Artículo **Revista del Desarrollo Urbano y Sustentable**
Septiembre 2017 Vol.3 No.8 31-41

Representación numérica de la cocción de ladrillos en un horno MK2

LARA-MIRELES, Juan Antonio*†, ALONSO-ROMERO, Sergio y FRÍAS-CHIMAL, José Eduardo

CIATEC. Omega 201, Industrial Delta, 37545 León, Gto.

Recibido Junio 08, 2017; Aceptado Septiembre 08, 2017

Resumen

El objetivo del presente trabajo es la representación numérica del fenómeno de cocción de ladrillos en un horno MK2. Lo anterior, para conocer los perfiles de temperatura que se presentan en el interior del horno y compararlos respecto a los perfiles obtenidos de forma experimental. Las curvas de los perfiles de temperatura que se obtuvieron, mediante la experimentación, presentan un comportamiento similar a las obtenidas mediante la simulación numérica. Estos resultados son parte de la primera etapa de la investigación, en una segunda etapa, se busca la optimización del proceso de cocción de ladrillos en un horno MK2, mediante el mejoramiento en el acomodo de los ladrillos, el reacomodo de la salida de los gases, las dimensiones del horno, para una mejor y más rápida distribución de los perfiles de temperatura en el interior del horno lo que permitirá mejorar la productividad del mismo.

Simulación, Numérica, Horno, Optimización, Productividad

Abstract

The objective of this project is the numeric representation of the phenomenon of firing bricks in a MK2 bricks kiln. The above, to know the profiles of temperature inside of the kiln and compare them to the profiles obtained experimentally. The curves of temperature profiles obtained, through experimentation, are similar to those obtained by numerical simulation. These results are part of the first stage of the research, in a second stage, we search the optimization of process of firing bricks in a MK2 kiln, with the improvement in the arrangement of bricks, the rearrangement of the exit of the gases, the dimensions of the kiln, for a better and faster distribution of temperature profiles inside of the kiln allowing improve the productivity of the same.

Simulation, Optimization, Numerical, Kiln, Productivity

Citación: LARA-MIRELES, Juan Antonio, ALONSO-ROMERO, Sergio y FRÍAS-CHIMAL, José Eduardo. Representación numérica de la cocción de ladrillos en un horno MK2. Revista del Desarrollo Urbano y Sustentable. 2017. 3-8: 31-41.

*Correspondencia al autor (Correo electrónico: jlara.picyt@ciatec.mx)
†Investigador contribuyendo como primer autor.

© ECORFAN-Bolivia

1. Introducción

Se han realizado estudios diversos para la mejora del proceso de cocción del ladrillo tradicional desde distintos puntos de vista, entre los cuales destaca el ambiental por obvias razones, Corral y De la Mora tratan el problema del riesgo ambiental y como buscar la ubicación de los mismos, de manera que afecten menos a las ciudades (Corral, De la Mora, Cota, Carrasco, & Santana, 2009).

Otras propuestas se desarrollan en torno a la eficiencia energética de los hornos de cocción de ladrillo tradicional, en un estudio realizado en Juárez, Chihuahua, se muestran los resultados de una comparación, entre la contaminación del aire producida por el horno tradicional para cocción de ladrillo usado en el norte de México y otro tipo de horno de acuerdo al diseño del Dr. Roberto Márquez, que se conoce como horno MK2.

El horno MK2 consiste en un horno techado con una cúpula y la salida de aire caliente conectada a un segundo horno idéntico, el cual estará cargado con ladrillo crudo para su secado y al mismo tiempo servirá como filtro de los gases, una vez terminado el ciclo de cocción el horno de filtrado se convierte en el horno de cocción y los papeles se invierten.

Hace aproximadamente ocho años Roberto Márquez diseño un tipo de horno con una significativa reducción de emisiones contaminantes, en donde, la idea básica era explorar las posibilidades de absorción del material en el horno de filtración. También se examina el desempeño de varios hornos de techo abierto, dos prototipos de hornos MK, y dos series de hornos de tipo MK construidos en Ciudad Juárez. (Bruce, Corral, & Lara, 2012).

1.1 Justificación

Los productores de ladrillo artesanal son pequeños empresarios que difícilmente cuentan con la facilidad de mejorar tecnológicamente. Un modelo numérico preciso proporciona información detallada en una forma económica, además de permitir el análisis de varios casos (Possamai, Oba, & Nicolau, 2012). Con este proyecto buscamos darles una opción para trabajar con un horno (MK2) el cual generé menos emisiones y que obtenga una mayor productividad.

