:

$$Q_h = 2.729.123,83 \text{ kJ}$$

$$Q_h = 2,73 * 10^6 \text{ kJ}$$

### 3.3.12 Pérdidas intangibles

Las "pérdidas intangibles" denotan la energía perdida por los fenómenos que presentan cierta dificultad para determinarse como hidrógeno, hidrocarburos por los humos negros y la radiación hacia el exterior. Esta pérdida se calculará como el excedente o diferencia entre la energía disponible por el combustible y la sumatoria de los flujos de energía calculados anteriormente.

Para la evaluación de la pérdida intangible se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{in} = Q_H - Q_T \text{ Ec. 91}$$

Donde:

$Q_{in}$  = Pérdidas intangibles (kJ)  
 $Q_H$  = Calor de entrada (kJ)  
 $Q_T$  = Sumatoria flujos de energía (kJ)

Las pérdidas intangibles en el horno de la ladrillera El Recreo 2 son:

$$Q_H = 49,2 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_T = 42,73 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_{in} = 49,20 * 10^6 \text{ kJ} - 42,73 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_{in} = 6,46 * 10^6 \text{ kJ}$$

De igual forma se evalúan las pérdidas intangibles en el horno de la ladrillera Ocaña, cuyo valor es:

$$Q_H = 340,16 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_T = 240,95 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_{in} = 99,21 * 10^6 \text{ kJ}$$

### 3.3.13 Rendimiento del horno

El rendimiento por calor utilizado para la cocción del material está dado por la relación entre el calor real utilizado para la cocción del material y el calor aportado por el combustible.

Para la evaluación del rendimiento del horno se utiliza la siguiente expresión:

$$\eta_c = \frac{Q_{cm} + Q_{wm} + Q_{dq}}{Q_T} * 100 \text{ Ec. 92}$$

Donde:

$\eta_c$  = Rendimiento por calor utilizado para la cocción del material (%)  
 $Q_{cm}$  = Calor por carga a cocer (kJ)  
 $Q_{wm}$  = Calor para sacar la humedad del material a cocer (kJ)  
 $Q_{dq}$  = Calor necesario para la descomposición de la arcilla (kJ)  
 $Q_T$  = Sumatoria flujos de energía (kJ)

El rendimiento por calor utilizado para la cocción del material en el horno de la ladrillera El Recreo 2 es:

$$Q_{cm} = 13,92 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_{wm} = 3,40 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_{dq} = 7,03 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_t = 42,73 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$\eta_c = \frac{(13,92 * 10^6 \text{ kJ} + 3,40 * 10^6 \text{ kJ} + 7,03 * 10^6 \text{ kJ})}{42,73 * 10^6 \text{ kJ}} * 100$$

$$\eta_c = 56,99 \%$$

De igual manera, se evalúa el rendimiento por calor utilizado para la cocción del material en el horno de la ladrillera Ocaña, cuyo valor es:

$$Q_{cm} = 107,71 * 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_{wm} = 23,31 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_{dq} = 58,67 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$

$$Q_t = 240,95 \cdot 10^6 \text{ kJ}$$

$$\eta_c = 78,73 \%$$

El rendimiento por cantidad de material cocido está dado por la relación entre el calor aportado por el combustible y la masa húmeda total por carga. Corresponde a la ecuación que se relaciona a continuación:

$$\eta_m = \frac{Q_T}{\text{Masa húmeda total por carga}} \text{ Ec. 93}$$

Donde:

$\eta_m$  = Rendimiento por cantidad de material cocido (%)

$Q_T$  = Sumatoria flujos de energía (kJ)

El rendimiento por cantidad de material cocido en el horno de la ladrillera El Recreo 2 es:

$$\eta = \frac{42,73 \cdot 10^6 \text{ kJ}}{19.205,00 \text{ kg}}$$

$$\eta = 2.224,94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$$

De igual forma se evalúa el rendimiento por cantidad de material cocido en el horno de la ladrillera Ocaña, cuyo valor es:

$$\eta = 1.521,91 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$$

### 3.4 Requerimientos energéticos y de aire necesario para la combustión

En los hornos tradicionales a cielo abierto, utilizados para la producción de material cerámico en el municipio de Ocaña, se presenta el problema de la combustión incompleta de los combustibles suministrados en la cámara de cocción del horno. La causa principal es la falta de oxígeno para la combustión completa, fenómeno originado por la falta de chimenea (que solo posee el horno de la ladrillera Ocaña).

La existencia de un buen tiraje permite una buena circulación de oxígeno en el interior del horno y, en consecuencia, se obtiene una buena combustión, quemando completamente el combustible. Su ineficiencia trae consigo la emisión de gases tóxicos como el monóxido de carbono, dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno, gases que contaminan la atmósfera contribuyendo al calentamiento global y a la destrucción del ecosistema<sup>48</sup>.

Con la combustión completa se garantiza la concentración de  $O_2$  en los rangos permitidos, pues un exceso de aire provoca que el horno se enfríe y los gases calientes sean extraídos del horno antes de transferir su calor a los productos.

Para el análisis del problema se determinó la relación másica aire-combustible, y para ello se asumió que la combustión es estequiométrica y por lo tanto completa.

<sup>48</sup> (Gómez Coello, 2012)

Los productos de la combustión solamente contienen  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$  y  $N_2$ . La ceniza fue ignorada y los gases de combustión se consideraron como gases ideales.

Para evaluar los números de moles de los constituyentes del carbón, se eligió la composición elemental del carbón de la base de datos de la UPME, para carbones del Norte de Santander.

Para determinar el número de moles de carbono se utiliza la expresión:

$$N_C = \frac{C \cdot m_c}{M_C} \text{ Ec. 95}$$

Donde:

$N_C$  = Número de moles de carbono (kmol)

$C$  = Porcentaje de carbono en el carbón (%)

$C$  = 78,00 %

$m_c$  = Masa de carbón (kg)

$M_C$  = Peso molecular del carbono ( $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$ )

$M_C$  = 12,00  $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$

En la ladrillera El Recreo 2 se utilizó 1.500,00 kg de carbón y en la ladrillera Ocaña se utilizó 10.370,76 kg de carbón.

El número de moles de carbono en el combustible utilizado en el horno de la ladrillera El Recreo 2 es:

$$N_C = \frac{0,78 \cdot 1.500,00 \text{ kg}}{12,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}$$

$$N_C = \frac{1.170,00 \text{ kg}}{12,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}$$

$$N_C = 97,50 \text{ kmol}$$

De igual forma se evalúa el número de moles de carbono en el combustible utilizado

en el horno de la ladrillera Ocaña y su valor es 674,10 kmol.

El número de moles de hidrógeno es:

$$N_{H_2} = \frac{H_2 \cdot m_c}{M_{H_2}} \text{ Ec. 96}$$

Donde:

$N_{H_2}$  = Número de moles de hidrógeno (kmol)

$H_2$  = Porcentaje de hidrógeno en el carbón (%)

$H_2$  = 5,80 %

$m_c$  = Masa de carbón (kg)

$M_{H_2}$  = Peso molecular del hidrógeno ( $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$ )

$M_{H_2}$  = 2,00  $\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$

El número de moles de hidrógeno en el combustible utilizado en el horno de la ladrillera El Recreo 2 es:

$$N_{H_2} = \frac{0,058 \cdot 1.500,00 \text{ kg}}{2,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}$$

$$N_{H_2} = \frac{87,00 \text{ kg}}{2,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}$$

$$N_{H_2} = 43,50 \text{ kmol}$$

De igual forma se evalúa el número de moles de hidrógeno en el combustible utilizado el horno de la ladrillera Ocaña y su valor es 300,75 kmol.

El número de moles de oxígeno es:

$$N_{O_2} = \frac{O_2 \cdot m_c}{M_{O_2}} \text{ Ec. 97}$$

Donde:

$N_{O_2}$  = Número de moles de oxígeno (kmol)

$O_2$  = Porcentaje de oxígeno en el carbón (%)

$O_2$  = 6,60 %

$m_c$  = Masa de carbón (kg)

$$M_{O_2} = \text{Peso molecular del oxígeno } \left(\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right)$$

$$M_{O_2} = 32,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

El número de moles de oxígeno en el combustible utilizado en el horno de la ladrillera El Recreo 2 es:

$$N_{O_2} = \frac{0,066 \cdot 1.500,00 \text{ kg}}{32,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}$$

$$N_{O_2} = \frac{99,00 \text{ kg}}{32,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}$$

$$N_{O_2} = 3,09 \text{ kmol}$$

De igual forma se evalúa el número de moles de oxígeno en el combustible utilizado en el horno de la ladrillera Ocaña y su valor es 21,39 kmol.

El número de moles de nitrógeno es:

$$N_{N_2} = \frac{N_2 \cdot m_c}{M_{N_2}} \text{ Ec. 98}$$

Donde:

$$N_{N_2} = \text{Número de moles de nitrógeno (kmol)}$$

$$N_2 = \text{Porcentaje de nitrógeno en el carbón (\%)}$$

$$N_2 = 1,60 \%$$

$$m_c = \text{Masa de carbón (kg)}$$

$$M_{N_2} = \text{Peso molecular del nitrógeno } \left(\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right)$$

$$M_{N_2} = 28,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

El número de moles para el nitrógeno en el combustible utilizado en el horno de la ladrillera El Recreo 2 es:

$$N_{N_2} = \frac{0,016 \cdot 1.500,00 \text{ kg}}{28,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}$$

$$N_{N_2} = \frac{24,00 \text{ kg}}{28,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}$$

$$N_{N_2} = 0,86 \text{ kmol}$$

De igual forma se evalúa el número de moles de nitrógeno en el combustible utilizado en el horno de la ladrillera Ocaña y su valor es 5,93 kmol.

El número de moles de azufre es:

$$N_s = \frac{S \cdot m_c}{M_s} \text{ Ec. 99}$$

Donde:

$$N_s = \text{Número de moles de azufre (kmol)}$$

$$S = \text{Porcentaje de azufre en el carbón (\%)}$$

$$S = 1,00 \%$$

$$m_c = \text{Masa de carbón (kg)}$$

$$M_{N_2} = \text{Peso molecular del azufre } \left(\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right)$$

$$M_{N_2} = 32,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

El número de moles de azufre en el combustible utilizado en el horno de la ladrillera El Recreo 2 es:

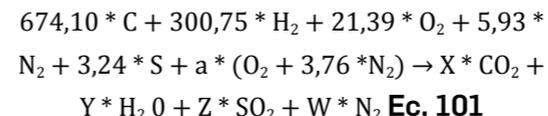
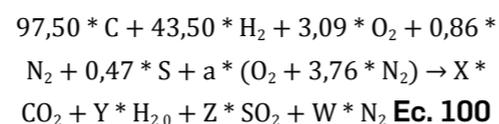
$$N_s = \frac{0,010 \cdot 1.500,00 \text{ kg}}{32,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}$$

$$N_s = \frac{15,00 \text{ kg}}{32,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}$$

$$N_s = 0,47 \text{ kmol}$$

De igual forma se evalúa el número de moles de azufre en el combustible utilizado en el horno de la ladrillera Ocaña y su valor es 3,24 kmol.

