

Análisis de los perfiles de temperatura en un Horno de Cocción de Ladrillos

Miguel Angel Corzo Velázquez

Departamento de Ingeniería Mecánica
Instituto Tecnológico de Celaya
ask0@hotmail.es

Luis Alejandro Alcaraz Caracheo

Departamento de Ingeniería Mecánica
Instituto Tecnológico de Celaya
alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx

Sergio Alonso Romero

Departamento de Investigación en Biomecánica e
Investigación en Materiales, CIATEC A.C.
salonso@ciatec.mx

Raúl Lesso Arroyo

Departamento de Ingeniería Mecánica
Instituto Tecnológico de Celaya
raul.lesso@itcelaya.edu.mx

Jose Eduardo Frias Chimal

Departamento de Investigación en Biomecánica e
Investigación en Materiales, CIATEC A.C.
jfrias@ciatec.mx

RESUMEN

Se analizó un horno de cocción de ladrillos, en el cual se estudió la distribución de los perfiles de temperatura en su interior. Para ello, se realizó un análisis numérico por volumen finito en estado transitorio contemplando el detalle del estibado de los ladrillos, los efectos conductivos, convectivos y de radiación que influyen en la transferencia de calor dentro del horno.

Los resultados de la simulación fueron comparados con datos experimentales. Se observa una buena correlación entre los datos experimentales y los obtenidos por la simulación.

PALABRAS CLAVE: horno, transitorio, ladrillos

NOMENCLATURA

v	Velocidad
p	Presión
g	Gravedad
h_{tot}	Entalpía total
h	Entalpía
k_s	Conductividad térmica solido
C_p	Calor específico presión constante
T	Temperatura
C_μ	Constante del modelo k- ϵ (0.09)
$S_{M,buoy}$	Fuerzas de flotación Buoyanci

SÍMBOLOS GRIEGOS

μ	Viscosidad
ρ	Densidad
λ	Conductividad térmica fluido
μ_{eff}	Viscosidad efectiva
μ_t	Viscosidad de turbulencia
k	Energía cinética de turbulencia
ϵ	Turbulencia de disipación
σ_k	Constante del modelo k- ϵ (1.0)
σ_ϵ	Constante del modelo k- ϵ (1.3)
$C_{\epsilon 2}$	Constante del modelo k- ϵ (1.92)

1. INTRODUCCIÓN

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencias tenemos los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano. La variación de las concentraciones de gases de efecto invernadero altera el equilibrio

energético del sistema climático, siendo el dióxido de carbono (CO₂) el más importante. Sus emisiones anuales aumentaron en torno a un 80% entre 1970 y 2004 (Pachauri, 2008).

Una de las principales fuentes generadoras de gases de efecto invernadero a nivel mundial es la producida por la elaboración de ladrillos artesanales debido al combustible utilizado de alto impacto ambiental (madera, neumáticos usados y plásticos). Actualmente el 75% de la producción mundial de ladrillos se concentra en 4 países, China, India, Pakistán y Bangladesh, y son estos países los que trabajan fuertemente en alternativas para disminuir la contaminación producida por esta actividad (Baum, 2010). Como un caso específico, la India ha trabajado desde el año de 1970 hasta la fecha en el desarrollo e implementación de tecnología para reducir las emisiones contaminantes, producto de la elaboración de ladrillos (Greentech, 2012). Entre los logros que se han tenido son la implementación de hornos del tipo vertical Shaft Brick Kiln (Lakshmikantan, 1998), los cuales han demostrado tener un mejor rendimiento térmico, con un consumo de 0,03 MJ de energía primaria / kg de ladrillo cocido.

Como se mencionó anteriormente, una de las desventajas es el uso de los combustibles, si a esto le agregamos el hecho de que los hornos artesanales presentan una baja eficiencia térmica, el uso irracional del suelo y la deforestación, tenemos un grave problema de contaminación que afecta principalmente la calidad del aire en ciudades cercanas y generan un impacto negativo en la salud (Swisscontact, 2011).

Con todo esto los Países de América Latina contribuyen con el 8,5% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero por lo que se están implementando programas para mitigar el cambio climático (Swisscontact, 2011).

En el marco nacional, se ha venido trabajando en esta problemática desde hace 2 décadas, tenemos a Ciudad Juárez, Chihuahua, en donde las investigaciones se centraron en conocer los gradientes de temperatura dentro del horno (González, 1996), en obtener un procedimiento de quemado que favorezca la calidad del ladrillo y reducir la producción de contaminantes atmosféricos (Bruce, 2007).