1.2 Descripción del Problema

A partir de las últimas décadas del siglo pasado a nivel global y nacional hay un marcado interés en el fenómeno del cambio climático (IMC, 2011) y en reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero, que causan el calentamiento global: Dióxido de carbono (CO2), metano (CH4), oxido nitroso (N2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF6) (ONU, 1998).

El crecimiento urbano de las ciudades modernas ha propiciado, que la industria de fabricación de ladrillo artesanal (rojo) represente, una fuente considerable de contaminación en las mismas. Esta industria generalmente se desarrolla como un negocio familiar. La Industria ladrillera requiere ser más redituable y productiva para satisfacer las necesidades de los empresarios y hacer crecer estos negocios. Mayormente, el proceso de cocción del ladrillo rojo, se ha estudiado para mejorar la eficiencia energética de los hornos y así disminuir la contaminación que generan. Diferentes propuestas surgen al estudiar el proceso de cocción de ladrillo rojo, una de ellas: el horno tipo MK2, es considerado un horno ecológico, emite menores cantidades de contaminantes.

ISSN: 2414-4932
ECORFAN® Todos los derechos reservados.

La reducción de mermas, consumo de combustible y tiempo de cocción son de primordial importancia para poder lograr los rendimientos necesarios, por consecuencia se realizará el análisis numérico del proceso, mediante software especializado para entender el fenómeno y aportar propuestas de mejora al proceso de cocción de ladrillo en este tipo de horno.

1.3 Hipótesis

El representar mediante simulación numérica el fenómeno del proceso de cocción de ladrillo en un horno MK2, nos permitirá verificar las variables que tienen una influencia fuerte sobre el mismo.

1.4 Objetivos
1.4.1 Objetivo General

Obtener la representación numérica del proceso de cocción de ladrillos, en un horno MK2.

1.4.2 Objetivos específicos

- Comparar los perfiles de temperatura obtenidos mediante la simulación numérica, respecto a los perfiles obtenidos de forma experimental.
- Identificar las variables más importantes que influyen en el proceso de cocción de ladrillos en un horno MK2.

2. Marco Teórico

Fabricación de ladrillo artesanal

La fabricación de ladrillos se lleva a cabo en varias etapas, desde la extracción del material, mezcla de los materiales, elaboración del ladrillo, cocción del producto, almacenamiento y transporte para su comercialización.

Una de las etapas fundamentales del proceso de fabricación del ladrillo, en lo que se refiere a la generación de contaminantes atmosféricos, es la cocción, etapa durante la cual se utilizan diversos materiales combustibles (leña, combustóleo, aceites residuales, chapopote, residuos sólidos municipales, gas licuado, entre otros combustibles) necesarios para abastecer el calor suficiente, para poder llevar a cabo esta etapa del proceso (Blanc, 2008). Para transformar el adobe (ladrillo crudo) a ladrillo cocido se requiere elevar su temperatura, a este proceso le llamamos proceso de cocción de ladrillo. El proceso de cocción del ladrillo se puede dividir en cinco etapas que se describen en la tabla siguiente.

Etapa	Temperatura (°C)
Evaporación	120
Descomposición	120-350
Cambio a cerámica	350-700
Oxidación	700-800
Vitrificación	800-1000

Tabla 1. Etapas del proceso de cocción de ladrillo. (Martínez, Jimenez, & Flores, 2002)

La vitrificación es el término usado para describir la sinterización, que es la reacción entre las partículas solida individuales de una sustancia para dar un producto duro, menos poroso y de tamaño algo menor y tiene lugar a una temperatura inferior al punto de fusión, aproximadamente 1000°C (Corzo M. , 2013).

3. Metodología
3.1 Quema experimental

Para obtener los datos de perfiles de temperatura de la parte interna del horno, condiciones de alimentación, de combustible y condiciones ambientales, se monitoreo una quema en un horno MK2, bajo las condiciones que comúnmente maneja el productor de ladrillos con las siguientes actividades:

ISSN: 2414-4932
ECORFAN® Todos los derechos reservados.

Acomodo de ladrillos

Se monitoreo el acomodo de los ladrillos, para conocer el espaciamiento en cada una de las camas. El acomodo de ladrillos lo realiza el operador, de acuerdo a su experiencia, el acomodo consta de un total de 20 camas de ladrillos con una cantidad de 5,105 ladrillos en total.

Figura 1 Cama 1 del acomodo de ladrillos
Fuente: Elaboración Propia

Localización de termopares

Se colocaron un total de 14 termopares en las caras correspondientes a los cuatro puntos cardinales, así como, uno en la cúpula y uno en la chimenea. También se monitorearon las temperaturas alcanzadas en el horno filtro.