La ecuación de combustión en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y ladrillera Ocaña respectivamente se puede escribir como:



Realizando el balance de masa para los constituyentes, se obtiene los coeficientes de balanceo:

El coeficiente de balanceo para el carbono en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y ladrillera Ocaña respectivamente es:

$$X = 97,50 \text{ kmol}$$

$$X = 674,10 \text{ kmol}$$

El coeficiente de balanceo para el hidrógeno en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y ladrillera Ocaña respectivamente es:

$$Y = 43,50 \text{ kmol}$$

$$Y = 300,75 \text{ kmol}$$

El coeficiente de balanceo para el azufre en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y ladrillera Ocaña respectivamente es:

$$Z = 0,47 \text{ kmol}$$

$$Z = 3,24 \text{ kmol}$$

El coeficiente de balanceo para el oxígeno en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y ladrillera Ocaña respectivamente es:

$$3,09 + a = X + 0,50 * Y + Z \text{ Ec. 102}$$

$$3,09 + a = 97,50 + 0,50 * 43,50 + 0,47$$

$$a = 116,63 \text{ kmol}$$

$$21,39 + a = 674,10 + 0,50 * 300,75 + 3,24$$

$$21,39 + a = 674,10 + 0,50 * 300,75 + 3,24$$

$$a = 806,33 \text{ kmol}$$

El coeficiente de balanceo para el nitrógeno en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y ladrillera Ocaña respectivamente es:

$$W = 0,86 + a * 3,76 \text{ Ec. 103}$$

$$W = 0,86 + 116,63 * 3,76$$

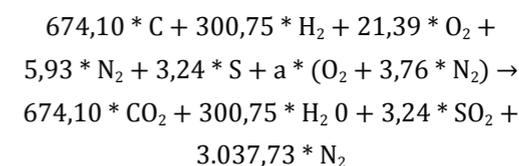
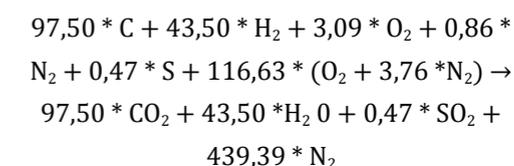
$$W = 439,39 \text{ kmol}$$

$$W = 5,93 + a * 3,76 \text{ Ec. 104}$$

$$W = 5,93 + 806,33 * 3,76$$

$$W = 3.037,73 \text{ kmol}$$

La ecuación balanceada de combustión en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y ladrillera Ocaña respectivamente es:



Las fracciones molares de los gases producto de la combustión se determinan como:

$$N_g = X + Y + Z + W \text{ Ec. 105}$$

Donde:

$$N_g = \text{Fracción molar de los gases (kmol)}$$

$$X = \text{Coeficiente de balanceo para el carbono (kmol)}$$

Y = Coeficiente de balanceo para el hidrógeno (kmol)  
 Z = Coeficiente de balanceo para el azufre (kmol)  
 W = Coeficiente de balanceo para el nitrógeno (kmol)

La fracción molar de los gases en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y ladrillera Ocaña respectivamente es:

$$N_g = 97,50 \text{ kmol} + 43,50 \text{ kmol} + 0,47 \text{ kmol} + 439,39 \text{ kmol}$$

$$N_g = 580,86 \text{ kmol}$$

$$N_g = 674,10 \text{ kmol} + 300,75 \text{ kmol} + 3,24 \text{ kmol} + 3.037,73 \text{ kmol}$$

$$N_g = 4.015,82 \text{ kmol}$$

La fracción molar para el dióxido de carbono es:

$$Y_{CO_2} = \frac{X}{N_g} \text{ Ec. 106}$$

Donde:

$Y_{CO_2}$  = Fracción molar para el dióxido de carbono  
 X = Coeficiente de balanceo para el carbono (kmol)  
 $N_g$  = Fracción molar de los gases (kmol)

La fracción molar para el dióxido de carbono en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y ladrillera Ocaña es:

$$Y_{CO_2} = \frac{97,50 \text{ kmol}}{580,86 \text{ kmol}}$$

$$Y_{CO_2} = 0,17$$

La fracción molar para el agua es:

$$Y_{H_2O} = \frac{Y}{N_g} \text{ Ec. 107}$$

Donde:

$Y_{H_2O}$  = Fracción molar para el agua  
 Y = Coeficiente de balanceo para el hidrógeno (kmol)  
 $N_g$  = Fracción molar de los gases (kmol)

La fracción molar para el agua en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y ladrillera Ocaña es:

$$Y_{H_2O} = \frac{43,50 \text{ kmol}}{580,86 \text{ kmol}}$$

$$Y_{H_2O} = 0,075 \text{ kmol}$$

La fracción molar para el dióxido de azufre es:

$$Y_{SO_2} = \frac{Z}{N_g} \text{ Ec. 108}$$

Donde:

$Y_{SO_2}$  = Fracción molar para el dióxido de azufre  
 Z = Coeficiente de balanceo para el azufre (kmol)  
 $N_g$  = Fracción molar de los gases (kmol)

La fracción molar para el dióxido de azufre en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y ladrillera Ocaña es:

$$Y_{SO_2} = \frac{0,47 \text{ kmol}}{580,86 \text{ kmol}}$$

$$Y_{SO_2} = 0,00081 \text{ kmol}$$

La fracción molar para el nitrógeno es:

$$Y_{N_2} = \frac{W}{N_g} \text{ Ec. 109}$$

Donde:

$Y_{N_2}$  = Fracción molar para el nitrógeno  
 W = Coeficiente de balanceo para el nitrógeno (kmol)  
 $N_g$  = Fracción molar de los gases (kmol)

La fracción molar para el nitrógeno en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y ladrillera Ocaña es:

$$Y_{N_2} = \frac{439,39 \text{ kmol}}{580,86 \text{ kmol}}$$

$$Y_{N_2} = 0,76 \text{ kmol}$$

La masa molar aparente de los gases producto de la combustión es:

$$M = \frac{m_g}{N_g} \text{ Ec. 110}$$

$$M_{ma} = \frac{X \cdot M_{CO_2} + Y \cdot M_{H_2O} + Z \cdot M_{SO_2} + W \cdot M_{N_2}}{N_g} \text{ Ec. 111}$$

Donde:

$M_{ma}$  = Masa molar aparente de los gases ( $\frac{kg}{kmol}$ )  
 $m_g$  = Masa de los gases (kg)  
 $N_g$  = Fracción molar de los gases (kmol)  
 X = Coeficiente de balanceo para el carbono (kmol)  
 Y = Coeficiente de balanceo para el hidrógeno (kmol)  
 Z = Coeficiente de balanceo para el azufre (kmol)  
 W = Coeficiente de balanceo para el nitrógeno (kmol)  
 $M_{CO_2}$  = Peso molecular del dióxido de carbono ( $\frac{kg}{kmol}$ )

$M_{CO_2} = 44,00 \frac{kg}{kmol}$   
 $M_{H_2O}$  = Peso molecular del agua ( $\frac{kg}{kmol}$ )  
 $M_{H_2O} = 18,00 \frac{kg}{kmol}$   
 $M_{SO_2}$  = Peso molecular dióxido de azufre ( $\frac{kg}{kmol}$ )  
 $M_{SO_2} = 64,00 \frac{kg}{kmol}$   
 $M_{N_2}$  = Peso molecular del nitrógeno ( $\frac{kg}{kmol}$ )  
 $M_{N_2} = 28,00 \frac{kg}{kmol}$

La masa molar aparente de los gases producto de la combustión en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y ladrillera Ocaña es:

$$M = \frac{(97,50 \cdot 44,00 + 43,50 \cdot 18,00 + 0,47 \cdot 64,00 + 439,39 \cdot 28,00) \text{ kg}}{580,86 \text{ kmol}}$$

$$M = \frac{17.406,00 \text{ kg}}{580,86 \text{ kmol}}$$

$$M = 29,97 \frac{kg}{kmol}$$

La relación másica aire-combustible es:

$$AC = \frac{m_{Aire}}{m_c} \text{ Ec. 112}$$

Donde:

AC = Relación másica aire-combustible ( $\frac{kg \text{ Aire}}{kg \text{ Comb.}}$ )  
 $m_{Aire}$  = Masa de aire (kg)  
 $m_c$  = Masa de combustible (kg)

La masa de aire es:

$$m_{Aire} = a \cdot N_{aire} \cdot M_{aire} \text{ Ec. 113}$$

Donde:

$m_{Aire}$  = Masa de aire (kg)  
 a = Coeficiente de balanceo para el oxígeno  
 $N_{aire}$  = Número de moles de aire (kmol)  
 $N_{aire} = O_2 + 3,76 N_2$   
 $N_{aire} = 4,76 \text{ kmol}$   
 $M_{aire}$  = Peso molecular del aire ( $\frac{kg}{kmol}$ )  
 $M_{aire} = 29,00 \frac{kg}{kmol}$

La masa de aire en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y ladrillera Ocaña respectivamente es:

$$m_{\text{Aire}} = 116,63 * 4,76 \text{ kmol} * 29,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$m_{\text{Aire}} = 16.099,61 \text{ kg Aire}$$

$$m_{\text{Aire}} = 806,33 * 4,76 \text{ kmol} * 29,00 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}$$

$$m_{\text{Aire}} = 111.305,79 \text{ kg Aire}$$

La relación másica aire-combustible en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y ladrillera Ocaña es:

$$AC = \frac{16.099,61 \text{ kg Aire}}{1.500,00 \text{ kg Comb.}}$$

$$AC = 10,73 \frac{\text{kg Aire}}{\text{kg Comb.}}$$

Es decir, se deben suministrar 10,73 kg de aire por cada kg de carbón en el horno.

La comparación en los resultados de la relación aire-combustible en las ladrilleras El Recreo 2 y Ocaña se muestran en las tablas 7 y 8.

**Tabla 7.** Número de moles constituyentes del carbón en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y la ladrillera Ocaña.

