



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**"DETERMINAR LOS PERFILES DE TEMPERATURA  
DE UN HORNO PARA LADRILLOS DEL SECTOR  
CHAMBO"**

**GONZÁLEZ ESCOBAR MARÍA ISABEL**

**TESIS DE GRADO**

**PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

*Riobamba – Ecuador*

2011

**Epoch**

Facultad de Mecánica

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS**

---

**CONSEJO DIRECTIVO**

Noviembre, 10 del 2011

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

**MARÍA ISABEL GONZÁLEZ ESCOBAR.**

---

Titulada:

**“DETERMINACIÓN DE LOS PERFILED DE TEMPERATURA DE UN HORNO PARA LADRILLOS DEL SECTOR CHAMBO ”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERA MECÁNICA**

---

Ing. Geovanny Novillo A.

DECÁNO DE LA FAC. DE MECÁNICA

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Rodrigo Díaz B.

DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Ramiro Valenzuela S.

ASESOR DE TESIS

---

## CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:**      MARÌA ISABEL GONZÀLEZ ESCOBAR.

**TÍTULO DE LA TESIS:**      “DETERMINACIÓN DE LOS PERFILES DE TEMPERATURA DE UN HORNO PARA LADRILLOS DEL SECTOR CHAMBO”

**Fecha de Examinación:**              Noviembre 10 del 2011.

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
ING. GEOVANNY NOVILLO (Presidente Trib. Defensa)			
ING. RODRIGO DÍAZ F. (Director de Tesis)			
ING. RAMIRO VALENZUELA S. (Asesor)			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:**      \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal quien certifica al Consejo Directivo que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

f) Presidente del Tribunal

## TABLA DE CONTENIDOS

<u>CAPÍTULO</u>		<u>PÁGINA</u>
<b>1</b>	<b>GENERALIDADES</b>	
1.1	ANTECEDENTES.....	1
1.2	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3	JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4	OBJETIVOS.....	4
1.4.1	OBJETIVO GENERAL.....	4
1.4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
<b>2</b>	<b>MARCO TEORICO DE LOS HORNOS PARA LADRILLO</b>	
2.1	DIAGNÓSTICO DE LOS HORNOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA LADRILLERA DE LA REGIÓN.....	6
2.1.1	GENERALIDADES SOBRE SU DISEÑO.....	6
2.1.2	IDENTIFICACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE HORNO.....	8
2.1.2.1	HORNOS DE BÓVEDA DE TIRO ASCENDENTE.....	8
2.1.3	DESCRIPCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y FUNCIONAMIENTO DEL HORNO TRADICIONAL.....	9
2.1.3.1	MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.....	9
2.1.3.2	CONSTRUCCIÓN O ALBAÑILERÍA DEL HORNO.....	9
2.1.4	TIPO DE OPERACIÓN DEL HORNO.....	10
2.2	MANTENIMIENTO.....	11
2.2.1	EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL HORNO EN EL PROCESO DE QUEMA.....	12
2.3	TIPO DE COMBUSTIBLE QUE UTILIZA.....	13
2.4	PROCESO DE PRODUCCIÓN.....	13
2.4.1	MEZCLADO.....	14
2.4.2	MOLDEO.....	15
2.4.3	SECADO.....	17
2.4.4	HORNEADO.....	19
2.5	EVALUACIÓN DE LA EMISIÓN DE GASES TÓXICOS A LA ATMÓSFERA.....	20
2.6	PROBLEMAS ENCONTRADOS EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS HORNOS TRADICIONALES.....	22

2.6.1	COMBUSTIÓN INCOMPLETA DE LOS COMBUSTIBLES EMPLEADOS.....	22
2.6.2	EL DISEÑO DE LOS HORNOS.....	23
2.6.3	CALIDAD DEFICIENTE DE LOS PRODUCTOS.....	23
2.6.4	EXCESIVA GENERACIÓN DE DESPERDICIOS SÓLIDOS.....	24
2.7	OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES Y PARÁMETROS FÍSICOS..	24
2.7.1	PROPIEDADES DEL SOLIDO.....	24
2.7.2	PROPIEDADES DEL GAS.....	25
2.7.3	PARÁMETROS FÍSICOS.....	26
2.7.3.1	TEMPERATURA TEÓRICA DE FLAMA.....	28
2.7.3.2	VELOCIDAD DE ASCENSO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN.....	28
2.7.3.3	POROSIDAD DE LA PILA DE LADRILLOS.....	28
2.7.3.4	COEFICIENTE AV.....	29
2.7.3.5	FACTOR GEOMÉTRICO.....	31
2.8	COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	31
2.8.1	COEFICIENTE INTERNO.....	31
2.8.2	COEFICIENTE ENTRE LA PARED DEL HORNO Y EL MEDIO AMBIENTE.....	32
2.8.3	COEFICIENTE ENTRE EL DOMO Y EL MEDIO AMBIENTE.....	32
2.8.4	COEFICIENTE GLOBAL EN LA PARED DEL HORNO.....	33
2.8.5	COEFICIENTE GLOBAL EN EL DOMO DEL HORNO.....	33
2.9	EFICIENCIA DEL HORNO.....	33

### **3 ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL HORNO**

3.1	MODELO PARA UN HORNO TRADICIONAL PARA LADRILLOS...	34
3.2	METODOLOGÍA.....	35
3.2.1	SELECCIÓN DE LAS VARIABLES DE INTERÉS.....	36
3.2.1.1	TEMPERATURA DE FLAMA.....	36
3.2.1.2.	TEMPERATURA AMBIENTE.....	37
3.2.1.3.	ESPACIADO.....	37
3.2.1.4	VELOCIDAD DE ASCENSO DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN....	37
3.2.1.5	ESPESOR DE LA PARED.....	38
3.3	FORMULACIÓN MATEMÁTICA.....	38
3.3.1	HORNO CUADRADO MODELO 2D.....	39

3.3.2	CÁLCULO DE LA TEMPERATURA PROMEDIO.....	41
3.4	CÁLCULO DE LA POROSIDAD Y EL COEFICIENTE AV.....	41
3.5	CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR.....	42
3.6	CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DEL HORNO SIN LAS AYUDAS.....	43
<b>4</b>	<b>DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS EN EL HORNO</b>	
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
4.1	EFFECTO DE LAS VARIABLES EN LA TEMPERATURA PROMEDIO	44
4.2	POROSIDAD DE LA PILA CONTRA TEMPERATURA PROMEDIO..	47
4.3	ANÁLISIS DE LAS LIMITACIONES EN LOS MODELOS MATEMÁTICOS.....	48
4.4	PERFILES DE TEMPERATURA DEL HORNO CUADRADO 2 D.....	50
4.5	COMPARACIÓN DEL LOS PERFILES DE TEMPERATURA DEL HORNO CUADRADO CON LOS CANALES DE AYUDA Y SIN LOS CANALES DE AYUDA.....	51
4.6	PERFILES DE TEMPERATURA DE LOS LADRILLOS.....	55
4.7	PERFILES DE TEMPERATURA PARA EL HORNO CON EL BLOQUE DE LADRILLOS.....	58
4.8	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	60
4.9	EFICIENCIAS TÉRMICAS ENCONTRADAS POR MEDIO DEL SOFTWARE.....	60
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
5.1	Conclusiones.....	62
5.2	Recomendaciones.....	64

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### BIBLIOGRAFÍA

### LINKOGRAFÍAS

### ANEXOS

## LISTA DE TABLAS

<u>TABLA</u>	<u>PÁGINA</u>
2.1 Materiales característicos y partes comunes de un horno para ladrillos.....	10
2.2 Poderes caloríficos de la leña.....	13
2.3 Agentes contaminantes producidos por las emisiones de los hornos	21
2.4 Propiedades físicas del ladrillo.....	25
2.5 Propiedades físicas de los gases de combustión.....	25
2.6 Formulas utilizadas para la obtención física del gas.....	26
2.7 Datos tomados en los hornos.....	28
2.8 Comparación de correlación para obtener h.....	32
3.1 Condiciones frontera del sólido para el horno cuadrado en 2d.....	40
3.2 Condiciones frontera del gas para el horno cuadrado en 2d.....	40
4.1 Efecto de la temperatura de flama sobre la temperatura promedio del horno.	45
4.2 Efecto de la temperatura ambiente sobre la temperatura promedio del horno	45
4.3 Efecto del espaciado sobre la temperatura promedio del horno.....	46
4.4 Efecto del espesor de pared sobre la temperatura promedio del horno.....	47
4.5 efecto de la porosidad sobre la temperatura promedio para hornos de 15 mil ladrillos.....	48

## LISTA DE FIGURAS

<b><u>FIGURA</u></b>		<b><u>PAGINA</u></b>
2.1	Horno de bóveda de tiro ascendente.....	9
2.2	Etapas para la fabricación del ladrillo.....	13
2.3	Tractor Agrícola para la elaboración de la mezcla.....	15
2.4	Moldeo con gavera.....	16
2.5	Eliminación de sobrantes con un rasero.....	16
2.6	Ladrillos moldeados sobre el suelo.....	17
2.7	Horno en funcionamiento.....	19
2.8	Ladrillos deficientes.....	24
2.9	Variables que determinan la porosidad en la pila de ladrillos.....	30
2.10	Ubicación de los coeficientes de transferencia de calor.....	31
3.1	Condiciones frontera del sólido en el horno cuadrado 2D.....	39
4.1	Porosidad de la pila vs espaciado.....	48
4.2	Perfiles de temperatura para el horno cuadrado sin canales de ayuda.....	51
4.3	Perfiles de temperatura para el horno cuadrado .....	53
4.4	Perfiles de temperatura para el horno cuadrado con canales de ayuda.....	53
4.5	Curva característica.....	54
4.6	Temperatura del nodo 26 sin canales de ayuda.....	54
4.7	Temperatura del nodo 26 con canales de ayuda.....	54
4.8	Perfil de temperatura para el primer tramo de ladrillos.....	55
4.9	Perfil de temperatura para el segundo tramo de ladrillos.....	56
4.10	Perfil de temperatura para el último tramo de ladrillos.....	57
4.11	Temperatura en el interior de los ladrillos.....	57
4.12	Temperatura en la cara interna de la superficie de los ladrillos.....	58
4.13	Perfiles de temperatura para el horno sin canales de ayuda.....	58
4.14	Perfiles de temperatura para el horno con canales de ayuda.....	59
4.15	Curva característica en el nodo 26.....	59
4.16	Temperaturas nodales sin canales y con canales de ayuda.....	60
4.17	Resultados del programa.....	61

## **LISTA DE ANEXOS**

**Anexo A.** Normas mexicanas para la fabricación de ladrillos.

**Anexo B.** Productos malogrados por el proceso de cocion.

## NOMENCLATURA

<b>A<sub>v</sub></b>	coeficiente característico, $\text{cm}^2 \text{ cm}^{-3}$
<b>C<sub>p</sub></b>	Capacidad calorífica a presión constante $\text{cal g}^{-1}\text{K}^{-1}$
<b>h</b>	coeficiente de transferencia de calor $\text{cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ K}^{-1}$
<b>k</b>	conductividad térmica $\text{cal cm}^{-1} \text{ min}^{-1} \text{ K}^{-1}$
<b>L</b>	altura del horno , cm.
<b>p</b>	presión $\text{N cm}^{-2}$
<b>S</b>	factor geométrico (altura/mitad del ancho) $\text{cm/cm}$
<b>t</b>	tiempo, min.
<b>T</b>	temperatura ° C
<b>T<sub>a</sub></b>	temperatura ambiente °C
<b>T<sub>f</sub></b>	temperatura de flama °C
<b>g</b>	Velocidad de ascenso de los gases de la combustión $\text{cm min}^{-1}$
<b>W</b>	mitad del ancho en el horno cuadrado cm

### Símbolos griegos

$\epsilon$	Porosidad de la pila de ladrillos, adimensional
$\gamma$	emisividad, adimensional
$\mu$	viscosidad, $\text{g cm}^{-1} \text{ min}^{-1}$
$\rho$	densidad $\text{g cm}^{-3}$
$\sigma$	constante de Stefan Boltzman $\text{cal min}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ K}^{-4}$

### Subíndices

s	sólido
g	gas.

## DERECHOS DE AUTORÀ

El trabajo de grado que presento, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos – científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de la autora. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

---

f) María Isabel González Escobar

**AGRADECIMIENTO**

Le agradezco a Dios, por darme la oportunidad de ser mejor cada día.

A mis Padres Manuel y Elisa les quedo profundamente agradecida por brindarme su apoyo incondicional sobre todo a ti madrecita.

A mis hermanos Manuel, Darío, David, Carina, Juan por todo su cariño y apoyo.

A ti William gracia por tu comprensión y apoyo.

Al Ing Rodrigo Díaz, gracias por sus consejos y su amistad.

A todos mis amigos que me brindaron su afecto.

Expresar el sentimiento de gratitud y reconocimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ESPOCH, a la Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica, a todos sus Docentes en especial a mis profesores Ing Rodrigo Díaz DIRECTOR DE TESIS, Ing Ramiro Valenzuela ASESOR, maestros que con dedicación forjaron mis conocimientos.

María Isabel González Escobar.

**DEDICATORIA**

Culminar este trabajo ha sido de gran trascendencia en mi camino de superación, en tomar otra etapa en mi vida, sintiéndome realizada como mujer y como profesional.

Todo este empeño y esfuerzo se lo dedico a mi madre, y a mis hijos, quienes se han sacrificado para que se haya hecho realidad este sueño.

María Isabel González Escobar

**RESUMEN**

En el presente trabajo de tesis se realizó una simulación mediante elementos finitos para la obtención de los perfiles de temperatura de un horno ladrillero artesanal. Las variables analizadas fueron la velocidad de ascenso de los gases de combustión, relación de las dimensiones del horno altura/mitad del ancho, espaciado entre cada ladrillo al estibarse y el espesor de la pared para el horno cuadrado. La temperatura promedio y los perfiles de temperatura son importantes porque determinan en gran medida la calidad del producto final.

Para lograr el objetivo se plantearon modelos matemáticos en estado estacionario que incluyen términos de conducción, convección y radiación. La solución se realizó usando un software computacional.

La variable más representativa resultó ser la velocidad con la que ascienden los gases de la combustión. Para obtener una distribución de temperaturas dentro del horno más homogénea es necesario mantener una temperatura de flama constante y tratar de exponer el mayor número de ladrillos al fuego. El espesor de la pared como el espaciado entre los ladrillos mostró no tener efecto significativo.

Dentro de las gráficas de una primera simulación se encontró que los ladrillos ubicados en las partes laterales superiores no llegan a completar la cocción, razón por la cual se consideró en una segunda simulación los canales de ayuda donde se coloca el combustible adicional para llegar a compensar la temperatura faltante, canales que han sido tradicionalmente utilizados por los productores ladrilleros, confirmándose de esta manera que se logra una mejor distribución del calor a todos los ladrillos del horno.

## SUMMARY

A simulation through finite elements for the obtaining of temperature profiles of a handmade brick oven was carried out in this thesis work. The analyzed variables were speed rise of combustion gases, relationship of the oven dimensions height / half of the width, space among each brick when being stowed and wall thickness for the square oven.

The temperature average and the temperature profiles are important because they determine in great measure the quality of the final product.

To achieve the objective mathematical models were set out in stationary states, which include conduction, convection and radiation terms. The solution was carried out using computing software.

The most representative variable was the speed at which the combustion gases ascend. To obtain a more homogeneous temperature distribution inside the oven it is necessary to maintain a constant flame temperature and try to expose the biggest number of bricks to the fire. The wall thickness as well as the space among the bricks showed not to have significant effect.

Inside the graphs of a first simulation it was found that the bricks located in the superior lateral parts don't end up completing the cooking, that is why it was considered in a second simulation the help channels where the additional fuel is placed to compensate the missing temperature, channels that have been traditionally used by the brickmakers, confirming in this way that a better heat distribution is achieved to all the oven bricks.

# CAPÍTULO I

## GENERALIDADES

### 1.1 Antecedentes

La invención del ladrillo supuso un gran avance en la historia de la arquitectura mundial. Materiales tan susceptibles como el adobe o tan costosos y pesados como la piedra, se han visto relegados a un segundo plano en la mayoría de trabajos de albañilería.

La forma de fabricar ladrillos y los tipos de hornos utilizados varían de un país a otro, dependiendo principalmente del legado cultural y de su economía. En Ecuador, la fabricación de ladrillos sigue siendo principalmente un método artesanal, teniendo como principales desventajas la contaminación atmosférica, el uso irracional del suelo y la falta de eficiencia térmica.

El ladrillo constituye el principal material en la construcción tanto de las antiguas como modernas viviendas y principales edificios que han venido siendo el pilar principal del desarrollo humano de la sociedad. Los primeros ladrillos datan de hace unos 9.000 años.

Este material compuesto por masa de barro o **arcilla** cocida y con forma rectangular, encuentra su mejor aliado en el cemento. Juntos conformarán la columna vertebral de arquitectura moderna.

El ladrillo ha venido siendo valorado por sus cualidades decorativas y funcionales en construcciones muy versátiles y por su fabricación en enormes cantidades. Existen tres clases: ladrillo de fachada o exteriores, cuando es importante el aspecto; el ladrillo común, hecho de arcilla de calidad inferior destinado a la construcción; y el ladrillo refractario, que resiste temperaturas muy altas y se emplea para fabricar hornos. [1]

Dentro del sector ladrillero es de suma importancia el estudio de mejoras en el proceso de obtención así como la calidad del producto, ya que hoy en día el

ladrillo ha venido siendo muy usado en la construcción de viviendas y de edificios, el mismo que puede poner en riesgo la vida de muchas personas, por su mal proceso de obtención resultando débiles o muy vitrificados.