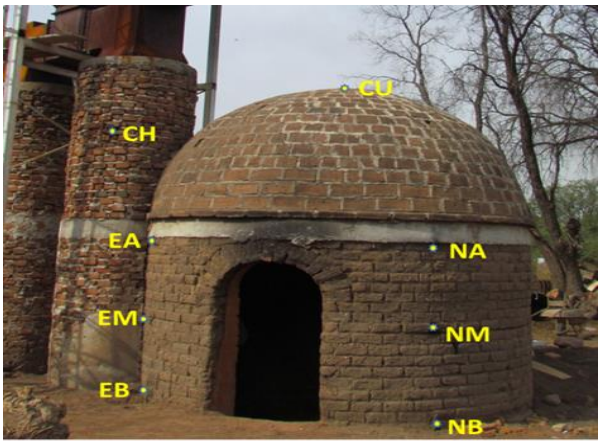

Figura 2 Localización de los termopares.
Fuente: Elaboración Propia

Figura 3 Localización de termopares
Fuente: Elaboración Propia

Abreviatura	Localización
EB	Este bajo
EM	Este medio
EA	Este alto
EB	Este bajo
EM	Este medio
EA	Este alto
NB	Norte bajo
NM	Norte medio
NA	Norte alto
CH	Chimenea
CU	Cúpula

Tabla 2 Nomenclatura de los termopares.
Fuente: Elaboración Propia

Monitoreo de la alimentación del combustible

Durante la quema se monitoreo la cantidad de combustible que es alimentada al horno. Se llevo un control de la alimentación del combustible, que en este caso, fue madera de pino, alimentando un total de 1538.8 kg de combustible durante las 12 horas durante las cuales se alimentó el horno.

ISSN: 2414-4932
ECORFAN® Todos los derechos reservados.

Figura 4 Pesaje del combustible
Fuente: Elaboración Propia

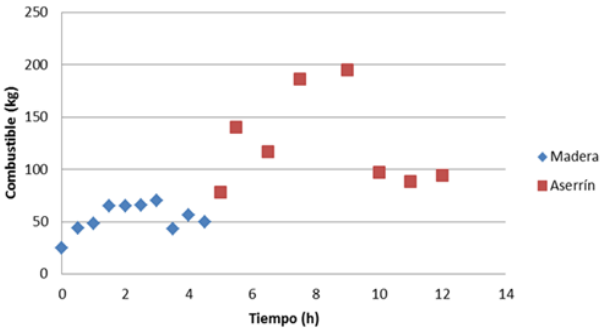

Figura 5 Alimentación de combustible
Fuente: Elaboración Propia

Monitoreo de temperaturas

Se realizó el monitoreo de temperaturas en el interior del horno, por medio de los termopares cada dos minutos, utilizando un dispositivo de adquisición de datos, así como de las condiciones ambientales, cada treinta minutos y temperaturas en las paredes externas mediante pirómetro y cámara termográfica.

Figura 6 Toma de temperatura externa con pirómetro
Fuente: Elaboración Propia

Perfiles de temperatura

En las siguientes imágenes se observa los perfiles de temperatura de un horno MK2, en la parte baja, media y alta del horno.

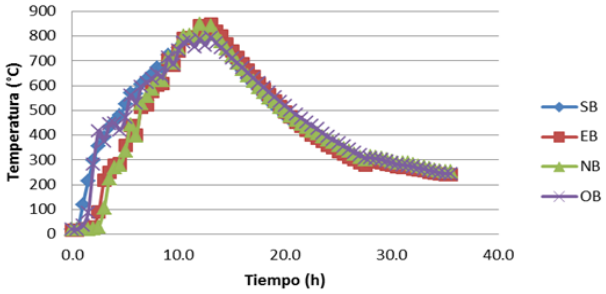

Figura 7. Temperaturas alcanzadas en la parte baja del horno
Fuente:Elaboración Propia

3.2. Modelado en CAD

Se realizó el modelado del horno en software CAD, la configuración de los ladrillos, así como del fluido para posteriormente importarlo al software ANSYS.

ISSN: 2414-4932
ECORFAN® Todos los derechos reservados.