Ladrillera	Número de moles constituyentes del carbón				
	C	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	S
El Recreo 2	97,50	43,50	3,09	0,86	0,47
Ocaña	674,10	300,75	21,39	5,93	3,24

Fuente: Autores

**Tabla 8.** Coeficientes de balanceo en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y la ladrillera Ocaña

Ladrillera	Coeficientes de balanceo				
	C	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	S
El Recreo 2	97,50	43,50	0,47	116,63	439,39
Ocaña	674,10	300,75	3,24	806,33	3.037,73

Fuente: Autores

### 3.5 Emisiones atmosféricas

Para la medición directa de la concentración de los contaminantes en la chimenea o ducto de emisión en los hornos seleccionados se utiliza el método del analizador instrumental haciendo uso de un analizador de gases de combustión UEi EAGLE, el cual reporta los valores de las emisiones de manera inmediata. Este permite la realización de pruebas de evaluación de mediciones de emisiones de contaminantes de CO (%), CO<sub>2</sub> (%), O<sub>2</sub> (%) y NO (PPM).

La toma de muestras se hizo siguiendo los pasos estipulados según la normatividad vigente en la legislación colombiana. El Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial estipula, en el protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas, que el número de pruebas o corridas para la ejecución de los métodos de evaluación de emisiones contaminantes en fuentes fijas es de 3 corridas cuando se aplica el método del Analizador instrumental. Por cada corrida se hacen 4 mediciones con intervalo

de 15 minutos. Se realizaron mediciones en 8 empresas para un total de 24 corridas<sup>49</sup>.

Los puntos de medición establecidos en el horno Hoffman son los 3 ductos o nipples ubicados en la chimenea establecidos para tal fin. Para los hornos artesanales, en cambio, las mediciones se hicieron en la parte superior.

La medición de gases en el horno de la ladrillera Ocaña y El Recreo 2 se realizó el día 28 de mayo del 2017, y su concentración de contaminantes puede verse en las tablas 9 y 10.

#### 3.5.1 Corrección a condiciones de referencia

Los resultados de las mediciones de los diferentes contaminantes deben ser corregidos a condiciones de referencia: a 25°C y presión de 760 mm. Hg, de acuerdo con lo establecido en el artículo 86 de la resolución 909 del 5 de junio de 2008 emanada por el Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, por medio de la siguiente ecuación:

$$C_{CR} = C_{CL} * \left( \frac{T_{CL} * P_{CR}}{T_{CR} * P_{CL}} \right) \text{ Ec. 114}$$

Donde:

C<sub>CR</sub> = Concentración del contaminante a condiciones de referencia ( $\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$ )

C<sub>CL</sub> = Concentración del contaminante a condiciones locales ( $\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$ )

T<sub>CL</sub> = Temperatura de los gases a la salida del ducto (°K)

T<sub>CR</sub> = Temperatura a condiciones de referencia (°K)

T<sub>CR</sub> = 298,00°K

P<sub>CL</sub> = Presión de los gases a la salida del ducto (mm Hg)

P<sub>CR</sub> = Presión a condiciones de referencia (mm Hg)

P<sub>CR</sub> = 760,00mm Hg

Se indican las correcciones a condiciones de referencia del óxido nítrico en la ladrillera El Recreo 2 y para encontrar la concentración de óxidos de nitrógeno a condiciones locales en  $\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$  se utilizará la siguiente expresión:

$$C_{CL} = C_{CL \text{ p.p.m.}} * \frac{P.M.}{24,45} \text{ Ec. 115}$$

Donde:

C<sub>CL</sub> = Concentración de óxidos de nitrógeno a condiciones locales

C<sub>CL p.p.m.</sub> = Concentración de óxidos de nitrógeno a condiciones locales (p.p.m.)

C<sub>CL p.p.m.</sub> = 17,52 p.p.m.

P.M. = Peso molecular de óxidos de nitrógeno (g)

P.M. = 30,00 g

La concentración de óxidos de nitrógeno a condiciones locales en  $\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$  es:

$$C_{CL} = 17,52 * \frac{30,00}{24,45}$$

$$C_{CL} = 21,50 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

<sup>49</sup> (Ministerio de Ambiente y Vivienda, 2010)

**Tabla 9.** Emisiones de gases en la ladrillera Ocaña

Medición ladrillera Ocaña													Total
# Corrida	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Hora	4:15 P.M.	4:30 P.M.	4:45 P.M.	5:00 P.M.	5:15 P.M.	5:30 P.M.	5:45 P.M.	6:00 P.M.	6:15 P.M.	6:30 P.M.	6:45 P.M.	6:00 P.M.	
Contaminante													
<b>O<sub>2</sub></b>	2,70	2,80	6,40	2,00	4,40	16,40	18,10	12,10	9,70	7,30	5,40	4,70	
<b>(%)</b>	0,80	0,70	3,90	8,20	7,50	2,70	1,70	8,50	9,60	10,10	13,60	2,70	
	1,80	2,10	4,50	6,10	6,30	8,50	10,20	10,60	9,20	9,60	10,20	4,50	
<b>Total</b>	<b>1,77</b>	<b>1,87</b>	<b>4,93</b>	<b>5,43</b>	<b>6,07</b>	<b>9,20</b>	<b>10,00</b>	<b>10,40</b>	<b>9,50</b>	<b>9,00</b>	<b>9,73</b>	<b>3,97</b>	<b>6,82</b>
<b>CO</b>	5,78	6,66	4,66	4,63	10,37	3,42	4,68	6,19	4,00	4,86	4,80	5,62	
<b>(%)</b>	4,63	2,24	3,77	4,35	3,14	5,61	3,50	5,90	4,29	6,44	6,99	6,83	
	4,80	4,60	4,80	4,60	8,60	4,20	4,20	6,10	3,80	5,20	6,20	6,10	
<b>Total</b>	<b>5,07</b>	<b>4,50</b>	<b>4,41</b>	<b>4,53</b>	<b>7,37</b>	<b>4,41</b>	<b>4,13</b>	<b>6,06</b>	<b>4,03</b>	<b>5,50</b>	<b>6,00</b>	<b>6,18</b>	<b>5,18</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	17,50	18,50	19,40	19,30	18,20	11,80	15,60	16,30	12,90	12,80	13,70	15,60	
<b>(%)</b>	19,30	11,50	16,40	12,70	13,10	18,10	12,50	16,40	13,40	17,90	18,40	17,50	
	18,46	14,79	17,00	14,37	18,69	13,12	12,35	20,33	13,57	16,25	18,23	15,25	
<b>Total</b>	<b>18,42</b>	<b>14,93</b>	<b>17,77</b>	<b>15,46</b>	<b>16,66</b>	<b>14,34</b>	<b>13,48</b>	<b>17,67</b>	<b>13,29</b>	<b>15,65</b>	<b>16,77</b>	<b>16,12</b>	<b>15,88</b>
<b>NO</b>	77,00	68,00	33,00	66,00	19,00	9,00	20,00	26,00	10,00	12,00	14,00	15,00	
<b>(ppm)</b>	50,00	96,00	17,00	11,00	7,00	19,00	8,00	14,00	9,00	8,00	11,00	17,00	
	64,00	88,00	26,00	42,00	16,00	18,00	17,00	22,00	10,00	11,00	12,00	17,00	
<b>Total</b>	<b>63,67</b>	<b>84,00</b>	<b>25,33</b>	<b>39,67</b>	<b>14,00</b>	<b>15,33</b>	<b>15,00</b>	<b>20,67</b>	<b>9,67</b>	<b>10,33</b>	<b>12,33</b>	<b>16,33</b>	<b>25,53</b>
<b>T</b>	192,60	232,70	223,20	251,20	226,80	530,70	210,60	83,50	178,20	194,50	208,60	214,20	
<b>(°C)</b>	277,80	275,80	248,10	553,30	589,90	261,90	354,60	227,70	479,60	320,30	409,50	276,60	
	210,20	240,50	230,50	420,50	510,00	480,10	280,10	230,80	420,50	320,30	210,20	250,60	
<b>Total</b>	<b>226,87</b>	<b>249,67</b>	<b>233,93</b>	<b>408,33</b>	<b>442,00</b>	<b>424,23</b>	<b>281,77</b>	<b>180,67</b>	<b>359,43</b>	<b>278,37</b>	<b>276,10</b>	<b>247,13</b>	<b>309,04</b>

Fuente: Autores

**Tabla 10.** Emisiones de gases en la ladrillera El Recreo 2

Medición ladrillera El Recreo 2													Total
# Corrida	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Hora	9:00 A.M.	9:15 A.M.	9:30 A.M.	9:45 A.M.	10:00 A.M.	10:15 A.M.	10:30 A.M.	10:45 A.M.	11:00 A.M.	11:15 A.M.	11:30 A.M.	11:45 A.M.	
Contaminante													
<b>O<sub>2</sub></b>	18,10	6,90	20,20	20,50	16,40	8,20	14,20	14,90	13,20	15,00	12,10	10,70	
<b>(%)</b>	11,10	9,70	13,90	7,30	5,70	14,60	9,20	13,90	14,60	13,30	12,20	10,80	
	10,50	9,40	11,20	9,60	11,60	13,20	10,50	14,20	13,50	14,20	11,90	10,50	
<b>Total</b>	<b>13,23</b>	<b>8,67</b>	<b>15,10</b>	<b>12,47</b>	<b>11,23</b>	<b>12,00</b>	<b>11,30</b>	<b>14,33</b>	<b>13,77</b>	<b>14,17</b>	<b>12,07</b>	<b>10,67</b>	<b>12,42</b>
<b>CO</b>	3,15	3,24	3,64	0,00	3,31	3,29	3,33	3,31	3,33	3,36	3,32	3,33	
<b>(%)</b>	3,29	7,24	1,45	0,00	0,90	2,81	3,66	3,02	3,29	3,29	3,28	3,30	
	3,10	6,25	2,80	0,00	2,11	3,05	3,50	3,17	3,31	3,33	3,30	3,32	
<b>Total</b>	<b>3,18</b>	<b>5,58</b>	<b>2,63</b>	<b>0,00</b>	<b>2,11</b>	<b>3,05</b>	<b>3,50</b>	<b>3,17</b>	<b>3,31</b>	<b>3,33</b>	<b>3,30</b>	<b>3,32</b>	<b>3,01</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	7,00	13,50	10,70	0,00	4,30	12,20	6,40	5,80	7,40	5,70	8,50	9,80	
<b>(%)</b>	9,40	11,90	5,00	0,00	9,00	7,40	8,50	7,20	6,10	7,30	8,40	9,70	
	7,38	11,57	7,77	0,00	3,25	8,02	7,77	6,58	6,62	6,66	8,68	9,76	
<b>Total</b>	<b>7,93</b>	<b>12,32</b>	<b>7,82</b>	<b>0,00</b>	<b>5,52</b>	<b>9,21</b>	<b>7,56</b>	<b>6,53</b>	<b>6,71</b>	<b>6,55</b>	<b>8,53</b>	<b>9,75</b>	<b>7,52</b>
<b>NO</b>	23,00	31,00	20,00	73,00	10,00	16,00	11,00	9,00	6,00	4,00	7,00	8,00	
<b>(ppm)</b>	30,00	19,00	17,00	74,00	10,00	10,00	8,00	9,00	4,00	5,00	7,00	8,00	
	27,20	26,20	19,50	72,80	10,00	12,50	10,10	9,00	4,80	4,60	7,00	8,00	
<b>Total</b>	<b>26,73</b>	<b>25,40</b>	<b>18,83</b>	<b>73,27</b>	<b>10,00</b>	<b>12,83</b>	<b>9,70</b>	<b>9,00</b>	<b>4,93</b>	<b>4,53</b>	<b>7,00</b>	<b>8,00</b>	<b>17,52</b>
<b>T</b>	66,40	70,60	67,50	52,00	65,40	64,20	76,50	64,20	65,80	66,20	65,40	66,70	
<b>(°C)</b>	71,30	64,10	71,00	63,20	51,30	73,10	75,70	64,30	63,60	63,40	68,20	65,50	
	66,20	68,50	68,70	55,20	59,20	66,60	75,50	64,40	63,90	65,20	67,00	66,20	
<b>Total</b>	<b>67,97</b>	<b>67,73</b>	<b>69,07</b>	<b>56,80</b>	<b>58,63</b>	<b>67,97</b>	<b>75,77</b>	<b>64,30</b>	<b>64,43</b>	<b>65,07</b>	<b>66,87</b>	<b>66,13</b>	<b>66,15</b>