En la última década se han realizado algunos intentos por mejorar los hornos térmicamente. Es por esta razón que se han recolectado algunos datos por medio del convenio entre el Instituto Ambiental de Estocolmo SEI- ESPOCH, con miras a brindar mejoras dentro del sector ladrillero, y de esta manera contribuir con el desarrollo social, industrial y comunitario dentro de la provincia.

En la provincia de Chimborazo en el sector de Chambo, es el principal lugar donde se elabora los ladrillos comunes para la construcción de diferentes tipos de viviendas, y además son estas fábricas las encargadas de abastecer del suficiente ladrillo a toda la región.

### **1.1.1 Fabricación del ladrillo rojo.**

En Chambo, la fabricación de ladrillo rojo involucra operaciones de preparación de la mezcla, moldeado, secado y cocción. La mezcla se realiza con arcillas o con una mezcla de tierra arenosa y aserrín, en ambos casos se bate con agua para darle la consistencia requerida. La mezcla es colocada en moldes que tienen una medida estándar de 7X14X28cm. Los ladrillos se sacan del molde y se dejan secar al aire hasta tener consistencia suficiente para ser apilados y continuar con el secado hasta completar al menos tres días, para posteriormente ser cocidos.

Durante el cocido, el horno es alimentado de combustible en su parte inferior donde se encuentra el hogar. La alimentación de combustible está regulada de acuerdo a la experiencia de cada ladrillero, quien empíricamente determina cuanto tiempo de fuego requiere el tipo de tierra que está utilizando. Los ladrillos se cargan a través de una puerta en la parte frontal del horno, la misma que se cubre con tierra humedecida con el fin de sellar el horno. El tiempo de quemado puede oscilar entre 20 y 30 horas dependiendo del tipo de tierra y el

combustible utilizado así como también depende de la cantidad de ladrillos que se estén cociendo en el horno.

## **1.2 Formulación del problema.**

De acuerdo a los datos procesados por el proyecto "Uso eficiente de la energía en hornos ladrilleros". Se ha determinado que la masa de combustible utilizado es de:

- Masa de leña: 5053.73 Kg.
- Masa de aserrín: 3599.19 Kg

.Con un consumo específico de 10.5 carretillas de leña por cada 1000 ladrillos. A nivel nacional se estima una producción de 360 millares de ladrillos al año, lo cual significa que anualmente se consume 623010.24 kg de masa de combustible, el mismo que produce 9984.981 GJ al año, produciéndose 910.4 toneladas de monóxido de carbono al año.

Se tiene una pérdida de ladrillos quemados: 4.15 % Ladrillos rotos: 1.84 % Ladrillos mal quemados (amarillos): 3.12 % Ladrillos en estado comercial: 90.89 %.

## **1.3 Justificación**

La excesiva emisión de CO<sub>2</sub> a nivel mundial a conllevado al calentamiento global con consecuencias que se están poniendo en evidencia como son las inundaciones en la mayor parte de países del mundo, la erosión de los suelos, ocasionada por una deforestación sin control.

Con el fin de disminuir la contaminación atmosférica y reducir el consumo de combustibles sólidos como la leña, se debe procurar mejorar la eficiencia térmica de los hornos Para lo cual nos vemos en la necesidad de determinar el perfil de temperaturas en un horno para ladrillos del sector Chambo, el mismo que es de gran importancia debido a que después de analizar la situación

actual, hemos observado que podemos mejorarlo en beneficio del sector ladrillero.

En tal virtud es necesario conocer la distribución de la energía en el horno, mediante la determinación de los perfiles de temperatura de un horno para ladrillos ya que el aprovechar el calor existente y disminuir pérdidas reducir costos tanto de fabricación como de operación dentro de este proceso, puede significar un gran cambio en el que todos estamos incluidos.

#### **a) Justificación técnica**

Es de gran importancia el aprovechar de la mejor manera el calor existente dentro del horno así como también buscar los medios que lo garanticen, y de igual manera el poder usar al máximo el poder calorífico que nos entrega el combustible que en este caso es la madera (biomasa) teniendo consciencia de que en algún momento se verá limitada como combustible.

#### **b) Justificación Económica**

El momento en que se logre sacar el mejor provecho al combustible y al calor que nos brinda el horno, estamos directamente implicando en que se abaratan los costos de producción, se gasta menos combustible y tendrán mayor rentabilidad dentro del sector ladrillero teniendo menos pérdidas por que saldrían menos desperdicios más productos buenos que puedan ser vendidos sin mayor problema, es algo que no solo beneficia al productor si no, también al consumidor ya que se brindaría un producto de mayor calidad con precios asequibles.

#### **c) Justificación ambiental**

Es de vital importancia el tomar conciencia que el ambiente es el lugar donde nos desarrollamos, por lo tanto al generar menos calor desperdiciado que se vota al ambiente, así como parar el uso indiscriminado del suelo, y quemar menos combustible haría que de una u otra forma colaboremos en la protección del medio ambiente pudiendo vivir mejor y con mayor comodidad.

## **1.4 OBJETIVOS.**

### **1.4.1 Objetivo general.**

Determinar el perfil de temperaturas en un horno para ladrillos del sector Chambo, provincia de Chimborazo.

### **1.4.2 Objetivos específicos.**

- Conocer el marco teórico del proceso de cocción de los ladrillos.
- Analizar el modelo matemático específico.
- Determinar la distribución de temperaturas en el horno.
- Analizar los resultados obtenidos.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO DE LOS HORNOS PARA LADRILLO

#### 2.1. Diagnóstico de los hornos utilizados en la industria ladrillera de la región.

Desde unos inicios el sector Chambo ha venido siendo uno de los sectores mas productores de ladrillo dentro de la provincia de Chimborazo, se uso primeramente el adobe y la arcilla para la edificación de viviendas, años más tarde, comunidades ubicadas en esta región comenzaron a edificar construcciones con ladrillos cocidos elaborados de la misma arcilla, es entonces cuando los hornos ladrilleros comenzaron a aparecer.

##### 2.1.1 Generalidades sobre su diseño.

El diseño de un horno ladrillero puede dividirse en dos partes: el diseño físico del equipo a utilizarse y el diseño basado en la transferencia de calor. El primer caso considera el diseño y peso de la estructura y los equipos de control y combustión. Los elementos en un diseño de transferencia de calor incluyen definir la posición y el tipo de los quemadores, el sistema de gases de escape, el patrón de flujo de calor, el acomodo de la carga, los fenómenos de radiación, convección y conducción entre otros[1].

Los principios sobre los que se baso su diseño son los siguientes

**Principio 1.** Un cubo es la mejor forma de un horno. Este postulado se deriva de la experiencia que nos indica que con estas dimensiones hay una distribución más uniforme de temperatura en el horno.

**Principio 2.** La forma de la cámara se determina por la dirección del calor y la facilidad del movimiento de la flama para permitir el flujo natural. El movimiento de la flama y su dirección del calor deben tener solamente un ángulo recto por vencer en el interior de la cámara. Los ángulos rectos causaran calentamiento irregular.

**Principio 3.** Una cantidad específica de área de la parrilla (hogar o área de quemado del combustible) se necesita para el tiro natural. El área de la parrilla depende del combustible usado, por ejemplo, si se trata de madera el área debe ser 10 veces más grande que la sección horizontal de la chimenea, para carbón:  $1 \text{ m}^2$  de parrilla por cada  $6 \text{ a } 8 \text{ m}^2$  de espacio de piso y en el caso de aceite:  $1 \text{ m}^2$  de área de combustión por cada  $5 \text{ m}^2$  de área de piso. Este es el principio de horno más difícil de aplicar porque determina el gasto del tiro. Cuando se tengan dudas, es mejor un área de parrilla más grande que una pequeña.

**Principio 4.** El ahusado de una chimenea regula el tiro. El ahusamiento reduce la presión atmosférica e incrementa la velocidad del tiro, de este modo se regula el valor del tiro que regularmente debe ser de 1.22 a 1.53 m/s.

**Principio 5.** Deberá tener 3 m de chimenea por cada metro de tiro hacia abajo, más un metro de chimenea por cada 3 m de tiro horizontal. El tiro horizontal incluye el diámetro de la cámara de combustión, el largo de la caja colectora y ancho de la chimenea.

**Principio 6.** El diámetro de la chimenea es aproximadamente de  $1/4$  a  $1/5$  del diámetro de la cámara.

**Principio 7.** Una chimenea alta incrementa la velocidad dentro de la cámara de cocido, pero si es demasiado alta puede causar calentamiento irregular por no permitir que la energía se acumule dentro del horno. Por otra parte, una chimenea demasiado corta puede restringir el recalentamiento en el hogar y la succión del oxígeno que se necesitan para una combustión apropiada.

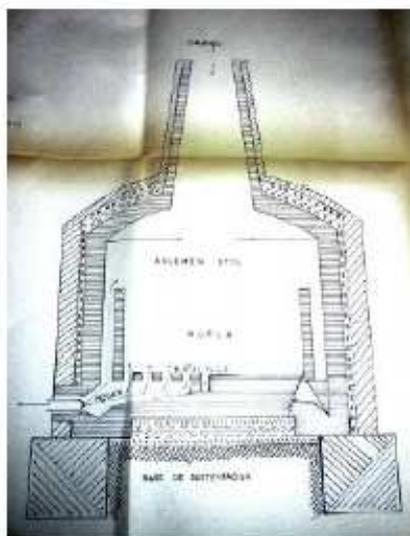
**Principio 8.** Las áreas críticas de un horno deben ser planeadas y construidas para ser modificadas fácilmente. Esto es importante porque siempre se tendrán que hacer modificaciones en cualquier horno nuevo durante las primeras pruebas

### **2.1.2 Identificación de los diferentes tipos de hornos.**

Los hornos de ladrillo rojo tradicional se pueden clasificar como intermitentes y pueden ser de forma circular, ovalada, cuadrada o rectangular. El horno circular posee la ventaja de sus reducidos costos de construcción y mantenimiento en comparación con su capacidad, y de una distribución más uniforme de la temperatura; sus desventajas son el mal aprovechamiento económico del suelo, mayores dificultades en la colocación de la carga y el ser menos adaptable a la alimentación mecánica del combustible. Por su parte, el horno rectangular presenta la ventaja del pleno aprovechamiento del espacio [3].

#### **2.1.2.1. Hornos de bóveda de tiro ascendente: [3].**

Estos hornos fueron desarrolladas por los años de 1 550 a 1 650. Es más eficiente que los anteriores, la combustión se desarrolla en la cámara de combustión y el calor fluye de abajo hacia arriba atravesandola carga para desfogar los gases de combustión por la chimenea que se encuentra encima de la bóveda del horno. El inconveniente de estoshornos es que la cámara de combustión tiene mayor temperatura en la parte inferior de la cámara de cocción y más fría en la parte superior, loque no garantiza una buena cocción de los productos.



**Figura 2.1 Horno de bóveda de tiro ascendente[3].**

### **2.1.3 Descripción de las características físicas y funcionamiento del horno tradicional**

Los hornos utilizados actualmente en el sector ladrillero de Chambo, básicamente son hornos cúbicos de base rectangular, de tiro ascendente natural, sus capacidades de carga oscilan entre los 10000 a 15000 ladrillos artesanales.

La temperatura de calentamiento llega a los 300°C para luego dar lugar a la cocción llegando su temperatura hasta los 990-1000°C, y posteriormente ir al enfriamiento a temperatura ambiente que es de 15 °C, los ladrillos permanecen en el horno por un lapso de 30 horas.

Además cabe mencionar que como es un horno de bóveda se ha realizado unos canales en la parte superior para poder cargar aserrín en los mismos que nos ayuda a mejorar la calidad y secado del producto ya que el principal problema de estos hornos es que tiene mayor temperatura en la parte de la cámara de cocción, mientras que en la parte superior los ladrillos van quedando sin secarse y no toman ni el color ni la consistencia deseada.

Se trata de un horno, vertical fijo con tres bocas inferiores de tamaño 4.5x2.8x5.2 m. Con una compuerta frontal superior que es por donde se carga al horno, las paredes se encuentran recubiertas con adobe que sirve como aislante térmico y no permite que el calor escape hacia el exterior.

#### **2.1.3.1 Materiales de construcción**

Los materiales con los que se encuentran contruidos los hornos característicos del sector Chambo son los siguientes:

Ladrillos, adobes, mortero de barro o arcilla.

#### **2.1.3.2 Construcción o albañilería del horno.**

En el siguiente cuadro se muestra las características y los materiales utilizados en la construcción del horno.

**Tabla 2.1 Materiales característicos y partes comunes de un horno para ladrillos.[3]**

<b>PARTES DELHORNO</b>	<b>MATERIALES</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
Cimientos	Piedras y mortero de arcilla de arena	Dimensiones de 0,80 x 0,50 m
Parrilla de cargado	Ladrillos y mortero de arcilla	Altura de la bóveda 1m con espacios vacios cuadrados de 0,29 m de lado.
Muros o paredes	Adobes y mortero de arcilla y arena	Muros de cabeza 50cm de espesor Inferior de la cámara de cocción
Revoque	Mortero de arcilla y arena	Tiene 0,245 m de espesor. Todo el perímetro de la cámara de cocción

Adicionalmente los hornos cuentan con columnas de adobes cada dos metros aproximadamente que protegen las paredes laterales del horno, sobre todo aquellos que no están protegidos, incrustados en las laderas.

Se debe destacar que no se utiliza materiales refractarios y refractarios aislantes térmicos, en la construcción de los hornos.

#### **2.1.4 Tipo de operación del horno.**

La operación del horno consta de las siguientes acciones:

1.- Se carga los materiales a quemarse, dejando espacios vacios por donde pueda fluir el fuego y los gases de combustión. Algunos productores en las últimas capas de la carga incluyen aserrín con el objeto de uniformizar la temperatura de cocción de los productos.

**2.-** Haciendo uso de leña (bolillos o rajas de eucalipto), se enciende lentamente por un lapso de 4 horas aproximadamente, hasta completar el secado de los productos. Luego se continúa con la quema utilizando como combustibles aserrín, ramas de eucalipto por un lapso estimado de 14 a 18 horas hasta completar la cocción de los productos.

Una vez que se ha completado la cocción se sella la parte superior del horno con los ladrillos que han quedado mal cocidos de quemas anteriores, dejando el espacio suficiente para que puedan salir los gases producto de la combustión. También se cierra la compuerta de la cámara de combustión con lodo mojado, para evitar un enfriamiento brusco y pueda malograr los productos coccionados.

**3.-** Se deja enfriar durante 192 horas aproximadamente, luego de este tiempo se puede descargar los productos, [17] observándose una pérdida de aproximadamente del 26 %. De los productos cargados por productos malogrados y rajaduras.

## **2.2 Mantenimiento.**

Los trabajos rutinarios de mantenimiento más frecuentes en el horno son:

a) Limpiar el revoque interior de la cámara de cocción por que es donde se carga el combustible (biomasa), quedando cenizas, o resto de leña producto de la combustión.

b) En la bóveda de la cámara de cocción puesto que algunos ladrillos que lo conforman tienden a fusionarse, quedando unidos unos con otros siendo necesario desalojarlos para la nueva carga que va a ingresar.

## **2.2.1 Evaluación de las características técnicas del horno en el proceso**

### **de quema**

Los hornos utilizados en la industria ladrillera del sector Chambo, técnicamente denominados “Hornos de tiro ascendente y natural”, nos muestra las siguientes características técnicas durante su operación:

- a) El horno al carecer de aislamiento térmico especialmente en la cámara de cocción, hace que disipe calor al medio ambiente, de esta manera se debe quemar más combustible de lo requerido y se incrementa el tiempo de operación.
- b) En la cámara de cocción no hay una distribución uniforme de temperatura, existiendo una gradiente apreciable, es así que en la parte inferior de la cámara de cocción es más alta, inclusive llegan a fusionarse los productos lo que indica que ha alcanzado temperaturas superiores a 1000°C y en la parte superior de la cámara todavía los productos no han completado la cocción, lo que indica que no han superado los 600°C. Hoy en día algunos van solucionando el problema adicionando carbón mineral, aserrín y ramas de eucalipto en la parte superior del horno.
- c) Los productos cocinados no tienen una calidad homogénea y que difícilmente podría pasar los estándares de calidad si esta se sometiera a evaluación.
- d) La eficiencia térmica del horno es inferior al 30%, es decir, que solamente aprovecha el 25% de la energía suministrada para coccionar los productos mientras que, el 75%, se disipa por la parte superior del horno y por las paredes de la cámara de cocción.

### 2.3 Tipo de combustible que utiliza.

El combustible que se usa en el horno es biomasa (retazos de madera, aserrín), de donde se obtiene el calor necesario para la cocción de los ladrillos crudos.

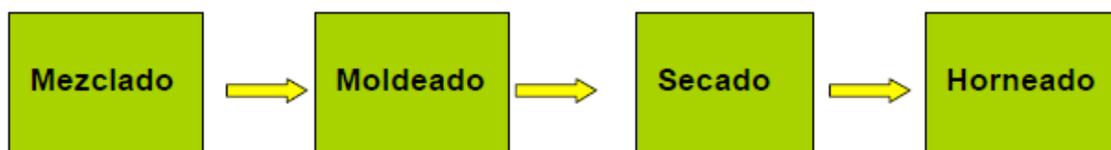
**Tabla 2.2 Poderes caloríficos de la leña [4].**

PODERES CALORIFICOS DE LA LEÑA	
Aserrín	37000.00 Kcal / Kg
Leña Eucalipto	4306.00 Kcal/ Kg

### 2.4 Proceso de producción.

Existen dos formas de producción de ladrillos: artesanal e industrial. Estas dos formas de producción tienen los mismos pasos o secuencia, únicamente variando en los instrumentos, métodos, y herramientas utilizadas para la producción. Los pasos básicos de la producción de ladrillos son:

- a)• Preparación de la mezcla previamente húmeda o semiseca.
- b)• Moldeado.
- c)• Secado.
- d)• Horneado.