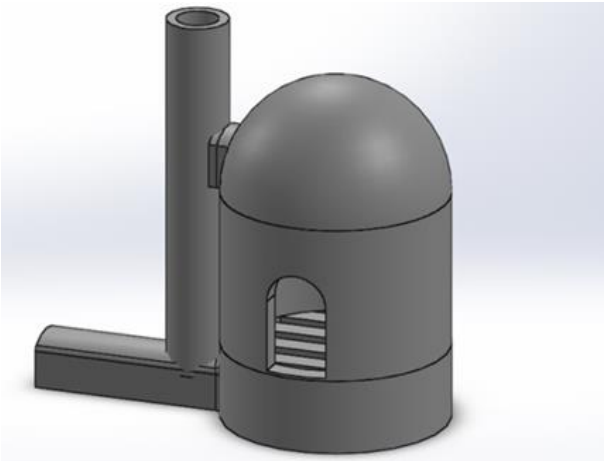

Figura 8 Modelado del horno MK2 en CAD
Fuente: Elaboración Propia

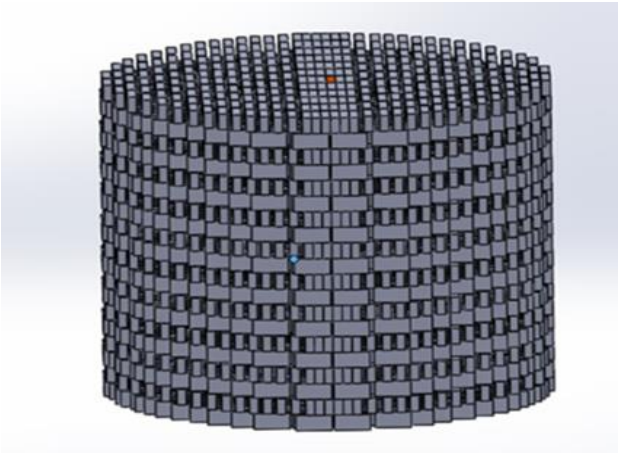

Figura 9 Acomodo de ladrillos
Fuente: Elaboración Propia

3.3 Discretización

Las limitaciones de la mente humana, en ocasiones no nos permiten resolver problemas muy complejos en una sola operación. El proceso de subdividir todo el sistema en componentes, para resolverlos de manera individual y posteriormente reconstruir el sistema original, es el medio natural que se utiliza en la ingeniería, la ciencia y nos permite mejorar los procesos (Zienkiewich & Taylor, 2000).

El dominio del área de estudio se divide en volúmenes de control, en los cuales se deben satisfacer el equilibrio de las ecuaciones que rigen el fenómeno. Por lo tanto, las características y el número de estos elementos influyen considerablemente en el proceso de resolución numérica. ANSYS CFX permite la posibilidad de emplear diferentes tipologías para realizar el mallado, de esta forma se puede adaptar el mallado a la forma de la geometría que limita el dominio.

Forma del elemento	**Nodos por volumen de control**
Tetraedro	4
Pirámide	5
Prisma	6
Hexaedro	8

Tabla 3 Tipo de malla Vs Número de nodos

La diferencia principal de los distintos elementos es el número de nodos, con el que se resuelven las ecuaciones dentro de su volumen de control (Carrillo & Castillo). Para este caso, se opto por un mallado con elementos hexaédrico, debido a la geometría del modelo, con 1,190,401 elementos y 3,960,689 nodos.

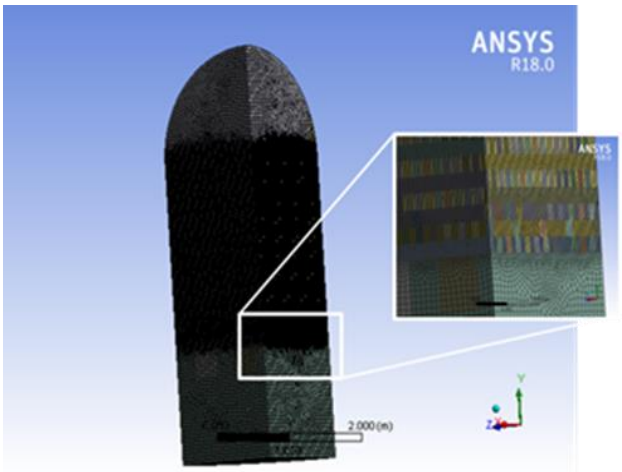

Figura 10 Mallado geométrico
Fuente: Elaboración Propia

ECORFAN® Todos los derechos reservados.

3.4. Condiciones

Ecuaciones gobernantes

A continuación, se presentan las ecuaciones que gobiernan el fenómeno de transferencia de calor, dentro de un horno de cocción de ladrillos tipo MK2 (Bird, Steward, & Lightfoot, 2011).