Fuente: Autores

La presión barométrica en la ciudad de Ocaña es de  $93,20 \cdot 10^3$  Pa o 699,06 mm Hg. La presión de los gases a la salida del ducto es de 701,99 mm Hg y la temperatura de los gases a la salida de la chimenea es de 66,15°C. Por lo tanto, la corrección de óxidos de nitrógeno contaminante a condiciones de referencia es:

$$C_{CR} = 21,50 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \cdot \left( \frac{339,15 \text{ °K} \cdot 760,00 \text{ mm Hg}}{298,00 \text{ °K} \cdot 701,99 \text{ mm Hg}} \right)$$

$$C_{CR} = 26,49 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

Una vez obtenida la corrección a condiciones de referencia se procedió a hacer la corrección a condiciones de oxígeno de referencia del 18%, de acuerdo con lo establecido en el artículo 88 de la resolución 909 emanada por el Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, por medio de la siguiente ecuación:

$$C_{CR(O2ref)} = C_{CR(X\%)} \cdot \left( \frac{21,00 - \% O_2 \text{ ref}}{21,00 - X\%} \right) \text{ Ec. 116}$$

Donde:

$C_{CR(O2ref)}$  = Concentración del contaminante a condiciones de referencia ( $\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$ )

$C_{CR(X\%)}$  = Concentración del contaminante a condiciones de referencia ( $\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$ )

$C_{CR(X\%)} = 26,49 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$

X % = Oxígeno medido a la salida de los gases (%)

X % = 12,42 %

La corrección a condiciones de referencia con oxígeno de referencia del 18% es:

$$C_{CR(O2ref)} = 26,49 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \cdot \left( \frac{21,00 - 18,00}{21,00 - 12,42} \right)$$

$$C_{CR(O2ref)} = 9,27 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

### 3.5.2 Exceso de aire

El exceso de aire evita la formación de inquemados sólidos y gaseosos como monóxido de carbono e hidrocarburos. Sin embargo, el exceso no puede ser grande y se debe controlar el porcentaje de exceso de  $O_2$  en la salida de los gases de combustión, puesto que se pierde mucha energía del carbón en calentar el nitrógeno del aire que se escapa al medio ambiente sin su aprovechamiento.

El cálculo del exceso de aire que está avalado por el ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial es el método 3análisis de las emisiones para determinar el porcentaje de dióxido de carbono, oxígeno y monóxido de carbono. Para calcular el exceso de aire se utilizan los resultados del análisis de los gases producto de la combustión y para su evaluación se utiliza la siguiente expresión:

$$\% \text{ E.A.} = \frac{(\% O_2) - (0,5 \cdot \% CO)}{0,264 \cdot (\% N_2) - (\% O_2 - 0,5 \cdot \% CO)} \cdot 100 \text{ Ec. 117}$$

Donde:

% E.A. = Exceso de aire (%)

$O_2$  = Porcentaje de oxígeno en los gases de combustión (%)

CO = Porcentaje de monóxido de carbono en los gases de combustión (%)

$N_2$  = Porcentaje de nitrógeno en los gases de combustión (%)

El exceso de aire para en el horno de la ladrillera El Recreo 2 es:

$$\% \text{ E.A.} = \frac{12,42 - 0,50 \cdot 3,01}{0,264 \cdot 77,05 - (12,42 - 0,50 \cdot 3,01)} \cdot 100$$

$$\% \text{ E.A.} = 115,79 \%$$

El exceso de aire en las ladrilleras a cielo abierto es elevado, lo que genera un máximo valor de 115,79 % y una eficiencia de la combustión de 41,78 % en la ladrillera El Recreo 2 y un mínimo valor de exceso de aire de 71,07 % y una eficiencia de la combustión de 53,83 %, mientras que en la ladrillera Ocaña el exceso de aire fue de 28,56 y la eficiencia de la combustión de 88,22 % por lo cual la combustión del carbón no es completa en los hornos artesanales a cielo abierto, lo cual afecta notoriamente la eficiencia de la combustión, mientras que en la ladrillera Ocaña el exceso de aire es bajo y su eficiencia a la combustión es alta.

Debido a que no se cuenta un control y ajuste del proceso de combustión respecto al aire de reacción se presenta un excesivo aire de combustión que conlleva a un aumento en el consumo de combustible.

### 3.5.3 Eficiencia de la combustión

La eficiencia de combustión se puede medir por medio de la concentración de monóxido de carbono en los humos, el cual se basa en la conversión teórica y real del carbono de los compuestos combustibles en dióxido de carbono que aparece en los humos. Se compara la reacción real con la reacción completa del combustible y el comburente, reacción en la cual se queman el carbono y el hidrógeno. Para la evaluación de la eficiencia de combustión se utiliza la siguiente expresión:

$$\eta_c = \frac{(\% CO_2)_{real}}{(\% CO_2)_{teorico}} \text{ Ec. 118}$$

$$\eta_c = \frac{CO_2}{\alpha_0} \text{ Ec. 119}$$

Donde:

$\eta_c$  = Eficiencia de combustión (%)

$(\% CO_2)_{real}$  = Reacción real del combustible y el comburente (%)

$(\% CO_2)_{teorico}$  = Reacción completa del combustible (%)

$(\% CO_2)_{teorico} = \alpha_0$

Para la evaluación de la reacción completa del combustible y el comburente se utiliza la siguiente expresión:

$$\alpha_0 = \frac{0,21}{0,79 \cdot 1 + \frac{3}{C} \cdot \left( H_2 - \frac{O_2 - S}{8} \right) + 0,21 \cdot \left( 1 - \frac{3N_2}{7C} \right)} \text{ (125)}$$

Donde:

$\alpha_0$  = Reacción completa del combustible

C = Porcentaje de carbono en el carbón (%)

C = 78,00 %

$H_2$  = Porcentaje de hidrógeno en el carbón (%)

$H_2$  = 5,80 %

S = Porcentaje de azufre en el carbón (%)

S = 1,00 %

$N_2$  = Porcentaje de nitrógeno en el carbón (%)

$N_2$  = 1,60 %

La reacción completa del combustible y el comburente es:

$$\alpha_0 = \frac{0,21}{0,79 \cdot 1 + \frac{3}{78,00} \cdot \left( 5,80 - \frac{6,60 - 1,00}{8} \right) + 0,21 \cdot \left( 1 - \frac{3 \cdot 1,60}{7 \cdot 78,00} \right)}$$

$$\alpha_0 = 0,18$$

La eficiencia de combustión en el horno de la ladrillera El Recreo 2 es:

$$\eta_c = \frac{7,52}{0,18}$$

$$\eta_c = 41,78 \%$$

## 4. Análisis de la energía en los hornos de la ladrillera El Recreo 2 y la ladrillera Ocaña

Los resultados del análisis de energía en los hornos seleccionados se muestran en las tablas 11, 12, 13, 14, 15 y 16, y en las figuras 22 y 23.

**Tabla 11.** Acumulación de calor en mampostería de los productos de la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña

Ladrillera	Temperatura media de la pared (°C)	Temperatura media del techo (°C)	Temperatura media del piso (°C)	Calor acumulado en la pared $Q_{o,pa} * 10^6$ (kJ)	Calor acumulado en el techo $Q_{o,tec} * 10^6$ (kJ)	Calor acumulado en el piso $Q_{o,pis} * 10^6$ (kJ)	Calor acumulado en mampostería $Q_o * 10^6$ (kJ)
El Recreo 2	304,30	-	601,97	6,41	-	0,85	7,26
Ocaña	495,20	606,38	397,37	175,09	388,93	18,18	582,20

Fuente: Autores

**Tabla 12.** Calor por carga del material a cocer de los productos de la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña

Ladrillera	Masa húmeda unitaria del bloque (Kg)	Masa húmeda unitaria del ladrillo H-10 (Kg)	Humedad del bloque (%)	Humedad del ladrillo H-10 (%)	Calor por carga del material a cocer de los bloques $Q_{cm,b} * 10^6$ (kJ)	Calor por carga del material a cocer de ladrillos H-10 $Q_{cm,L} * 10^6$ (kJ)	Calor por carga del material a cocer $Q_{cm} * 10^6$ (kJ)
El Recreo 2	4,10	9,35	7,90	2,30	11,78	2,14	13,92
Ladrillera	Masa húmeda unitaria del ladrillo H10X30	Masa húmeda unitaria del ladrillo H10X40	Humedad del ladrillo H10X30 (%)	Humedad del ladrillo H10X40 (%)	Calor por carga del material a cocer del ladrillo H10X30 $Q_{cm,L1} * 10^6$ (kJ)	Calor por carga del material a cocer del ladrillo H10X40 $Q_{cm,L2} * 10^6$ (kJ)	Calor por carga del material a cocer $Q_{cm} * 10^6$ (kJ)
Ocaña	5,34	6,98	6,16	2,95	98,01	9,70	107,71

Fuente: Autores

**Tabla 13.** Calor para sacar la humedad del material a cocer de los productos de la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña

Ladrillera	Masa húmeda unitaria del bloque (Kg)	Masa húmeda unitaria del ladrillo H-10 (Kg)	Calor para sacar la humedad de los bloques $Q_{wm\ b} * 10^6$ (kJ)	Calor para sacar la humedad de los ladrillos H-10 $Q_{wm\ L} * 10^6$ (kJ)	Calor para sacar la humedad del material a cocer $Q_{wm} * 10^6$ (kJ)
El Recreo 2	4,10	9,35	3,24	0,16	3,40
Ladrillera	Masa húmeda unitaria del ladrillo H10X30	Masa húmeda unitaria del ladrillo H10X40	Calor para sacar la humedad de los ladrillos H10X30 $Q_{wm\ L1} * 10^6$ (kJ)	Calor para sacar la humedad de los ladrillos H10X40 $Q_{wm\ L2} * 10^6$ (kJ)	Calor para sacar la humedad del material a cocer $Q_{wm} * 10^6$ (kJ)
Ocaña	5,34	6,98	22,29	1,02	23,31

