



CIATEC

**Mejora del proceso de cocción de ladrillo artesanal en horno tipo MK2 por simulación numérica.**

## **Tesis**

Que para obtener el grado de

**Doctor en Ciencia y Tecnología en la Especialidad de Ingeniería Industrial y de Manufactura**

Presenta

**Juan Antonio Lara Mireles**

Director: Dr. Sergio Alonso Romero

Co-asesor: M.C. José Eduardo Frías Chimal

León, Guanajuato. Julio de 2021





GOBIERNO DE  
**MÉXICO**



CONACYT



CIATEC

León, Gto., a 16 de junio de 2021.

Coordinación de Posgrado.  
PICYT - CIATEC.  
Guanajuato.

Los abajo firmantes miembros del Comité Tutorial del alumno **Juan Antonio Lara Mireles**, una vez leída y revisada la Tesis titulada "*Mejora del proceso de cocción de ladrillo artesanal en horno tipo MK2 por simulación numérica*", aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Doctor en Ciencia y Tecnología en la Especialidad de Ingeniería Industrial y de Manufactura durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste se firma la presente a los 16 días del mes de junio del año dos mil veintiuno.

Dr. Sergio Alonso Romero.  
Tutor Académico

M.C. José Eduardo Frías Chimal.  
Tutor en planta.

EG-850-01-F13





GOBIERNO DE  
**MÉXICO**



CONACYT



CIATEC

León, Gto., a 13 de julio de 2021.

Dr. Ricardo Jaime Guerra Sánchez  
Director General de  
PICYT - CIATEC  
León, Guanajuato.

Estimado Dr. Guerra,

Los abajo firmantes miembros del Jurado de Examen del alumno **Juan Antonio Lara Mireles**, una vez leída y revisada la Tesis titulada *"Mejora del proceso de cocción de ladrillo artesanal en horno tipo MK2 por simulación numérica"*, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Doctor en Ciencia y Tecnología en la Especialidad de Ingeniería Industrial y de Manufactura durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 13 días del mes de julio del año dos mil veintiuno.

Dr. José Antonio Vázquez López.  
**Presidente.**

Dr. Alejandro Zaleta Aguilar.  
**Secretario.**

Dr. Jesús Salvador Jaime Ferrer.  
**Vocal.**

Dra. Anayansi Estrada Monje.  
**Vocal.**

Dr. Sergio Alonso Romero.  
**Vocal.**



## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por el apoyo económico para realizar mis estudios de doctorado.

Al Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas CIATEC y a todo su personal por brindarme el acceso a los recursos necesarios para la realización de este proyecto.

## Contenido

1. Introducción.....	1
2. Planteamiento del Problema .....	3
3. Estado del Arte.....	4
3.1 Hornos MK .....	4
3.2 Mejoras y Eficiencia en Hornos Ladrilleros .....	4
3.3 Simulación Numérica de Hornos Ladrilleros .....	6
4. Marco Teórico .....	10
4.1 Fabricación de Ladrillo Artesanal.....	10
4.2 Principales tipos de hornos en México para la cocción de ladrillo artesanal. ....	10
4.2.1 Horno Tradicional Abierto .....	11
4.2.2 Horno Tradicional Mejorado, Paredes Fijas .....	11
4.2.3 Horno MK2 .....	12
4.3 Norma y Requisitos de Calidad .....	15
4.4 Transferencia de Calor .....	15
4.4.1 Formas de Transferencia de Calor .....	16
4.4.2 Ecuaciones de Navier-Stokes .....	17
4.4.3 Ecuaciones Gobernantes del Fenómeno .....	18
4.4.4 Condiciones de Frontera .....	24
4.5 Elemento Finito .....	25
4.5.1 Software Ansys .....	28
4.5.2 CFD Computational Fluid Dynamics y CFX.....	29
4.6 Resumen de las Suposiciones del Modelo Numérico .....	29
5 Justificación .....	30
6 Objetivos .....	31
6.1 Objetivo General .....	31
6.2 Objetivos Específicos .....	31
7 Hipótesis.....	32
8 Desarrollo de la Investigación .....	33
8.1 Metodología.....	33
8.2 Análisis de Datos (Quemas Experimentales) .....	34
8.2.1 Actividades de Preparación .....	34

8.2.2 Actividades Ejecutadas Durante la Quema .....	37
8.3 Análisis Energético.....	41
8.3.2 Energía Absorbida por los Ladrillos en Cocción .....	42
8.3.3 Energía Pérdida por las Paredes del Horno .....	43
8.3.4 Energía perdida a través de los arcos fijos del horno (arcos de soporte para los ladrillos) .....	44
8.3.5 Energía perdida a través de los gases de combustión.....	45
8.3.6 Residuos de Material.....	45
8.4 Pruebas de Resistencia a la Compresión.....	45
8.5 Simulación Numérica, Volumen Finito .....	45
8.5.1 Geometría del Horno y Generación del Modelo en CAD.....	46
8.5.2 Discretización (Malla) .....	46
8.5.3 Propiedades de los Materiales: .....	49
8.5.4 Condiciones Iniciales .....	49
8.5.5 Condiciones de Frontera .....	49
8.5.6 Monitores .....	54
8.6 Diseño experimental.....	55
8.7 Horno MK en Serie.....	57
9 Resultados .....	59
9.1 Resultados de la Quema Experimental .....	59
9.1.1 Quema 1 Comparada con Quema 2.....	59
9.1.2 Perfiles de Temperatura .....	59
9.2 Análisis Energético.....	60
9.2.1 Energía Total Suministrada .....	60
9.2.2 Energía Absorbida por los Ladrillos en Cocción .....	60
9.2.3 Energía Perdida por las Paredes del Horno .....	61
9.2.4 Energía perdida a través de los arcos fijos del horno (arcos de soporte para los ladrillos) .....	61
9.2.5 Energía Perdida a Través de los Gases de Combustión .....	62
9.2.6 Residuos de Material.....	62
9.2.7 Calor Total .....	62
9.3 Pruebas de Resistencia a la Compresión .....	64
9.4 Simulación Numérica .....	65

9.4.1 Validación con Resultados Experimentales.....	65
9.4.2 Comportamiento Térmico Interno del Horno MK.....	66
9.4.3 Comportamiento del Aire Caliente.....	68
9.4.4 Perfil Interno de Presión.....	70
9.4.5 Perfiles de Temperatura en el Centro del Horno.....	71
9.5 Diseño Experimental.....	72
9.5.1 ANOVA de pruebas experimentales para la temperatura promedio en el horno.....	74
9.5.2 ANOVA de pruebas experimentales para la desviación estándar de las temperaturas.	77
9.5.3 Prueba de Falta de Ajuste.....	78
9.5.4 Optimización del Modelo.....	80
9.5.6 Análisis por Simulación Numérica.....	84
Conclusiones.....	86
ANEXO A.....	88
ANEXO B.....	91
ANEXO C.....	94
ANEXO D.....	96
ANEXO E.....	98
ANEXO F.....	100
ANEXO G.....	102
Referencias.....	103

## Índice de Tablas

Tabla 1. Artículos centrales del proyecto.....	9
Tabla 2. Etapas del proceso de cocción de ladrillo. Fuente: (Martínez, et al., 2002). .....	10
Tabla 3. Nomenclatura para identificar los ladrillos de prueba.....	37
Tabla 4. Nomenclatura termopares. ....	38
Tabla 5. Características de las mallas en los modelos de prueba. ....	47
Tabla 6. Tipos de elementos para mallado. ....	47
Tabla 7. Malla seleccionada para horno completo .....	48
Tabla 8. Propiedades físicas del ladrillo y del aire. Fuente: (Incropera & De Witt, 1999) .....	49
Tabla 9. Nomenclatura, localización monitores de temperaturas. ....	55
Tabla 10. Localización de termopares por cama. ....	55
Tabla 11. Variables influyentes en el proceso de cocción de ladrillo horno MK2. ....	56
Tabla 12. Condiciones base (del modelo validado). ....	56
Tabla 13. Alias para un Diseño de experimentos $2^5$ fraccionado a $1/4$ . ....	57
Tabla 14. Resumen de datos de las dos quemas. ....	59
Tabla 15. Temperaturas máximas por zona ( $^{\circ}\text{C}$ ). ....	61
Tabla 16. Pérdidas por las paredes (kcal). ....	61
Tabla 17. Resumen del consumo energético.....	63
Tabla 18. Comparación energética del horno MK y el horno (HL) analizada por Hinojosa-Ledesma y Velasco-Hurtado (2004). ....	63
Tabla 19. Comparación con los resultados reportados por Munguía –Guillen et al (2012). ....	64
Tabla 20. Resultados de la resistencia de los ladrillos de prueba .....	64
Tabla 21. Flujo de los gases.....	69
Tabla 22. Alias para un diseño de experimentos $2^5$ fraccionado a $1/4$ . ....	73
Tabla 23. Cambios para un diseño de experimentos $2^5$ fraccionado a $1/4$ en un horno MK2.....	74
Tabla 24. ANOVA para la temperatura promedio en el horno (mejor ANOVA) .....	75
Tabla 25. ANOVA para la desviación estándar de las temperaturas. ....	77
Tabla 26. ANOVA para la temperatura promedio en el horno. ....	79
Tabla 27. Diseño de composición central.....	81
Tabla 28. Descripción de los niveles de los factores para diseño de composición central. ....	82
Tabla 29. ANOVA para la temperatura promedio en el horno DDC. ....	82
Tabla 30. ANOVA para la desviación estándar de las temperaturas DDC. ....	83
Tabla 31. Modelos de regresión.....	83
Tabla 32. Valores objetivo en base a resultados de experimentación.....	83



## Índice de Figuras

Figura 1. Horno tradicional o de campaña.....	11
Figura 2. Horno de paredes fijas. ....	12
Figura 3. Esquema del funcionamiento del horno MK2 .....	12
Figura 4. Caldera o cocina, horno MK2 .....	13
Figura 5. Arcos, horno MK2. ....	13
Figura 6. Puerta de alimentación de combustible .....	13
Figura 7. Puerta de carga. ....	14
Figura 8. Túneles. ....	14
Figura 9. Cúpula de horno MK2. ....	14
Figura 10. Chimenea de horno MK2.....	15
Figura 11. Conducción y convección en la frontera de un sistema (Welty, et al., 1994).....	25
Figura 12. Descripción de la metodología aplicada. ....	33
Figura 13. Localización de las ladrilleras “El Refugio”. ....	34
Figura 14. Horno MK2, El Refugio. ....	34
Figura 15. Dimensionamiento de horno.....	35
Figura 16. Perforaciones para termopares. ....	35
Figura 17. Localización de termopares. ....	35
Figura 18. Localización de termopares. ....	36
Figura 19. Acomodo de adobes, primera cama. ....	36
Figura 20. Localización de los ladrillos para las pruebas de resistencia.....	37
Figura 21. Dispositivo para almacenamiento de datos .....	38
Figura 22. Localización de termopares. ....	38
Figura 23. Pirómetro y cámara termográfica.....	39
Figura 24. Temperaturas exteriores (con pirómetro), de la cara este del horno, quema 1.....	39
Figura 25. Toma de temperaturas por medio de cámara termografía. ....	39
Figura 26. Anemómetro digital y estación meteorológica portátil. ....	40
Figura 27. Temperaturas ambientales, quema 1 (mayo 2016). ....	40
Figura 28. Velocidad del viento, quema 1 (mayo 2016). ....	41
Figura 29. Rosa de los vientos en la segunda quema junio 2016. ....	41
Figura 30. Horno MK2 dividido en secciones, para el cálculo de la energía absorbida por los ladrillos....	43
Figura 31. Horno MK2 dividido en secciones, para el cálculo de la energía absorbida por el muro del horno. .....	44
Figura 32. Ubicación de los arcos de soporte en el interior del horno MK2 (longitudes en mm). ....	44
Figura 33. Geometría en Solidworks. ....	46
Figura 34. Geometría importada a ANSYS CFX. ....	46
Figura 35. Discretización del modelo. ....	48
Figura 36. Calidad de malla ortogonal .....	48
Figura 37. Calidad de malla oblicuidad. ....	49
Figura 38. Comportamiento de la temperatura en la base del horno. ....	51
Figura 39. Comportamiento de la temperatura en la base del horno. ....	52
Figura 40. Adecuación de ecuaciones en Minitab.....	52