Símbolo	Nomenclatura	Símbolo	Nomenclatura
p	Presión	ρ	Densidad
v	Velocidad	υ	Velocidad adimencional
g	Gravedad	ϕ	Tensor de densidad
k	Conductividad térmica	τ	Esfuerzo cortante
q	Generación de energía	T	Temperatura
C_p	Capacidad calorífica a presión constante	t	Tiempo
C_v	Capacidad calorífica a presión volumen constante		

Tabla 4 Nomenclatura manejada en las ecuaciones. (Welty, Wicks, & Wilson, 1994)

Ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho v) \tag{1}$$

El vector (ρv) es la densidad de flujo de materia y su divergencia $(\nabla \cdot \rho v)$ tiene el siguiente significado: es la velocidad neta con que sale o se emite la densidad de flujo de materia por unidad de volumen.

Ecuación de movimiento

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho v = -[\nabla \rho v v] - \nabla \rho - [\nabla \cdot \tau] + \rho g \tag{2}$$

Ecuación de energía

$$\nabla \cdot k \nabla T + q + \emptyset = \rho C_v \frac{DT}{Dt} \tag{3}$$

Las formas de la ecuación de la energía, que pueden aplicarse a casos que se encuentran comúnmente para un fluido sin fuentes de energía y con k constantes (Welty, Wicks, & Wilson, 1994):

$$\rho C_v \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T \tag{4}$$

Para un solido:

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T \tag{5}$$

Para fines de la simulación en CFX, se generan dos dominios en este caso un sólido (ladrillo) y el fluido (aire). Para el caso del dominio solido (ladrillo), las propiedades que se manejaron contantes durante la simulación se muestran a continuación.

Propiedad	Magnitud	Unidades
Conductividad de térmica	0.69	W/m K
Densidad	1.6	g/cm^3
Capacidad calorífica	840	J/kg K

Tabla 5 Propiedades físicas del ladrillo. (Incropera, Dewitt, Bergman, & Lavine)

Para el caso del dominio fluido (aire), se manejó como un gas ideal, las propiedades que se manejaron constantes durante la simulación se muestra a continuación.

Propiedad	Magnitud	Unidades
Conductividad de térmica	0.0261	W/m K
Capacidad calorífica	1004.4	J/kg K

Tabla 6 Propiedades físicas del aire. (Incropera, Dewitt, Bergman, & Lavine)

Debido al aumento constante de la temperatura dentro del horno, se optó por un modelo Buoyanci. Se usa una densidad de referencia de 1.18 kg/m3.

ISSN: 2414-4932
ECORFAN® Todos los derechos reservados.

Las condiciones iniciales, fueron determinadas mediante los datos experimentales de la quema preliminar en el horno MK2.

Entrada

Es la representación de la entrada de los gases resultantes de la combustión, está localizada en la parte inferior del horno. La temperatura del fluido presenta un aumento con respecto al tiempo y esta relacionada directamente con la alimentación de combustible, en este caso madera de pino, por lo que la variable fue representada mediante la siguiente expresión:

$$Temp. = 292.15 + \left[175*\left(\frac{t}{3600}\right)\right] - \left[10.49*\left(\frac{t}{3600}\right)^2\right] + \left[0.1671*\left(\frac{t}{3600}\right)^3\right] + \left[2*(0.000189*C\right] \quad (6)$$

Donde C representa la cantidad de calorías ingresadas al horno y t el tiempo transcurrido.

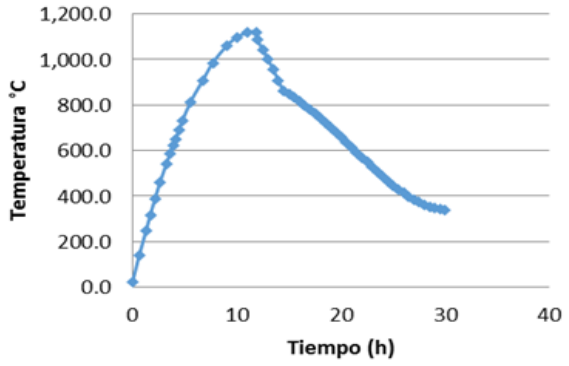

Figura 11 Gráfica de la variación de la temperatura de la entrada de los gases con respecto al tiempo.
Fuente: Elaboración Propia

La velocidad de los gases de combustión, no presento un valor constante, debido a las dificultades de su medición, se decidió usar una representación exponencial, teniendo como límite una velocidad reportada (Flores, 2001) y fue representada por la siguiente expresión (Corzo, Alonso, lesso, Frías, & Alcaraz, 2013).