**Figura 2.2 Etapas para la fabricación del ladrillo [5]**

Para lo relacionado con la preparación de la mezcla, se emplean la arcilla o tierra, como comúnmente se le conoce con el aserrín y el agua. El porcentajes aproximado de la arcilla utilizada para la preparación de la mezcla son:[5]

- Arcilla amarilla: 50%
- Arcilla gruesa: 25%

Estos porcentajes pueden variar debido a que los componentes químicos que contiene cada tierra son muy variados e inconstantes, y dependen del lugar de donde se extrae cada tierra. El porcentaje de agua utilizada para la mezcla es aproximadamente del 25% del total.

#### **2.4.1 Mezclado**

A continuación se mencionará el proceso de elaboración de los ladrillos en dicho sector, que antes se encontraba en un sector retirado del centro de la región, pero por el crecimiento y asentamiento de la población han hecho que hoy en día se encuentren cerca de la zona urbana de esa región, cabe mencionar que se requieren una mediana a grande extensión para elaborar el moldeo de los mismos.

Cuando ya se ha escogido el emplazamiento, se procede al arranque de las tierras excavando con picos o máquinas excavadoras, dejándolas expuestas a la intemperie; la arcilla se consigue en bancos de arcilla ubicados en la misma región.

Se continúa regularizando las tierras añadiéndoles la cantidad de arcillas que hagan falta, para que no resulten demasiado aguadas ni excesivamente espesas. Posteriormente, se procede a la formación de la pasta, anteriormente la arcilla se mezclaba con aserrín, empujándola con los pies sobre el suelo, se le agregaba agua y se amasaba con palos, palas o rastrillos y, actualmente, tractores para arado



**Figura 2.3** Tractor agrícola para la elaboración de la mezcla.

#### **2.4.2.- Moldeo:**

Para el moldeo de los ladrillos se prepara una extensa área plana cuya superficie varía dependiendo de la cantidad de ladrillos a producir. El terreno debe tener una pendiente de un 5% a un 10% para que escurran las aguas, y debe estar provista de pozos u otros medios que brinden el agua necesaria para la formación de la pasta.

La operación de moldeo es inmediata a la formación de la pasta; esta operación en verano se hace más difícil, porque el excesivo calor seca más rápidamente los bordes de los ladrillos moldeados por su parte interior, lo que suele provocar su rotura.

Los ladrillos considerados ordinarios se moldean en unos moldes de madera llamados gaveras (Ver Figura 2.4), estando formadas por un bastidor que generalmente comprende 6 ladrillos, en algunas ocasiones y dependiendo de la habilidad del trabajador la gavera comprende 8 ó 10 ladrillos, con las mismas dimensiones en superficie y grueso que hayan de tener aquéllos.

Cada vez que va a moldearse se esparce arena fina en el fondo que viene constituido por el fondo de la explanada y por las paredes interiores del bastidor, con el objeto de que la pasta no se adhiera ni en el suelo ni en las maderas del molde y se aprieta con las manos hasta que se haya llenado completamente todo el molde, raspando lo que sobra con un objeto llamado rasero (Ver Figura 2.5).

Los ladrillos se disponen en ordenaciones paralelas, teniendo cuidado de dejar entre unas y otras filas el espacio suficiente para poder circular.



**Figura 2.4 Moldeo con gavera.**



**Figura 2.5 Eliminación de sobrantes con un rasero.**

### 2.4.3.- Secado:

Después de moldear los ladrillos han de secarse; para esto se levantan verticales con el objeto de que se sequen por las dos caras, dejándolos en esta posición alrededor de 24 horas.

Después de que hayan adquirido la suficiente tenacidad para poder limpiar y enderezar sus bordes, se disponen formando una especie de muros gruesos en seco llamados enrejados (Ver Figura 2.6), en los cuales tiene que circular libremente el aire entre los ladrillos, dejándolos en esta posición las condiciones climáticas: si los días están nublados y húmedos, el tiempo de secado se aplazará; y si hay un “buen tiempo” o días calurosos y con viento, el tiempo de secado se reducirá considerablemente.



**Figura 2.6 Ladrillos moldeados con gaveras (sobre el suelo).**

El proceso de secado consiste en el desprendimiento del agua unida físicamente a la pasta, siendo este volumen igual al volumen de contracción  $V_{ren}$  que se contrajo el objeto. [5]. Existe un volumen de agua intersticial ( $V_{int}$ ) que queda en la arcilla y que será eliminado después. Estos dos volúmenes pueden formar una relación  $V_r / V_{int}$ , la misma que determina el grado de sensibilidad de la arcilla al secado:

$$K_s = V / \{V_1 [(W_1 - W) / (V_1 - V)]\} \quad (2.1)$$

Donde  $V$  es el volumen del ladrillo secado al aire,  $V_1$  es el volumen del ladrillo húmedo,  $W$  es el peso del ladrillo húmedo,  $W_1$  es el peso del ladrillo secado al aire y  $K_s$  se refiere al índice aproximado de rendimiento, y es igual a la relación de volúmenes antes mencionada. Con base en la fórmula anterior se puede determinar las siguientes condiciones:

- $K_s < 1$ , entonces la arcilla poco sensible al secado.
- $K_s = 1.5$ , entonces la arcilla es de sensibilidad media (preferible).
- $K_s = 2$ , entonces la arcilla es muy sensible y produce fácilmente agrietamientos.

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo realizado para determinar la sensibilidad al secado de la arcilla utilizada para la producción de ladrillos en la región de Chambo, donde

- $V = 1422 \text{ cm}^3 = 86.7758 \text{ in}^3$
- $V_1 = 1440 \text{ cm}^3 = 87.8742 \text{ in}^3$
- $W = 2.4 \text{ kg.} = 5.2911 \text{ lb.}$
- $W_1 = 3 \text{ kg.} = 6.6139 \text{ lb.}$

Para realizar el muestreo se pesaron 5 ladrillos recién moldeados y 5 secados al aire, como lo determinan las normas mexicanas para un mínimo aceptable de muestra. Después se hizo un promedio y el valor obtenido se utilizó para calcular la sensibilidad de la arcilla al secado. Aplicando la fórmula, y sustituyendo los valores en unidades del sistema inglés, se obtiene que  $K_s = 0.82$ . Con base al resultado obtenido se puede decir que la arcilla de Chambo es poco sensible al secado ya que el valor del cálculo es menor que la unidad. El hecho de que la arcilla Chambo sea poco sensible al secado nos da como consecuencia un tiempo más largo destinado para el secado.

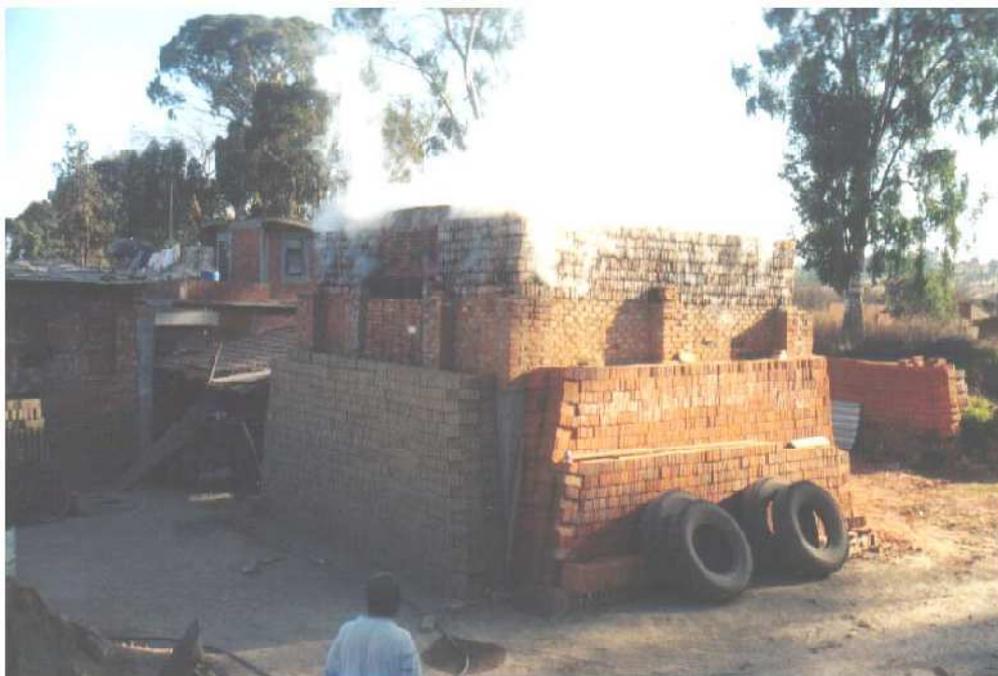
Dentro del proceso de secado hay un proceso conocido como presecado, el cual consiste en dejar durante un tiempo el ladrillo recién moldeado en el mismo lugar donde fue hecho para que pierda humedad y sea posible su manipulación.

En el proceso de secado se involucran dos fenómenos físicos: Transferencia de calor y Transferencia de masa. La transferencia de calor se da cuando el ladrillo y el ambiente buscan un equilibrio térmico, del cual dependerá en parte la velocidad de difusión del agua presente en la arcilla.

El fenómeno de transferencia de masa se da siempre y cuando exista un gradiente de humedad entre el ambiente y la arcilla, ya que se produce cuando el vapor de agua se difunde a través de los poros de la matriz arcillosa. El tiempo de secado dependerá de la velocidad de difusión, misma que está en función del tamaño, longitud, y forma del poro de la arcilla.

#### **2.4.4.- Horneado:**

Cuando los ladrillos se encuentran secos estos se introduce a los hornos (Ver Figura 2.7) los cuales utilizan leña como combustible. Finalmente, el proceso de cocción dura alrededor de 30 horas en el horno, luego se deja enfriar la carga un periodo de 8 días aproximadamente, la carga se extrae y está lista para comercializarse.



**Figura 2.7 Horno en funcionamiento.**

Un trabajador que use este método para la elaboración de ladrillos normalmente produce 1 millar de ladrillos “en verde” o húmedos en una sesión

de trabajo de 10 horas aproximadamente en la que 2 hrs es el tiempo promedio que se pierde para la carga y acarreo de la mezcla, entonces se tendrán 8 hrs para la elaboración de la cantidad antes mencionada de ladrillos en verde, lo que equivale a la elaboración de 143 ladrillos por hora y a 2.3 ladrillos por minuto aproximadamente, en el proceso de moldeo.

El proceso de horneado consiste en cocer en hornos los ladrillos previamente secados, con el fin de que adquieran sus propiedades mecánicas y físicas, ya que la arcilla sin cocer tiene propiedades muy bajas, así como su apariencia final. Durante éste proceso se pueden observar cuatro etapas: [5]

1. Precalentamiento a 300° C y eliminación del agua unida físicamente a la arcilla.
2. Calentamiento hasta 700° C, aquí se da la eliminación del agua químicamente unida a la arcilla.
3. Maduración del biscocho entre 900 y 1000° C.
4. Temple de la pieza, enfriamiento lento hasta alcanzar 500° C.
5. Enfriamiento final hasta llegar a los 15° C.

## **2.5 Evaluación de la emisión de gases tóxicos a la atmósfera**

Por el diseño de los hornos con el que vienen laborando los industriales deladrillos en el sector de Chambo, presentan un problema crucial el cual es, la combustión incompleta de los combustibles suministrados por falta de oxígeno,

pese a tener la cámara de combustión un volumen considerable, esto es originado por la ausencia de tiro en el horno (ausencia de chimeneas).

La existencia de un buen tiraje es muy importante porque permite una buena circulación de oxígeno en el interior del horno con lo que se obtiene una buena combustión (quemar completamente el combustible). Esta deficiencia origina que los hornos sean fuentes de contaminación ambiental, que a continuación enumeramos:

- a) Emisión de gases contaminantes, que ocurre durante la operación del horno,

debido a la combustión incompleta de los combustibles utilizados y como consecuencia de ello, se lanza a la atmósfera grandes cantidades de gases tóxicos de CO, NO, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> etc. que contaminan el aire de zona circundante que lo rodea, generan riesgo de precipitación de lluvias ácidas que afectan a la actividad agrícola regional y que, además, son contribuyentes potenciales del efecto invernadero que actualmente vienen destruyendo la capa de ozono, poniendo en peligro la sostenibilidad de la vida y afectando al comportamiento del clima global.

b) Presencia de sustancias particuladas, estas se originan, principalmente, en la descarga de los productos cocidos en los hornos, operación en la que se observa la presencia de abundantes subproductos de la cocción, cenizas que quedan después de la combustión de los combustibles sólidos (ramas de eucalipto, aserrín y carbón mineral). La presencia de estos materiales afecta a la salud integral de la población aledaña, generando condiciones malas como bronco-respiratorios, silicosis, conjuntivitis crónica y hasta enfermedades malignas.

c) Inadecuado manejo de residuos sólidos, No se tiene lugares especialmente acondicionados para depositar los residuos sólidos de cenizas así como también ladrillos rotos. Tampoco hay programas para el reciclaje de estos materiales que pueden ser usados como abonos, en el caso de las cenizas y como insumos anti-plásticos de la misma industria cerámica en el caso de ladrillos rotos.

**Tabla 2.3 Agentes contaminantes producidos por las emisiones de los hornos.[2]**

Contaminante	Causa	Efecto
<b>SO<sub>2</sub></b>	Proviene del empleo de combustibles sólidos y líquidos que contienen azufre.	Ocasionan enfermedades bronquiales, irritación del tracto respiratorio, cáncer, etc.
<b>SO<sub>3</sub></b>	Proviene del empleo de combustibles sólidos y líquidos que contienen	Puede causar daños en la vegetación y en los metales y ocasionar trastornos pulmonares

	azufre.	permanentes y problemas respiratorios
<b>NOx</b>	Proviene de la combustión de la gasolina, el carbón y otros combustibles como el combustóleo.	En altas concentraciones, genera smog que puede producir dificultades respiratorias en las personas asmáticas, accesos de tos en los niños y trastornos en general del sistema respiratorio. Provoca la lluvia ácida que afecta la vegetación y altera la composición química del agua de los lagos y ríos, haciéndola potencialmente inhabitable para las bacterias, excepto para aquellas que tienen tolerancia a los ácidos.
<b>CO</b>	El monóxido de carbono se produce como consecuencia de la combustión incompleta de combustibles a base de carbono, tales como el combustóleo, el petróleo y la leña, y de la de productos naturales y sintéticos, como por ejemplo el humo de cigarrillos	Es un gas inodoro e incoloro. Cuando se inhala, sus moléculas ingresan al torrente sanguíneo, donde inhiben la distribución del oxígeno. En bajas concentraciones produce mareos, jaqueca y fatiga, mientras que en concentraciones mayores puede ser fatal.
<b>CO2</b>	Se origina a partir de la combustión de carbón, petróleo y gas natural. También se produce al quemar basura.	En estado líquido o sólido produce quemaduras, congelación de tejidos y ceguera. La inhalación es tóxica si se encuentra en altas concentraciones, pudiendo causar incremento del ritmo respiratorio, desvanecimiento e incluso la muerte. Es el principal gas causante del efecto invernadero.

## **2.6 Problemas encontrados en el funcionamiento de los hornos tradicionales**

### **2.6.1 Combustión incompleta de los combustibles empleados.**

La buena combustión se realiza por un equilibrio entre la cantidad de combustible y la cantidad de oxígeno del aire necesario para esta reacción química. Su deficiencia trae consigo la emisión de gases tóxicos como el monóxido de carbono, anhídrido carbónico y gases sulfurosos junto con humo

negro o carbón particulado, con lo que se destruye la atmósfera y se contribuye con el calentamiento global y la destrucción de nuestro ecosistema como resultado de esta quema deficiente, se requiere gastar más combustible que el requerido pues la eficiencia térmica es muy baja, lo que redundará en el alto costo de las quemas con el consiguiente encarecimiento de los procesos de producción.

### **2.6.2. El diseño de los hornos .**

La mayor parte de los hornos son abiertos, este hecho hace que el gradiente térmico o la diferencia de temperaturas entre la base y parte alta de la carga en la cámara de cocción sea muy grande por lo que las quemas son deficientes, pudiendo fundirse la carga cercana a las llamas del hogar y quedar casi cruda la carga colocada en la parte más alta.

Además los hornos abiertos pierden la mayor parte de la energía térmica producida por el combustible, reduciéndose la eficiencia térmica de esta en la cocción de la carga.

### **2.6.3. Calidad deficiente de los productos.**

Como consecuencia de las quemas deficientes se ofertan productos de calidad dudable, pues la mezcla cerámica no llega a la quema completa o a la "sinterización", quedando con un alto nivel de porosidad, baja resistencia al golpe, cizallamiento, abrasión y tracción.

Sin contar con la presencia de gránulos calcáreos o "caliche" que al quemarse generan nódulos de cal que por higrscopia rompen las estructuras de los ladrillos.



**Figura 2.8 Ladrillos deficientes**

#### **2.6.4.- Excesiva generación de desperdicios sólidos.**

La industria ladrillera artesanal del sector Chambo genera en su actividad una gran cantidad de desperdicios sólidos como ladrillos rotos, fundidos o mal quemados que modifican el entorno dando una impresión de abandono y desorden. Estos materiales deben ser reprocesados, molidos y reciclados como materiales antiplásticos componentes de las pastas arcillosas, con esta operación se eliminaría la contaminación por excretas sólidas y se daría un valor agregado a estos desechos. Algunos señores ladrilleros ya están reciclando estos materiales.

#### **2.7.- Obtención de propiedades y parámetros físicos.**

Se indican las fórmulas y correlaciones que se utilizaron para calcular las propiedades y los parámetros físicos ó en su caso de donde se obtuvieron.