En el estado de Guanajuato como primer avance, se realizó un estudio numérico para determinar el efecto de algunas variables de diseño sobre los perfiles de temperatura en los hornos artesanales, y donde se encontró que la variable más importante resultó ser la velocidad ascenso los gases (Flores, 2000). Otro trabajo que figura, es el estudio de un horno experimental sujeto a diversas variables de estudio, y en el cual se comprobó que sustituyendo el combustible tradicional por gas L.P. puede reducir el tiempo de cocción de los ladrillos y la contaminación (Curicaveri, 2001).

2. MÉTODO

Horno experimental

El horno de campaña experimental, es un horno intermitente de cielo abierto con dimensiones de 3.70 m de largo X 3.1 m de ancho X 3.5 m de altura, para una carga de 7000 ladrillos, esta altura es variable dependiendo del número de ladrillos que se van a quemar. Para la construcción del modelo CAD, no se tomaron en cuenta las paredes

del horno o recubrimiento, de acuerdo a la geometría del horno, se consideró realizar una simplificación aplicando condiciones de simetría, figura 1, usando $\frac{1}{4}$ horno. La simetría corresponde a las cara norte y este del horno experimental.



Figura 1. Simetría horno de ladrillos a 1/4

La quema experimental se desarrolló en el municipio León en la Localidad del Refugio. Se propuso analizar un horno de campaña de tipo cielo abierto ya que este tipo de horno es el preponderante en la región.

Se analizó la forma en la cual productores elaboran los ladrillos sin tener ninguna intervención en el proceso al momento de realizar las mediciones de la parte experimental. Se recabaron los siguientes datos:

- Tipo de estibado de ladrillos.
- Temperatura ambiente.
- Velocidad del aire.
- Humedad del aire.
- Tipo de combustible, madera de encino.
- Medición de las temperaturas en la pared exterior.
- Medición de las temperaturas dentro del horno, manejando 52 termopares tipo K.

La quema experimental inicio a las 7 am, y se monitoreo hasta las 48 horas posteriores al inicio de la quema. Con los datos obtenidos en la quema experimental se inició la construcción del modelo CAD en base al estibado de ladrillos en el horno, se identificaron 3 secciones, figura 2, las cuales se representaron lo más cercano posible a las condiciones del horno analizado. Estas secciones son las siguientes:

- Arcos, es la primera sección que se construye dentro del horno, cumple con dos funciones: dar soporte para todos los ladrillos que se van a quemar y generar el espacio para hogar del horno donde se quema el combustible.
- Rejilla, esta sección se construye a continuación de los arcos, su función es la de distribuir los gases combustión en el interior del horno.
- Camas, El acomodo de los ladrillos en esta sección es siempre de canto, con hileras alternadas en un sentido y la siguiente girada a 90° con una separación entre filas de ladrillos de aproximadamente 20 mm.

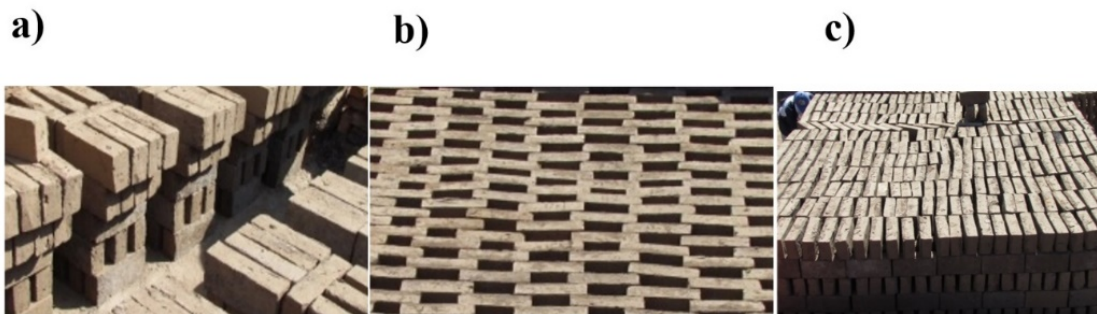


Figura 2. Secciones del horno: a) arcos, b) rejilla, c) camas.

Modelo Geométrico

El modelo CAD 3D fue generado en ANSYS WORKBENCH-14.0, el cual se representaron las 3 secciones mencionadas anteriormente, figura 3.