Figura 41. Grafica de las ecuaciones resultantes. ....	52
Figura 42. Localización de entrada de los gases (área de color verde). ....	53
Figura 43. Grafica de la velocidad del fluido.....	53
Figura 44. Condición adiabática.....	54
Figura 45. Localización de termopares y monitores.....	54
Figura 46. Esquema del proceso de quema de ladrillo en horno MK-n. ....	58
Figura 47. Comportamiento de las temperaturas del horno, quema 1. ....	60
Figura 48. Graficas de la validación de temperaturas lado Este ....	65
Figura 49. Comportamiento térmico en el interior a las 12 horas. ....	66
Figura 50. Comportamiento térmico visto en forma de rebanada a las 12 horas ....	67
Figura 51. Comportamiento de la temperatura alcanzada en distintos momentos. ....	67
Figura 52. Comportamiento del fluido en el interior del horno durante la simulación a las 12 horas.....	68
Figura 53. Comportamiento del fluido visto en forma de rebanada a las 12 horas.....	69
Figura 54. Comportamiento de los niveles de presión (Pa) interior del horno durante la simulación a las 12 horas. ....	70
Figura 55. Comportamiento de los niveles de presión (Pa) interior del horno visto en forma de rebanada a las 12 horas. ....	71
Figura 56. Comportamiento de las temperaturas del horno, quema 3. ....	72
Figura 57. Temperaturas alcanzadas en la parte central del horno. ....	72
Figura 58. Graficas de la primera corrida experimental para verificación de los supuestos. ....	76
Figura 59. Graficas de residuos y efectos principales. (Para la tercera variable de salida) ....	78
Figura 60. Graficas de residuos y efectos principales. (Para prueba de falta de ajuste) ....	79
Figura 61. Variables que se ajustaron de acuerdo al modelo óptimo ....	84
Figura 62. Imágenes del comportamiento térmico durante la simulación numérica) ....	85

## 1. Introducción

En la actualidad se han realizado diferentes investigaciones relativas al proceso de fabricación de ladrillo artesanal, la mayoría de ellas enfocadas en la mejora de la eficiencia energética o en la disminución de emisiones contaminantes. Se nota preocupación por parte del gobierno, en sus tres niveles, por atacar el problema de contaminación que generan los hornos en la fabricación de ladrillo artesanal; en general se han dado situaciones muy similares en América Latina.

La participación de familias de pocos recursos en el negocio de elaboración de ladrillo artesanal es común. Estas familias difícilmente tienen acceso a niveles educativos altos, lo que los mantiene al margen de realizar mejoras en sus negocios, con utilidades bajas y en condiciones desfavorables para su salud. Para los productores, parte de la productividad implica disminuir las mermas (ladrillos que no cumplen las especificaciones) (Normas, 1976), reducir el consumo de combustible, y el tiempo de cocción.

Esta tesis aborda el entendimiento del proceso de cocción de ladrillo en el horno MK2 mediante la herramienta computacional de simulación numérica, utilizando el software Ansys® y el módulo de CFD específicamente CFX. Este trabajo inicia obteniendo datos de una quema experimental en campo, donde se obtienen, entre otros datos, los perfiles de temperatura del horno. Posteriormente se plantean los elementos del modelo como: condiciones iniciales y de frontera, para luego validar el modelo contra los perfiles de temperatura originales y en base a este modelo validado se plantean mejoras para el mejor funcionamiento del horno.

El conocimiento del proceso de cocción de ladrillo en un horno MK2, mediante el análisis de datos experimentales, muestra el comportamiento energético del mismo, es decir, cómo ocurre el calentamiento en algunas zonas del horno, al igual que se puede realizar el cálculo de la eficiencia energética. Y como herramienta de análisis y comportamiento ante diferentes variables de operación se presenta un modelo numérico y su validación, ya que la versatilidad experimental no es la que se puede llegar a tener en el análisis numérico.

Como principales contribuciones se consideran las siguientes:

- Identificar las variables que influyen en el funcionamiento del proceso de cocción de ladrillos en un horno MK2.
- Se generó un modelo geométrico de simulación de un horno MK2 completo (en Solidworks®).
- Llevar a cabo la simulación de un horno MK2 (en Ansys CFX).
- Se realizó un balance energético para un horno MK2.
- Se realizó un DOE, típicamente usado en experimentos de laboratorio, en una aplicación de simulación numérica.
- Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones numéricas, los cuales se discutirán en la sección correspondiente.

La simulación numérica del horno MK2 aporta lo siguiente:

- Identifica y valida las variables que influyen en el funcionamiento del proceso de cocción de ladrillos en un horno MK2.
- Generó un modelo numérico, representativo del proceso de cocción de ladrillos en un horno MK2, el cual nos permite simular diferentes condiciones de operación del mismo para realizar propuestas de mejora (el modelo considera las propiedades físicas del adobe, las propiedades físicas del aire, las ecuaciones gobernantes, las condiciones iniciales y de frontera en donde se incluye la ecuación de entrada de energía).
- El modelo numérico representativo del proceso de cocción de ladrillos en un horno MK2, nos permite conocer de mejor manera los fenómenos internos que ocurren, tales como: La transferencia de calor en toda la configuración de ladrillos y el comportamiento de los gases calientes al interior del horno. Lo anterior no es posible experimentalmente.

## 2. Planteamiento del Problema

La industria de fabricación de ladrillo generalmente se desarrolla como un negocio familiar. Las condiciones de trabajo en algunos casos evidencia la pobreza y marginación de las personas que trabajan en estas ladrilleras (del estado de Guanajuato) (García, 2016). En México actualmente los hornos artesanales más utilizados son del tipo paredes fijas (75 %), del tipo de tradicional o de campaña (22 %) y el porcentaje restante corresponde a tecnologías relativamente nuevas como el horno MK2 (CIATEC, 2015). El horno tipo MK2 es una propuesta relativamente nueva, pero que aún sigue en una etapa experimental al no tener una metodología de quema definida (Munguía, et al., 2012).

La cantidad de energía utilizada en el proceso de cocción de los ladrillos en este tipo de hornos (artesanales) es alta, ya que se requiere elevar a altas temperaturas entre 900 y 1,000°C (Singer, 1960), por lo que se requiere un tiempo de quema considerable. El costo del combustible representa aproximadamente el 60 % del total de los insumos (materia prima).

La reducción de mermas, consumo de combustible y tiempo de cocción son de primordial importancia para poder lograr los rendimientos necesarios. La calidad del ladrillo también es un factor fuerte debido a que no solo tiene que ver con la apariencia sino también con las especificaciones que están bien definidas (ONNCCE, 2012). Por consecuencia, se estudiara el proceso de cocción del ladrillo artesanal en un horno MK2, con el objeto de encontrar mejores condiciones de quema respecto a las condiciones actuales.

### 3. Estado del Arte

La literatura revisada refleja pocas publicaciones en relación a los hornos MK2. La mayoría de estudios son referentes a otros tipos de hornos, principalmente buscando mejorar o hacer más eficientes estos hornos. En cuanto a la parte de simulación numérica se encuentran también pocas publicaciones realizadas en hornos ladrilleros, sin haber encontrado una publicación referente a los hornos MK2. A continuación un resumen del estado del arte en cuanto al estudio de hornos ladrilleros.

#### 3.1 Hornos MK

Bruce et al (Bruce, et al., 2012) 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 MK (Márquez, 2002). Bruce et al., (2012) demuestran un buen potencial del horno tipo MK para la reducción de emisiones contaminantes a través del horno filtro. Munguía et al (Munguía, et al., 2012) realizaron un análisis del consumo energético en hornos MK2 de las ciudades de San Miguel de Allende, Guanajuato y de Aguascalientes (México). Se encuentra que hay mucha variación en cuanto a los consumos de energía y baja eficiencia o productividad en la elaboración de ladrillos. Se recalca también la importancia del consumo de energía en los hornos que se encuentra influida por distintos parámetros, siendo los más importantes: la configuración de los hornos, el tipo de combustible utilizado, y los tiempos de alimentación.

#### 3.2 Mejoras y Eficiencia en Hornos Ladrilleros

Violante y Gallegos (Violante & Gallegos, 2003) realizaron el análisis de una pared compuesta para estudiar la transferencia de calor conjugada, tratando de minimizar costos de inversión de los materiales aplicados, así como optimizar el diseño de los hornos ladrilleros. Para el análisis de la pared compuesta se desarrolló un modelo numérico aplicando la dinámica de fluidos computacional CFD que utiliza el método de volumen finito para resolver la transferencia de calor por convección natural en una cavidad de aire que se aplica a la pared compuesta del horno. Manejaron dos configuraciones: A (ladrillo común, lana mineral, cavidad de aire y ladrillo refractario) y B (ladrillo común, colchoneta de superwool, cavidad de aire y ladrillo común). De acuerdo a la simulación de ambas opciones y un análisis de costos de los materiales, los autores recomiendan como mejor opción la B. Este tipo de propuestas pueden ser difíciles de implementar para un ladrillero común.

Martínez, Jiménez y Sandoval (Martínez, et al., 2003). Realizaron un estudio experimental utilizando gas licuado de petróleo como combustible. Se analizaron alternativas de mejoramiento en el quemado tradicional, tales como el diseño de un horno térmicamente eficiente (fijo intermitente de 3.04 m de largo X 3.04 m de ancho X 3.04 m de altura de pared fija y 1.5 m de sección de campana) y el uso de un sistema de combustión que disminuya la contaminación actual generada por la quema con basura u otros residuos. En el sistema de combustión empleado se utilizaron dos clases de quemadores: atmosférico y de turbina, donde el aire es alimentado mediante un soplador. Se realizaron siete quemas variando el tipo de horno, el tipo de gas licuado de petróleo, carga de ladrillo y tipo de quemador, teniendo como variables de respuesta, la cantidad de emisiones atmosféricas, consumo de combustible y la calidad de los ladrillos. Los resultados muestran un aumento en la eficiencia térmica ya que se utilizaron 600 litros de combustible para quemar

una carga de 17,500 ladrillos, obteniéndose una eficiencia de 81 %. Concluyen que la carga sin espaciado de los ladrillos aumenta la eficiencia térmica y produce ladrillos de buena calidad.