##### **2.7.1.- Propiedades del sólido. [12]**

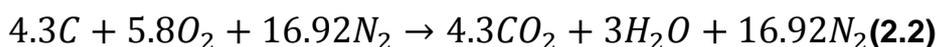
Las propiedades físicas del ladrillo

**Tabla 2.4 Propiedades físicas del ladrillo.[12]**

<i>Propiedad</i>	<i>Magnitud</i>
Conductividad térmica (cal cm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0.0989
Densidad (g cm <sup>-3</sup> )	1.6000
Capacidad calorífica (cal g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0.2006
Emisividad	0.9300

**2.7.2 Propiedades del gas.**

Todas las simulaciones efectuadas toman en cuenta que el tipo de combustible es biomasa (eucalipto y aserrín). La combustión completa de la biomasa, viene dada por la reacción:



Los productos de esta reacción determinan la composición molar de la mezcla de gases de combustión. Las propiedades para la mezcla de gases de combustión que aparece en la Tabla V, son valores promedio para el intervalo de temperaturas desde 300 a 1200° K. En este intervalo se lleva a cabo el proceso de cocción de los ladrillos.

**Tabla 2.5 Propiedades físicas de los gases de combustión.[12]**

<i>Propiedad</i>	<i>Magnitud</i>
Conductividad térmica (cal cm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0.060488
Densidad (g cm <sup>-3</sup> )	0.011860
Capacidad calorífica (cal g <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0.018500
Viscosidad (g cm <sup>-1</sup> min <sup>-1</sup> )	0.348340
Emisividad	1.000000

Las propiedades de la tabla 2.5, se han obtenido con las fórmulas que se indican en la tabla 2.6.

**Tabla 2.6 Fórmulas utilizadas para la obtención de las propiedades físicas del gas.[1]**

<i>Propiedad</i>	<i>Formula(s)</i>	<i>Observaciones</i>
Conductividad térmica	$k_{mez} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i k_i}{\sum_{j=1}^n x_j \Phi_{ij}}$ $\Phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left( 1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-\frac{1}{2}} \left[ 1 + \left( \frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{M_j}{M_i} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2$	M representa el peso molecular, $\mu$ la viscosidad y $i, j$ representan los componentes.
Densidad	$\rho_{mez} = \frac{n_{tot} PM_{mez}}{Vol_{mez}}$	Cálculo del volumen de cada componente con la ecuación de estado de Redlich-Kwong.
Capacidad calorífica	$C_{P_{mez}} = \sum_{i=1}^n x_i C_{pi}$ $C_{pi} = A_i + B_i T + C_i T^2$	
Viscosidad	$\mu_{mez} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu_i}{\sum_{j=1}^n x_j \Phi_{ij}}$	$\Phi_{ij}$ es el mismo que en el caso de la conductividad térmica.

### 2.7.3 Parámetros físicos.

**Tabla 2. 7 Datos tomados en los hornos[17]**

<b>Nombre del productor</b>	<b>Localización</b>	<b>Datos de la quema<sup>1</sup></b>
Manuel Quihuirí	Chambo Chimborazo Ecuador. <i>Altitud:</i> 2760 m.s.n.m.	Inicio: 22/01/99 17H00 Finaliza: 25/01/99 00H00
<i>Tipo de horno:</i> Horno vertical fijo, con 3 bocas inferiores. <i>Tamaño:</i> 4.5x2.8x5.2 m.	<i>Tipo de combustible:</i> Leña de eucalipto y aserrín mezclado en la arcilla	<i>Masa de combustible<sup>1</sup> utilizado:</i> <i>Masa de leña:</i> 5053.73 Kg. <i>Masa de aserrín:</i> 3599.19 Kg
<i>Poder Calorífico Inferior:</i> 18.5 MJ/Kg.	<i>Número de ladrillos crudos en el horno:</i> 18 000	<i>Masa de un ladrillo: Recién elaborado:</i> 7.75 Kg. <i>Húmedo<sup>2</sup>:</i> 5.78 Kg.

<sup>1</sup> Masa evaluada con la balanza en el sitio de la prueba.

<sup>2</sup> Se considera ladrillo Húmedo, al que se ha secado al medio ambiente, y es en las condiciones que ingresa al horno.

		Seco <sup>3</sup> : 5.44 Kg. Cocido: 4.96 Kg.
<i>Humedad en base seca:</i> <i>Ladrillo: 6.25 %</i> <i>Leña: 23.00 %</i> <i>Aserrín: 28.00 %</i>	<i>Elaboración de los ladrillos:</i> Elaboración manual en moldes, mediante vertido. La masa es preparada, con apisonado de vacas y pisoteado por los operarios.	<i>Condiciones climáticas:</i> Ambiente medianamente húmedo, frío, cielo parcialmente cubierto, lluvias frecuentes. Viento predominante a partir de las 17H00.
<i>Cálculos de eficiencia del</i>	<i>Horno:</i>	<i>Información Complementaria</i>
<i>Masa de ladrillos crudos:</i>	83810 Kg.	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>Barras utilizadas:</i> 11,13,15,17</li> </ul>
<i>Humedad cont. en los ladrillos</i>	11890 Kg.	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>Máxima temperatura en el horno:</i> &gt; 990 °C</li> </ul>
<i>Humedad cont. leña:</i>	945.05 Kg.	<i>Novedades:</i> Los termógrafos se fundieron, ya que se los colocó en los canales de ayudas.
<i>Humedad cont. en el aserrín:</i>	211.64 Kg.	
<i>Energía para secar ladrillos:</i>	26829.79 MJ.	
<i>Energía para secar leña:</i>	2132.5 MJ.	
<i>Energía para secar aserrín:</i>	477.56 MJ.	
<i>Energía suministrada por la leña:</i>	76010.626 MJ.	
<i>Energía suministrada por aserrín:</i>	62669.673 MJ.	
<i>Energía suministrada total:</i>	138680.3 MJ.	
<i>Masa de ladrillos cocidos:</i>	71920 Kg.	
<i>Energía específica<sup>4</sup> del quemado</i>	1.52 MJ./Kg.	

<sup>3</sup> El ladrillo seco, es el obtenido en el laboratorio, luego de haberle extraído la humedad en estufa.

<p><i>Comentarios:</i> Ladrillos quemados: 4.15 % Ladrillos rotos: 1.84 % Ladrillos mal quemados (amarillos): 3.12 % Ladrillos en estado comercial: 90.89.</p>	<p>% Consumo de aserrín en la masa: 10.5 carretillas por cada 1 000 ladrillos</p>	
--	---	--

Fuente: Datos tomados por el Ing. Rodrigo Díaz e Ing. Gilberto Zabala, en el proyecto uso eficiente de la energía en Hornos ladrilleros.

### 2.7.3.1 Temperatura teórica de flama. [13]

La temperatura alcanzada cuando se quema un combustible en aire u oxígeno sin ganancia o pérdida de calor se denomina temperatura teórica de flama. La máxima temperatura adiabática de flama se alcanza cuando se quema el combustible con la cantidad teóricamente necesaria de oxígeno puro. La temperatura teórica de flama puede calcularse resolviendo la siguiente ecuación para  $T_f$

$$T_f = \frac{q}{cp_2} + \frac{Cp_1}{cp_2} T_1 \quad (2.3)$$

### 2.7.3.2. Velocidad de ascenso de los gases de combustión.

La velocidad de ascenso de los gases de combustión ( $V_g$ ) se calcula con las siguientes expresiones [14]

$$V_g = V_1 \frac{\gamma_1(\gamma_2 - 1)}{\gamma_2(\gamma_1 - 1)} \left( \frac{q}{cp_1 T_1} + 1 \right) \quad (2.4)$$

---

<sup>4</sup> Este valor esta calculado, con la energía total utilizada en el horno (suministrada por el aserrín y la leña), menos la energía gastada en secar el aserrín, la leña y los ladrillos crudos.

donde  $V_1$  es la velocidad de entrada del gas al quemador,  $\gamma$  es el cociente del calor específico a presión constante ( $C_p$ ) sobre el calor específico a volumen constante ( $C_v$ ),  $T_1$  es la temperatura con la que el gas llega (generalmente cercana o igual a la temperatura ambiente),  $T_f$  es la temperatura de flama, que es la cantidad de calor por unidad de masa en la reacción, el subíndice 1 indica gas sin quemar y el 2 gas quemado.

### 2.7.3.3. Porosidad de la pila de ladrillos. [15]

La porosidad de la pila de ladrillos  $\epsilon$  se define como la relación de los espacios vacíos entre los ladrillos y el volumen total que éstos ocupan, matemáticamente:

$$\epsilon = \text{volumen de huecos} / \text{volumen de la pila de ladrillos} \quad (2.5)$$

### 2.7.3.4 Coeficiente $a_v$ .

El coeficiente  $a_v$  depende de las dimensiones del ladrillo, del espacio entre los ladrillos al ser estibados y de las dimensiones del horno. Su definición es la siguiente:

$$a_v = \text{área de transferencia de calor de la pila} / \text{volumen de la pila} \quad (2.6)$$

El término pila se refiere al conjunto de ladrillos que se forma al ser estibados. Sea  $l$  el espacio entre ladrillo y ladrillo,  $NX$  el número de ladrillos en el lado  $Lx$  del horno,  $NY$  el número de ladrillos en el lado  $Ly$  y  $a, b, c$  las dimensiones de un ladrillo típico (figura 9), entonces debe cumplirse:

$$bNY + (NY + 1)l = Ly \quad (2.7)$$

$$aNX + (NX + 1)l = Lx \quad (2.8)$$

En este trabajo  $L_x = L_y$ , por lo que el número de ladrillos por “cama” (NC) es:

$$NC = NX \cdot NY = \left( \frac{Lx - l}{a + l} \right) \left( \frac{Ly - l}{b + l} \right) \quad (2.9)$$

Si la altura del horno la representamos por L, entonces el número de camas para un horno cuadrado es  $L/c$  y el número de ladrillos totales dentro del horno (NT) es:

$$NT = NC \cdot \left( \frac{L}{c} \right) = \left( \frac{Lx - l}{a + l} \right) \left( \frac{Ly - l}{b + l} \right) \left( \frac{L}{c} \right) \quad (2.10)$$

La porosidad está definida como el cociente que resulta de dividir el volumen de huecos entre el volumen total:

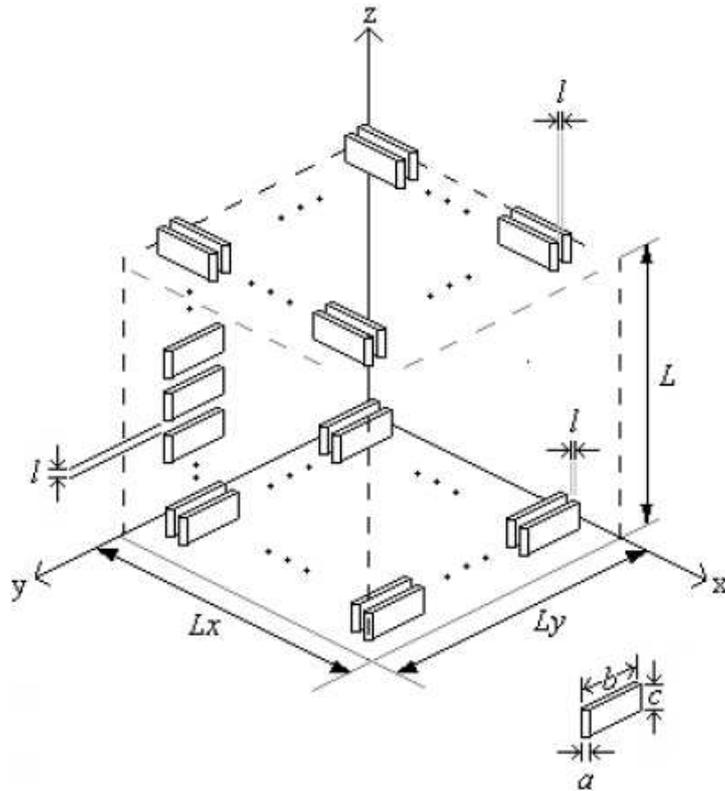
$$\varepsilon = 1 - \frac{NT(abc)}{Lx \cdot Ly \cdot L} \quad (2.11)$$

El área disponible de cada ladrillo puede aproximarse a  $2c(a + b)$ , entonces el área por “cama” ( $A_c$ ) es:

$$A_c = 2 \cdot NC \cdot c \cdot (a + b) \quad (2.12)$$

Siguiendo la definición de  $a_v$  (área de la pila/volumen de la pila) se tiene:

$$a_v = \frac{2c(a + b)NC \left( \frac{L}{c} \right)}{Lx \cdot Ly \cdot L} \quad (2.13)$$



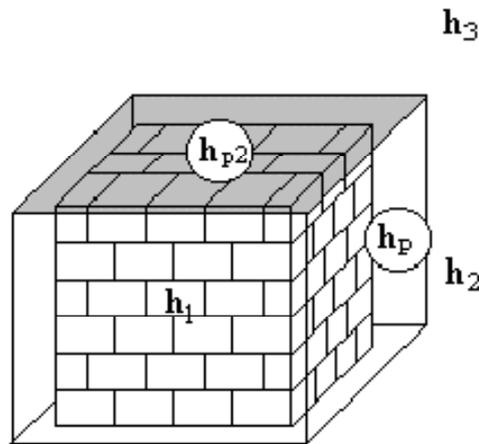
**Figura 2.9 Variables que determinan la porosidad de la pila de ladrillos en un horno cuadrado.**

### 2.7.3.5 Factor Geométrico. [15]

El factor geométrico (S) es el cociente que existe entre dos dimensiones; para un horno cuadrado  $S = \text{Altura}/(0.5 \cdot \text{ancho})$ .

### 2.8 Coeficientes de transferencia de calor.

La Figura 9 muestra los diferentes coeficientes de transferencia de calor que es necesario estimar para el horno cuadrado.



**Figura 2.10** Ubicación de los coeficientes de transferencia de calor.

**2.8.1** Coeficiente interno  $h_1$ .

No existe una correlación específica para calcular este coeficiente. Su valor real debe obtenerse experimentalmente, sin embargo, puede calcularse en forma aproximada suponiendo que la pila de ladrillos constituye un medio poroso. La Tabla VII muestra algunos valores obtenidos usando distintas correlaciones. [6][16].

**Tabla 2.8.** Comparación de correlaciones para obtener  $h_1$ .

Correlación	$h_1$ (cal cm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$h_1 = 0.61 \phi C_p G_0 \left( Pr_g \right)^{\frac{2}{3}} Re^{0.41}$	$3.2668 \times 10^{-3}$
$\frac{h_1 H}{k} = 0.888 Ra^{0.5}$	$1.5378 \times 10^{-2}$
$\frac{h_1 d_p}{k} \left( \frac{\epsilon}{1-\epsilon} \right) Pr^{-\frac{1}{3}} = 0.5 \left( \frac{1}{1-\epsilon} \right)^{\frac{1}{2}} Re^{\frac{1}{2}} + 0.2 \left( \frac{1}{1-\epsilon} \right)^{\frac{2}{3}} Re^{\frac{2}{3}}$	$4.9023 \times 10^{-4}$

**2.8.2** Coeficiente entre la pared del horno y el medio ambiente  $h_2$ .

Este coeficiente puede calcularse con la siguiente correlación

$$Nu = \frac{h_2 L}{k} = 0.825 + 0.387 Ra_L \frac{1}{16} \left( 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}} \quad (2.14)$$

Valido para  $10^{-1} < Ra_L < 10^{12}$ .

### 2.8.3 Coeficiente entre el domo del horno y el medio ambiente $h_3$ .

Visualizando el domo del horno como si fuera un plato horizontal, puede utilizarse la siguiente correlación:

$$Nu = \frac{h_3 L}{k} = 0.27 (GrLPr)^{0.25} \quad (2.15)$$

donde  $k$  y las demás propiedades son las del gas, y  $L = 0.25$  para el caso del horno cuadrado

### 2.8.4 Coeficiente global en la pared del horno $h_p$ .

Para una geometría cuadrada este coeficiente viene dado por

$$h_p = \left( \frac{1}{h_1} + \frac{W_{esp}}{k_{pared}} + \frac{1}{h_2} \right)^{-1} \quad (2.16)$$

En donde  $L$  es la dimensión externa,  $k_{pared}$  es la conductividad térmica de la pared del horno (generalmente adobe), donde  $W_{esp}$  es el espesor de pared.

### 2.8.5 Coeficiente global en el domo del hornoh<sub>p2</sub> .

Para esta geometría el coeficiente en el domo se calcula como si se tratara de una pared compuesta aplicando la ecuación:

$$h_{p2} = \left( \frac{1}{h_1} + \frac{\text{Espesor}}{k \text{ tierra}} + \frac{1}{h_3} \right)^{-1} \quad (2.17)$$

Donde, Espesor, es el espesor de la capa de tierra (3-10 cm) y  $k_{\text{tierra}}$  su conductividad calorífica.  $K \text{ tierra seca} = 0.91 \text{ W / m K}$

### 2.9 Eficiencia del horno.

La eficiencia del horno viene dada por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\text{Energía aprovechada}}{\text{Energía total}} \quad (2.18)$$

## CAPÍTULO III

### ANÁLISIS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL HORNO

#### 3. Modelos matemáticos.

En este trabajo la temperatura es una variable importante, por esta razón, se describe la ecuación de energía y las condiciones de frontera utilizadas. La finalidad es fundamentar la formulación de los modelos matemáticos que se utilizan.