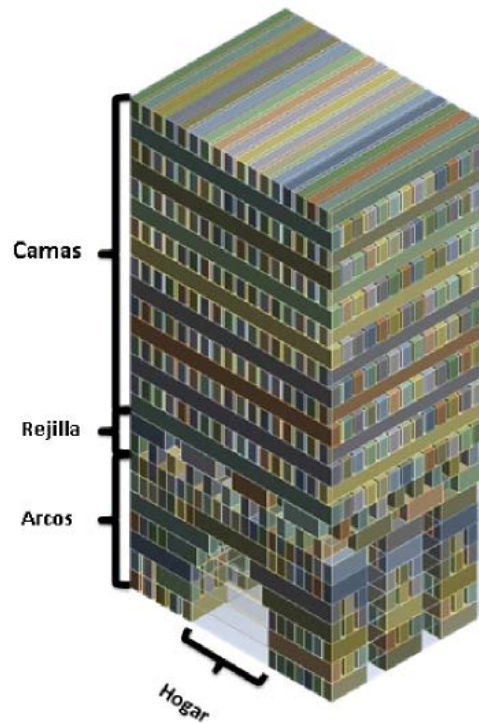


Figura 3. Modelo CAD 3D aplicando 1/4.

Ecuaciones

Para describir la transferencia de calor dentro del horno, es necesario hacer una breve reseña de las ecuaciones de balance que regirán nuestro fenómeno. Las ecuaciones de transporte de propiedades como masa (1), cantidad de movimiento (2) y energía (5,6) se describen en las siguientes expresiones (Bird, 1960):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_{M,buoy} \quad (2)$$

Donde:

$$\tau = \mu \left[\nabla v + (\nabla v)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot v \right] \quad (3)$$

$$S_{M,buoy} = (\rho - \rho_{ref})g \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\rho v h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (v \cdot \tau) + S_E \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (6)$$

Otro modelo a las ecuaciones anteriores, es el modelo de turbulencia k-ε que introduce dos nuevas variables la ecuación de continuidad y cantidad de movimiento (6, 7).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_{M,buoy} \quad (8)$$

Donde:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (9)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

μ_{eff} = Viscosidad efectiva

μ_t = Viscosidad de turbulencia

k = Energía cinética de turbulencia

ε = Turbulencia de disipación

C_μ = Constante del modelo k-ε (0.09)

Modelo Volumen Finito

El modelo mallado fue transferido a ANSYS-CFX para su posterior análisis transitorio (ANSYS, 2008). La discretización del modelo toma parte importante para la calidad de los resultados, para ello es importante la selección del tamaño de elemento ideal, ya que el tamaño de la malla influye significativamente en los resultados así como en el

tiempo de simulación, se realizó un análisis de sensibilidad de malla en estado estable de un modelo del horno mayor, comparando 4 tamaños de 10, 15, 20 y 25 mm.

Los resultados se compararon en base a la malla más fina, como se puede observar en la tabla 1, no existe diferencia en las temperaturas alcanzadas por los ladrillos. Las diferencias se pueden observar en la velocidad de los gases en el interior del horno, a un tamaño de 10-15 mm existe una variación del 6%, pero a un tamaño de elemento mayor a 15 mm este error sube a un 22% y se tienen problemas de convergencia durante la solución de modelo.

Tabla 1. Resultados análisis de sensibilidad de malla.

Tamaño de elemento en mm	Número de elementos	Temperatura alcanzada en los ladrillos	Velocidad de los gases
10	2339064	1000	4.04
15	758664	1000	4.3
20	329111	1000	5.2
25	185631	1000	5.7

Debido a los resultados expuesto, se decidió usar un tamaño de elemento de 10 mm. La malla del modelo generó 6,550,751 elementos hexaédricos y con 6,330,578 nodos, figura 4. El tipo elemento usado fue un hexaedro de 8 nodos.

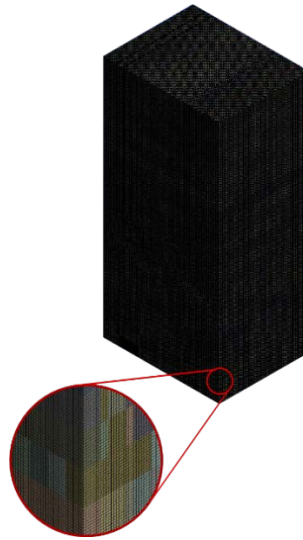


Figura 4. Modelo mallado.