Hinojosa *et al* (Hinojosa & Velasco, 2004) realizaron un diagnóstico de cómo trabajan las ladrilleras artesanales en la ciudad de Oruro, Bolivia. Muestran un balance térmico en donde se llega a un rendimiento térmico del horno del 22.95 %. Concluyen que es difícil mantener el rango de temperaturas requerido durante el proceso de cocción de los ladrillos, esto por la forma de alimentar el combustible sólido y la falta de instrumentos de medición. Por ello no se logra alcanzar la temperatura requerida (800 a 900 °C) y otras veces ésta se sobrepasa. Hinojosa *et al* (Hinojosa & Velasco, 2005) mostraron a detalle la elaboración del balance térmico del horno de Oruro, como conclusión, proponen el uso de combustible gaseoso, el cual deberá permitir superar las dificultades de la etapa de cocción de los ladrillos, siendo más fácil alcanzar y mantener las temperaturas requeridas por la cocción con un control del consumo de combustible relativamente sencillo.

Ramírez *et al* (Ramírez, *et al.*, 2004) monitorearon la temperatura por medio de termopares en diferentes ubicaciones de un horno tipo escoces modificado de tiro directo durante el proceso de cocción de ladrillo. Se realizaron dos pruebas; la cocción de ladrillo con un dosificador manual de aserrín y con un dosificador mecánico empleando un soplador oscilante. Se midió también la temperatura al interior del horno y en la superficie del ladrillo ubicado en el centro del horno. Los ladrillos ubicados en el centro del horno desde la parte inferior hasta la parte superior presentaron un color rojo intenso, alrededor de los ladrillos con color rojo intenso se encontraron ladrillos con una menor intensidad de color pero catalogados como de primera calidad. Los ladrillos de segunda se encontraron en las partes más alejadas al centro del horno. El uso del dosificador mecánico de aserrín dio como resultado una disminución del tiempo de cocción y una menor emisión de humo debido a una mejor distribución y combustión del aserrín en el hogar del horno. Con el monitoreo de la temperatura fue posible modificar algunas etapas del proceso para obtener mayor número de piezas de primera calidad y evitar la sobre cocción de ladrillos. Concluyeron que la calidad del ladrillo depende de su ubicación en el horno y por consecuencia de la temperatura alcanzada durante la cocción.

Chávez (Chávez, 2008) analizó el funcionamiento de dos hornos de paredes fijas acoplados entre sí por un sistema de campanas extractoras adaptadas a la parte superior de los hornos; el estudio incluye las emisiones de gases y partículas producto de la combustión. Una de sus conclusiones fue que el uso de un horno para filtrar los gases y a la vez utilizado como cámara de pre-secado redujo el consumo energético en el rango de 25-39 %, lo cual reduce el consumo de combustible y, por obvias razones, de la contaminación.

Corral *et al* (Corral Avitia, *et al.*, 2009) trataron el problema del riesgo ambiental buscando la ubicación de los hornos ladrilleros de manera que afecten menos a las ciudades, los autores encontraron áreas geográficas idóneas en el municipio de Juárez para la reubicación de la industria ladrillera. Se utilizó la técnica de análisis multicriterio (AMC) con base cartográfica digital en un sistema de información geográfica (SIG). Los factores seleccionados para el análisis incluyeron aspectos biofísicos, sociales y económicos. De la superposición de los mapas se obtuvieron polígonos con diferentes grados de vulnerabilidad hacia la población y el ecosistema. Los polígonos (zonas) de menor vulnerabilidad, que en este caso están representados por los niveles 7, 8 y 9 (la escala va de 0 al 9), son la mejor opción para

reubicar los hornos bajo los conceptos de protección de la salud humana, preservación de recursos naturales y optimización de aspectos económicos. Para este estudio, los factores ambientales críticos fueron zonas ecológicas y edafología; los sociales fueron densidad de población y vivienda; en relación a los económicos el de mayor impacto fue uso de suelo. Reportan cerca de 71 % de la superficie evaluable incluida como de baja vulnerabilidad, concluyendo que es necesario llevar a cabo un estudio más detallado que permita localizar sitios apropiados para el establecimiento de parques ladrilleros; o alguna otra industria de riesgo similar, dentro del plan de ordenamiento territorial municipal.

González (González, 2010), en un estudio con enfoque cualitativo en el norte de México, identificó aquellos elementos que están deteniendo la adopción de nuevas tecnologías, aparentemente exitosas, en la reducción de emisiones como son los Hornos MK2 (un horno con otro tipo de tecnología implica cambios principalmente en el proceso de quema de ladrillo). Se manejaron como causas principales de inhibición al cambio tecnológico la escasa planeación de los gestores (promotores e implementadores de esta tecnología) y la alteración del proceso de producción de ladrillos el cual realizan de forma tradicional es decir, han realizado sus actividades sin cambios considerables por generaciones. La planeación de los gestores al no incluir diagnóstico integral, ajustes y seguimiento del proyecto generó una implementación de tecnología que no tenía el soporte necesario según las especificidades de la comunidad.

Pinto *et al* (Pinto, et al., 2011) evaluaron el empleo de la inyección de aire (uso de ventilador) versus la quema tradicional obteniendo un cuadro comparativo de las eficiencias térmicas, de los consumos específicos y de la eventual economía de energía con el empleo de aire inyectado (con ventilador). En resumen, afirmaron que el uso del ventilador permite una economía de 29.0 % de energía térmica (leña), además de posibilitar una mayor producción de productos bien sinterizados.

Luby *et al* (Luby, et al., 2015) realizaron investigaciones del por qué se siguen utilizando métodos antiguos que generan contaminación en la ciudades. Concluyen que la principal razón es que resulta más barato la producción tradicional respecto a la producción en un horno Hoffman más moderno. Existe una fuerte demanda de ladrillos de bajo costo y un mercado mucho más pequeño para ladrillos caros. El costo de producción para ladrillos cocidos en pequeños hornos de chimenea fijos estacionales es sustancialmente menor que los ladrillos cocidos a través de un horno Hoffman más moderno que puede producir ladrillos con menos contaminación por ladrillo.

### **3.3 Simulación Numérica de Hornos Ladrilleros**

La simulación numérica y el método por elemento finito se usan para la resolución de diversos problemas en áreas como mecánica, química, arquitectura (Xu & Liu, 2011). Moreira Morcillo (Moreira-Morcillo, 1989) desarrollo un modelo matemático de respuesta transiente, partiendo primero de una geometría unidimensional, bidimensional y finalmente tridimensional. Realizó también el análisis por medio de diferencias finitas y subdividiendo el horno en secciones, cada una de las cuales tiene un volumen pequeño de material llamados nodos. El trabajo se realizó en el lenguaje de programación Basic en una microcomputadora IBM. Concluye que los resultados representan la conducción de calor dentro de la carga de ladrillos pero no representaron del todo el comportamiento real del proceso de cocción del horno ladrillero debido a procesos que, por falta de experimentación, no pudo incluir (no considera el fenómeno de convección de los gases al ladrillo ni la radiación de los gases a las capas de ladrillos fríos).



Prasertsan *et al* (Prasertsan, et al., 1997) estudiaron un horno para cocción de ladrillos en busca de una mejor eficiencia energética, analizaron las variables del proceso por medio de la simulación: el secado, el precalentamiento, la cocción y el enfriamiento. Como resultado surge una propuesta de horno continuo, el cual contempla las variables mencionadas como etapas del mismo, es decir, el horno está constituido por cuatro cámaras separadas pero conectadas entre sí por ductos que recirculan el aire dependiendo la etapa de proceso en la que se encuentren. Simularon cada proceso por separado y posteriormente lo validaron con quemas experimentales obteniendo diferencias de hasta 100 °C entre la simulación y los resultados experimentales. De las ventajas a resaltar es la eficiencia energética de hasta 70 %, aunque una de las desventajas de este horno es el tiempo que se utiliza para el enfriamiento (aproximadamente 12 h). Como ejemplo en la primera quema reportada en una de las cuatro cámaras los tiempos en horas fueron: 9.25, 11.5, 11, 12.5 para las etapas de secado, precalentado, cocción y enfriamiento respectivamente.

Martínez *et al* (Martínez, et al., 2002) simularon matemáticamente la operación de un horno cilíndrico vertical en base a las ecuaciones de energía clásicas aplicadas a la fase gaseosa (gases de combustión) y a la fase sólida (Ladrillo). El modelo resultante se resolvió numéricamente por medio del código IMPLI-F2 que utiliza diferencias finitas centrales. Los resultados muestran que la pérdida de calor está influenciada por las dimensiones del horno, independientemente del espesor de la pared, cuando se tiene un espesor mayor de 30 cm. Además, se encontró que la velocidad de los gases de combustión es una variable importante para la obtención de la temperatura de operación requerida. El modelo aquí propuesto predice que la relación longitud/radio en el horno debe ser de 4; sin embargo, valores de 2 o 3 son aceptables. Los espesores de la pared del horno mayores de 30 cm solamente interesan para el diseño mecánico para simplificar el modelo (la velocidad del gas se consideró constante).

Abou-Ziyan (Abou-Ziyan, 2004) aplicó modelos matemáticos en busca de mejoras en los procesos de cocción de ladrillo tradicional. Por ejemplo, presentan una simulación de diferentes acomodos de ladrillos en un horno tipo túnel. La escala del horno de experimentación fue de 1:4, y se probaron seis configuraciones diferentes incluidos tres tipos de acomodos, una configuración especial y dos configuraciones mixtas; las variables que manejan son: espaciamiento entre columnas, espaciamiento entre ladrillos, distancia de la pared a los ladrillos, distancia del techo a los ladrillos y el número de Reynolds que se movió en un rango de 6,000 a 33,000 con flujo de calor constante. Los resultados muestran que la caída de presión y el coeficiente de transferencia de calor por convección dependen fuertemente de ciertos factores, el Numero de Nusselt aumenta un 56 % al aumentar la separación de ladrillos de 5 a 26 mm, lo cual evidencia una mejor transferencia por convección. Los hornos que alcanzan un mejor coeficiente de transferencia de calor por convección obtienen el más corto tiempo de producción y proporcionan un alto grado de ahorro energético, y también llegan a la conclusión de que los datos tienen una buena correlación con el número de Nusselt o con el número de Reynolds y el factor de fricción (Abou-Ziyan, 2004). Obtuvieron correlaciones para su uso en el cálculo de las caídas de presión y las tasas de transferencia de calor por convección en la cocción de materiales refractarios se informan en forma de grupos adimensionales. Los números de Nusselt para todos los datos son correlacionados con el número de Reynolds y algunos otros grupos geométricos, o con el número de Reynolds y factor de fricción como sigue:

$$Nu = 0.088Re^{0.625} \left(\frac{s}{a}\right)^{-2.3} \left(\varepsilon \cdot \frac{s}{b}\right)^{1.837}$$

$$Nu = 0.081 f^{1.31} \text{ (Abou-Ziyan, 2004).}$$

López y Gallegos (López Robles & Gallegos Muñoz, 2008) plantean un análisis del proceso de quemado en un espacio bidimensional a través de los canales formados por la disposición de los ladrillos dentro del horno. En base a la geometría del ladrillo y a la observación de dichos canales para los hornos que utilizan combustóleo o diésel, los autores proponen diferentes modelos (de acuerdo a diferentes acomodos de los ladrillos A, B y C) como casos de estudio a desarrollar desde la perspectiva de la transferencia de calor, partiendo del estudio de la dinámica de fluidos por volumen finito utilizando el software Fluent. En conclusión, ellos detectan las áreas de oportunidad para un mejor aprovechamiento de la energía calorífica y ahorro de combustible. De los modelos que estudiaron uno de estos (el modelo C) fue seleccionado como la mejor opción debido a que presentó una mejor distribución de las temperaturas. También mencionan que el control de los gases de salida se logra retardar de manera sensible con dicha distribución, lo que permitiría asegurar un calentamiento más uniforme en todo el horno, mejorando así el consumo de combustible.