##### 3.1 Modelo para un Horno tradicional para ladrillos

El ladrillo común es utilizado para instalaciones donde no se requiere demasiada temperatura el mismo que llega a soportar hasta 700°C El ladrillo contiene poros extremadamente finos que retienen una gran cantidad de agua que debe ser secada completamente para evitar la destrucción del ladrillo [8].

Las ecuaciones que gobiernan la transferencia de calor y masa son las siguientes:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{a}{g} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{a}{g} \frac{\partial P}{\partial y} \right) + \frac{\partial W_d}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - C_a \frac{\partial W}{\partial t} = C_W \frac{a}{g} \left( \frac{\partial P}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3.2)$$

**Las condiciones frontera son:**

Para la humedad:

$$-\frac{a}{g} \frac{\partial P}{\partial n} = B_W (P - P_{ent}) \quad 3.3$$

$$P = P_w \quad 3.4$$

Para la temperatura:

$$-K \frac{\partial T}{\partial n} = h_T(T - T_{en}) + C_a h_W(P - P_{ent}) \quad 3.5$$

$$T = T_w \quad 3.6$$

donde  $W$  es el contenido de agua libre;  $W_d$  es el agua liberada por deshidratación durante el calentamiento;  $a$  es la permeabilidad relativa;  $g$  es la aceleración gravitatoria;  $P$  es la presión de vapor del poro;  $t$  es el tiempo;  $x$  y  $y$  son las coordenadas espaciales (especificadas en las condiciones frontera como  $n$ );  $\rho$  es la densidad del ladrillo;  $C_p$  es el calor específico del ladrillo a presión constante;  $C_a$  es el calor de evaporación del agua libre;  $C_w$  es el calor específico del agua;  $k$  es la conductividad térmica del ladrillo;  $h_w$  y  $h_T$  son los coeficientes convectivos de transferencia para la humedad y el calor, respectivamente;  $T_{en}$  y  $P_{en}$  son la temperatura ambiente y la presión parcial de vapor del ambiente, respectivamente;  $P_w$  y  $T_w$  representan la presión de vapor de poro y la temperatura en la frontera, respectivamente;  $T$  es la temperatura.

Las condiciones iniciales son: a)  $t = 0$   $T = T_{en}$  y la humedad relativa de  $P/P_s$  ( $25^\circ\text{C}$ ) = 90% en el poro.

Experimentos numéricos muestran[8] que la presión de vapor de poro producida en el proceso de secado está mayormente influenciada por la permeabilidad y la conductividad calorífica, especialmente por la permeabilidad

Las ecuaciones 3.5 y 3.6 por el método de elemento finito muestra que es adecuado para predecir los efectos de la geometría del horno durante el proceso de secado.

### **3.2 Metodología.**

Para identificar las variables que tienen mayor influencia sobre la temperatura promedio y sobre la distribución de temperatura de los ladrillos dentro del horno, se ha seguido la siguiente metodología:

**1. Selección de las variables de interés.** Estas son: temperatura de flama( $T_f$ ), temperatura ambiente( $T_a$ ), espaciado en el estibado del ladrillo( $l$ ), velocidad de ascenso de los gases de combustión( $V_g$ ), el espesor de la pared del horno( $esp$ ), la geometría.

**2. Formulación de modelos matemáticos** que representen el fenómeno de la cocción de ladrillo para el horno cuadrado de tipo tradicional.

**3. Cálculo de la temperatura promedio** para distintos valores del grupo de variables de interés. Esto con la finalidad de determinar que variables son más importantes.

**4 . Determinación de los perfiles de temperatura del ladrillo** para la variable más significativa.

**5. Análisis de los resultados.**

### **3.2.1 Selección de las variables de interés.**

#### **3.2.1.1 Temperatura de flama.**

En la práctica se utilizan un gran número de combustibles para la cocción de los ladrillos. En este trabajo se consideró como único combustible la biomasa (leña de eucalipto y aserrín mezclado en la arcilla). La manera de calcular la temperatura de flama se encuentra en el Capítulo 2.

Según ecuación (2.3):

$$T_f = \frac{90160000}{77404} \left( \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right) + \frac{1041}{77404} \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}} (15)^\circ\text{C}$$

$$T_f = 1164.7 + 0.20 = 1164.9^\circ\text{C}$$

Para observar la influencia de la temperatura de flama sobre la temperatura promedio se decidió utilizar los siguientes valores: 1000, 950, 800 y 700°C. Donde el valor mayor es muy cercano al valor teórico obtenido si el combustible se quemara completamente (1110 °C) [13], debido a que en la práctica es muy difícil de lograr, valores más pequeños se sugieren hasta un mínimo de 700°C.

#### **3.2.1.2 Temperatura ambiente.**

El valor utilizado para la temperatura ambiente fue de 15°C, que es el valor de la temperatura promedio en el sector Chambo. Aunque en la práctica la temperatura ambiente puede variar significativamente en un mismo día, en las simulaciones se le consideró constante.

#### **3.2.1.3 Espaciado.**

En la práctica el espaciado es empírico, pero en promedio es de 0.75 cm.; basados en la experiencia previa de los ladrilleros, los valores muy pequeños (menores que 0.25 cm) no serían prácticos y mayores que 2 cm no proporcionan un quemado homogéneo. Debido a lo anterior, los valores considerados fueron 0.25, 0.5, 1 y 2 cm.

#### **3.2.1.4 Velocidad de ascenso de los gases de combustión.**

La importancia de la velocidad de ascenso de los gases de combustión se debe al hecho que parte de la transferencia de calor en el horno se efectúa de los gases al ladrillo, la velocidad con la que se muevan estos gases debe influir sobre la convección y sobre la cocción. Durante las quemas en campo, un aumento en la velocidad de dichos gases puede inducirse por la presencia de un ventilador cerca del hogar. Teniendo en cuenta lo anterior se utilizaron valores en el intervalo de 50-450 cm/min. La velocidad del viento en Chambo 20 m /s y la velocidad de los gases de combustión son de 25 cm /min[15].

Según ecuación(2.4):

$$0.25 \left( \frac{m}{min} \right) \frac{1.41(1.51-1)}{1.51(1.41-1)} \frac{1.52}{1.010(15)} + 1 = 0.62 \text{ (m/min)}.$$

### **3.2.1.5 Espesor de pared.**

Los espesores de pared empleados obedecen a algunas de las combinaciones que pueden presentarse al acomodar ladrillos. Los valores analizados fueron: 7, 21, 35 y 42 cm.[1] Frecuentemente, los dos primeros se localizan en los llamados hornos de campana, los dos siguientes son utilizados en hornos de capacidades mayores a los 10,000 ladrillos. Para lo cual utilizaremos el valor de 42 cm.

### **3.3 Formulación matemática.**

Los modelos matemáticos se basan en considerar el intercambio de energía entre el gas (gases producto de la combustión) y el sólido (ladrillo), tomando en cuenta los fenómenos de conducción, convección y radiación. Los modelos que a continuación se describen utilizan propiedades y parámetros físicos. Las siguientes suposiciones están implícitas en los modelos

- i) La transferencia de calor se efectúa del gas al sólido.
- ii) El gas fluye dentro del horno en régimen laminar.
- iii) La convección forzada domina sobre la natural.
- iv) No se considera reacción química ni efectos de re-radiación
- v) Las propiedades físicas se mantienen constantes.
- vi) El combustible es leña de eucalipto, aserrín mezclado en la arcilla y su combustión es completa.

### 3.3.1 Horno cuadrado. (Modelo en 2D)

Ecuaciones que caracterizan la transferencia de calor en el horno cuadrado.

Para el sólido :

$$\rho_s C p_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{K_s}{(1-\varepsilon)} \left[ \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \right] + h_1 a_v (T_g - T_s) + \sigma \gamma_s a_v (T_g^4 - T_s^4) \quad (3.7)$$

Para el gas :

$$\rho_g C p_g \left( \frac{\partial T_g}{\partial t} + V_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \right) = \frac{K_s}{\varepsilon} \left[ \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} \right] - h_1 a_v (T_g - T_s) - \sigma \gamma_g a_v (T_g^4 - T_s^4) \quad (3.8)$$

El modelo está constituido con las ecuaciones 3.7 y 3.8, las condiciones iniciales y las condiciones frontera indicadas en las Tablas IX y X. Las condiciones de frontera para el sólido se muestran en la Figura 11

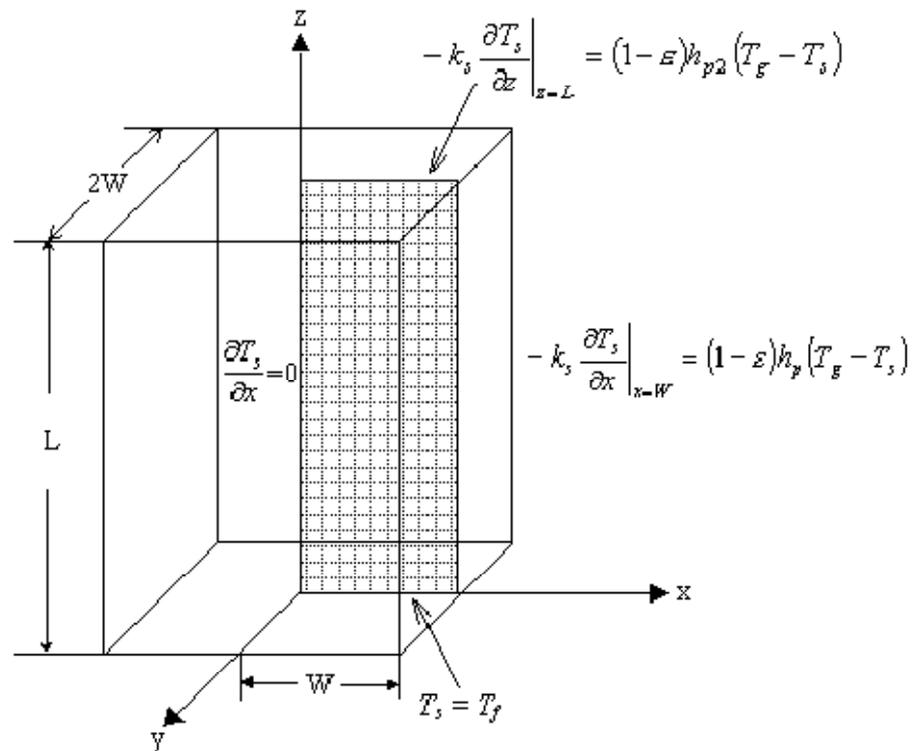


Figura 3.1 Condiciones frontera del sólido en el horno cuadrado 2D.

**Tabla 3.1 Condiciones frontera del sólido para el horno cuadrado en 2d.**

	<b>Expresión matemática</b>	<b>Interpretación física</b>
X=0	$\frac{\partial T_s}{\partial x} \int_{x=0} = 0$	En las paredes del horno el calor por conducción es igual al calor por convección entre el gas y el sólido.
X=W	$-K_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \int_{x=W} = (1 - \varepsilon) h_p (T_g - T_s)$	En las paredes del horno el calor por conducción es igual al calor por convección entre el gas y el sólido.
Z=0	$T_s = T_f$	En las paredes del horno el calor por conducción es igual al calor por convección entre el gas y el sólido.
Z=L	$-K_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \int_{z=L} = (1 - \varepsilon) h_2 (T_g - T_s)$	En el domo del horno el calor por conducción es igual al calor por convección entre el gas y el sólido.

**Tabla 3.2 Condiciones frontera del gas para el horno cuadrado en 2d.**

	<b>Expresión matemática</b>	<b>Interpretación física</b>
x=0	$\frac{\partial T_g}{\partial x} \int_{x=0} = 0$	En las paredes del horno el calor por conducción del gas es igual al calor por convección entre el gas y el medio ambiente.
x=W	$-K_g \frac{\partial T_g}{\partial x} \int_{x=W} = \varepsilon h_p (T_g - T_a) + \varepsilon h_1 (T_g - T_s)$	En las paredes del horno el calor por conducción del gas es igual al calor por convección entre el gas y el medio ambiente.
Z=0	$T_g = T_f$	En la base del horno, la temperatura del gas es igual a la temperatura de flama.
Z=L	$-K_g \frac{\partial T_g}{\partial z} \int_{z=L} = \varepsilon h_{p2} (T_g - T_a) + \varepsilon h_1 (T_g - T_s)$	En la parte superior del horno, la conducción del gas es igual a la convección entre el gas y el medio ambiente.

Suponiendo que domina la convección forzada sobre la natural y que el flujo es laminar, se propuso utilizar el perfil parabólico de velocidad obtenido para el paso de un fluido a través de una sección rectangular como una aproximación para el perfil de velocidad en un horno cuadrado[6]. En este caso, la expresión para  $V_g(x)$  es la siguiente:

$$V_g(x) = V_{gmax} \left[ 1 - \left( \frac{x}{W} \right)^2 \right] = \frac{(P_0 - P_L)W^2}{2\mu_g L} \left[ 1 - \left( \frac{x}{W} \right)^2 \right] \quad (3.9)$$

Sustituyendo la ecuación 3.14 en la 3.15

$$\rho_g C p_g \left( \frac{\partial T_g}{\partial t} + \frac{(P_0 - P_L)W^2}{2\mu_g L} \left[ 1 - \left( \frac{x}{w} \right)^2 \right] \frac{\partial T_g}{\partial z} \right) = \frac{K_g}{\varepsilon} \left[ \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} \right] - h_1 a_v (T_g - T_s) - \sigma \gamma_g a_v (T_g^4 - T_s^4) \quad (3.10)$$

### 3.3.2 Cálculo de la temperatura promedio.

La temperatura promedio junto con la distribución de temperaturas dentro del horno es importante porque determinan en gran medida la calidad del producto final.

El software nos da una temperatura promedio de 700°C, que es la temperatura promedio de los ladrillos.

### 3.4 Cálculo de la porosidad y el coeficiente $a_v$ .

$$Nx = \frac{Lx}{c} = \frac{4500}{150} = 30$$

$$Ny = \frac{Ly}{b} = \frac{5200}{300} = 17$$

$$Nc = 17 \times 30 = 510$$

$$Nt = 510 \left( \frac{4500}{150} \right) = 15300 \text{ ladrillos}$$

- **Porosidad:**

$$\varepsilon = 1 - \frac{15300(50 \times 150 \times 300)}{4500 \times 5200 \times 5200} = 0.90 \text{ mm}$$

- **Área disponible para cada ladrillo:**

$$2(150)(50 + 300) = 105\,000 \text{ mm}^2$$

- **Área por cada cama :**

$$2(510)(150)(50 + 300) = 53\,550\,000 \text{ mm}^2$$

- **Coefficiente  $a_v$ :** según la ecuación 2.13

$$\frac{2(150)(300 + 50)510 \left(\frac{5200}{150}\right)}{4500 \times 5200 \times 5200} = 0.01525641$$

### 3.5 Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor.

- **Cálculo de  $h_1$ :**

Según las correlaciones de la tabla VII, hemos seleccionado el valor de  $1,5378 \times 10^{-2} \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ K}^{-1} = 7 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

- **Calculo de  $h_p$ :**

Según la ecuación 2.16

$$\left(\frac{1}{0.01} + \frac{42}{0.989} + \frac{1}{2.6 \times 10^{-4}}\right)^{-1} = 6.83 \times 10^{-3} \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{ min K}} = 4,712 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- **Cálculo de  $h_{p2}$ :**

Según ecuación 2.17,

$$\left(\frac{1}{0.01} + \frac{3}{0.989} + \frac{1}{5,810^{-2}}\right)^{-1} = 8,31 \times 10^{-3} \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2 \text{ min K}} = 5,797 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

Se calculo todos los coeficientes convectivos, indicados en el capítulo II, pero los coeficientes que usa el software se encuentran calculados, en este literal.

### **3.6 Cálculo de la eficiencia del horno sin las ayudas**

Energía Total = 138680.3 MJ

$$nt = \frac{\text{Energía aprovechada}}{\text{Energía total}}$$

$Q_{cc} = m_{\text{ladrillo}} \times C_p \times (1000-300)^\circ\text{K}$

$$= 4 \text{ Kg} \times 15000 \times 0.2006 \times \text{Kcal /Kg}^\circ \text{K} \times 700^\circ\text{K}$$

$$= 8425200 \text{Kcal} \times 4.1868 \text{ KJ/Kcal}$$

$$= 35274627 \text{ KJ}$$

$$= 35274.627 \text{ MJ}$$

$$nt = \frac{35274.627}{138680.3} = 0.2543 \cdot 100 \% = 25.43\%$$

### **3.4 Obtención de perfiles de temperatura del ladrillo.**

Los valores discretos utilizados para calcular la temperatura promedio son utilizados para obtener los perfiles de temperatura(gas o sólido). Para tal efecto se utilizó un programa de cálculo. La información de los perfiles define y localiza donde se encuentran las zonas frías, que son de interés práctico por ser estas donde encontramos un producto de mala calidad.

### **3.5 Perfil de temperatura de hornos ladrilleros.**

El objetivo de obtener el perfil del ladrillo es que mediante estas curvas nos podemos dar cuenta cuales son las partes en la que el suministro de calor es deficiente o exagerado, y es una de las mayores razones por las cuales tenemos producto de mala calidad.

## CAPITULO IV

### DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS EN EL HORNO

#### 4. Resultados y Discusión.

En este capítulo se analizan y discuten los resultados obtenidos. La solución de los modelos en 2D se realizó una simulación de las variables más representativas dentro del proceso de horneado de ladrillos.

[15]El valor del factor geométrico para un horno cuadrado cuya altura es 2.5 veces mayor que la mitad del ancho, es de 2.5 el mismo que es utilizado comúnmente en la práctica. El tiempo de quema simulado fue de 30 h.