3. MATERIALES

Para fines de la simulación del horno de ladrillos se generaron dos dominios (sólido y fluido):

- Ladrillos (sólido), las propiedades se manejaron constantes durante toda simulación (tabla 2).

Tabla 2. Propiedades ladrillo

Propiedad	Magnitud	Unidades
Conductividad térmica	0.69	$W m^{-1} K^{-1}$
Densidad	1600	$kg m^{-3}$
Capacidad calorífica	840	$J kg^{-1} K^{-1}$

- Aire caliente, se manejó como un gas ideal y las propiedades se manejaron constantes durante toda simulación (tabla 3).

Tabla 3. Propiedades aire

Propiedad	Magnitud	Unidades
Conductividad térmica	0.0261	W m ⁻¹ K ⁻¹
Capacidad calorífica	1004.4	J kg ⁻¹ K ⁻¹

En el caso de la densidad se optó por el modelo de Buoyanci como una mejor representación de esta propiedad, debido al constante aumento de la temperatura en el interior del horno durante toda la simulación. Se usó una densidad de referencia de 1.18 kg/m³.

Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera fueron determinadas mediante datos experimentales, lo cuales fueron recabados durante una quema del horno analizado. Las condiciones de operación del horno no fueron modificadas, se operó el horno como normalmente se hace en cualquier quema. Estas condiciones consisten en las siguientes:

- Se carga el horno de ladrillos frescos.
- Por las dos compuertas ubicadas en la cara este y oeste se introduce la leña a quemar.
- Se inicia la quema, encendiendo la leña.
- Se sigue alimentando el horno mientras la que quema avanza.
- Se sellan las compuertas de alimentación pasadas 12 horas.
- Se sella la parte superior del horno con una mezcla de arcilla y estiércol.
- Se cuida la temperatura en el interior del horno, si es necesario se alimenta nuevamente el horno.

- Pasadas 32 horas el horno presenta la mayor temperatura en la parte superior, a partir de ese momento se consideran otras 24 o 32 horas para el enfriamiento.
- Se abren las compuertas de alimentación para que el aire entre y pueda enfriarse con mayor rapidez.

Entrada: Representa la entrada de los gases de combustión por la parte inferior del horno. Para poder representar de manera adecuada esta condición fue necesario tomar las siguientes dos consideraciones:

- La temperatura de los gases de combustión presentó un valor variable durante la quema experimental debido a que al inicio de la quema no se tiene una combustión completa del combustible, es por eso que la temperatura va en ascenso desde 50°C hasta los 1000°C. Debido a este comportamiento fue necesario la representación de esta variable como se muestra en la figura 5:

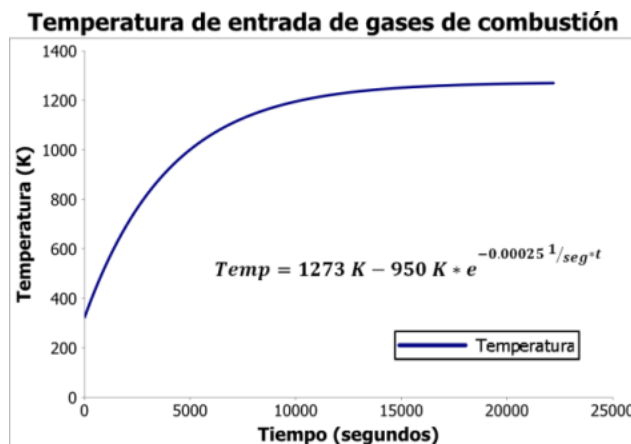


Figura 5. Grafica de la variación de la temperatura de entrada de los gases de combustión respecto al tiempo.

- La velocidad de ascenso de los gases de combustión, al igual que la temperatura de los gases de combustión, no presentó un valor constante, pero debido a las

dificultades de su medición se optó por una representación similar a la utilizada en la temperatura de los gases de combustión, teniendo como límite una velocidad reportada de 0.67 m/seg [9], y fue representada por la figura 6:

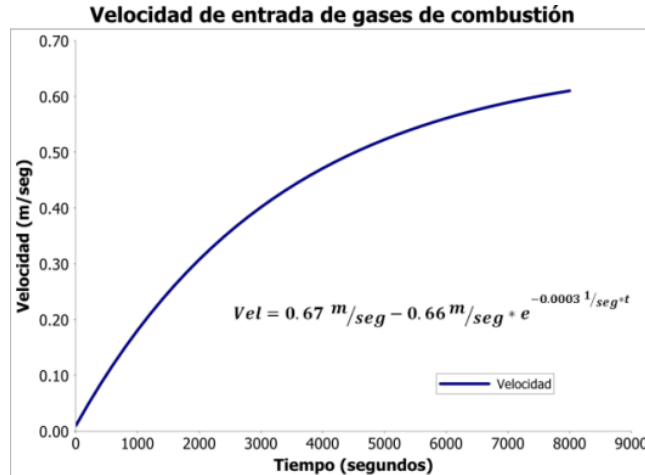


Figura 6. Grafica de la variación de la velocidad de entrada de los gases de combustión respecto al tiempo.

Salida: Debido al tipo de horno analizado es de tipo cielo abierto, se optó por una condición de frontera salida en la parte superior del horno, figura 7b, representando la salida de los gases combustión al medio ambiente bajo las condiciones promedios de 25°C y 1 atm. Por lo cual no se presenta un gradiente de presión entre la entrada y la salida.

Simetría: Se manejó una simetría en dos caras internas del modelo en la dirección norte y oeste, figura 7c, esto debido a las condiciones simétricas que presenta el horno en esas direcciones.

Pared: La última condición de frontera que se manejó, fue una condición de pared adiabática, en las caras exteriores del horno que corresponde a las direcciones sur y

este, figura 7d. Esta condición representa una condición ideal para la función que ejercen las paredes externas del horno.

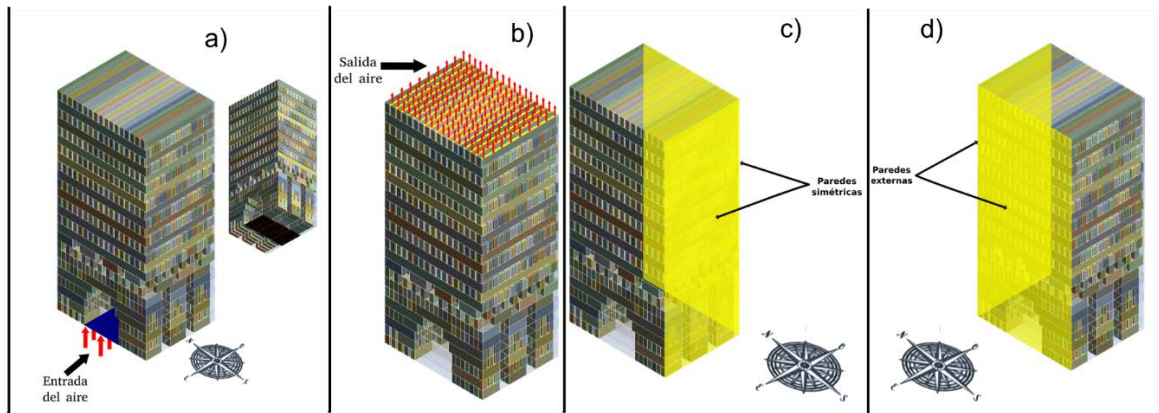


Figura 7. Condiciones de frontera: a) entrada, b) salida, c) simetría, d) pared

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a la configuración geométrica del modelo CAD, figura 8, la comparación de los perfiles de temperatura obtenidos por la simulación se realizaron en 4 puntos, que representan 4 termopares colocados en las fronteras del horno los cuales 2 estuvieron ubicados en la cara este y 2 en la cara norte, las consideraciones del porque tomar estas caras para la comparación de resultados, son solamente por la forma como se construyó el modelo CAD, estos resultados son válidos para cualquier esquina del horno, en la tabla 4 se muestran las localizaciones:

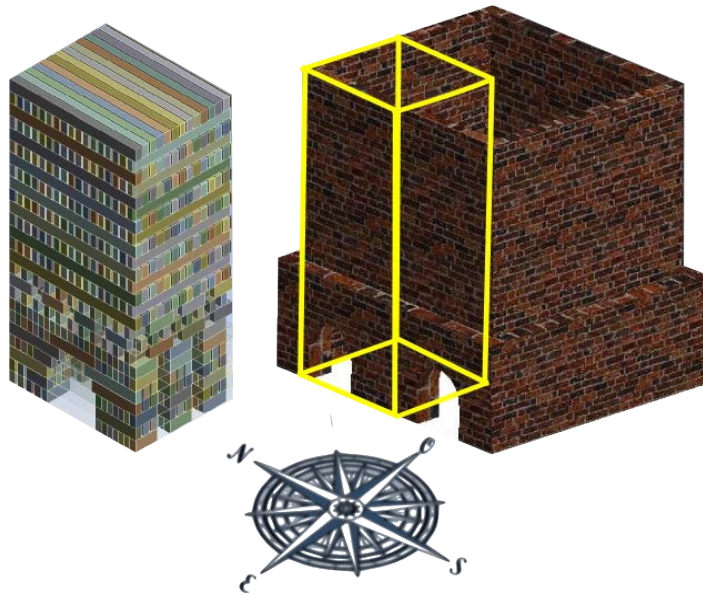


Figura 8. Detalle de geometría CAD

Como se mencionó anteriormente se comparó los resultados de simulación con los datos experimentales, en la figura 9 se puede observar la localización de los 18 termopares distribuidos en las caras Este y Norte, en los cuales se compararon los perfiles de temperatura.

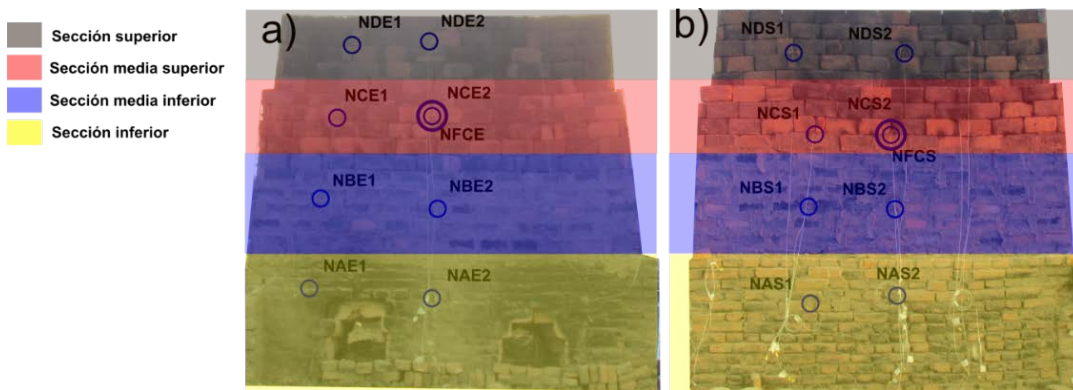


Figura 9. Localización de termopares comparados: a) cara Este, b) cara Norte

La comparación de las temperaturas se hizo en 4 termopares, una técnica estadística para conocer el grado de dispersión de los resultados de simulación respecto a los

experimentales mediante la obtención del factor de correlación. Mediante esta técnica se obtuvieron buenos factores de correlación, tabla 4.

Tabla 4. Valores de los factores de correlación en la cara Este

Termopares	Factor de correlación
NAE1	0.9221
NBE1	0.9967
NAN2	0.9915
NDN2	0.8567

Como se muestra en la tabla 4, podemos observar que la mayoría de los factores de correlación en los termopares se aproximan a 1 y son valores positivos, lo cual nos indica que los valores experimentales respecto a los de simulación presentan buena cercanía lineal y la misma dirección. En base a los factores de correlación obtenidos, se analizó 2 termopares de la cara Este (NAE1, NBE1) y 2 termopares de la cara Norte (NAN2 y NDN2).

El primer termopar que se analizó fue el NAE1, este termopar se localiza en la sección inferior de la cara Este muy cercano al hogar del horno, figura 9. En la figura 10 se presenta una comparación de las temperaturas obtenida de manera experimental y la simulación, y como se puede observar la temperatura obtenida mediante la simulación presenta un comportamiento parecido a los datos experimentales, esto se confirma con el valor de correlación (0.9221) obtenido en este termopar, que es muy cercano al valor promedio de 0.9342. En este termopar podemos observar como conforme el tiempo

avanza las temperaturas de simulación se van acercando a los datos experimentales, hasta tener un error del 13.91%.