Ramírez *et al* (Ramírez, et al., 2008) desarrollaron un modelo matemático para la simulación de hornos para cerámica (para la simulación utilizaron el software Fluent 6.1), mismo que fue validado con datos experimentales. Estudiaron la relación del diámetro y la altura (relación D/H) así como el espesor de la pared refractaria de un horno vertical. Concluyen que es mejor un horno con una relación (D/H) mayor (con un mayor diámetro en relación a la altura) que los de relación más pequeña, entre más alta sea la relación los hornos promueven uniformidad térmica y el ahorro de energía ya que cuanto mayor es la relación, mayor es el área donde la transferencia de calor se realiza desde el fondo donde se encuentra la leña y simultáneamente disminuye la pared lateral a través de la cual hay pérdidas de calor. Sin embargo, mencionan que es difícil calentar más área ya que es necesario distribuir mejor la leña por la cámara de combustión, lo que implica que no es probable que opere bajo tales proporciones donde el diámetro del horno es muy grande a menos que sea posible introducir el flujo de calor utilizando gas natural, que puede ser fácilmente dirigido por un simple sistema de tuberías con quemadores.

Nicolau y Dadam (Nicolau & Dadam, 2009) afirman que la necesidad de ahorrar energía requiere la aplicación de análisis numérico. La optimización de un horno implica un gran número de variables y un fenómeno físico complejo. Un modelo preciso proporciona información detallada en una forma económica, además de permitir el análisis de varios casos. Nicolau y Dadam también presentan un trabajo de simulación para el diseño y operación de un horno tipo túnel en Brasil basado en las ecuaciones de conservación de masa y energía y programando en lenguaje FORTRAN.

Possamai (Possamai, et al., 2012) presenta una metodología para el estudio y modelado de energía térmica en cocción de cerámica, en un horno de cocción de cerámica tipo túnel, a través de simulación numérica mediante software CFD. Este tipo de hornos son usados para la cocción de tejas de barro, ladrillos y productos similares, con gas natural y aserrín como combustibles. La simulación CFD es realizada mediante el software comercial Ansys CFX 11.0 que está basado en el método de volumen finito. El problema térmico está compuesto por la combustión de gas natural con oxígeno, el flujo turbulento interno de los gases, la energía perdida por convección y radiación. La solución numérica provee resultados consistentes haciendo posible la predicción del comportamiento del horno. Los resultados incluyen la distribución tridimensional de la temperatura dentro de las paredes del horno, y el balance energético incluye todos los flujos de

energía relacionados con el proceso. Se discuten las estrategias para el diseño del horno y se ventajas de combinar el bajo costo del aserrín de madera y la facilidad de ajuste y calidad del ladrillo.

Wang *et al* (Wang, et al., 2012) analizan la transferencia de calor en ladrillos huecos y buscan cual es la forma más adecuada de los huecos del ladrillo. Mediante simulación numerica (elemento finito) tambien analizan los materiales con los que estan hechos. Tres tipos de ladrillos de acuerdo a la forma del hueco (forma de T, tipo entrecruzado y tipo de eje) fueron analizados, asi como tres tipos de materiales (ceniza, arcilla y hormigon). Para los tres materiales el mejor diseño es el modelo T que es el que tiene un mayor porcentaje de parte hueca.

Corzo *et al* (Corzo, et al., 2013) trabajaron en un horno tradicional o de campaña; realizaron un análisis transitorio mediante software de simulación numérica basado en el método de volumen finito (ANSYS CFX). Era necesario conocer el desarrollo de la distribución de los perfiles de temperatura respecto a las siguientes variables: geometría (acomodos de ladrillos), tiempo de residencia y velocidad de entrada de los gases de combustión y turbulencia. Las curvas de los perfiles de temperatura que se obtuvieron mediante la simulación presentan un comportamiento parecido al de las curvas obtenidas previamente (de manera experimental). Se muestran buenos resultados en las publicaciones en donde han simulado de 1/16 y 1/4 del horno.

Como resumen la Tabla 1 muestra los artículos con los que se considera es sustentada esta investigación. Son trabajos en donde en general se ha trabajado en el proceso de la cocción de ladrillos y la simulación numérica.

Tabla 1. Artículos centrales del proyecto.

Referencia	Información relevante
(Martínez, et al., 2003)	Realizan un estudio experimental utilizando gas licuado, así como un diseño de un horno térmicamente más eficiente, teniendo como una variable de respuesta la calidad del ladrillo.
(Abou-Ziyan, 2004)	Referente a la producción de ladrillos. Simulación de diferentes acomodos de los ladrillos en un horno tipo túnel. El aumentar la separación de 5 a 26 mm, entre los ladrillos evidencio una mejor transferencia por convección.
(Ramírez, et al., 2004)	Se monitoreo la temperatura por medio de termopares llegando a la conclusión de que la calidad del ladrillo depende de su ubicación en el horno y por ende de la temperatura que alcanza durante la cocción. El aumento de los ingresos debe lograrse mediante un mayor porcentaje de producción de ladrillo de primera calidad y la disminución de costos de producción con una inversión lo más bajo posible. Los costos de producción y el nivel de emisión de los contaminantes están relacionados con el diseño del horno y el tipo de combustible utilizado para la cocción.
(Ramírez, et al., 2008)	Presentan modelo matemático de hornos cerámicos en el estado de Michoacán, México, mediante un software, la transferencia de calor, el flujo de fluidos resultado de la convección.
(López Robles & Gallegos Muñoz, 2008)	Se plantea un nuevo análisis para el proceso de quemado en un espacio bidimensional a través de los canales formados en ciertas regiones del horno como resultado de la disposición de los ladrillos.
(Nicolau & Dadam, 2009)	Se modeló un horno tipo túnel mediante simulación numérica basado en las ecuaciones de conservación de masa y energía.
(González, 2010)	Se analiza la introducción de hornos ecológicos en comunidades ladrilleras.
(Munguía, et al., 2012)	Se realiza un análisis energético en Hornos MK2.
(Corzo, et al., 2013)	En un horno tradicional, se pretende optimizar las dimensiones y distribución de los ladrillos para una mejor y más rápida distribución de los perfiles de temperatura.

## 4. Marco Teórico

### 4.1 Fabricación de Ladrillo Artesanal

La fabricación de ladrillos se lleva a cabo en varias etapas, desde la extracción de los materiales, mezcla de los mismos, elaboración del ladrillo, cocción del producto, almacenamiento y transporte para su comercialización. Una de las etapas fundamentales del proceso de fabricación del ladrillo es la cocción, etapa durante la cual se utilizan diversos materiales combustibles (leña, combustóleo, aceites residuales, chapopote, residuos sólidos municipales, gas LP, entre otros 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. La etapa de cocción del ladrillo se puede dividir en las siguientes subetapas (Martínez, et al., 2002):

1. Evaporación de agua o deshidratación. Esta subetapa se presenta hasta aproximadamente 120 °C en donde se elimina el contenido de agua o humedad de la pieza.
2. La descomposición, donde se elimina la materia vegetal. Se presenta entre 120 °C y 350 °C
3. El cambio a cerámica inicia cuando se elimina por completo el agua de la estructura cristalina; el cambio es irreversible y comienza entre los 350 °C y 450°C. Presenta una etapa máxima entre los 600 °C y 700 °C.
4. El carbón y el sulfuro presentes se queman por oxidación formando monóxido y bióxido de carbono, y monóxido, bióxido y trióxido de azufre. Esta etapa llega a su máximo a los 800 °C.
5. La vitrificación ocurre a partir de los 800 °C. En esta etapa se fortalecen los ladrillos debido a que las partículas de arcilla forman óxido.

Tabla 2. Etapas del proceso de cocción de ladrillo. Fuente: (Martínez, et al., 2002).

<b>Etapas</b>	<b>Temperatura</b>
<b>Evaporación ( secado)</b>	120 °C
<b>Descomposición</b>	120 °C -350 °C hasta 600 °C
<b>Cambio a cerámica</b>	600 °C -700 °C
<b>Oxidación</b>	700 °C -800 °C
<b>Vitrificación</b>	800 °C-1,000 °C

La vitrificación es el término usado para describir la sinterización, que es la reacción entre las partículas sólidas 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 1,000 °C (Corzo, 2013).

### 4.2 Principales tipos de hornos en México para la cocción de ladrillo artesanal.

En distintas partes del mundo donde son usados los hornos ladrilleros tradicionales se han desarrollado varios tipos de hornos. En México para la fabricación de ladrillos se utilizan mayormente hornos tradicionales, los cuales tienen distintas desventajas respecto a otro tipo de hornos. Entre estas se encuentra la mala eficiencia de los hornos, la obtención de ladrillos de baja calidad, el alto consumo energético, el fuerte gradiente de temperatura dentro del horno, el uso de combustibles contaminantes

(combustóleo, aceites gastados, residuos, llantas, etc.), entre otros. Se sabe que en promedio el consumo energético es aproximadamente el 60 % del costo del ladrillo, además de que una mejora en las formulaciones de los ladrillos (mezcla de arcillas, abonos, aserrín y aditivos) ayudaría a obtener una mejor calidad en estos.

A continuación, un resumen de los principales hornos para cocción de ladrillo artesanal:

#### **4.2.1 Horno Tradicional Abierto**

El cual se forma conforme se apilan los ladrillos para su cocción. Las paredes del horno y los arcos de alimentación están hechos de los mismos ladrillos a cocer (Figura 1). Es importante mencionar que existen varios tipos de hornos tradicionales, adoptando las demandas económicas y sociales de cada región, incluidos los costos de inversión inicial y las necesidades operacionales (Herrera Cuéllar & Rodríguez Silva, 2011).



Figura 1. Horno tradicional o de campaña.

#### **4.2.2 Horno Tradicional Mejorado, Paredes Fijas**

También conocido como horno fijo y está construido con ladrillo cocido en toda su estructura, teniendo entre dos y tres túneles de alimentación (prefabricados); u otros con una base (donde se colocan los ladrillos a cocer). Poseen una serie de arcos de hasta 1.6 metros de alto, siendo este el lugar de alimentación (Figura 2).



Figura 2. Horno de paredes fijas.

#### 4.2.3 Horno MK2

El horno MK2 es un horno que se considera ecológico (Romo, et al., 2004), el cual fue diseñado y construido por Robert O. Márquez. Como anteriormente se mencionó, el horno está constituido por dos cámaras unidas entre sí por un túnel. Se cargan las dos cámaras con ladrillo crudo y en una de ellas se realiza la cocción del ladrillo mientras la otra sirve como filtro para la salida de partículas, y a su vez se aprovecha el calor generado en la primera cámara para secar el ladrillo de la segunda cámara (ver Figura 3). En la Figura 3 se ilustran las diferentes partes de las que consta el horno MK2, estas partes son:

- Caldera o cocina. Lugar donde se lleva a cabo la combustión.
- Arcos. Sirven como soporte para la configuración de los ladrillos.
- Puerta de alimentación de combustible. Entrada a la cocina.
- Túneles. Conectan a ambos hornos.
- Cúpula. Parte superior del horno.
- Chimenea. Salida de los gases calientes.
- Compuertas. Sirven para obstruir una salida.