##### 4.1 Efecto de las Variables en la Temperatura Promedio.

Los modelos matemáticos solucionados en esta sección corresponden al horno cuadrado en 2D. La temperatura de flama fue la primera variable que se analizó. Los resultados se muestran en la Tabla 4.1 y se obtuvieron para una temperatura ambiente de 15°C, un espesor de pared  $d$  de 42 cm y un espaciado de 0.25 cm. Estos resultados indican que la temperatura promedio aumenta al aumentar  $V_g$ , siendo la máxima temperatura registrada de 890.56 °C ( $V_g = 400$  cm/min) y la mínima de 124.44°C ( $V_g = 50$ cm/min).

La temperatura de flama también influye sobre la temperatura promedio. En la práctica la temperatura de flama tiene que ver con el tipo de combustible empleado y su eficiencia al quemarse. Como puede observarse si  $V_g$  aumenta de 200 a 400 cm/min la temperatura promedio se incrementa un 60% para todos los valores de  $T_f$  analizados, esto no significa que este porcentaje vaya a presentarse en una quema de campo, pero es indicativo que un incremento en el valor de  $V_g$  incrementa la temperatura promedio.(ecuaciones 3.9 y 3.10)

**Tabla 4.1 Efecto de la temperatura de flama sobre la temperatura promedio del horno.**

<b>Temperatura promedio (°C)</b>				
<b>Tf (°C)</b>	<b>Vg = 50 cm/min.</b>	<b>Vg = 150 cm/min.</b>	<b>Vg = 200 cm/min.</b>	<b>Vg = 400 cm/min.</b>
<b>700</b>	<b>124.44</b>	203.33	241.53	393.44
<b>800</b>	152.72	229.75	273.61	448.03
<b>900</b>	177.44	2269.37	321.73	529.9
<b>1000</b>	202.16	309.00	369.85	<b>890.56</b>

De acuerdo a las condiciones de frontera en el domo, los hornos están tapados con una capa de tierra de 3 cm de espesor. Al disminuir  $V_g$  aumenta el tiempo de residencia de los gases de combustión, favoreciendo la convección. Aunque no se le considera en el modelo, está implícito que los gases escapan a través del domo.

La segunda variable analizada fue la temperatura ambiente. Los resultados obtenidos están en la Tabla 4.2. Los valores utilizados fueron:  $T_f = 1000^\circ\text{C}$ , espesor = 42 cm y  $l = 0.25$  cm. Para una  $V_g = 50$  cm/min., se observa que la diferencia entre la temperatura promedio máxima y mínima es de  $25^\circ\text{C}$ , mientras que para  $V_g = 400$  cm/min, esta diferencia es de  $15^\circ\text{C}$ . Esto sugiere que el efecto de  $V_g$  influye significativamente sobre la temperatura promedio aún cuando la temperatura del ambiente oscile entre 10 y  $40^\circ\text{C}$ .

**Tabla 4.2 Efecto de la temperatura ambiente sobre la temperatura promedio del horno.**

<b>Temperatura promedio (°C)</b>				
<b>Ta(°C)</b>	<b>Vg = 50 cm/min.</b>	<b>Vg = 150 cm/min.</b>	<b>Vg = 200 cm/min.</b>	<b>Vg = 400 cm/min.</b>
<b>10</b>	172.76	269.38	324.82	549.35
<b>20</b>	180.92	276.47	331.44	554.49
<b>30</b>	189.20	283.56	338.07	551,62
<b>40</b>	197.83	290.66	344.70	<b>564.74</b>

La Tabla 4.3 resume los resultados obtenidos al variar el espaciado, mientras que la Tabla 4.5 muestra los resultados para distintos espesores de pared. Los resultados en el primer caso al igual que en el segundo se obtuvieron para una temperatura ambiente de 15°C, un espesor de pared de 42 cm y una temperatura de flama de 1000°C un espaciado de 0.25 cm.

Para velocidades de 50, 150 y 200 cm/min se muestra que el efecto del espaciado incrementa la temperatura promedio hasta en 4 °C para cada rango de velocidades por ejemplo ( $V_g = 200$  cm/min), y velocidades mayores, este aumento no se presenta para  $V_g = 400$  cm/min; debido probablemente a que el efecto del espaciado sobre la temperatura promedio no es muy significativo.

**Tabla 4.3 Efecto del espaciado sobre la temperatura promedio del horno.**

Temperatura promedio (°C)				
l (cm)	Vg = 50 cm/min.	Vg = 150 cm/min.	Vg = 200 cm/min.	Vg = 400 cm/min.
<b>0.25</b>	185.00	279.96	334.76	557.06
<b>0,5</b>	185.68	280.65	335.34	556.86
<b>1.0</b>	187.24	282.11	336.61	556.47
<b>2.0</b>	190.56	285.93	339.15	<b>555.60</b>

Al observar la Tabla 4.4 podemos percatarnos que la temperatura promedio es independiente del espesor de pared, pues en el mejor de los casos la diferencia entre el mínimo y el máximo espesor es aproximadamente de 1°C. Debe tenerse en cuenta que los resultados en las Tablas 4.3 a 4.4 son más bien de tipo cualitativo. En todas, la dependencia de la temperatura promedio con  $V_g$  resultó ser la más significativa. Sin embargo, es muy difícil que la condición de  $V_g$  constante se presente, pues esto implicaría que en cada punto dentro del horno se tiene el mismo valor.

Tabla 4.4. Efecto del espesor de pared sobre la temperatura promedio del horno.

Temperatura promedio (°C)				
esp (cm)	Vg = 50 cm/min.	Vg = 150 cm/min.	Vg = 200 cm/min.	Vg = 400 cm/min.
7.00	184.80	279.48	334.17	555.89
21.00	184.90	279.67	334.56	556.67
35.00	185.00	279.96	334.76	557.06
42.00	185.00	279.96	334.76	<b>557.16</b>

#### 4.2 Porosidad de la pila contra temperatura promedio.

La Figura que se obtuvo al graficar la ecuación 2.11, muestra la relación que existe entre el espaciado del ladrillo al estibar y la porosidad de la pila de ladrillos; dicha relación indica que para los espaciados entre 0.5 y 2.0 cm el valor de la porosidad es prácticamente el mismo.

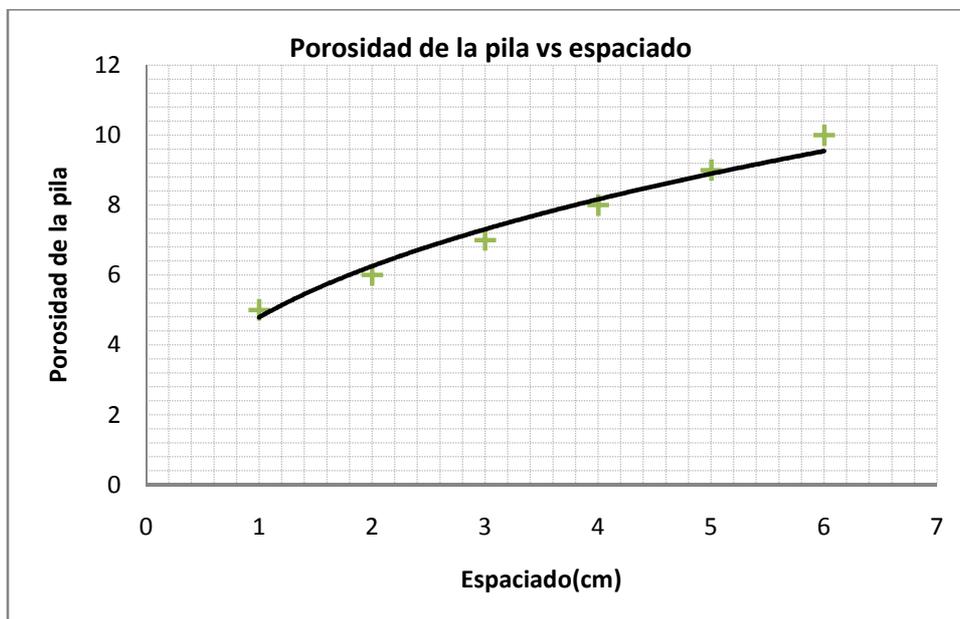


FIGURA 4.1 POROSIDAD DE LA PILA VS ESPACIADO

**Tabla 4. 5 Efecto de la porosidad sobre la temperatura promedio para hornos de 15 mil ladrillos.**

Porosidad	Temperatura Promedio (°C)
0.1	725.90
0.2	728.65
0.3	714.20
0.4	712.18

Los resultados de la Tabla XV se obtuvieron para  $L = 300$  cm,  $V_{gm} = 400$  cm/min,  $esp = 40$  cm, espesor de la capa de tierra de 3 cm,  $T_f = 1000$  °C y  $T_a = 15$ °C. El aumento de la porosidad es indicativo de un aumento del número de huecos en el horno y, por lo tanto, de una disminución en el número de ladrillos; hecho que aparentemente influye ligeramente sobre la temperatura promedio.

#### **4.3 Análisis de las limitaciones en los modelos matemáticos.**

Es importante analizar las limitaciones de los modelos utilizados. En primer lugar, la forma en cómo se visualiza el horno y la cocción. Se consideró el horno como un cuerpo sólido con cierta porosidad (donde los espacios entre los ladrillos constituyen los poros)[15]. Esta forma permite tomar en cuenta la conducción, la convección y la radiación, pero limita la contribución energética de otros fenómenos que pueden ser importantes, tales como el secado y la reacción química.

El espaciado resultó tener una influencia mínima sobre los perfiles de temperatura y la temperatura promedio; sin embargo, una limitación de los modelos utilizados es que consideran un espaciado constante (que corresponde a un cierto acomodo) y no permite estudiar el efecto de otros acomodos de los ladrillos.

Cabe indicar que se ha tratado de simular espacios pequeños como es el espacio existente entre los ladrillos(0.25cm), pero no se ha tenido resultados coherentes ya que el programa, ha quedado limitado.

El acomodo de ladrillos afecta principalmente a dos fenómenos, la conducción del sólido y la convección. Todas las posibles configuraciones en el acomodo implican un cierto espaciado que puede ser constante o variable. Si el espaciado es pequeño, aumenta el área de transferencia de calor por conducción y la turbulencia (convección favorecida), pero los resultados incrementa el tiempo de residencia de los productos de combustión, principalmente agua y bióxido de carbono. Esto ocasiona una disminución de la temperatura de flama y de la temperatura promedio.

Si por el contrario, el espaciado es muy grande, existe evidencia de un incremento en el tiempo de cocción y un mayor gasto de combustible (experiencia de los ladrilleros).

Hemos supuesto que en el interior del horno domina la convección forzada, por la cantidad y velocidad de viento existente en el sitio; sin embargo, ésta es otra limitación del modelo. Lo más probable, es que sea necesario considerar conjuntamente la convección natural y la forzada. La estimación de números adimensionales tales como el Reynolds y el Grashof pueden resultar útiles para discernir qué tipo de convección prevalece.

El orden de magnitud empleado para los coeficientes de transferencia de calor ( $h_1$ ,  $h_p$  y  $h_{p2}$ ), se describen en los respectivos cálculos. Los perfiles de temperatura del ladrillo están influenciados tanto por la  $V_g$  como por el valor de estos coeficientes.

Observamos que la suposición de  $V_g$  constante predice perfiles de temperatura que indican que para un tiempo de 20 h más de la mitad superior del horno esta frío. En la práctica, la totalidad de los ladrillos para ese tiempo ya estarían cocidos. Lo que aparentemente es concordante con los resultados que suponen  $V_g$  parabólica.

No estamos seguros que  $V_g$  presente una funcionalidad parabólica dentro del horno. Dicha suposición tendría que comprobarse experimentalmente. Sin

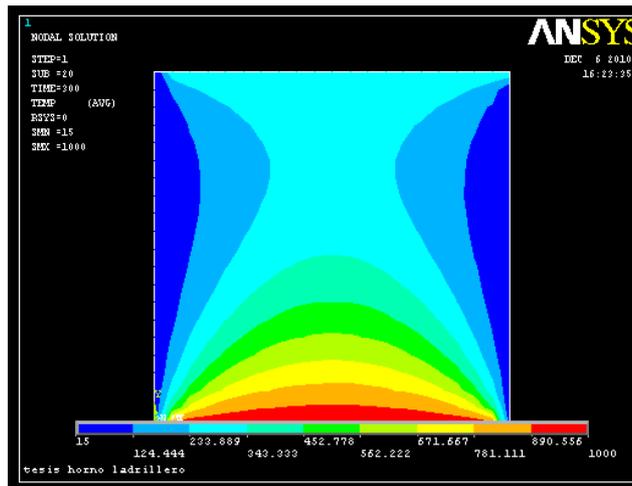
embargo, las dificultades experimentales son muchas y con alto costo (altas temperaturas, equipo de control y monitoreo, etc.).

En las simulaciones se observó que una distribución parabólica de velocidades da como resultado una mejor distribución de temperaturas que la suposición de un perfil plano ( $V_g$  constante), y he aquí donde la incertidumbre en el perfil parabólico de  $V_g$  plantea una pregunta que debe contestarse en investigaciones futuras. La pregunta es: ¿Puede un determinado acomodo de ladrillos propiciar la formación de perfiles parabólicos?. Probablemente exista más de un acomodo.

Para compensar el calor que al llegar a las paredes laterales es mínimo, se ha previsto de unos canales en los cuales se coloca la biomasa para que al incinerarse pueda llegar a la temperatura de cocción de los ladrillos, y de alguna manera suplir el calor faltante.

#### **4.4 Perfiles de temperatura para un horno cuadrado 2D.**

La representación de los perfiles de temperatura para el sólido obtenidos con el modelo del horno cuadrado 2D con  $V_g$  constante, resultaron ser que más del 50% del horno está frío (Temperaturas inferiores a 80°C). Esto aparentemente no está de acuerdo con lo que sucede en la práctica. En contraste, el modelo que considera un perfil de  $V_g(x)$  parabólico (ecuaciones 3.12 y 3.15) indica que la distribución de temperaturas en el interior del horno cuadrado es más homogénea tal como se observa en la Figura 12. Los datos empleados en la obtención fueron:  $T_f = 1000^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 15^\circ\text{C}$ ,  $l = 0.25$  cm y  $esp = 42$  cm.



**Figura 4.2 Perfiles de temperatura obtenidos al resolver el modelo del horno cuadrado 2D**

En la Figura 4.2 podemos observar que al utilizar un perfil parabólico de velocidad en los modelos matemáticos los perfiles de temperatura se ven modificados. A tal grado que la distribución de temperaturas dentro del horno parece ser más homogénea, presentándose zonas frías en las esquinas. En otras palabras, el horno cuadrado con  $V_g(r)$  parabólico prevé menos pérdidas de material debido a un cocimiento de los ladrillos más homogéneo.

Anteriormente hemos visto que  $V_g$  favorece tanto a la temperatura promedio como a los perfiles de temperatura. Esto induce a pensar que puede ser que parte de la clave al modelar matemáticamente hornos artesanales radique en considerar el efecto de la atmósfera que se origina dentro del horno. Concretamente, incluir los efectos de radiación de posibles radicales libres y el  $CO_2$  (efectos de re-radiación).

Probablemente, el hecho de no predecir temperaturas cercanas a los  $900^\circ C$ , las cuales son necesarias para un buen cocimiento, es que, los modelos no toman en cuenta los fenómenos de reacción química ni el proceso de secado.

#### **4.5 Comparación de los perfiles de temperatura del horno cuadrado con los canales de ayuda y sin los canales de ayuda**

En la figura 4.2 se puede observar claramente que a pesar de que el horno cuadrado brinde, mejor y mayor distribución de calor la parte superior y las

partes laterales se encuentran frías llegando a temperaturas menores que 80°C.

En vista de que la parte superior y laterales no llegan a la temperatura de cocción del producto se ha provisto de unos canales de ayuda por medio de los cuales se ingresa combustible para compensar de alguna manera el calor faltante para llegar a completar la cocción de los ladrillos, Lo podemos observar en la figura 15.