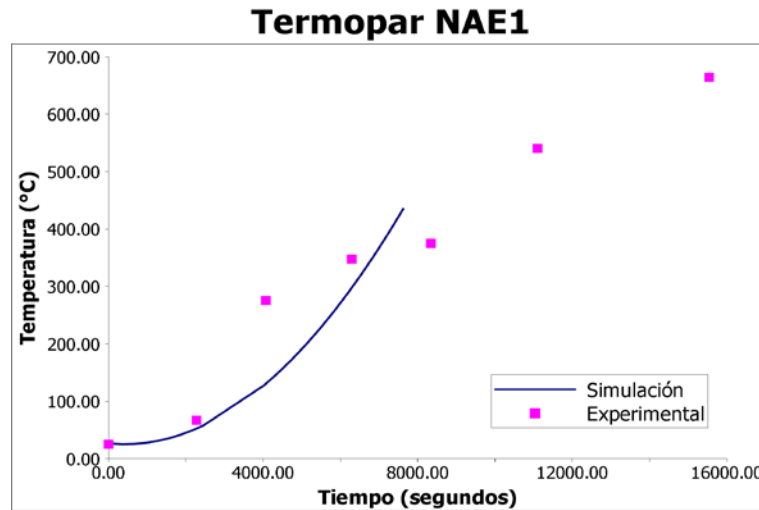


Figura 9. Comparación de perfiles de temperatura en el termopar NAE1

El segundo termopar que se analizó fue el NBE1, este termopar se localiza en la sección media inferior de la cara Este por encima del termopar NAE1, figura 9. En la figura 10 se presenta una comparación de las temperaturas obtenida de manera experimental y la simulación, y como se puede observar la temperatura obtenida mediante la simulación presenta un comportamiento idéntico a los datos experimentales, esto se confirma con el valor de correlación (0.9967) obtenido de la tabla 1, el cual presenta el valor más cercano a 1 de entre los 4 termopares analizados. En este termopar podemos observar como conforme el tiempo avanza las temperaturas de simulación presentan un comportamiento idéntico y buena aproximación a los resultados experimentales, en este termopar tenemos un error de 7.06%.

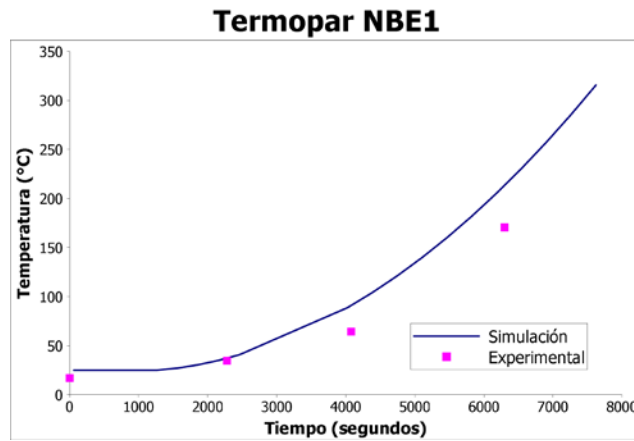


Figura 10. Comparación de perfiles de temperatura en el termopar NBE1

El primer termopar que se analizó de la cara Norte fue el NAN2, este termopar se localiza en la sección inferior de la cara Norte, figura 9. En la figura 11 se presenta una comparación de las temperaturas obtenida de manera experimental y la simulación, y como se puede observar la temperatura obtenida mediante la simulación presenta un comportamiento idéntico a los datos experimentales, esto se confirma con el valor de correlación (0.9915) obtenido en este termopar, que es un valor prácticamente de 1. En este termopar podemos observar como conforme el tiempo avanza las temperaturas de simulación se van acercando a los datos experimentales, hasta tener un error del 2.79%.

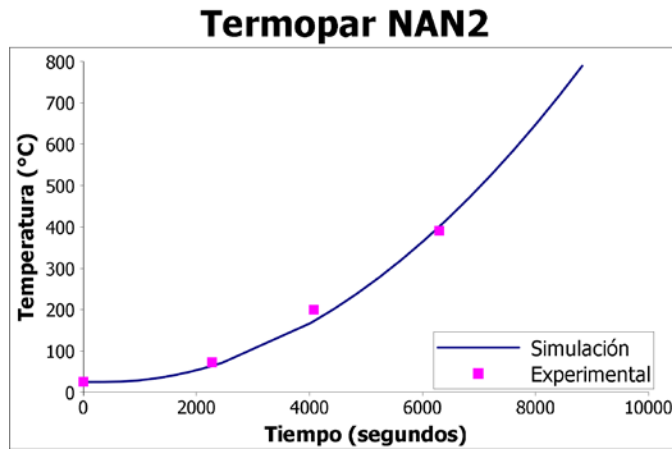


Figura 11. Comparación de perfiles de temperatura en el termopar NAN2

El último termopar que se analizó de la cara Norte fue el NDN2, este termopar se localiza en la sección superior de la cara Norte, figura 9. En la figura 12 se presenta una comparación de las temperaturas obtenida de manera experimental y la simulación, y como se puede observar la temperatura obtenida mediante la simulación presenta un valor medio de las temperaturas experimentales. A diferencia de los demás termopares para poder conocer el desarrollo de la temperatura en este termopar, fue necesario interpolar los datos hasta 4 horas de quema, y con esto el error que se obtiene es de 2.39%.