La caldera, o cocina, es la cavidad en donde se realiza la combustión para la quema.

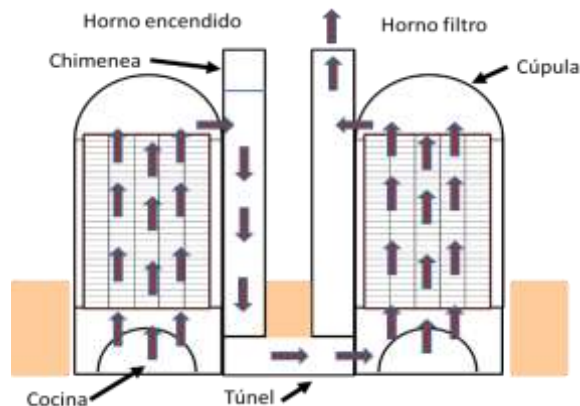


Figura 3. Esquema del funcionamiento del horno MK2



Figura 4. Caldera o cocina, horno MK2



Figura 5. Arcos, horno MK2.

Los arcos (Figura 5) soportan los ladrillos que se van a quemar, a la vez permiten distribuir el fuego que quema los ladrillos. La puerta de alimentación de combustible (Figura 6) sirve para alimentar el combustible a la cocina (Figura 4) y distribuirlo; por esta puerta entra el aire requerido por la combustión.



Figura 6. Puerta de alimentación de combustible



Figura 7. Puerta de carga.

La puerta de carga (Figura 7) está localizada atrás de los hornos, es por donde entra el ladrillo al horno, se cierra con ladrillo cocido y barro y se quita para cargar o descargar. Los túneles subterráneos (Figura 8) sirven para conducir el aire caliente de un horno a otro, tienen compuertas o guillotinas para controlar el humo y utilizar el horno filtro (Márquez, 2011).



Figura 8. Túneles.



Figura 9. Cúpula de horno MK2.

La cúpula (Figura 9), es la parte del horno que conduce el humo, evita que escape hacia el exterior de la primera cámara, y lo canaliza hacia la cámara filtro (Márquez, 2011). La chimenea es la parte del horno que conduce el humo hacia el exterior después de haber pasado por el horno filtro.





Figura 10. Chimenea de horno MK2.

### 4.3 Norma y Requisitos de Calidad

En la norma NMX-C-404-ONNCCE-2012 podemos encontrar las características que deben de tener los ladrillos para su comercialización (ONNCCE, 2012).

Dimensiones para tabiques de barro (ladrillos). Las dimensiones nominales mínimas deben cumplir con las siguientes medidas: 5 cm de alto, 10 cm de ancho y 19 cm de largo. Las dimensiones reales no deben diferir en más de  $\pm 3$  mm en cualquier dimensión con respecto a las de fabricación.

Tolerancia de forma. La desviación máxima de la arista de las piezas respecto a una línea recta perpendicular al lado contiguo no debe ser mayor que 3 %. Dicha desviación (d) se calcula como el cociente de la distancia que se desvía la arista medida perpendicularmente a la línea de referencia (e) entre la distancia hasta el punto medido.

Resistencia a la compresión. Para el ladrillo de arcilla se debe de cumplir con una resistencia a la compresión mínima de 70 kg/cm<sup>2</sup>.

### 4.4 Transferencia de Calor

La transferencia de calor es aquella ciencia que busca predecir la transferencia de energía que puede ocurrir entre cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura. La termodinámica enseña que esta transferencia de energía se define como calor. La ciencia de la transferencia de calor no sólo trata de explicar cómo puede ser transferida la energía calorífica, sino también trata de predecir la rapidez a la que se realizará este intercambio bajo ciertas condiciones específicas. La termodinámica se ocupa de sistemas en equilibrio; se puede utilizar para predecir la cantidad de energía requerida para pasar un sistema de un estado de equilibrio a otro; no puede usarse para predecir qué tan rápido se realizará un cambio, ya que el sistema no se encuentra en equilibrio durante el proceso. En un ejemplo sencillo, la termodinámica puede usarse para predecir la temperatura de equilibrio final de la combinación de la barra de acero y agua. La termodinámica no nos dirá cuánto tardará en alcanzar esta condición de equilibrio o

cuál será la temperatura de la barra después de pasado un cierto tiempo antes que se alcance la condición de equilibrio. La transferencia de calor puede usarse para predecir la temperatura tanto de la barra como del agua en función del tiempo. (Holman, 1999).

#### 4.4.1 Formas de Transferencia de Calor

Existen tres formas de transferencia de calor, por conducción, convección y radiación, las cuales a continuación se describen.

##### Conducción

La transferencia de energía por conducción se realiza en dos formas. La primera de ellas es la de la interacción molecular, en donde el mayor movimiento de una molécula a un nivel de energía superior (temperatura) imparte energía a las moléculas adyacentes de niveles de energía inferiores. Este tipo de transferencia se halla presente, hasta cierto grado, en todos los sistemas en donde existe un gradiente de temperatura y en el que se encuentran presentes moléculas de sólido, líquido o gas.

El segundo mecanismo de transferencia de calor por conducción es por electrones "libres". El mecanismo de electrones libres es significativo principalmente en los sólidos metálicos puros; la concentración de electrones libres varía de manera considerable en las aleaciones y disminuye mucho para los sólidos no metálicos. La capacidad de los sólidos para conducir calor varía de modo directo con la concentración de electrones libres, por lo tanto, no es sorprendente que los metales puros sean los mejores conductores de calor, como lo indica la experiencia (Welty, et al., 1994).

La ecuación de Fourier fue establecida por primera vez en 1822; describe el fenómeno de conducción de calor.

$$\frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad 4.1$$

Dónde:  $q_x$  = Rapidez de transferencia de calor en la dirección de x (watts o Btu/h),  $A$  = Área normal a la dirección del flujo de calor ( $m^2$  o  $ft^2$ );  $dT/dx$  = Gradiente de temperatura en la dirección de x (K/m o  $^{\circ}C/m$ );  $k$  = Conductividad térmica (W/mK).

La ecuación siguiente es una relación más general para el flujo de calor (tridimensional),

$$\frac{q}{A} = -k \nabla T \quad 4.2$$

##### Convección

La transferencia de calor debida a la convección se relaciona con el cambio de energía que ocurre entre una superficie y un fluido adyacente. Debe hacerse una distinción entre convección forzada, en la cual se hace pasar un flujo por una superficie sólida usando un medio externo, tal como un ventilador o una bomba y la convección libre o natural, en la que un fluido más caliente (o más frío), que se encuentra próximo a la frontera sólida, ocasiona la circulación de fluido a causa de la diferencia de densidades que resulta de la variación de temperatura en una región.

Fue Newton, quien en 1701 expresó por primera vez la ecuación correspondiente a la rapidez de transferencia de calor convectivo, por lo que se le denomina ecuación de Newton de la rapidez o “ley” de Newton del enfriamiento (Welty, et al., 1994). Esta ecuación es:

$$\frac{q}{A} = h \Delta T \quad 4.3$$

Dónde: q = rapidez de transferencia de calor convectivo (Btu/h); A= Área normal a la dirección del flujo de calor (m<sup>2</sup> o ft<sup>2</sup>); ΔT= Diferencia de temperatura que existe entre la superficie y el fluido (K o °C); h = Coeficiente de transferencia de calor convectivo (W/m<sup>2</sup>K).

## Radiación

La transferencia de calor radiante difiere de la conducción y de la convección en que no se necesita un medio para su propagación. De hecho, la transferencia de energía por radiación es máxima cuando las dos superficies que están intercambiando energía están separadas por un vacío perfecto.

El mecanismo exacto de la transferencia de energía radiante no ha quedado totalmente aclarado. Existe evidencia tanto para respaldar el argumento ondulatorio como el corpuscular. Sin embargo, es un hecho notable que un proceso relativamente complicado como la transferencia de energía radiante pueda describirse por medio de una expresión analítica razonablemente sencilla.

La rapidez de emisión de energía desde un radiador perfecto o cuerpo negro está dada por:

$$\frac{q}{A} = \sigma T^4 \quad 4.4$$

Dónde: q = Rapidez de emisión de energía radiante en W o en (Btu/h); A= Área de la superficie emisora (m<sup>2</sup> o ft<sup>2</sup>); T= Temperatura absoluta (K o °R), σ = Constante de Stefan-Boltzman (5.672 x W/m<sup>2</sup> K<sup>4</sup> o 0.1714 x Btu/h ft<sup>2</sup> °R<sup>4</sup>). La ecuación se conoce comúnmente como ley de Stefan-Boltzman de la radiación térmica (Welty, et al., 1994).

### 4.4.2 Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes son expresiones diferenciales de la segunda ley de Newton del movimiento que corresponden a un fluido newtoniano. Estas ecuaciones son válidas, tanto para los fluidos compresibles como para los incompresibles (Welty, et al., 1994).

Estas ecuaciones se puede aplicar a numerosos sistemas de flujo para obtener información concerniente a: la variación de la velocidad, los gradientes de presión y otra información. Al ser expresada en términos de sus componentes, se obtienen tres ecuaciones diferenciales parciales en las direcciones de x, y, z.

$$\rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \quad 4.5a$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \quad 4.5b$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \quad 4.5c$$

Los términos del lado izquierdo representan la rapidez de cambio (con respecto al tiempo) mientras que los términos del lado derecho representan a las fuerzas (Welty, et al., 1994). Estas ecuaciones se pueden expresar de manera compacta en la ecuación de un solo vector:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g - \nabla P + \mu \nabla^2 v \quad 4.6$$

Las ecuaciones de Navier-Stokes expresan en el lenguaje del medio continuo las tres leyes de conservación de masa, momentum y la ecuación de conservación de la energía (Versteeg, 1995).

#### 4.4.3 Ecuaciones Gobernantes del Fenómeno

A continuación se presentan las ecuaciones que gobiernan el fenómeno de transferencia de calor en un horno de cocción de ladrillos.

##### La Ecuación de Continuidad (de conservación de masa)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left( \frac{\partial}{\partial x} \rho v_x - \frac{\partial}{\partial x} \rho v_y - \frac{\partial}{\partial x} \rho v_z \right) \quad 4.7$$

La anterior es la ecuación de continuidad la cual describe la velocidad de variación respecto al tiempo de la densidad del fluido en un punto fijo en el espacio. En notación vectorial tenemos:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho v) \quad 4.8$$

El vector  $(\rho v)$  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.