$$Vel = 0.165\ m/s - 0.1425\ m/s*e^{-0.000025s-1*t} \quad (7)$$

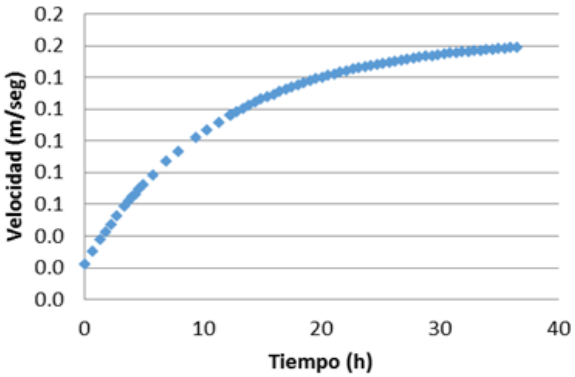

Figura 12 Gráfica de la variación de la velocidad de la entrada de los gases con respecto al tiempo
Fuente: Elaboración Propia

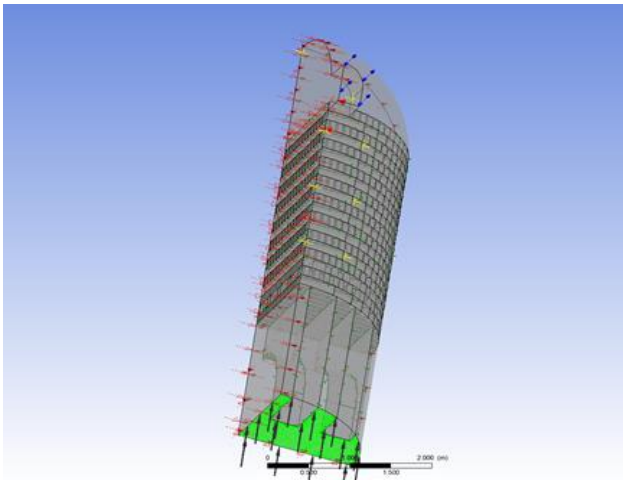

Figura 13 Localización de la entrada de los gases en la parte inferior del horno
Fuente: Elaboración Propia

Salida

Debido al tipo de horno, se optó por una condición de frontera de salida en la parte superior del horno. En la siguiente figura, se representa la salida de los gases de combustión al exterior bajo las condiciones promedio de 25°C y 1 atm.

ECORFAN® Todos los derechos reservados.

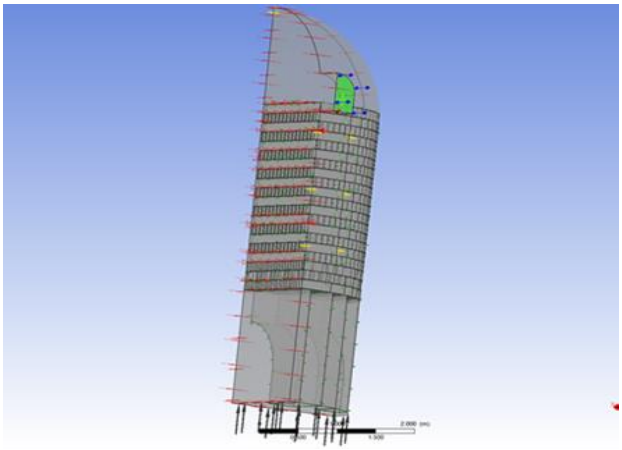

Figura 14 Localización de la salida de los gases en la parte superior del horno
Fuente: Elaboración Propia

Simetría

Se manejó una simetría en dos caras internas del horno, debido a las condiciones de la geometría.

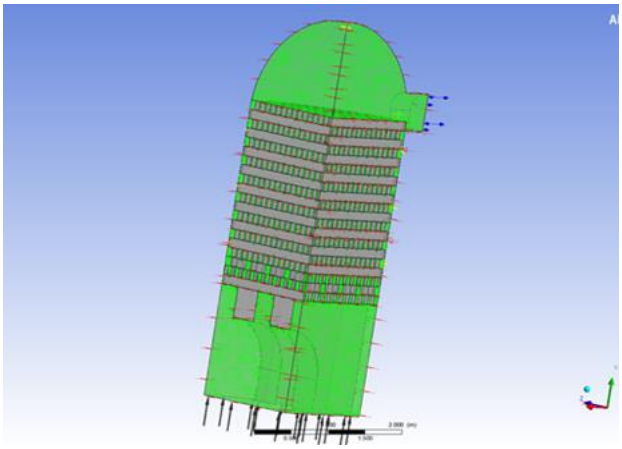

Figura 15 Caras simétricas del horno
Fuente: Elaboración Propia

Pared: Esta última condición de frontera, es una condición de pared adiabática, en las caras exteriores. Esta condición representa una condición ideal para la función que ejercen las paredes externas del horno.