Fuente: Autores

**Tabla 14.** Calor necesario para la descomposición química de la arcilla de los productos de la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña

Ladrillera	Calor descomposición química arcilla de bloques $Q_{dq\ b} * 10^6$ (kJ)	Calor descomposición química arcilla de ladrillos H-10 $Q_{dq\ L} * 10^6$ (kJ)	Calor descomposición química de la arcilla $Q_{dq} * 10^6$ (kJ)
El Recreo 2	5,95	1,08	7,03
Ladrillera	Calor descomposición química de la arcilla de ladrillos H10X30 $Q_{dq\ L1} * 10^6$ (kJ)	Calor descomposición química de la arcilla de ladrillos H10X40 $Q_{dq\ L2} * 10^6$ (kJ)	Calor descomposición química de la arcilla $Q_{dq} * 10^6$ (kJ)
Ocaña	53,37	5,30	58,67

Fuente: Autores

**Tabla 15.** Otros calores presentes en el proceso de cocción en la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña

Ladrillera	Masa de carbón consumida por periodo de tiempo (Kg)	Masa total de carbón (Kg)	Calor de entrada $Q_{H} * 10^6$ (kJ)	Calor por humedad del carbón $Q_{wc} * 10^6$ (kJ)	Calor por agua formada $Q_{ac} * 10^6$ (kJ)	Calor por humedad del aire $Q_{wa} * 10^6$ (kJ)	Calor por quemados $Q_i * 10^6$ (kJ)	Calor por humos $Q_h * 10^6$ (kJ)
El Recreo 2	11,11	1.500,00	49,20	0,16	2,01	1,46	1,38	0,91
Ocaña	458,88	10.370,76	340,16	1,03	12,96	9,43	9,43	2,73

Fuente: Autores

**Tabla 16.** Pérdida de calor en las paredes y techo en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña

Ladrillera	Resistencia térmica por conducción en la pared $\frac{^{\circ}K}{W}$	Resistencia térmica por conducción en el techo $\frac{^{\circ}K}{W}$	Pérdida de calor por las paredes del horno $Q_{pa} * 10^6$ (kJ)	Pérdida de calor por el techo del horno $Q_{tec} * 10^6$ (kJ)	Pérdida de calor en paredes y techo del horno $Q_k * 10^6$ (kJ)
El Recreo 2	0,0062	-	5,20	-	5,20
Ocaña	0,042	0,0029	1,09	14,45	15,54

Fuente: Autores

**Tabla 17.** Balance termodinámico en la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña

Flujos de energía	Ladrillera El Recreo 2 calor * 10 <sup>6</sup> (kJ)	Porcentaje (%)	Ladrillera Ocaña calor * 10 <sup>6</sup> (kJ)	Porcentaje (%)
Acumulación en mampostería	7,26	16,99	582,20	70,73
Calor carga a cocer	13,92	33,58	107,71	13,09
Calor humedad del material	3,40	7,96	23,31	2,83
Calor descomposición arcilla	7,03	16,45	58,67	7,13
Calor humedad del carbón	0,16	0,37	1,03	0,13
Calor agua combustión	2,01	4,70	12,96	1,57
Calor humedad del aire	1,46	3,42	9,43	1,15
Calor por inquemados	1,38	3,23	9,57	1,16
Pérdidas de calor por pared	5,20	12,17	1,09	0,13
Pérdidas de calor por techo	----	0	14,45	1,76
Calor por humos	0,91	2,13	2,73	0,33
<b>Total</b>	<b>42,73</b>	<b>100</b>	<b>823,15</b>	<b>100</b>

Fuente: Autores

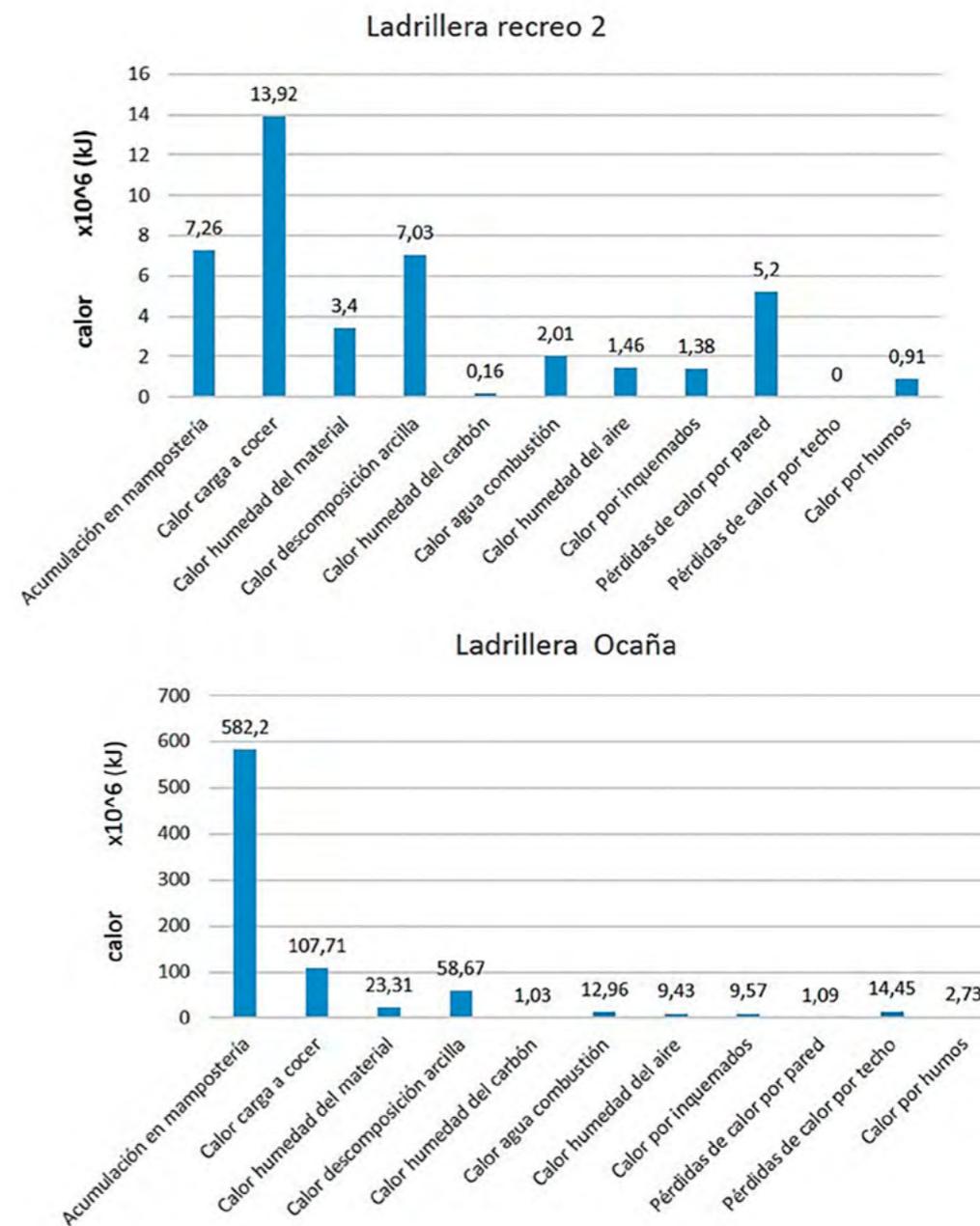
La comparación del balance termodinámico en la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña se muestran en la tabla 17 y la figura 24.

En el balance termodinámico en la ladrillera El Recreo 2 se observa que la cantidad de calor utilizada en el proceso de cocción de la arcilla es de  $24,35 * 10^6$  kJ, que significa el 57,99 % de la energía suministrada, mientras que en la ladrillera Ocaña se observa que la cantidad de calor utilizada en el proceso de cocción de la arcilla es de  $189,69 * 10^6$  kJ, que equivale al 23,05 % de la energía suministrada, teniendo en cuenta que se están acumulando o perdiendo calor en mampostería de  $582,20 * 10^6$  kJ, equivalente al

70,73 % de la energía suministrada. Como el proceso en el horno es continuo este calor no se debe tomar como una pérdida.

En la acumulación de calor en mampostería se utilizaron  $240,95 * 10^6$  kJ, de los cuales se utilizaron  $189,69 * 10^6$  kJ en el proceso de cocción de la arcilla, que significa el 78,73 % de la energía consumida y se perdieron  $51,26 * 10^6$  kJ, que significa el 21,27 % de la energía consumida, (ver figura 22) por lo anterior hace que los hornos a cielo abierto ubicados en la el municipio de Ocaña como el de la ladrillera El Recreo 2 sean muy ineficientes, mientras el horno continuo como el de la ladrillera Ocaña sea eficiente.

**Figura 22.** Balance termodinámico en la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña



Fuente: Autores

En el balance termodinámico en la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña indica que la cantidad de calor utilizada en el proceso de cocción de la arcilla es de  $24,35 * 10^6$  kJ y  $189,69 * 10^6$  kJ, la acumulación de calor en mampostería de  $7,26 * 10^6$  kJ y  $582,20 * 10^6$  kJ respectivamente mientras que la pérdida de energía en la pared del horno de la ladrillera El Recreo 2 es de  $5,20 * 10^6$  kJ, mientras que la pérdida de energía en la pared y el techo en el horno de la ladrillera Ocaña es de  $15,54 * 10^6$  kJ y por la chimenea del horno de la ladrillera Ocaña son expulsados  $2,73 * 10^6$  kJ, mientras que en el horno de la ladrillera Ocaña son expulsados  $0,91 * 10^6$  kJ.

En el horno de la ladrillera El Recreo 2 la eficiencia por calor del es de 56,99% y el rendimiento por cantidad de material cocido es de  $2.224,94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$ , mientras que en el horno de la ladrillera Ocaña la eficiencia por calor del es de 78,73% y el rendimiento por cantidad de material cocido es de  $1.521,91 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$ , por lo que el rendimiento por cantidad de material cocido del horno a cielo abierto es un 66,32% menos que el horno de la ladrillera Ocaña. En las evaluaciones efectuadas por la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) sobre hornos usados en Ecuador se estableció que la energía específica consumida al calor necesario para quemar un kg de ladrillos según la tecnología utilizada específica de quema en el horno es baja en el horno tipo Clamp cuando está entre 3.500 y 8.000  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$ ; en el tipo Escocés (caracterizado por tener paredes fijas, con zonas abiertas para el ingreso del material, que luego se sellan al igual que el techo durante la quema,

para volver a abrirse durante la descarga) es media de 2.300 a  $6.500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$  y en el tipo Hoffman 1.000 a  $2.200 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$ <sup>50</sup>.