##### La Ecuación de Movimiento (o de momentum)

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_x = - \left( \frac{\partial}{\partial x} \phi_{xx} - \frac{\partial}{\partial x} \phi_{yx} - \frac{\partial}{\partial x} \phi_{zx} \right) \quad 4.9$$

Se han utilizado las definiciones de derivadas parciales. Se obtienen ecuaciones similares para los componentes en las direcciones de y y de z del balance de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_y = - \left( \frac{\partial}{\partial x} \phi_{xy} - \frac{\partial}{\partial x} \phi_{yy} - \frac{\partial}{\partial x} \phi_{zy} \right) \quad 4.10$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_z = - \left( \frac{\partial}{\partial x} \phi_{xz} - \frac{\partial}{\partial x} \phi_{yz} - \frac{\partial}{\partial x} \phi_{zz} \right) \quad 4.11$$

Al usar notación vectorial, las tres ecuaciones pueden escribirse como a continuación:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v_i = -[\nabla \cdot \phi]_i + \rho g_i, \quad i = x, y, z \quad 4.12$$

Cuando la  $i$ -ésima componente de la ecuación se multiplica por el vector unitario en la  $i$ -ésima dirección y las tres componentes se suman vectorialmente se obtiene,

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v = -[\nabla \cdot \phi] + \rho g \quad 4.13$$

La anterior es el planteamiento diferencial de la ley de conservación de cantidad de movimiento. Es la traducción de la ecuación a símbolos matemáticos.

$\phi$  es la suma del tensor de densidad de flujo de cantidad de movimiento convectivo  $\rho v v$  y el tensor de densidad de flujo de cantidad de movimiento molecular, y que este puede escribirse como la suma de  $\rho \delta$  y  $\tau$ . Cuando se inserta  $\phi = -\rho v v + \rho \delta + \tau$ , se obtiene la ecuación de movimiento.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v = -[\nabla \rho v v] - \nabla \rho - [\nabla \cdot \tau] + \rho g \quad 4.14$$

Donde  $\nabla \rho$  es un vector denominado "gradiente del escalar  $\rho$ " y algunas veces se escribe como "grad  $\rho$ ". El símbolo  $[\nabla \cdot \tau]$  es un vector denominado "divergencia del tensor  $\tau$ " y  $[\nabla \rho v v]$  es un vector denominado "divergencia de (el producto diádico)  $\rho v v$ ". (Bird, et al., 1999).

Para la densidad, debido al aumento constante de la temperatura dentro del horno, se tiene como opción el modelo Buoyancy porque excluye el gradiente de la presión, acoplado tal condición a la ecuación de movimiento.

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho v = -[\nabla \rho v v] - \nabla \rho - [\nabla \cdot \tau] + S_{M,bouy} \quad 4.15$$

Donde:

$$S_{M,bouy} = (\rho - \rho_{ref})g \quad 4.16$$

### Ecuación de Energía

La ecuación de energía en su forma completa es:

$$\nabla \cdot k \nabla T + \dot{q} + \phi = \rho c_v \frac{DT}{Dt} \quad 4.17$$

Las formas de la ecuación de la energía, que pueden aplicarse a casos que se encuentran comúnmente, (Welty, et al., 1994) son las siguientes:

Para un fluido sin fuentes de energía y con conductividad constantes:

$$\rho c_v \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T \quad 4.18$$

Para un sólido:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot k \nabla T \quad 4.19$$

## Modelo de Turbulencia (ecuaciones promediadas de Navier Stokes, RANS)

Las aproximaciones tipo RANS son conocidas en inglés como Reynolds averaged Navier-Stokes, y han sido muy estudiados y resultan bastante útiles en la mayoría de los problemas prácticos resueltos mediante técnicas numéricas (Versteeg, 1995). En las aproximaciones promediadas de Reynolds para turbulencia todas las inestabilidades se promedian fuera, es decir, toda inestabilidad se considera parte de la turbulencia. La complejidad de la turbulencia hace improbable que cualquier modelo promediado de Reynolds sencillo sea capaz de representar todos los tipos de flujos. De esta forma los modelos de turbulencia se consideran aproximaciones de ingeniería más no leyes científicas. En instancias iniciales el modelo de turbulencia utilizado era el modelo de viscosidad turbulenta, el cual realiza una estimación de las escalas de velocidad-longitud del flujo por medio de los valores locales. Esto se lleva a cabo relacionando la viscosidad turbulenta como el gradiente de velocidad del flujo. Pero este modelo no presenta buenos resultados con modelos complejos. Los modelos clásicos de dos ecuaciones como el k-ε son actualmente los más usados.

### El Modelo de Turbulencia k-ε (Versteeg, 1995)

El modelo k-ε estándar es el modelo más utilizado, especialmente para aplicaciones industriales. Se trata de un modelo semi-empírico basado en ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (k) y para la disipación de la energía cinética turbulenta (ε). El modelo de ecuación de transporte para k se deriva de la ecuación exacta, mientras que el modelo de la ecuación de transporte para ε se obtiene utilizando el razonamiento físico.

A continuación, la ecuación de la energía cinética turbulenta k y la ecuación de la tasa de disipación ε se obtienen desde las siguientes ecuaciones de transporte:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(k\rho v_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - ZY_M + S_k \quad 4.20$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\varepsilon \rho v_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{\varepsilon 3} G_b) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad 4.21$$

En donde  $G_k$  representa la generación de la energía cinética turbulenta debido a los gradientes de la velocidad promedio; definido como:

$$G_k = -\rho \overline{v_i v_j} \frac{\partial (v_j)}{\partial x_i} \quad 4.22$$

$G_b$  representa la generación de la energía cinética turbulenta debido a las fuerzas de bouyancy, y se puede calcular:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad 4.23$$

Donde  $Pr_t$  es el número de Prandtl para la energía,  $g_i$  es la componente del vector gravitacional en la dirección  $i$ , y  $\beta$  es el coeficiente de expansión térmica, definida como:

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad 4.24$$

La viscosidad turbulenta  $\mu_t$ , es calculado de la siguiente manera:

$$\mu_t = -\rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad 4.25$$

Las constantes del modelo (Ecuaciones 4.21 y 4.22) han sido determinadas mediante experimentación y tienen los siguientes valores:

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0 \text{ y } \sigma_\varepsilon = 1.3$$

### Modelo de Radiación (Howell, 1998)

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación no requiere la presencia de un medio interpuesto; de hecho, la transferencia de energía por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en el vacío. De esta manera llega a la Tierra la energía del Sol. En nuestro estudio es de interés la radiación térmica, que es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Es diferente de las otras formas de radiación, como los rayos X, los rayos gamma, las microondas, las ondas de radio y de televisión, que no están relacionadas con la temperatura. Todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación térmica. La radiación es muy importante en un horno, donde las temperaturas son elevadas porque según la ley de Stefan-Boltzmann, la cantidad de energía emitida por radiación depende de la diferencia de las temperaturas absolutas elevada a la potencia cuatro.

$$\dot{Q} = \sigma A T_s^4 \quad 4.26$$

Donde A es el área superficial,  $\sigma$  es la constante de Boltzmann y  $T_s$  la temperatura absoluta.

$$\sigma = 5.667 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} * K^4 \quad 4.27$$

Realizando un balance de la energía radiactiva a lo largo de una dirección  $s$ , el cambio de intensidad radiactiva se determina sumando las contribuciones correspondientes a la emisión, absorción, dispersión entrante en la dirección  $s$  y dispersión saliente en la dirección  $s$ , de forma que se obtiene una ecuación para la intensidad de la radiación (Howell, 1992).

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = \epsilon \cdot I_{b\lambda} - (k_a + k_s) \cdot I_\lambda + \frac{k_s}{4\pi} \int_{4\pi} I_\lambda(\hat{S}_i) \cdot \Phi_\lambda(\hat{S}_i, S_i) \cdot d\Omega_i \quad 4.28$$

Donde:

$k_a$ = coeficiente de absorción espectral

$k_s$ = coeficiente de dispersión

$\epsilon$ = emisividad espectral

$I_{b\lambda}$ = es la función de Planck, describe la intensidad de la irradiación de cuerpo negro

$I_\lambda$ = intensidad de la radiación espectral que depende de la posición (r) y dirección (s)

$\Phi_\lambda$ = función dispersión de fase

$\Omega$ = ángulo sólido

Por la ley de radiación de Kirchhoff, la emisividad espectral  $\epsilon(\lambda)$  y el coeficiente de absorción espectral  $k_a(\lambda)$  tomarán el mismo valor. Este valor se puede estimar aplicando un modelo de gases grises, descomponiendo el gas real en uno claro y varios grises. Pero, para simplificar el problema y evaluar las propiedades del gas, se puede optar por un modelo de gas gris con un valor de absorción constante ( $\epsilon = 1$ ) para todo el espectro de frecuencia (Howell, 1992).

De acuerdo con la ley de Planck, la intensidad de cuerpo negro  $I_b$ , se obtiene integrando en todo el espectro la intensidad en cada longitud de onda  $\lambda$ .

$$I_b(T) = \int_0^\infty I_{b\lambda}(T) \cdot d\lambda = \sigma_B \cdot T^4 \quad 4.29$$

$$I_{b\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad 4.30$$

En cuanto a la dispersión, ésta se asume isotrópica en todo el medio simplificándose así el último término de la ecuación de transporte de la intensidad de la radiación.

$$\Phi_\lambda(\hat{s}_i, \hat{s}) = 1 \quad 4.31$$

La resolución de la ecuación integro-diferencial de primer orden para  $I_\lambda$  en dirección s es muy costosa computacionalmente. Para resolverla existen muchos modelos de radiación que proporcionan las soluciones aproximadas. Entre los modelos de radiación más usados están:

- Modelo Rosseland (Modelo de Aproximación de Difusión).
- Modelo P1 (también conocido como el modelo Gibb's o Modelo de armónicos esféricos).
- Modelo de Transferencia Discreta (Modelo Shah).
- Modelo de Monte Carlo.

La elección del modelo de radiación térmica afectará tanto la calidad de la solución como el tiempo de cómputo requerido. La selección adecuada debe hacerse a partir de consideraciones físicas (Versteeg, 1995). La aproximación al medio ópticamente delgado u ópticamente grueso es la más utilizada en la teoría de transmisión por radiación. En el primer caso la probabilidad de absorción de fotones en el volumen estudiado es muy pequeña y, en el segundo caso, muy grande. Esto significa que en el medio ópticamente delgado o transparente los fotones de radiación propia fácilmente abandonan el volumen y los fotones de la radiación exterior lo atraviesan sin resistencia. En el caso de aproximación al medio ópticamente grueso



o denso, los fotones de radiación propia y de la radiación exterior son absorbidos con el propio medio. Es importante resaltar que en el proceso de resolución de los problemas de radiación con frecuencia los medios son aproximados a uno de los dos casos.

Para el caso extremo es donde el medio es transparente a la radiación en longitudes de onda en la que se produce la mayoría de la transferencia de calor. En este caso, la radiación sólo afecta al medio por el calentamiento o enfriamiento de las superficies del dominio, sin la transferencia de energía radiante directamente al medio. Para este caso se debe utilizar sólo el modelo Monte Carlo. El modelo de Transferencia Discreta también se ha utilizado en este caso, pero con éxito limitado. En el extremo opuesto está la situación en la que el medio es ópticamente denso y la radiación interactúa con el medio en todo el interior del dominio, así como en las superficies. Si el medio es ópticamente grueso, la energía radiante está bien dispersa o se absorbe y es reemitida en todas las direcciones con una escala de longitud pequeña en comparación con el tamaño del dominio. Esta situación se conoce como el límite de la difusión, ya que la intensidad de radiación es independiente de la dirección. En este caso, los modelos Rosseland y P1 son una alternativa más atractiva que los modelos de Transferencia Discreta y Monte Carlo debido a su simplicidad. Para los casos generales, que van desde la óptica delgada (transparente) y ópticamente grueso (denso), como la combustión, los modelos de Transferencia Discreta y Monte Carlo representan con mayor precisión la solución de la ecuación de transferencia radiativa (Ansys, 2018).