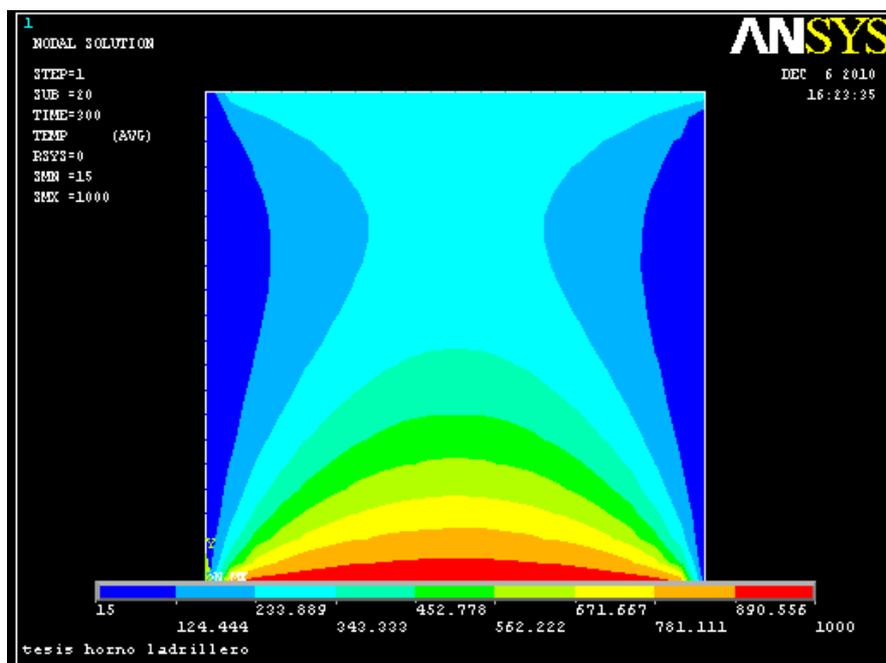
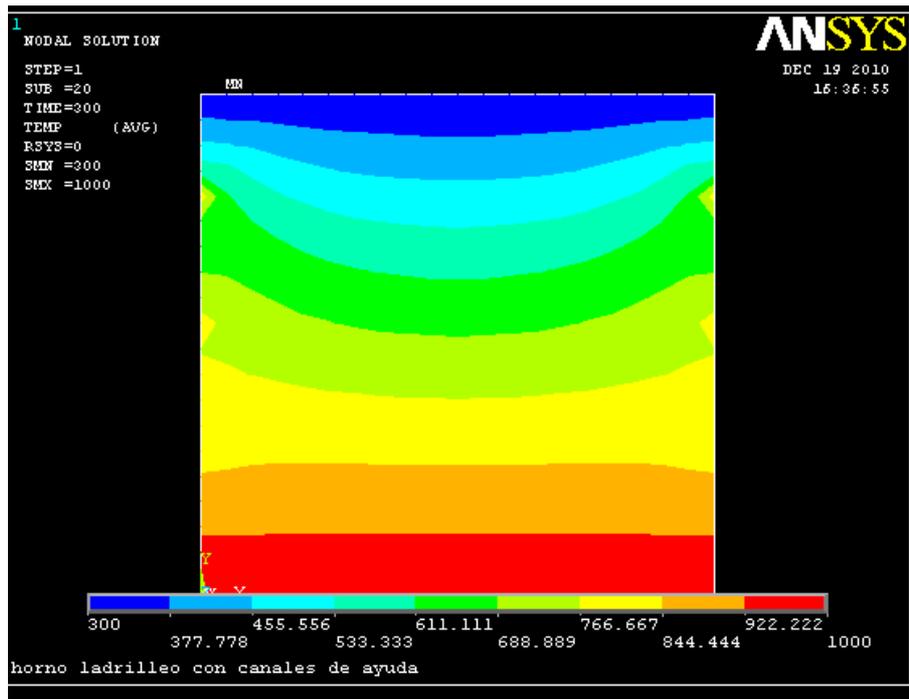


Figura 4.3 Perfiles de temperatura para el horno cuadrado



**FIGURA 4.4 PERFILES DE TEMPERATURA PARA EL HORNO CUADRADO CON CANALES DE AYUDA**

En la figura 16 tenemos la curva temperatura vs tiempo del nodo 26, y sus respectivas temperaturas antes y después de la colocación de los canales de ayuda.

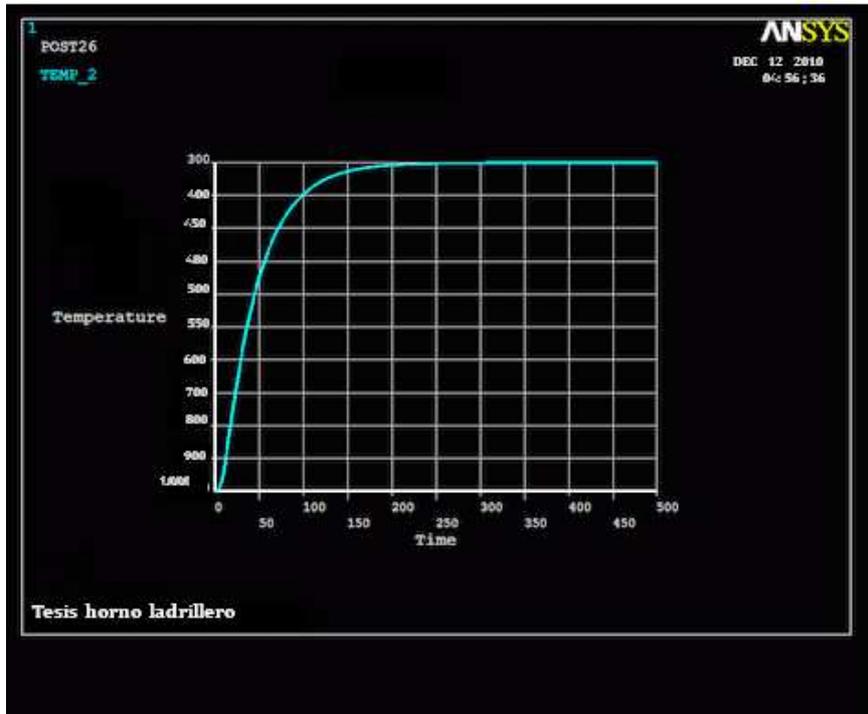


FIGURA 4.5 CURVA CARACTERÍSTICA

PRNSOL Command

File

17	1000.0
18	1000.0
19	1000.0
20	1000.0
21	1000.0
22	300.00
23	15.000
24	15.000
25	15.000
26	15.000
27	15.000
28	15.000
29	15.000
30	15.000
31	15.000
32	15.000
33	15.000
34	15.000
35	15.000
36	15.000
37	15.000
38	15.000

Figura 4.6 Temperatura nodo 26

PRNSOL Command

File

17	1000.0
18	1000.0
19	1000.0
20	1000.0
21	1000.0
22	300.00
23	970.70
24	941.37
25	911.77
26	881.40
27	849.51
28	800.00
29	801.83
30	787.12
31	773.77
32	765.07
33	800.00
34	720.88
35	688.37
36	668.81
37	666.60
38	666.60

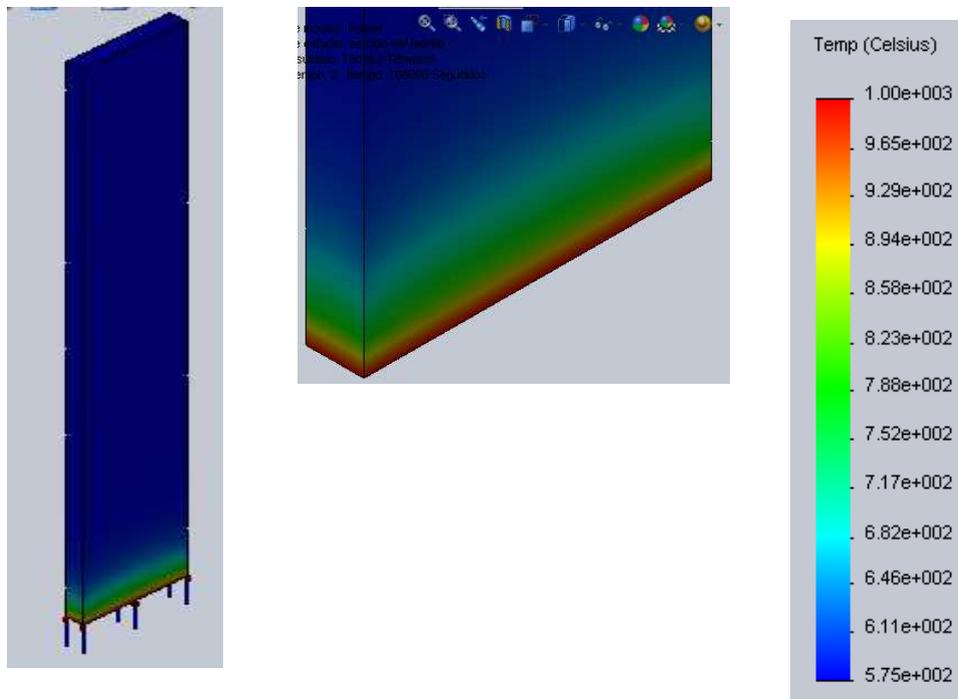
Figura 4.7 Temperatura nodo 26 con

sin canales de ayuda    Canales de ayuda

#### **4.6 Perfiles de temperatura del bloque de ladrillos**

Para la correspondiente simulación hemos tomado una fila de ladrillos de (1 700 mm) expuestos a un ambiente convectivo, con un valor que corresponde a  $7 \text{ W /m}^2\text{K}$ , y con la temperatura de flama que corresponde a  $1000^\circ\text{C}$ , y su temperatura inicial que representa a la temperatura que entran los ladrillos, tomado el estudio dentro de las 30 horas de cocción (108000 segundos), que dura el proceso, obteniendo los siguientes perfiles.

- **Para 1.7m (Primer tramo)**

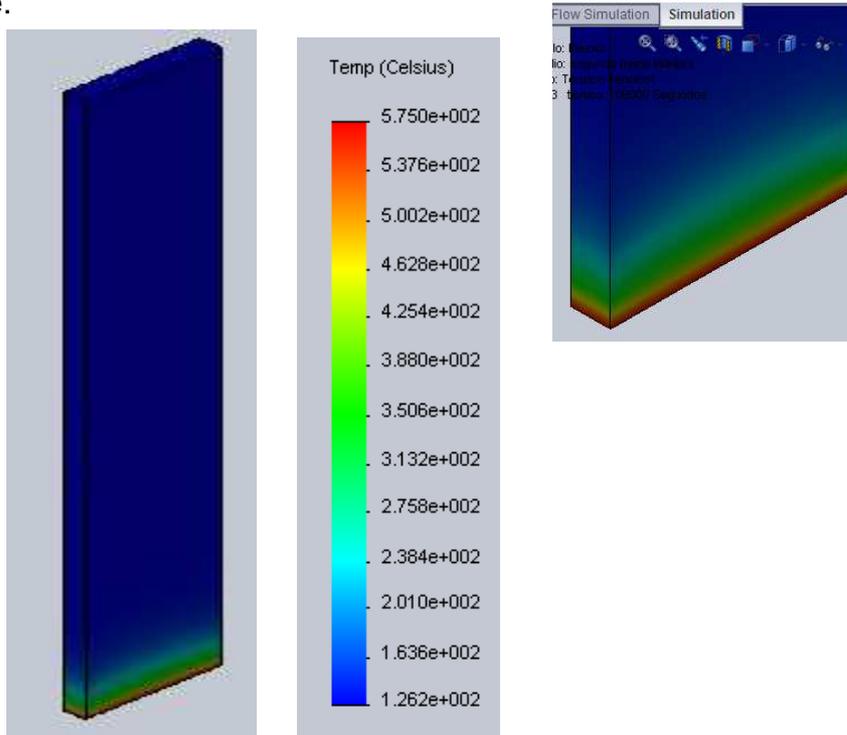


**Figura 4.8 Perfil de temperatura para el primer tramo de ladrillos**

Como podemos observar el rango en que se encuentran los ladrillos es de  $1000^\circ\text{C}$  llegando en su parte superior a  $575^\circ\text{C}$ , lo que significa que este tramo de ladrillos para las 30 horas, ya se encuentran totalmente cocidos.

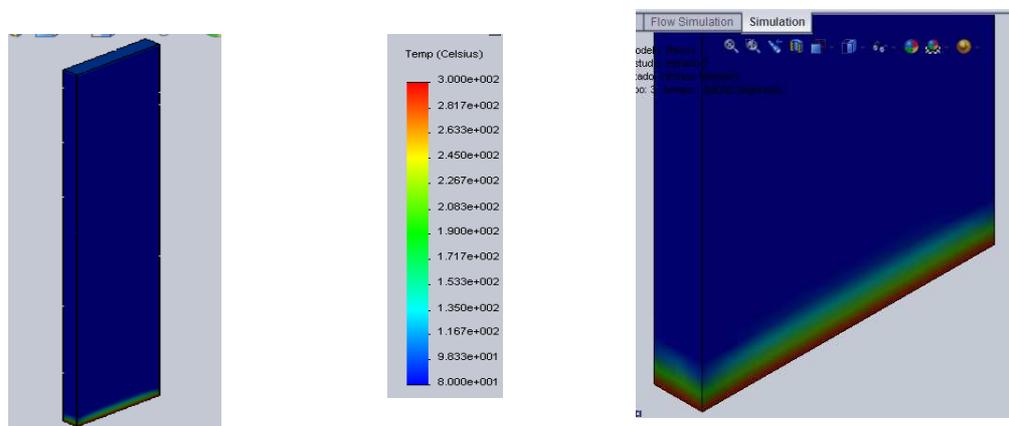
- **Para 1.7m(segundo tramo )**

En este tramo podemos observar que la parte inferior tenemos una temperatura de 575°C, mientras que en la parte superior la temperatura ha llegado a 126°C, lo que nos indica que la parte inferior se encuentra ya cocida mientras que en la parte superior los ladrillos simplemente se encontrarían secos y todavía no han tomado el color ni la compactabilidad necesaria para ser un producto comerciable.



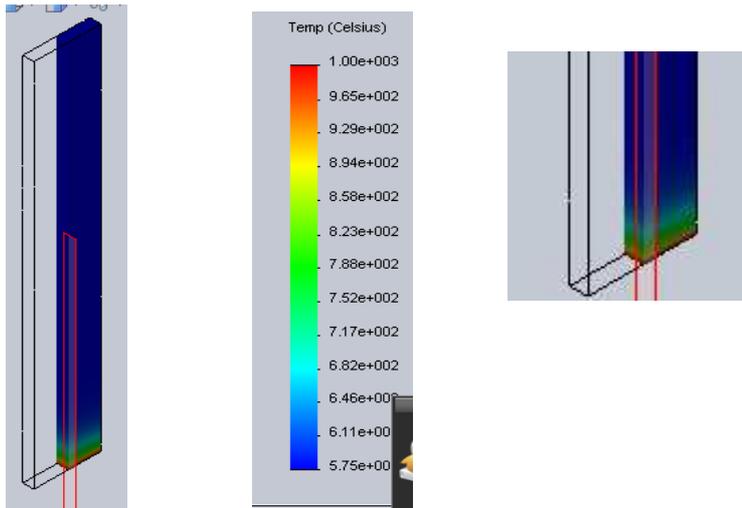
**Figura 4.9 Perfil de temperatura para el segundo tramo de ladrillos**

- **Para 1.7m (tramo final)**

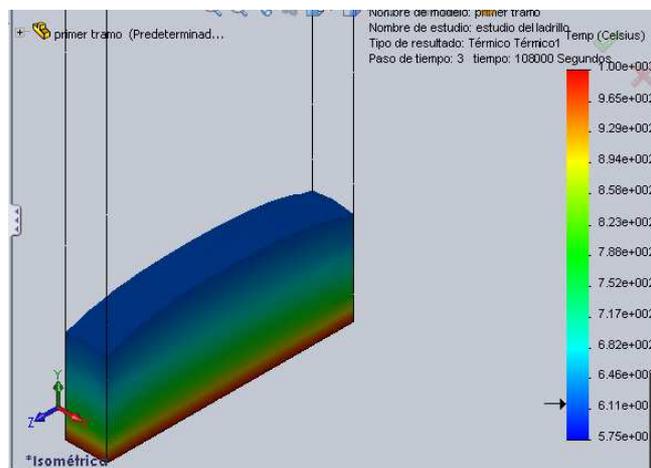


**Figura 4.10 Perfil de temperatura para el último tramo de ladrillos**

Podemos ver que en este tramo la temperatura de la parte inferior llega a 300°C, lo que significa que el producto se encuentra seco relativamente en un 75%, mientras que en la parte superior y media vemos que la temperatura alcanza a los 80°C, lo que nos indica que en esta parte los ladrillos no han llegado ni a la temperatura de absorción de la humedad los mismos que serian una perdida para la producción.



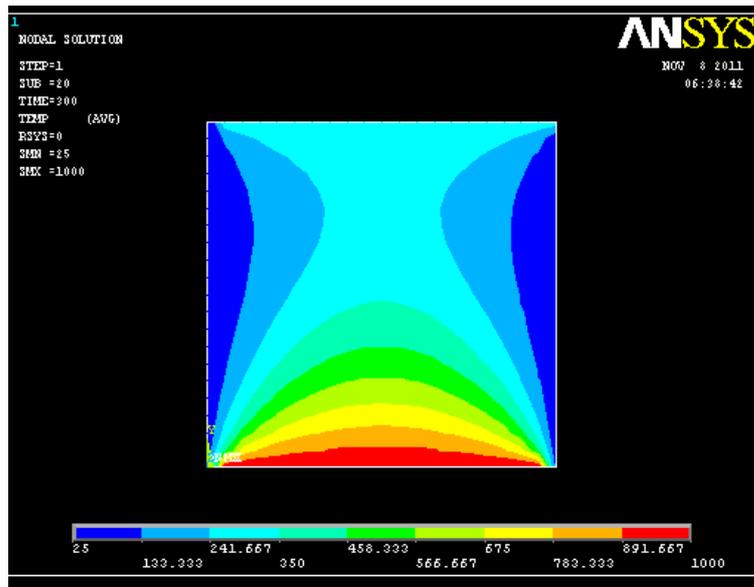
**Figura 4.11 Temperatura en el interior de los ladrillos**



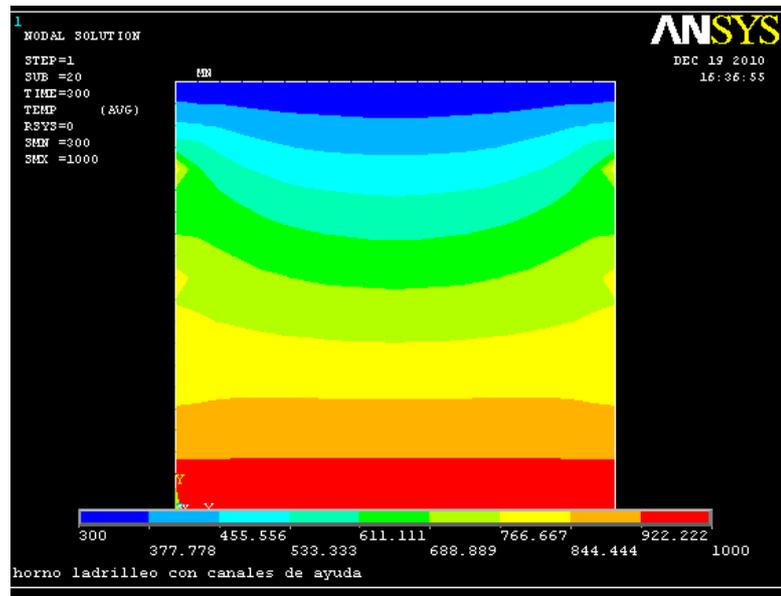
**Figura 4.12 Temperatura en la superficie de la cara interna de los ladrillos**

#### 4.7 Perfiles de temperatura para el horno con el bloque de ladrillos

Hemos considerado como un medio poroso, donde los poros son las distancias existentes entre ladrillos y ladrillo, cabe considerar que este perfil nos da para un cierto espaciado y un cierto acomodo ya que para otros acomodos y otros espaciados tendríamos que analizarlos y ver que perfiles nos dan.