Para conocer el comportamiento de las temperaturas durante la simulación numérica, se colocan monitores de temperatura que indican el lugar donde se evaluará esta condición, en la figura 16, se muestra la localización de los monitores de temperatura. En la tabla 7, se presenta la nomenclatura que se manejo para los monitores, es importante señalar que la palabra original se refiere a que coinciden con la posición de los termopares en el horno y los de referencia se colocaron casi a la orilla del modelo y no son coincidentes con la localización de los termopares.

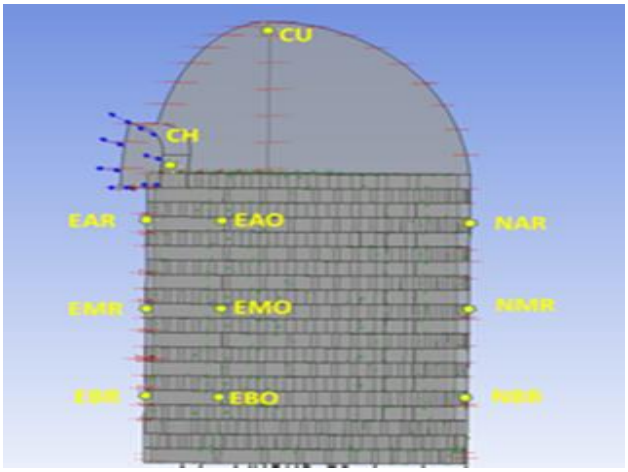

Figura 16 Localización de los monitores de temperatura
Fuente: Elaboración Propia

Abreviatura	Monitor
EBR	Este bajo referencia
EMR	Este medio referencia
EAR	Este alto referencia
EBR	Este bajo original
EMR	Este medio original
EAR	Este alto original
NBR	Norte bajo referencia
NMR	Norte medio referencia
NAR	Norte alto referencia
CH	Chimenea
CU	Cúpula

Tabla 7 Nomenclatura de los monitores
Fuente: Elaboración Propia

ISSN: 2414-4932
ECORFAN® Todos los derechos reservados.

4. Resultados

La simulación se corrió por un tiempo equivalente a 25 horas, arrojando perfiles de temperatura similares a los experimentales con un error promedio de 9%, esto nos permite considerar que el modelo numérico es representativo. El software también nos proporciona imágenes, que nos sirven para conocer de manera grafica el comportamiento de los gases y el comportamiento de las temperaturas, mismos que nos pueden servir para tomar decisiones de mejora.