En los problemas de difusión o medio ópticamente grueso, todos los modelos producen casi los mismos resultados. Entonces la mejor alternativa son los modelos Rosseland y P1. A medida que disminuye el espesor óptico el modelo P1 se convierte en la alternativa menos costosa. Y, por último, en el medio ópticamente delgado y transparente sólo los modelos Monte Carlo y Transferencia Discreta deben ser utilizados.

Para los modelos con medios gris, el campo de radiación se espera que sea razonablemente homogéneo en todas partes (al menos a nivel local), y se requiere de alta resolución espacial. En este caso el método Transferencia Discreta es mucho más eficiente y proporciona resultados muy precisos si se utiliza suficiente resolución angular. Un problema importante con la transferencia discreta es la falta de información del error.

Estas consideraciones son importantes para elegir el modelo de radiación. Para el presente trabajo en donde se simulan dos dominios (sólido y fluido), y considerando que para los dominios sólidos la radiación térmica es importante, el modelo de Monte Carlo es la única opción disponible.

### **Modelo de Monte Carlo**

El método de Monte Carlo es una técnica numérica basada en las características estadísticas de los procesos físicos. El método fue desarrollado por los primeros investigadores que analizaron el comportamiento potencial de las armas nucleares, donde los experimentos eran difíciles y los métodos de análisis disponibles en ese momento no eran suficientes para proporcionar una predicción precisa del comportamiento. La técnica de Monte Carlo es importante en la transferencia de calor por radiación por las mismas razones que se introdujo en los problemas de difusión de neutrones.

Las ecuaciones matemáticas que describen la transferencia de calor radiactivo son complejas y difíciles de resolver con exactitud. Además, muchos efectos físicos son importantes para la transferencia de radiación (por ejemplo, la dependencia espectral de la superficie y las propiedades del medio participante, distribuciones de dispersión anisotrópicas, propiedades de la superficie de dirección, variación de las propiedades con la ubicación y la temperatura). El método Monte Carlo es capaz de incorporar todos los efectos en una simulación de transferencia radiactiva sin aproximación, y este es su principal atributo. (Howell, 1998).

El Modelo de Monte Carlo simula los procesos subyacentes que gobiernan el sistema, es decir, las interacciones físicas entre los fotones y su entorno. Un fotón es seleccionado desde una fuente de fotones y seguido a través del sistema hasta que cruza la frontera de la región analizada (la superficie S) o se choca con las partículas materiales del medio. Cada vez que el fotón experimenta un evento por ejemplo, la dispersión (en este caso el fotón continua el movimiento en nueva dirección y con una nueva energía) o la absorción (en este caso el evento se termina), las cantidades físicas de interés son actualizadas. Este proceso genera una historia de los fotones en el sistema. Muchas historias de fotones deben ser generados para obtener buenas estimaciones de las cantidades físicas de interés en un sistema. Las fuentes de fotones son seleccionados de una muestra de la base de la radiación emitida (Howell, 1992).

#### 4.4.4 Condiciones de Frontera

Las condiciones iniciales se refieren específicamente a los valores de  $T$  y  $v$  que prevalecen al iniciarse el intervalo de tiempo que se está estudiando. Las condiciones iniciales pueden especificarse de manera sencilla en la siguiente forma:  $T|_{t=0} = T_0$  (constante), o de manera más complicada si la distribución de temperaturas al iniciar la medición del tiempo está en función de alguna variable espacial (Welty, et al., 1994).

Las condiciones de frontera se refieren a los valores de  $T$  y  $v$  existentes en ciertas posiciones específicas en las fronteras de un sistema, esto es, para valores dados de las variables especiales significativas. Un caso frecuente de condiciones de frontera para la temperatura son las fronteras isotérmicas, a lo largo de las cuales la temperatura es constante y las fronteras aisladas a través de las cuales no se lleva a cabo la conducción del calor en el lugar en que, de acuerdo con la ecuación de Fourier de rapidez, la derivada de la temperatura, normal a la frontera, es cero. A menudo existen funciones más complicadas de la temperatura en las fronteras del sistema y la temperatura de la superficie puede, también, variar con el tiempo. También los mecanismos combinados de transferencia de energía pueden determinar condiciones de frontera. Una situación que a menudo se presenta en una frontera sólida es la de la igualdad entre la transferencia de calor y la superficie por conducción y el calor que abandona la superficie por convección. Esta condición aparece en la Figura 11. En la superficie del lado izquierdo, la condición de frontera es:

$$h_h(T_h - T|_{x=0}) = -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} \quad 4.32$$

Y en la superficie del lado derecho:

$$h_c(T_h - T|_{x=L}) = -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L}$$

4.33

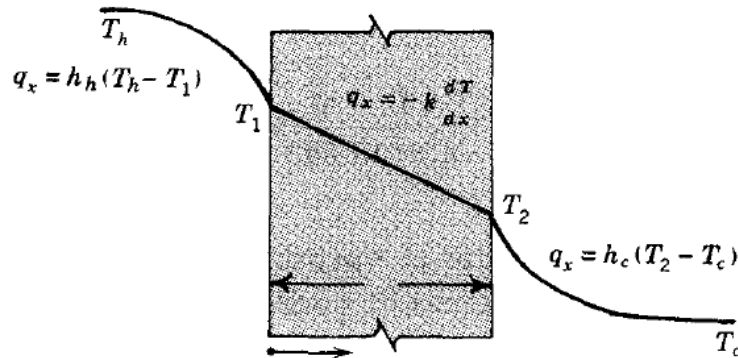


Figura 11. Conducción y convección en la frontera de un sistema (Welty, et al., 1994).

## 4.5 Elemento Finito

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 mejorar las ganancias en los negocios (Zienkiewicz & Taylor, 2000). La discretización de problemas continuos ha sido aprovechada por matemáticos e ingenieros; los ingenieros a menudo se acercan a los problemas de una manera intuitiva y crean una analogía entre los elementos discretos reales y las porciones finitas de un dominio continuo.

Un método frecuentemente usado para la solución de ecuaciones diferenciales parciales que se utiliza en problemas de ingeniería es el método de elemento finito. Una ventaja del método de elemento finito sobre el de diferencias finitas es la facilidad relativa con la que se manejan las condiciones de frontera del problema a tratar. El método de elemento finito es adecuado para problemas físicos con condiciones de frontera que contienen derivadas y que la frontera de la región tiene una forma irregular, lo que con diferencias finitas sería difícil de resolver, debido a que cada condición de frontera que contiene una derivada se debe aproximar mediante un cociente diferencial en los nodos de la malla. El método del elemento finito incluye las condiciones de frontera como integrales en un funcional que se debe minimizar (Burden & Faires, 1985).

Para ejemplificar consideramos la siguiente ecuación diferencial parcial:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( p(x, y) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( p(x, y) \frac{\partial u}{\partial y} \right) + r(x, y)u(x, y) = f(x, y)$$

4.34

Donde  $(x, y) \in \mathcal{D}$  donde  $\mathcal{D}$  es una región con frontera  $\ell$ .

Las condiciones de frontera que se imponen son del tipo

$$u(x, y) = g(x, y)$$

4.35

En una parte de la frontera  $\ell_1$ . En la parte restante  $\ell_2$  se requiere que  $u(x, y)$  satisfaga

$$p(x, y) \frac{\partial u}{\partial x} \cos \theta_1 + q(x, y) \frac{\partial u}{\partial y} \cos \theta_2 + g_1(x, y)u(x, y) = g_2(x, y), \quad 4.36$$

Donde  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son ángulos direccionales de la normal de la frontera que direcciona hacia el punto  $(x, y)$ .

En gran variedad de problemas físicos, en las áreas de mecánica de sólidos y de elasticidad, se presentan ecuaciones diferenciales parciales. La solución a este tipo de problemas consiste en la minimización de cierto funcional que involucra integrales sobre una clase de funciones determinadas por el caso (Burden & Faires, 1985).

Supongamos que  $p, q, r$  y  $f$  son todas funciones continuas en  $\mathcal{D} \cup \ell$ , que las primeras parciales de  $p$  y  $q$  son continuas y que  $g_1$  y  $g_2$  son continuas en  $\ell_2$ , asumiendo también que  $p(x, y) > 0, q(x, y) > 0, r(x, y) > 0$  y  $g_1(x, y) > 0$ . La solución de la ecuación 4.34 minimiza de manera única el funcional

$$I[w] = \iint_{\mathcal{D}} \left\{ \frac{1}{2} \left[ p(x, y) \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + q(x, y) \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 - r(x, y)w^2 \right] + f(x, y)w \right\} dx dy + \int_{\ell_2} \left\{ -g_2(x, y)w + \frac{1}{2} g_1(x, y)w^2 \right\} dS \quad 4.37$$

El método de elemento finito aproxima la solución minimizando el funcional  $I$  sobre una clase menor de funciones (Burden & Faires, 1985).

El primer paso consiste en dividir la región en un número finito de partes o elementos de forma geométrica, ya sea rectángulos o triángulos. El conjunto de funciones para la aproximación generalmente es el conjunto de polinomios segmentarios de grado fijo en  $x$ , donde la aproximación requiere que los polinomios se unan de tal manera que la función resultante sea continua, con primeras o segundas derivadas continuas, o integrables en la región entera. Los polinomios de tipo lineal en  $(x, y)$  son (Burden & Faires, 1985):

$$\phi(x, y) = a + bx + cy, \quad 4.38$$

Comúnmente se usan para elementos triangulares, mientras que polinomios de tipo bilineal en  $(x, y)$  se sugieren:

$$\phi(x, y) = a + bx + cy + dxy, \quad 4.39$$

Y se utilizan para elementos rectangulares.

Los vértices de las figuras se llaman nodos. El método busca una aproximación de la forma

$$\phi(x, y) = \sum_{i=1}^m \gamma_i \phi_i(x, y), \quad 4.40$$

Donde  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m$  son polinomios segmentarios de primer grado, linealmente independientes,  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m$  son constantes, donde algunas de ellas se utilizan para asegurar que se satisfaga la condición de frontera

$$\phi(x, y) = g(x, y) \quad 4.41$$

Mientras que el resto se usa para minimizar el funcional  $I[\sum_{i=1}^m \gamma_i \phi_i]$ .