**Figura 4.13 Perfiles de temperatura para el horno cuadrado sin canales de ayuda**



**Figura 4.14 Perfiles de temperatura para el horno cuadrado con canales de ayuda**

#### CURVA CARACTERÍSTICA EN EL NODO 26

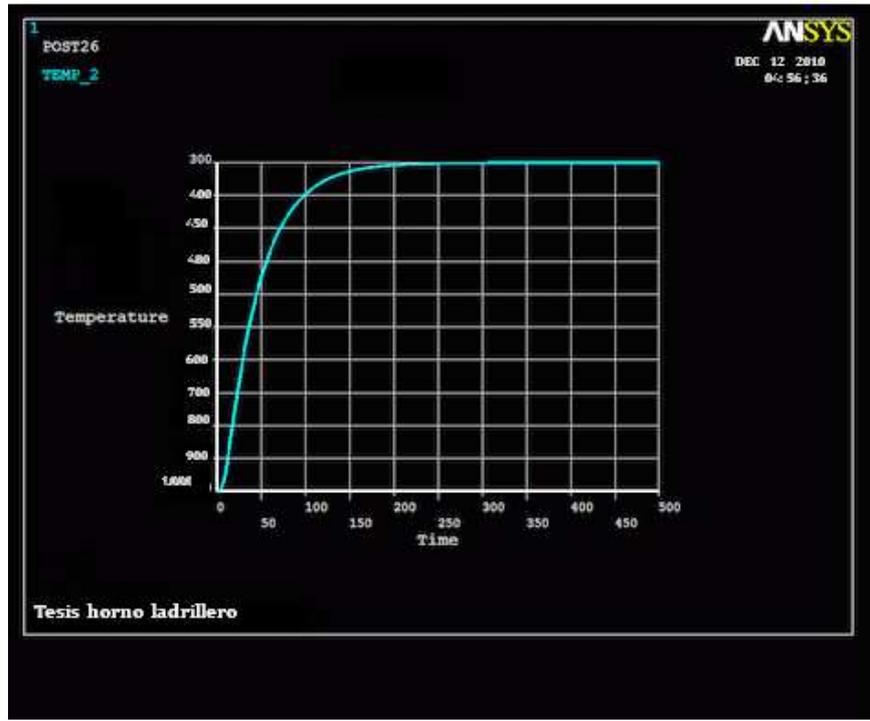


Figura 4.15 Curva característica en el nodo 26

#### 4.8 COMPARACIÓN DE RESULTADOS NODALES:

PRNSQL Command	
File	
14	1000.0
15	1000.0
16	1000.0
17	1000.0
18	1000.0
19	1000.0
20	1000.0
21	1000.0
22	300.00
23	25.000
24	25.000
25	25.000
26	25.000
27	25.000
28	25.000
29	25.000
30	25.000
31	25.000
32	25.000
33	25.000
34	25.000
35	25.000
36	25.000
37	25.000
38	25.000

PRNSQL Command	
File	
17	1000.0
18	1000.0
19	1000.0
20	1000.0
21	1000.0
22	300.00
23	970.70
24	941.37
25	911.77
26	881.40
27	849.51
28	800.00
29	801.83
30	787.12
31	773.77
32	765.07
33	800.00
34	720.88
35	688.37
36	668.81
37	666.60
38	666.60

Figura 4.16 Temperaturas nodales sin canales de ayuda y con canales de ayuda

Podemos darnos cuenta que la temperatura en el nodo 26 se ve completamente modificada, esto debido a los canales de ayuda, así que con

certeza sabremos que en esta región lateral vamos a tener un producto apto para la comercialización.

#### 4.9 Eficiencias térmicas encontradas por medio del software

Horno cuadrado sin canales de ayuda:

```

A /STATUS Command
File

LOAD STEP OPTIONS
LOAD STEP NUMBER. . . . . 2
TIME AT END OF THE LOAD STEP. . . . . 301.00
AUTOMATIC TIME STEPPING . . . . . ON
  INITIAL NUMBER OF SUBSTEPS . . . . . 20
  MAXIMUM NUMBER OF SUBSTEPS . . . . . 100
  MINIMUM NUMBER OF SUBSTEPS . . . . . 20
MAXIMUM NUMBER OF EQUILIBRIUM ITERATIONS. . . . . 15
STEP CHANGE BOUNDARY CONDITIONS . . . . . NO
TRANSIENT (INERTIA) EFFECTS
TRANSIENT INTEGRATION PARAMETERS
  THETA. . . . . 1.0000
  OSCILLATION LIMIT CRITERION. . . . . 0.50000
  ERROR . . . . . 0.5000
EFFICIENCY . . . . . 24.596
TERMINATE ANALYSIS IF NOT CONVERGED . . . . . YES (EXIT)
CONVERGENCE CONTROLS. . . . . USE DEFAULTS
PRINT OUTPUT CONTROLS . . . . . NO PRINTOUT
DATABASE OUTPUT CONTROLS. . . . . ALL DATA WRITTEN
                                FOR THE LAST SUBSTEP
  
```

Horno cuadrado con canales de ayuda:

```

A /STATUS Command
File

LOAD STEP OPTIONS
LOAD STEP NUMBER. . . . . 1
TIME AT END OF THE LOAD STEP. . . . . 300.00
AUTOMATIC TIME STEPPING . . . . . ON
  INITIAL NUMBER OF SUBSTEPS . . . . . 20
  MAXIMUM NUMBER OF SUBSTEPS . . . . . 100
  MINIMUM NUMBER OF SUBSTEPS . . . . . 20
MAXIMUM NUMBER OF EQUILIBRIUM ITERATIONS. . . . . 100
STEP CHANGE BOUNDARY CONDITIONS . . . . . NO
TRANSIENT (INERTIA) EFFECTS
TRANSIENT INTEGRATION PARAMETERS
  THETA. . . . . 1.0000
  OSCILLATION LIMIT CRITERION. . . . . 0.50000
  ERROR . . . . . 0.0020
EFFICIENCY . . . . . 42.890
TERMINATE ANALYSIS IF NOT CONVERGED . . . . . YES (EXIT)
CONVERGENCE CONTROLS. . . . . USE DEFAULTS
PRINT OUTPUT CONTROLS . . . . . NO PRINTOUT
DATABASE OUTPUT CONTROLS
  ITEM   FREQUENCY COMPONENT
  ALL     ALL
  
```

**Figura 4.17 Resultados obtenidos con el programa**

Al comparar las eficiencias tanto del horno sin canales de ayuda como con canales de ayuda, hemos observado que existe un aumento del 20% en la

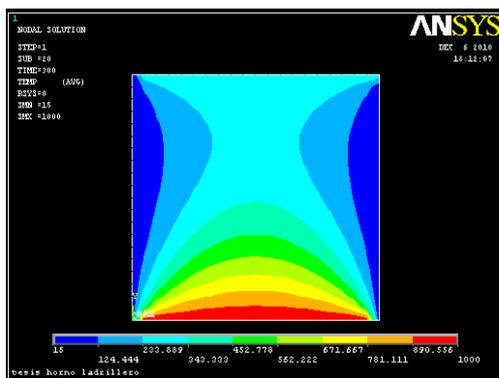
eficiencia del horno y hemos conseguido que la temperatura permanezca uniforme dentro del horno.

## CAPÍTULO V.

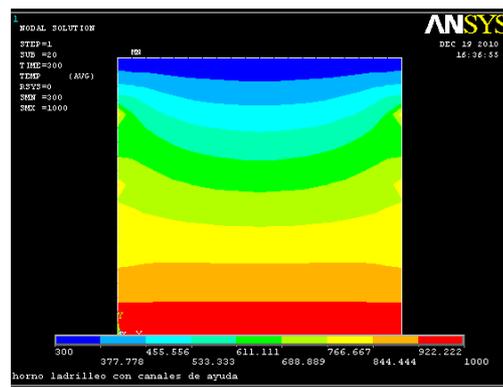
### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### 5.1 Conclusiones:

- El resultado de las simulaciones muestra que, la variable de operación más importante fue la velocidad de ascenso de los gases de combustión. Influye de manera determinante tanto en la temperatura promedio como en la distribución de los perfiles de temperatura del ladrillo en el horno cuadrado.
- Al llegar a determinar los perfiles de temperatura del horno se puede observar que en una primera instancia el horno acumula su calor en el centro y en la parte de la flama, mientras que las paredes laterales están frías, razón por la cual los ladrillos en ese lado no llegan a coccionarse, aumentando así el costo del producto por productos que no se pueden sacar a la venta.



**Perfiles sin canales de ayuda**



**Perfiles con canales de ayuda**

- En el resultado claramente nos podemos dar cuenta que al incluir unos canales de ayuda con combustible de alguna manera se compensa la falta de calor en las zonas laterales, siendo de gran ayuda debido a que se incrementó la temperatura en las zonas frías lo que redujo totalmente

la pérdida de material que en una primera instancia fue de 26% y después de colocar los canales de ayuda es del 8.1% reduciendo así productos malogrados, según comprobaron en el proyecto "Uso eficiente de la energía en hornos ladrilleros".

- La relación altura/mitad del ancho menor a la unidad mejora la distribución de temperaturas y eleva la temperatura promedio, siempre y cuando se mantenga una temperatura de flama constante, exponiendo el mayor número de ladrillos al fuego.
- El secado, que tiene lugar en las primeras horas de quema, debe tomar en cuenta la porosidad interna del ladrillo; la cuál varía con el tiempo, pues existe un aumento de ésta cuando se quema la materia orgánica contenida en el ladrillo crudo.
- La eficiencia térmica del horno se calculó en el 25%, el software entrega un cálculo de 24.596%
- Si se hace el análisis con los canales de ayuda, el software determina que la eficiencia del horno se incrementa a 42.89% lo cual significa un aumento del 20% .

## 5.2 Recomendaciones:

- En la práctica, el espaciado puede variar dentro del horno (puede ser muy cerrado en la parte superior y abierto en la base). Esto sugiere que será necesario implementar modelos más detallados donde se tome en cuenta la transferencia de calor de ladrillo a ladrillo, para confirmar que el espaciado no influye sobre éstas dos variables. La nueva formulación del modelo debe permitir estudiar el efecto de varios acomodos que propicien la formación de perfiles parabólicos, ya que como se ha visto, estos mejoran la distribución de temperaturas y elevan la temperatura promedio de los ladrillos.
- Recomendamos tomar en cuenta los coeficientes de convección que hemos dejado expresado ( $h_2$ ,  $h_p$ ,  $h_{p1}$  y  $h_3$ ), por que el programa no los usa, pero que serian de gran ayuda a futuras investigaciones debido a que nos pueden dar un inicio de que tal vez podamos usar conjuntamente la convección natural y forzada.
- Los criterios de comparación utilizados en este trabajo fueron los perfiles de temperatura del ladrillo y la temperatura promedio del ladrillo. El cálculo de la temperatura promedio puede mejorarse utilizando integrales de área. Sin embargo, existen otros criterios que pueden resultar útiles. Por ejemplo, el número de Nusselt global y la desviación estándar de la temperatura promedio.
- Por último, sugerimos que en simulaciones posteriores se incluya un análisis de costos, sobre todo al comparar el uso de varios combustibles ampliando el rango de la  $v_g$  de tal manera que incluya valores entre 50 y 3000 cm/min. o mayores, dependiendo de los resultados experimentales

## **Referencias bibliográficas**

- [1] [Http://www.books.com/biomasa y combustibles diseños parámetros de los hornos ladrilleros con eco tecnologías.utpd lcom](http://www.books.com/biomasa_y_combustibles_diseños_parámetros_de_los_hornos_ladrilleros_con_eco_tecnologías.utpd_lcom)
- [2] NAVA, F.D., Martínez, A.C. y Rodríguez, R.J, Informe técnico final del proyecto “Desarrollo de un prototipo de horno para cocción de ladrillos con tecnología limpia”, IPN-CIIDIR Unidad Oaxaca, Instituto Estatal de Ecología de Oaxaca, Oaxaca de Juárez, Oaxaca, México. ., 1999 p 16-24.
- [3] SINGER, F. y SINGER, S.S., , Enciclopedia de la Química Industrial, Tomo 9, URMO, S.A., España. 1976 p 87.
- [4] SINGER, F. y SINGER, S.S. Enciclopedia de la Química Industrial, Tomo 10, URMO, S.A., España. 1976 p 92.
- [5] Villareal Jiménez, Luis Alberto. Tesis de Licenciatura. USO DE LODO DE PAPEL Y ARENA SÍLICA PARA LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS Y TABLA ROCA. México. UDLA-P.2004. p 54
- [6] [http://fenomenos de transporte térmicos.org](http://fenomenos_de_transporte_térmicos.org) p14 -101.
- [7] McGraw-Hill, , Applied Numerical Methods with Personal Computers, International edition, USA, 1987. p 463-464.
- [8] Gong, Z. and Mujumdar, A.S., 1995, A two-dimensional finite element model for kiln-drying of refractory brick, Drying Technology, 13, Canada. p 585-605,
- [9] Celia, M.A. and Gray, W.G, Numerical Methods for Differential Equations: Fundamental Concepts for Scientific and Engineering Applications. Prentice-Hall, Inc, New Jersey.1992. p 45.

- [10] Nakamura, S. Métodos Numéricos Aplicados con Software, 1ª ed. en español, Prentice-Hall hispanoamericana S.A., México, D.F, 1992, p 171.
- [11] <http://brick.estudios de hornos con tiro ascendente//monografias.com>  
p 33 -78.
- [12] Özisik, M.N, Heat Transfer a Basic Approach, McGraw-Hill international edition. 1985. p 67.
- [13] Hougen, O.A., Watson, K.M. y Ragatz, R.A, Principios de los Procesos Químicos. Editorial Reverté S.A., España, 1954. 36.
- [14] Landau, L.D. and Lifshitz, E.M.Fluid Mechanics, segunda edición, Maxwell Macmillan International Editions. 1987, p 45-52.
- [15] J.C. Flores-Pimentel , G. M. Martínez-González y H. Jiménez-Islas, Maestrías en Tecnología ladrillera, 2001, Instituto Tecnológico de Celaya . Gto. México. 2001.p 37-96.
- [16] Nield, D.A. and Bejan, A, Convection in Porus Media. Springer Verlag, New York, USA. 1992, p 24-56.
- [17] Díaz R, Zabala G, Proyecto "Uso Eficiente de la Energía en Hornos ladrilleros", Riobamba 1999. P 1

## BIBLIOGRAFÍA

1. Celia, M.A. and Gray, W.G., 1992, Numerical Methods for Differential Equations: Fundamental Concepts for Scientific and Engineering Applications. Prentice-Hall, Inc, New Jersey.
2. Gong, Z. and Mujumdar, A.S., 1995, A two-dimensional finite element model for kiln-drying of refractory brick, Drying Technology, Canada.
3. JONES, T., 1996, The Basics of Brick Kiln Technology, GATE, Germany.
4. McGraw-Hill, 1987, Applied Numerical Methods with Personal Computers, International edition, USA.
5. Moreno, Franco. EL LADRILLO EN LA CONSTRUCCIÓN. España. Ediciones CEAC. 1981.
6. Nakamura, S., 1992, Métodos Numéricos Aplicados con Software, 1ª ed. en español, Prentice-Hall hispanoamericana S.A., México, D.F.
7. Norma Mexicana. NMX-C-006-1976. México. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. 1976.
8. SINGER, F. y SINGER, S.S., 1976a, Enciclopedia de la Química Industrial, Tomo 9, URMO, S.A., España.
9. SINGER, F. y SINGER, S.S., 1976b, Enciclopedia de la Química Industrial, Tomo 10, URMO, S.A., España.

## Linkografías

### CARACTERISTICAS Y PARAMETROS DE LOS HORNOS

[Http//www.books.com/biomasa y combustibles diseños parámetros de los hornos ladrilleros con eco tecnologías.utpd lcom](http://www.books.com/biomasa_y_combustibles_diseños_parámetros_de_los_hornos_ladrilleros_con_eco_tecnologías.utpd_lcom)  
2001-10-15.

### COSNSTRUCCIONES DE HORNOS LADRILLEROS

[Http// construcción. hornos ladrilleros.org.PDF](Http//_construcción._hornos_ladrilleros.org.PDF)  
1999-01-23

### TRATAMIENTO DE ARENAS Y MEDICION DE PARAMETROS

[http//\\_www.centro de investigaciones UDLAP.com](http://_www.centro_de_investigaciones_UDLAP.com)  
2003-12-04

### USO DE LODO DE PAPEL Y ARENA SÍLICA PARA LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS Y TABLA ROCA.

[http//\\_www.centro de investigaciones UDLAP.com.](http://_www.centro_de_investigaciones_UDLAP.com.)  
2004-10-03

### FENOMENOS DE TRANSPORTE.

[http://fenomenos de transporte térmicos.org](http://fenomenos_de_transporte_térmicos.org)  
1999-09-10

### HORNOS DE TIRO ASCENDENTE

[http://brick.estudios de hornos con tiro ascendente//monografías.com](http://brick.estudios_de_hornos_con_tiro_ascendente//monografías.com)  
1999-04-04