Como la energía total requerida para quemar un kg de ladrillo en las condiciones típicas asumidas en la ladrillera Ocaña es de  $1.521,91 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$  entre los valores de tecnología alta; en la ladrillera El Recreo 2, en cambio, es de  $2.224,94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$  por lo cual esta entre los valores de tecnología media.

La cantidad actual mensual de material a cocer en el horno de la ladrillera Ocaña es:

$$611.320 \frac{\text{productos}}{\text{mes}} * 9,35 \text{ kg} = 5.715.842 \frac{\text{kg material}}{\text{mes}}$$

La energía mensual utilizada en la ladrillera Ocaña para cocer los productos con un rendimiento por cantidad de material cocido de  $1.521,91 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$  es:

$$5.715.842 \frac{\text{kg material}}{\text{mes}} * 1.521,91 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}} = 8.698.997.098 \frac{\text{kJ}}{\text{mes}}$$

Para realizar el ahorro de energía se considera que todas las ladrilleras cambiarán de tecnología, pasando de cielo abierto a hornos continuos.

La cantidad actual mensual de material a cocer en los hornos a cielo abierto es:

$$416.280 \frac{\text{productos}}{\text{mes}} * 4,10 \text{ kg} = 1.706.748 \frac{\text{kg material}}{\text{mes}}$$

<sup>50</sup> (Escuela Politécnica del Litoral ESPOL, 2009)

La energía mensual utilizada en las ladrilleras a cielo abierto para cocer los productos con un rendimiento por cantidad de material cocido de  $2.224,94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$  es:

$$1.706.748 \frac{\text{kg material}}{\text{mes}} * 2.294,94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}} = 3.916.884.255 \frac{\text{kJ}}{\text{mes}}$$

Si se cambiara de hornos a cielo abierto a horno continuos tomando un rendimiento por cantidad de material cocido de  $1.521,91 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$  y una producción de 416.280 productos, la energía mensual es:

$$1.706.748 \frac{\text{kg material}}{\text{mes}} * 1.521,91 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}} = 2.597.516.849 \frac{\text{kJ}}{\text{mes}}$$

Por lo tanto, el ahorro de energía mensual al cambiar de hornos de cielo abierto a continuos es:

$$\text{Ahorro mensual de energía} = (3.916.884.255 - 2.597.516.849) \frac{\text{kJ}}{\text{mes}}$$

$$\text{Ahorro mensual de energía} = 1.319.367.406 \frac{\text{kJ}}{\text{mes}}$$

## 4.1 Analogía curvas de cocción en el proceso

Se realizó la comparación de la curva teórica de temperaturas establecida por (Fernandez, 2000), y se le practicó un análisis termocodilatométrico a la arcilla con la curva de cocción real de la arcilla obtenida en la adquisición de temperatura. En las figuras 23, 24 y 25 se observa la comparación de las curvas reales obtenidas de la arcilla

en las dos adquisiciones para cada ladrillera estudiada con la curva teórica correspondiente a la arcilla.

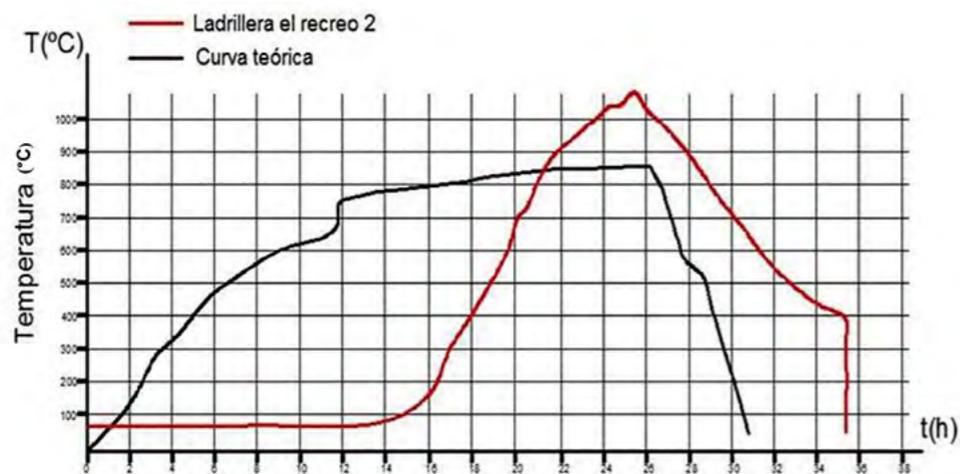
Al comparar la curva teórica con la curva real se evidencia un gran desfase durante las primeras horas del precalentamiento entre la curva de cocción para los productos y la curva real obtenida en la adquisición en el horno de la ladrillera El Recreo 2, mientras que en el horno de la ladrillera Ocaña existe una mayor concordancia entre la curva de cocción para los productos con la curva teórica.

Al inicio, en el periodo de humeo se observa que en el horno de la ladrillera El Recreo 2 la pasta no alcanzó los 400 °C a las 6 horas de haber comenzado la cocción. Las mediciones efectuadas no daban más de 120 °C, lo que significa que se estaba efectuando un calentamiento muy lento, precisamente en una zona en que el peligro de roturas es mínimo. Estas 6 primeras horas de cocción pueden considerarse mal aprovechadas. Por otro lado, el horno de la ladrillera Ocaña alcanzó los 450 °C.

La fase de humeo se extendió en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y, en efecto, hubo un aumento en la propagación de vapor de agua y en la dilatación de la pasta. Se entiende entonces que si la mayor cantidad de humos es liberada en esta parte<sup>51</sup>, el agua higroscópica es extraída del ladrillo, lo que representa un periodo de dilatación por acumulación de vapor en la pieza.

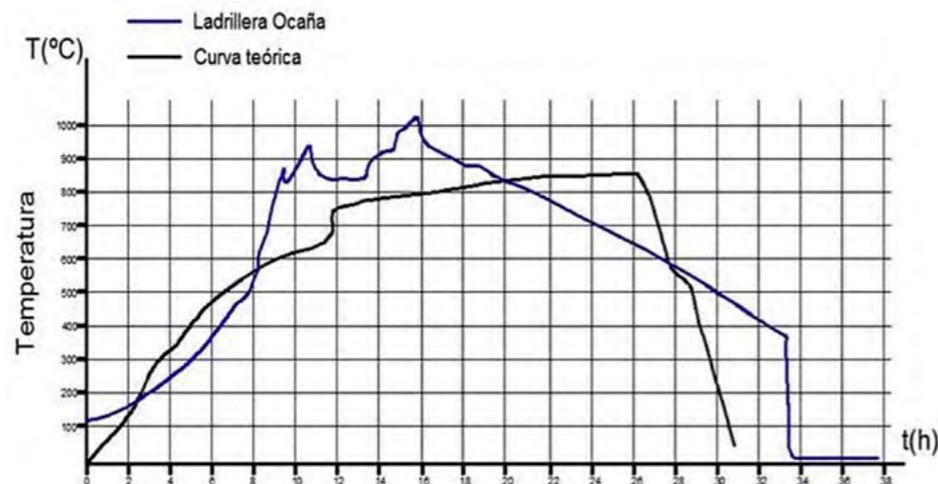
<sup>51</sup> (Fernandez, 2000)

**Figura 23.** Curva de cocción real y teórica del producto en la ladrillera El Recreo 2



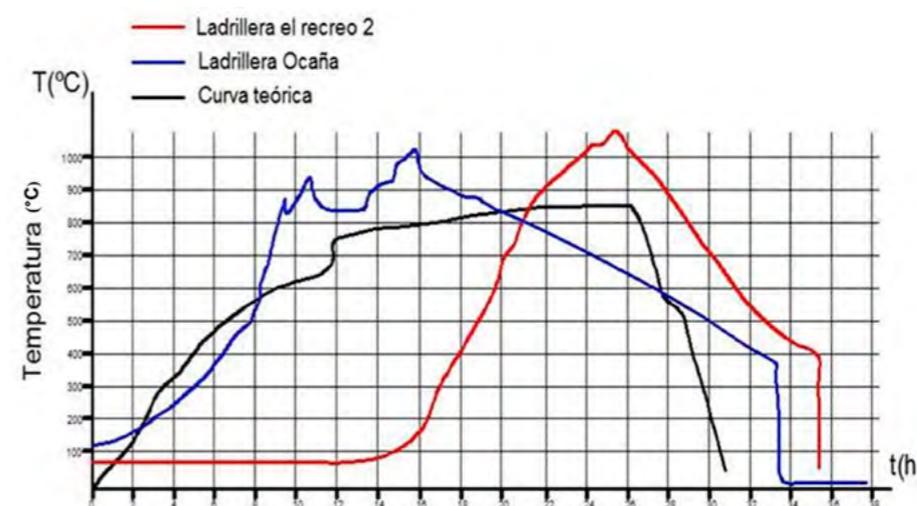
Fuente: Autores

**Figura 24.** Curva de cocción real y teórica del producto en la ladrillera Ocaña



Fuente: Autores

**Figura 25.** Curva de cocción real y teórica del producto en la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña



Fuente: Autores

En las 6 horas siguientes se produjo la fase descomposición de la materia orgánica. En esta se eliminó el agua combinada, aumentó la porosidad y se retractsó la pasta. Se aprecia, en la curva en el horno de la ladrillera El Recreo 2, una baja velocidad de calentamiento y, en cambio, en la curva en el horno de la ladrillera Ocaña así como en la curva teórica, sucede todo lo contrario, es decir, se acelera dicha velocidad, registrando en el horno de la ladrillera Ocaña su máxima pendiente a los 600 °C por el rápido calentamiento que tiene lugar al acercarse el carbojet al material. Esto provoca que las piezas se agrieten en las caras y aristas más directamente expuestas al fuego, pues las dilataciones en las periferias y el núcleo de la pieza no ocurren uniformemente.

El desfase entre la curva teórica y la curva en el horno de la ladrillera El Recreo 2, es

mucho más acentuado. Dicho desfase puede dar lugar a una auténtica lluvia ácida sobre el material seco estacionado en la zona de entrada, ahuecando toda su estructura y manchando las superficies expuestas a los gases.

Por otra parte, una porción de la curva de cocción en el horno de la ladrillera Ocaña se mantiene constante en una temperatura promedio de 800 °C. Esto es entendible cuando se tiene en cuenta que entre los 800 °C y los 900 °C sucede la contracción más importante de la arcilla, por lo que se hace necesario garantizar una temperatura uniforme en todo el horno antes de que se alcance los 800 °C, para luego ir aumentándola gradualmente. De hacerse lo contrario, se presentarán diferencias de contracciones entre las zonas más frías y las más calientes del apile, lo que generaría peligrosas tensiones de tracción y fisuras.