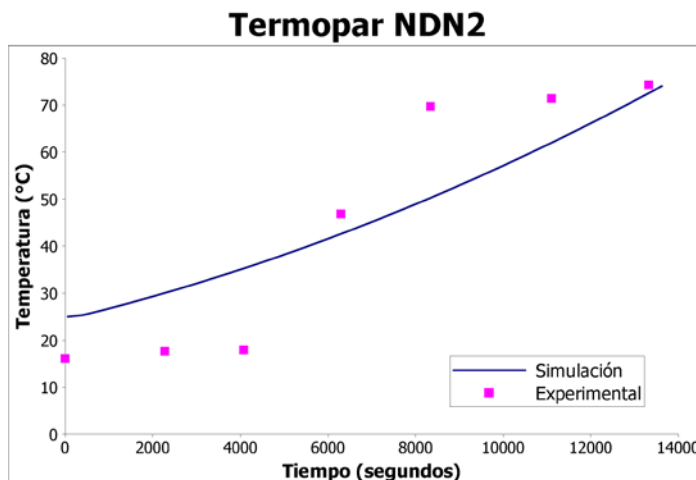


Figura 12. Comparación de perfiles de temperatura en el termopar NDN2

CONCLUSIONES

Se observó que existe una buena correlación entre los perfiles de temperatura obtenidos mediante la simulación y los datos experimentales, ya que se tiene un factor de correlación promedio de 0.9418 para los 4 termopares analizados, estos resultados son válidos para las primeras 3 horas ya que al extrapolar estos datos a un tiempo mayor obtenemos temperaturas muy altas a las alcanzadas de manera experimental. Esto se debe a diferentes factores, en el cual el principal es la falta de la modelación del agua contenida en los ladrillos, que representa un transporte de masa desde los ladrillos hacia el medio ambiente lo cual representa una pérdida de calor no considerada, ya que para este trabajo se consideró al ladrillo isotrópico con propiedades constantes. Actualmente se está trabajando en propiedades de los que representen este comportamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ANSYS Inc. "ANSYS Release 11.0 Documentation", ANSYS Company, Pittsburgh, PA, 2008.
- [2] Baum, Ellen. "BLACK CARBON from BRICK KILNS", Clean air task force, 2010.
- [3] Bird, R.B., Stewart W.E. and Lightfoot. "Transport Phenomena", John Wiley & Sons, Inc., 1960.
- [4] Bruce, C. W. "Development of cleaner burning brick kilns in Ciudad Juárez, Chihuahua, México", Air & Waste Manage, 2007.

- [5] Curicaveri, Omar. “Estudio Experimental del proceso de cocción de ladrillo usando gas L.P. como combustible”, Tesis de Maestría, Depto. de Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Celaya, 2001.
- [6] Greentech Knowledge Solutions. Brick Kilns Performance Assessment & A Roadmap for Cleaner Brick Production in India, <http://www.gkspl.in/>, 2012.
- [7] Flores, Julio Cesar. “Variables de diseño de hornos de ladrillo con geometría cilíndrica y cuadrada”, Tesis de Maestría, Depto. de Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Celaya, 2000.
- [8] González, “Diseño de horno circular experimental utilizando gas L.P. como combustible en ciudad Juárez”, Instituto de Investigaciones Ecotecnológicas, 1996.
- [9] Lakshmikantan, K. R.. “Vertical Shaft Brick Kiln - Technology Transfer India Experience – 1”, Gate, 1998.
- [10] Lakshmikantan, K. R.. “Vertical Shaft Brick Kiln - Technology Transfer India Experience – 2”, Gate, 1998.
- [11] Pachauri, R.K. y Reisinger, Cambio climático 2007: Informe de síntesis, <http://www.ipcc.ch/>, No.1, 2008.
- [12] Swisscontact, “Energy efficiency in artisanal brick kilns in latin America to mitigate climate change”, <http://www.swisscontact.org.pe/>, 2011.