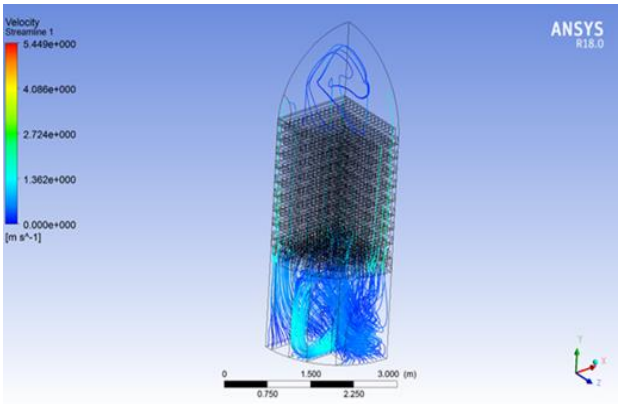

Figura 17 Comportamiento de los fluidos dentro del horno

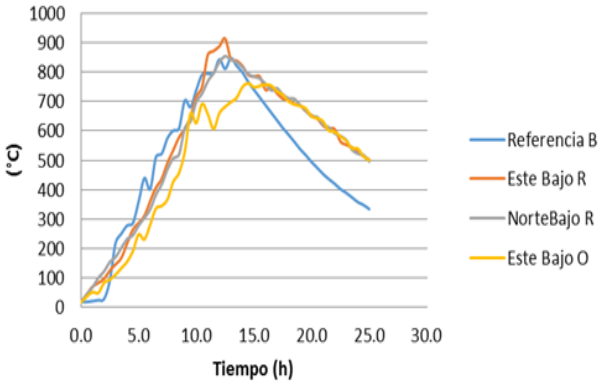

Figura 19 Comparación de Temperaturas parte baja del horno

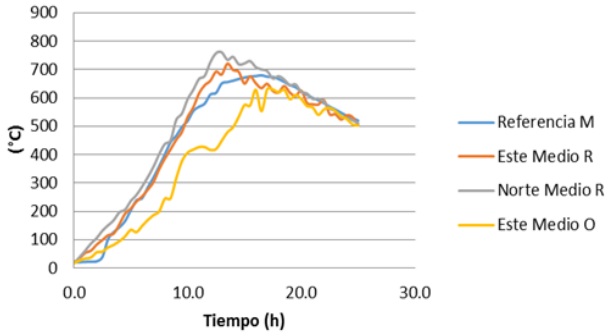

Figura 20 Comparación de Temperaturas parte media del horno

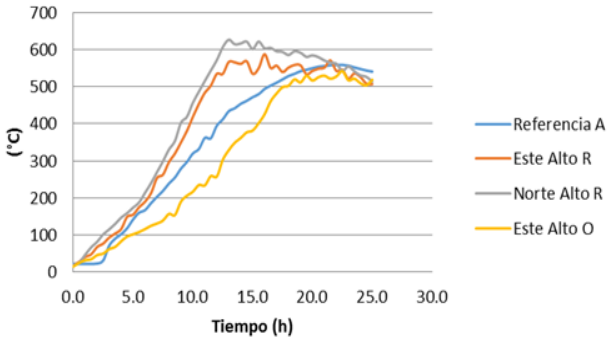

Figura 21 Comparación de Temperaturas parte alta del horno

5. Conclusiones

La simulación numérica nos proporciona información importante, que nos ayuda a concluir que:

- La simulación numérica arroja resultados aceptables, al compararlos con las temperaturas de la quema experimental.
- El aire caliente tiende a salir por la chimenea, lo cual genera una aumento de temperatura en esa zona, información que se corroborá con las temperaturas de la experimentación.
- Los arcos fijos del horno consumen una cantidad considerable de energía, que en algún momento se puede aprovechar para la cocción de ladrillo.

ISSN: 2414-4932
ECORFAN® Todos los derechos reservados.

- Según podemos observar en las imágenes, que el acomodo de los ladrillos y la colocación de la chimenea influyen en el flujo de aire caliente a la parte superior del horno.
- Podemos considerar como variables importantes: el acomodo de los ladrillos, la velocidad del aire, la colocación de la chimenea y el tamaño de los arcos.

Se pretende continuar con las simulaciones haciendo mejoras en el mallado, ajustar la ecuación de entrada de calor, hasta conseguir errores promedio menores, también se pretende realizar simulaciones del horno completo, para posteriormente buscar las mejoras pertinentes en el horno que nos permitan mejorar la productividad del mismo y la calidad del ladrillo.

6. Referencias

Bird, R. B., Steward, W. E., & Lightfoot, E. N. (2011). *Fenómenos de transporte.* México: Limusa.

Blanc, T. L. (2008). *Actualización de la metodología y el inventario de emisiones para ladrilleras, 2008.*

Bruce, C. W., Corral, a. Y., & Lara, A. S. (2012). Development of Cleaner-Burning Brick Kilns in. *Journal of the Air & Waste Management*, 444-456.

Carrillo, J., & Castillo, L. (n.d.). Consideraciones delmallado aplicadas al calculo de flujos bifasicos con técnicas de dinamica de fluidos computacional. *IV Jornadas de introducción a la investrigación de la UPCT*.

Corral, Y., De la Mora, A., Cota, R., Carrasco, K., & Santana, L. (2009). La Cartografía de riesgo como instrumento técnico para la rehubicación de la industra ladrillera del municipio de Juárez, México. *InforRev.*, 17-26.

Corzo, M. (2013). *Análisis de transferencia de calor en campañas de cocción de ladrillo rojo, por el método de volumen finito.* Celaya.

Corzo, M. A., Alonso, S., lesso, R., Frías, J. E., & Alcaraz, L. A. (2013). Representación por Volumen Finito de un Horno de. *Coloquio de Investigación Multidisciplinaria,*, 578,587.

Flores. (2001). *Variables de diseño de hornos de ladrillo con geometria cilindrica y cuadrada* .

IMC, I. M. (2011). *Programa Especial de cambio climatico para el periodo 2012-2020.*

Martínez, G., Jimenez, H., & Flores. (2002). Numerical Study on The operation of a cylindrical kiln for firing red brick. *Información Tecnológica*, 3-12.

ONU, N. U. (1998). *Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático.*

Possamai, T., Oba, R., & Nicolau, V. (2012). Numerical and experimental thermal analysis of an industrial kiln used for frit production. *Aplied Thermal Engineering*, 414-425.

Welty, J. R., Wicks, C. E., & Wilson, R. E. (1994). *Fundamentos detransferencia de momento, calor y masa.* México: Lumusa, Noriega Editores.

Zienkiewich, O., & Taylor, R. (2000). *The Finite Element Method, The Basis.* Butterworth Heinemann.

ECORFAN® Todos los derechos reservados.