La temperatura máxima en el horno de la ladrillera Ocaña fue de 1.000 °C, y en el horno de la ladrillera El Recreo 2 fue de 1.050 °C, donde la fase de maduración de la pasta se completa. En este momento la pasta empieza a vitrificarse, lo que aumentará la resistencia mecánica a la pieza.

El enfriamiento en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña es más lento que el de la curva teórica, soportando sin problemas las tensiones producidas por un enfriamiento rápido.

La pieza finalmente cocida empieza a enfriarse, disminuyendo su temperatura paulatinamente por la pérdida de energía transferida hacia las paredes del horno y el ambiente.

## 5. Mejoras en los procesos de producción de cerámicos por la implementación de buenas prácticas

El enfoque de las mejoras en las actividades de ladrilleras artesanales responde al interés de generar un ahorro de combustible, así como al propósito de cambiar el combustible con miras a mejorar la salud y la calidad de vida. De igual manera, se busca que los procesos sean lo más ecoeficientes posible y permitan promover la formalización de los microempresarios.

### 5.1 Factores de influencia en el mejoramiento de la producción de cerámicos

Los factores que influyen en el exceso de consumo de combustible y altos índices de contaminación ambiental por la industria ladrillera en el municipio de Ocaña, y que pueden ser mejorados, son los siguientes:

### 5.1.1 Ubicación de la planta productora

La mayoría de los chircales en el municipio de Ocaña están ubicados en las afueras de la ciudad. Sin embargo, la tendencia es instalar los chircales lo más cerca posible a las canteras de arcilla con los mejores rendimientos para la fabricación de ladrillos, a fin de obtener productos más homogéneos y de mejor calidad.

### 5.1.2 Materia prima

Se recomienda no promover la explotación irracional de las canteras para extraer la arcilla y tierra utilizada como materia prima, debido a que afecta la morfología y estabilidad de los suelos, generando procesos erosivos y riesgos de deslizamientos.

### 5.1.3 Tipo de combustible utilizado

Es importante eliminar el uso de combustibles altamente contaminantes como llantas, plásticos, aceites y utilizar combustible más ecoeficiente en la quema o cocción como gas natural, gas licuado, combustibles líquidos con bajo contenido de azufre como diésel, carbón de Piedra, aserrín de madera y cáscara de arroz y café. Así se lograría disminuir las emisiones de contaminantes a la atmósfera mediante el uso de un combustible más limpio y más eficiente y una combustión eficiente aprovechando al máximo la energía disponible en el combustible.

Es necesario identificar a los proveedores que suministren combustibles de buena calidad, asegurar el aprovisionamiento de combustible sin impurezas indeseables y evitar problemas ambientales, generando ahorros

de combustible por requerirse menor cantidad de combustible por ladrillo a quemar.

Es preciso comprar combustible en lotes grandes y directamente al productor, lo que redundará en ahorros por volumen de compra y en el flete del transporte del combustible y asegura el abastecimiento de combustible de buena calidad a precios competitivos.

También se deben implementar prácticas de orden y limpieza en los lugares de almacenamiento y manipulación, disponer de espacios distintos para almacenar materias primas, productos, residuos y combustible, y llevar un control de su uso y un inventario permanente de las cantidades existentes a fin de programar la frecuencia y oportunidad de las adquisiciones, lo que permitirá tener un control permanente de las existencias y programar las compras de materia prima y combustible.

Además, se necesita implementar sistemas para medir y controlar la dosificación de combustible, colocando medidores de flujo para el caso de combustibles líquidos o gaseosos y balanzas de pesaje para combustibles sólidos, disminuyendo el consumo de combustible por dosificación adecuada y logrando el mejor control de la cocción por exceso o falta de combustible respectivamente.

### 5.1.4 Tecnología de fabricación empleada en la preparación de ladrillo crudo, mezcla y moldeo

Se necesita, por otra parte, tamizar la materia prima para eliminar piedras, raíces, pedazos

de madera y otros elementos indeseables que afectan la calidad de la mezcla y del producto final, además elimina impurezas que reducen las propiedades de los productos.

También deben determinarse las proporciones de los componentes de la mezcla que den mejores resultados según el tipo de producto que se quiere producir, logrando así mayor productividad y estandarización de la mezcla.

Se recomienda implementar el uso de equipos mecánicos como mezcladora, amasadora, etc., para mejorar el proceso de mezcla y amasado, incrementando de tal modo la producción por reducción en el tiempo de amasado y mejor acabado de los productos sus propiedades.

### 5.1.5 Tecnología de proceso empleada en la cocción

Se deben utilizar combustibles limpios o de bajo impacto ambiental en el proceso de cocción o quema de ladrillos, a fin de evitar la contaminación atmosférica, multas y sanciones de los organismos de control ambiental. También es recomendable aumentar el espesor de las paredes y cúpula de los hornos para lograr una mayor eficiencia de quemado para evitar la pérdida de calor y ahorrar combustible.

### 5.1.6 Gestión de recursos

Establecer espacios para depositar en forma segregada los residuos generados en el proceso (cenizas, escombros, etc.), con la posibilidad de reciclaje y reutilización interna.

### 5.1.7 Higiene, seguridad y protección personal

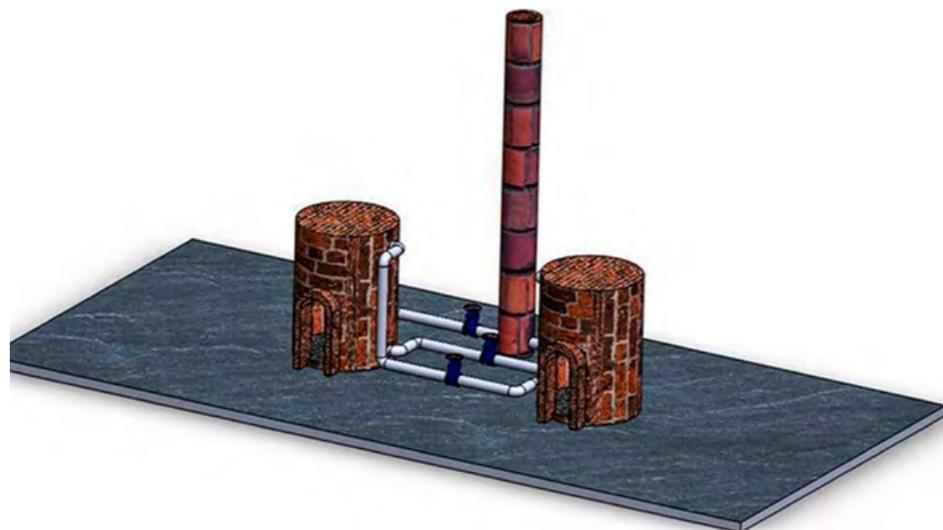
Deben utilizarse elementos de protección individual en la prevención y disminución de riesgos laborales.

Entrenar y capacitar al personal en la aplicación del manual de higiene y seguridad industrial, para prevenir accidentes laborales.

### 5.1.8 Adecuaciones

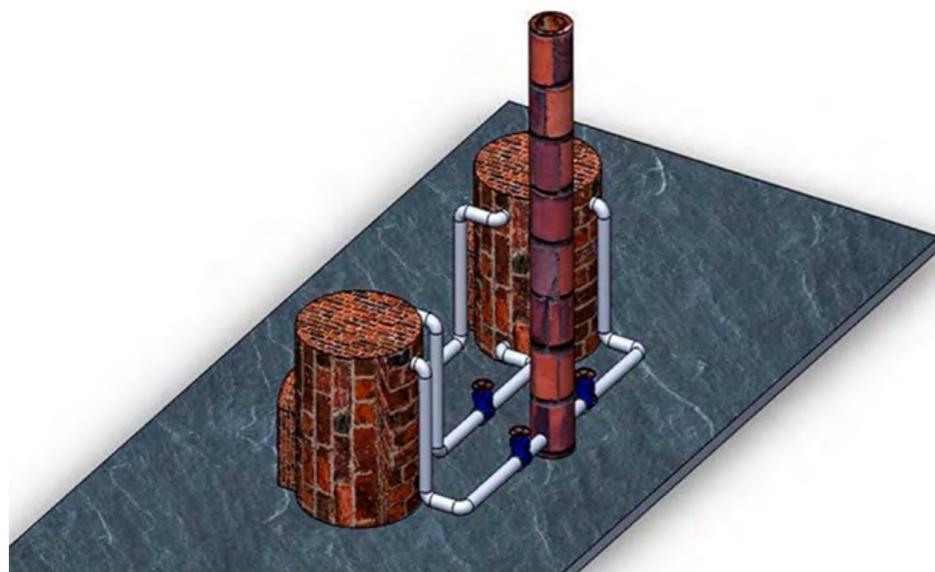
Las adecuaciones a los hornos a cielo abierto como estrategia de disminución del consumo de combustible, de reducción del consumo de energía y de disminución de la emisión de gases al ambiente, se pueden ver en las figuras 99 y 100. También se observan innovaciones o mejoras que se pueden aplicar fácilmente y tienen bajo costo de implementación, pues es posible introducir cambios operativos que conlleven a cambiar el diseño del horno que conduzca a la reutilización de los gases de escape. Una solución viable sería dirigirlos hacia el interior de otro horno ya preparado y cargado, haciendo que los gases pasen a través del interior del horno antes de ir a la chimenea. De esa manera, los gases calientes harían intercambio de calor entre sí, proporcionando un precalentamiento de la siguiente carga de productos y el secado de los productos. La producción de los hornos se hará de forma secuencial y en ciclos, elevando su temperatura y logrando que el gradiente de temperatura sea vertical. Este cambio requiere solo unas pocas obras en la ladrillera (ver figuras 26 y 27).

**Figura 26.** Adecuaciones en los hornos a cielo abierto



Fuente: Autores

**Figura 27.** Recirculación de gases producto de la combustión



Fuente: Autores

## 6. Análisis y síntesis

El diseño y la creación de una interfaz gráfica permitió la realización de la adquisición de temperatura en los hornos en cuestión, evidenciando el potencial de la herramienta computacional, con el fin de lograr una reducción en el consumo de energía y un mejor conocimiento del proceso de cocción en su conjunto y la búsqueda de una mayor calidad en los productos.

La diferencia de temperaturas entre la base y la parte alta de la carga en la cámara de cocción en el horno de la ladrillera El Recreo 2 y Ocaña es 550 °C y 300 °C respectivamente, por lo tanto las quemas son deficitarias. Esto puede ocasionar que se funda la carga cercana a las llamas del hogar del horno y que quede cruda la carga colocada en la parte más alta.

En la adquisición de datos de temperaturas de los gases de escape en los hornos seleccionados se evidenciaron temperaturas que oscilan alrededor de los 100 °C a la salida de los gases producto de la combus-

tión implicando grandes posibilidades de recuperación de calor residual en el aprovechamiento de secado de piezas, secado y precalentamiento de aire de combustión.

El incremento de temperatura registrada, superior a los 20 °C por hora en la etapa de cocción, afecta los estándares comerciales de calidad.

En el balance termodinámico en la ladrillera El Recreo 2 se observa que la cantidad de calor utilizada en el proceso de cocción de la arcilla es de  $24,35 * 10^6$  kJ, que significa el 57,99 % de la energía suministrada, mientras que en la ladrillera Ocaña se observa que la cantidad de calor utilizada en el proceso de cocción de la arcilla es de  $189,69 * 10^6$  kJ, que significa el 23,05 % de la energía suministrada, teniendo en cuenta que se están acumulando o perdiendo calor en mampostería de  $582,20 * 10^6$  kJ, que significa el 70,73 % de la energía suministrada.

La acumulación de calor en mampostería en el horno de la ladrillera El Recreo 2 es de  $7,26 * 10^6$  kJ, que significa el 16,99 % de la energía suministrada, mientras que en el horno de la ladrillera Ocaña es de  $582,20 * 10^6$  kJ, que significa el 70,73 % de la energía suministrada.

La pérdida de energía en la pared del horno de la ladrillera El Recreo 2 es de  $5,20 * 10^6$  kJ, que significa el 12,17 % de la energía suministrada, mientras que la pérdida de energía en la pared y el techo en el horno de la ladrillera Ocaña es de  $15,54 * 10^6$  kJ, que significa el 1,89 % de la energía suministrada. Este porcentaje se puede reducir

implementando el aislamiento en las paredes y el techo del horno.

Por la chimenea del horno de la ladrillera Ocaña son expulsados  $2,73 * 10^6$  kJ, que significan el 0,33 % de la energía liberada en la combustión, mientras que en el horno de la ladrillera El Recreo 2 son expulsados  $0,91 * 10^6$  kJ, que significa el 2,13 % de la energía liberada en la combustión. Esta porción se puede reutilizar en procesos tales como el secado de los productos y el combustible utilizado en la combustión.

La energía perdida por intangibles en el horno de la ladrillera El Recreo 2 es de  $6,46 * 10^6$  kJ, que significa el 13,13 % de la energía suministrada, mientras que en la ladrillera Ocaña es de  $99,21 * 10^6$  kJ que significa el 29,17 % de la energía consumida. Esta pérdida es bastante alta, lo que amerita reconsiderar algunos factores utilizados en los cálculos del balance termodinámico y tomados de la bibliografía disponible, como son la densidad volumétrica, el calor específico y la conductividad térmica del ladrillo utilizado en la construcción del horno, el calor específico de las arcillas locales y la composición química del carbón utilizado para la combustión.

Mediante la realización de los balances de energía se pudo determinar el destino de toda la energía térmica suministrada al horno, incluyendo la tasa de energía disponible que es expulsada al ambiente y que puede ser de su uso en otras fases del proceso, tales como el secado de los productos directamente en el propio horno o para calentar el aire de combustión.

En el municipio de Ocaña se encuentran 30 empresas del sector cerámico con una producción aproximada de 1.027.600 productos/mes dedicadas exclusivamente a la fabricación de materiales para la construcción como ladrillos, bloque y teja, que de acuerdo con la clasificación hecha en el Artículo 20 de la Ley 905 de 2004, el 96,67 % son empresas pequeñas que realizan la quema de carbón sobre parrilla fija con una cantidad de 416.280 productos correspondiente al 40,51 % de la producción mensual total en el municipio de Ocaña mientras que el horno continuo de la ladrillera Ocaña representa el 3,34 % con una cantidad de 611.320 productos correspondiente al 59,49 % de la producción.

El promedio de la eficiencia de combustión en el horno continuo fue de 88,22 % en comparación con las eficiencias bajas de los hornos a cielo abierto monitoreados con un promedio de 52,78 %.

En el horno de la ladrillera El Recreo 2 solamente se aprovecha el 56,99 % de la energía suministrada para cocinar los productos y el 43,01 % se pierde mientras en la ladrillera Ocaña se aprovecha el 78,73 % de la energía suministrada y pierde 21,27 %.

El rendimiento por cantidad de material cocido por mes en el horno de la ladrillera El Recreo 2 es de  $2.224,94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$ , mientras que en el horno de la ladrillera Ocaña es de  $2.224,94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$ , por lo que en el horno de la ladrillera El Recreo 2 se requiere mensualmente de  $2.224,94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$  más que en el horno de la ladrillera Ocaña.

La energía mensual utilizada en las ladrilleras a cielo abierto para cocer los 416.280 productos, con un rendimiento por cantidad de material cocido por mes de  $2.224,94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$  es  $3.916.884.255 \frac{\text{kJ}}{\text{mes}}$ , mientras que si se cambiara de hornos a cielo abierto a horno continuo tomando un rendimiento por cantidad de material cocido de  $1.521,91 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$  y una producción de 416.280 productos, la energía mensual es  $2.597.516.849 \frac{\text{kJ}}{\text{mes}}$ , que representa un ahorro de  $1.319.367.406 \frac{\text{kJ}}{\text{mes}}$ .

Los consumos específicos de energía en los hornos estudiados están en los rangos establecidos por ESPOL, lo que indica que la evaluación termodinámica es confiable.

La industria cerámica del municipio de Ocaña no posee el capital necesario para implementar sistemas de control de adquisición de temperatura y de inyección de carbón pulverizado o de tecnología que minimice el impacto ambiental, debido a que el 96,67 % de las empresas son pequeñas.

Uno de los grandes problemas para crecer y darle sostenibilidad al mercado de los carbones del interior del país y de exportación es la informalidad de la minería, por lo cual se enfatiza en la importancia de trabajar en pos de la consolidación de la actividad minera con visión empresarial.

En términos generales, se evidenció que la ladrillera Ocaña presenta indicadores más elevados en los tres aspectos evaluados; esto indica una ecoeficiencia mayor.

En los requerimientos de energía se observa que la ladrillera El Recreo 2 presenta un

rendimiento por cantidad de material cocido por mes de  $2.224,94 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$  mientras que en la ladrillera Ocaña es de  $1.521,91 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$  lo que significa que la ladrillera El Recreo 2 consume  $703,03 \frac{\text{kJ}}{\text{kg material}}$  más que la ladrillera Ocaña.

## 7. Bibliografía

- Academia Colombiana de Ciencias Exactas, F. N. (2003). *Factores de Emisión de los Combustibles Colombianos*. Bogotá: Unidad De Planeación Minero Energético.
- Alcaldía Municipal de Ocaña. (2011). *Plan Básico de Ordenamiento Territorial PBOT*. Ocaña.
- British Estandar Test Code. (1995). *Normas para el Cálculo del Balance Térmico en Hornos de Ladrillo*.
- Cengel, Y. A. (2009). *Transferencia de Calor y Masa*. México: Mc Graw Hill.
- Chandía Moraga, A. (2004). *Desarrollo de un Ladrillo de Trayectoria Térmica Máxima*. Concepción: Universidad del Bío-Bío.
- Cuéllar Henríquez, E. (2011). *Evaluación de la Resistencia a la Fractura de los Ladrillos de Barro Fabricados por Compresión*. San Salvador: Universidad Centroamericana.
- Dadam, A. P. (2005). *Análise Térmica de un Forno Tunel Utilizado na Indústria de Cerâmica Vermelha*. Florianopolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Escuela Politécnica del Litoral ESPOL. (2009). *Combustión en Hornos*. Guayaquil.
- Fernandez, M. (2000). *Cocción de Productos Cerámicos*. Laboratorio Técnico Cerámico.
- Gómez Coello, V. (2012). *Análisis Comparativo de la Contaminación Atmosférica Producida por la Combustión en Ladrilleras Artesanales Utilizando Tres Tipos de Combustible*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.

- Jácome Manzano, S. A. (2015). *Evaluación Termodinámica del Proceso de Cocción y Análisis de Gases en Hornos a Cielo Abierto y Hoffman en Ocaña*. Ocaña: Universidad Francisco De Paula Santander Ocaña.
- Meneses Calderon, J. A. (2003). *Evaluación de las Pérdidas en los Hornos Tipo Colmena de Tiro Invertido*. Cúcuta: Universidad Francisco De Paula Santander.
- Ministerio de Ambiente y Vivienda. (2010). *Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas*. Bogotá.
- Muller, C. (2010). *Manual de Aire Acondicionado y Calefacción*. México: Alfaomega.
- NASA. (s.f.).
- Oba, R. (2011). *Análisis Térmico Numérico e Experimental de un Forno Túnel*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Serrano Trillos, C. (1999). *Estudio Teórico Práctico del Proceso de Combustión de los Hornos de Tiro Invertido para el Chircal Sal Luis de Cúcuta*. Cúcuta: Universidad Francisco De Paula Santander.
- Vera Duarte, L. E. (2003). *Análisis Termodinámico y Simulación de un Horno Tipo Colmena de Tiro Invertido*. Cúcuta: Universidad Francisco De Paula Santander.

	<b>SU OPINIÓN</b>	
<p>Para la Editorial UPB es muy importante ofrecerle un excelente producto. La información que nos suministre acerca de la calidad de nuestras publicaciones será muy valiosa en el proceso de mejoramiento que realizamos. Para darnos su opinión, comuníquese a través de la línea (57)(4) 354 4565 o vía e-mail a <a href="mailto:editorial@upb.edu.co">editorial@upb.edu.co</a> Por favor adjunte datos como el título y la fecha de publicación, su nombre, e-mail y número telefónico.</p>		

Este trabajo inicia identificando la problemática que viven las industrias cerámicas del municipio de Ocaña dedicadas a la producción de materiales cerámicos en el municipio de Ocaña. Luego se identificaron las empresas ladrilleras dedicadas a la producción de materiales cerámicos en el municipio de Ocaña, se realizó una descripción del proceso de producción de materiales cerámicos a las ladrilleras seleccionadas, seguidamente se realizó una adquisición de datos de temperaturas en el proceso de cocción y enfriamiento para determinar la energía necesaria para el proceso de cocción, además se evaluó el requerimiento de aire para la combustión, así como la medición de las emisiones producto de la combustión y los resultados de las mediciones de los contaminantes fueron corregidos a condiciones de referencia, de acuerdo con lo establecido en el artículo 86 de la resolución 909 del 5 de junio de 2008 emanada por el Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Finalmente se plantearon algunas mejoras en los procesos de producción, recomendaciones en el diseño de los hornos desde el punto de vista estructural.



ISBN: 978-958-764-559-0