De la ecuación (4.37) el funcional es de la forma:

$$\begin{aligned} I[\phi] &= I[\sum_{i=1}^m \gamma_i \phi_i] \\ &= \iint_D \left\{ \frac{1}{2} \left[ p(x, y) \left( \sum_{i=1}^m \gamma_i \frac{\partial \phi_i}{\partial x}(x, y) \right)^2 + q(x, y) \left( \sum_{i=1}^m \gamma_i \frac{\partial \phi_i}{\partial y}(x, y) \right)^2 - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. r(x, y) \left( \sum_{i=1}^m \gamma_i \phi_i(x, y) \right)^2 \right] + f(x, y) \sum_{i=1}^m \gamma_i \phi_i(x, y) \right\} dx dy + \int_{\ell_2} \left\{ -g_2(x, y) \sum_{i=1}^m \gamma_i \phi_i(x, y) + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} g_1(x, y) \left( \sum_{i=1}^m \gamma_i \phi_i(x, y) \right)^2 \right\} dS \end{aligned} \quad 4.42$$

Para que ocurra un mínimo, considerando a  $I$  como una función de  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$  es necesario tener

$$\frac{\partial I}{\partial \gamma_j} = 0 \quad \text{Para cada } j=1, 2, \dots, n.$$

Diferenciando (4.42) se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I}{\partial \gamma_j} &= \iint_D \left\{ p(x, y) \gamma_i \frac{\partial \phi_i}{\partial x}(x, y) \frac{\partial \phi_j}{\partial x}(x, y) + q(x, y) \gamma_i \frac{\partial \phi_i}{\partial y}(x, y) \frac{\partial \phi_j}{\partial y}(x, y) - \right. \\ &\quad \left. r(x, y) \sum_{i=1}^m \gamma_i \phi_i(x, y) \phi_j(x, y) + f(x, y) \phi_j(x, y) \right\} dx dy + \int_{\ell_2} \left\{ -g_2(x, y) \phi_j(x, y) + \right. \\ &\quad \left. g_1(x, y) \sum_{i=1}^m \gamma_i \phi_i(x, y) \phi_j(x, y) \right\} dS; \end{aligned} \quad 4.43$$

Así que

$$\begin{aligned} 0 &= \sum_{i=1}^m \left[ \iint_D \left\{ p(x, y) \frac{\partial \phi_i}{\partial x}(x, y) \frac{\partial \phi_j}{\partial x}(x, y) + q(x, y) \frac{\partial \phi_i}{\partial y}(x, y) \frac{\partial \phi_j}{\partial y}(x, y) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. r(x, y) \phi_i(x, y) \phi_j(x, y) \right\} dx dy + \int_{\ell_2} g_1(x, y) \phi_i(x, y) \phi_j(x, y) dS \right] \gamma_i + \iint_D f(x, y) \phi_j(x, y) dx dy - \\ &\quad \int_{\ell_2} g_2(x, y) \phi_j(x, y) dS \end{aligned} \quad 4.44$$

Para cada  $j=1, 2, \dots, n$ . Este Conjunto de ecuaciones se pueden representar como un sistema lineal:

$$Ac = b \quad 4.45$$

Donde  $A = (\alpha_{i,j})$ ,  $c = (\gamma_1, \dots, \gamma_n)^t$  y  $b = (\beta_1, \dots, \beta_n)^t$ , y se definen como:

$$\begin{aligned} \alpha_{i,j} &= \iint_D \left[ p(x, y) \frac{\partial \phi_i}{\partial x}(x, y) \frac{\partial \phi_j}{\partial x}(x, y) + q(x, y) \frac{\partial \phi_i}{\partial y}(x, y) \frac{\partial \phi_j}{\partial y}(x, y) - \right. \\ &\quad \left. r(x, y) \phi_i(x, y) \phi_j(x, y) \right] dx dy + \int_{\ell_2} g_1(x, y) \phi_i(x, y) \phi_j(x, y) dS, \end{aligned} \quad 4.46$$

Para cada  $i=1, 2, \dots, n$ .  $j=1, 2, \dots, m$ , y

$$\beta_i = - \iint_D f(x, y) \phi_i(x, y) dx dy + \int_{\ell_2} g_2(x, y) \phi_i(x, y) dS - \sum_{i=1}^m \alpha_{ik} \gamma_i, \quad 4.47$$

Para cada  $i=1, \dots, n$ .

Es importante la elección de las funciones; una elección apropiada puede hacer que la matriz  $A$  sea positiva definida y en banda. Para el ejemplo supongamos que  $\mathcal{D}$  es poligonal y que  $\ell_1$  es un conjunto continuo de rectas con lo que  $\mathcal{D} = D$ . Para comenzar se divide la región  $D$  en triángulos  $T_1, T_2, \dots, T_M$  con los nodos del  $i$ -ésimo triángulo en

$$V_j^{(i)} = (x_j^{(i)}, y_j^{(i)}) \text{ Para } j=1, 2, 3. \quad 4.48$$

Para simplificar escribimos simplemente  $V_j = (x_j, y_j)$  cuando trabajemos con el triángulo fijo  $T_i$ , con cada vértice asociamos un polinomio lineal

$$N_j^{(i)} = a_j + b_j x + c_j y, \quad 4.49$$

$$\text{Donde } N_j^{(i)}(x_k, y_k) = \begin{cases} 1, & \text{si } j = k \\ 0, & \text{si } j \neq k \end{cases}$$

Esto produce sistemas lineales de la forma

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_j \\ b_j \\ c_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Sea  $E_1, E_2, \dots, E_M$  una asignación de los nodos que se encuentran en  $\mathcal{D} \cup \ell$  de izquierda a derecha y de arriba abajo. Para cada nodo  $E_k$ , asociamos una función  $\phi_k$ , que es lineal en cada triángulo, tiene el valor uno en  $E_k$  y cero en cada uno de los otros nodos. Esto hace que  $\phi_k$  sea idéntica a  $N_j^{(i)}$  en el triángulo  $T_i$  cuando el nodo  $E_k$  es el vértice denotado por  $V_j^{(i)}$  (Burden & Faires, 1985).

#### 4.5.1 Software Ansys

En la actualidad, si bien se puede encontrar una gran variedad de códigos para la resolución numérica de problemas de dinámica de fluido CFD, la realidad es que este mercado se encuentra acaparado por el grupo Ansys, cuyos principales programas dentro de Ansys CFD es FLUENT y CFX. En un segundo lugar tenemos a COMSOL Multiphysics. Una ventaja que tiene Ansys sobre los pequeños grupos es la oferta de su asesoramiento técnico a sus clientes.

Para la realización del presente trabajo se decidió por el programa Ansys-CFX, debido a que para el tipo de análisis este programa cumple con todos los modelos necesarios para la representación del horno de cocción de ladrillos. Además, este software ofrece todas las herramientas necesarias para su estudio: creación de la geometría, mallado, solución y post-procesado, además el software ha sido probado ya en simulaciones anteriores (Corzo, et al., 2013).

#### **4.5.2 CFD Computational Fluid Dynamics y CFX**

Es una herramienta computacional para simulación del entorno que envuelve el flujo de fluido, transferencia de calor y otros procesos físicos relacionados. Su funcionamiento se basa en la solución de las ecuaciones de flujo de fluidos (en su forma especial) sobre la región de interés con condiciones (conocidas) específicas en la frontera de la región.

El grupo de ecuaciones que describen los procesos de transferencia de calor, masa y momento son conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones diferenciales parciales fueron derivadas a principios del siglo XIX y no tienen una solución analítica conocida, pero pueden ser discretizadas y resueltas numéricamente.

Existen diferentes métodos de solución que se utilizan en los programas CFD. El más común, y en el que se basa CFX, se conoce como la técnica de volumen finito.

En esta técnica, la región de interés se divide en pequeñas sub-regiones, llamadas volúmenes de control. Las ecuaciones se discretizan y resuelven de forma iterativa para cada volumen de control. Como resultado, se puede obtener una aproximación del valor de cada variable en puntos específicos a lo largo del dominio. De esta manera, se obtiene una imagen completa del comportamiento del flujo.

#### **4.6 Resumen de las Suposiciones del Modelo Numérico**

Para la simulación del horno MK se tomaron las siguientes suposiciones:

- Pared adiabática
- Se considera que el flujo es turbulento
- Temperatura inicial (20 °C)
- Presión atmosférica (1 atm)

Las principales propiedades de los dominios aparecen en el apartado 8.5.3

## 5 Justificación

Se estima que las ladrilleras artesanales de América Latina producen entre 30 y 50% de la producción nacional de ladrillos, contribuyendo significativamente al crecimiento del sector construcción, que en muchos países ha sido uno de los motores del crecimiento económico en los últimos años (Cárdenas, et al., 2012). Solamente en la ciudad de León, Guanajuato, México cerca de 400 familias dependen de los ingresos generados de la producción del ladrillo, sin contar a las familias de los distribuidores y vendedores del producto. Los ladrilleros son pequeños empresarios que difícilmente cuentan con la facilidad de mejorar tecnológicamente sus procesos; por ello la necesidad de ahorrar energía y reducir mermas, esto nos lleva a analizar el proceso de cocción de ladrillo artesanal con la intención de mejorar la eficiencia del mismo.

Con este proyecto se busca una opción para trabajar con un horno (MK2), con el cual tener una mejor eficiencia térmica y mayor productividad, minimizando el tiempo de cocción, las mermas y uso de combustible.

Un modelo numérico preciso proporciona información detallada en una forma económica, además de permitir el análisis de varios casos (Possamai, Oba, & Nicolau, 2012). Una parte importante de la investigación del proyecto del cual emana este trabajo de tesis es la simulación numérica, la cual nos permitirá encontrar las mejores condiciones en el proceso de cocción de ladrillo artesanal en un horno MK2, lo anterior sin el costo que generaría realizar las quemadas de manera real.



## **6 Objetivos**

### **6.1 Objetivo General**

Encontrar mejores condiciones de proceso, respecto a la forma de quemado actual, durante la cocción de ladrillo tradicional (rojo) en un horno tipo MK2, basado en el entendimiento de los fenómenos de transferencia de calor y el flujo de fluidos que se dan dentro del mismo, mediante la simulación numérica.

### **6.2 Objetivos Específicos**

- Obtener un modelo numérico validado que represente el proceso de cocción de ladrillo artesanal en un horno MK2.
- Definir los factores que tienen influencia en el proceso de cocción en un horno MK2.
- Simular numéricamente el proceso de quemado de ladrillo tal que se puedan identificar mejoras que impacten sobre la productividad y eficiencia energética del horno MK2.
- Encontrar las condiciones de trabajo durante el proceso de cocción de ladrillo tradicional (rojo) en un horno tipo MK2, que permitan alcanzar las temperaturas deseadas en un menor tiempo y/o mejorar la homogeneidad de la temperatura dentro del horno.

## **7 Hipótesis**

Representar el proceso de cocción de ladrillo en un horno MK2 mediante un modelo de simulación numérica, basado en el entendimiento de la transferencia de calor y el flujo de fluidos dentro del horno, nos permitirá su mejor comprensión, experimentar con los factores que tienen una influencia fuerte sobre el proceso de cocción, y se podrá encontrar una configuración adecuada que permita alcanzar las temperaturas deseadas en un menor tiempo y/o mejorar la homogeneidad de la temperatura dentro del horno, resultando en la obtención de un proceso de quemado más productivo y eficiente térmicamente.

## 8 Desarrollo de la Investigación

### 8.1 Metodología

En este apartado se describe la metodología manejada en este proyecto.

La metodología se describe en la figura 12 se enumeran y se describen las etapas descritas a continuación:

1.-Realización de quemas experimentales.

2.-Análisis de datos experimentales.

3.-Modelo numérico. Determinación del modelo, simulación y validación del mismo con los datos experimentales obtenidos.

4.-Diseño experimental. Realizar simulaciones en base al diseño experimental y selección de la configuración que otorgue mejores resultados.

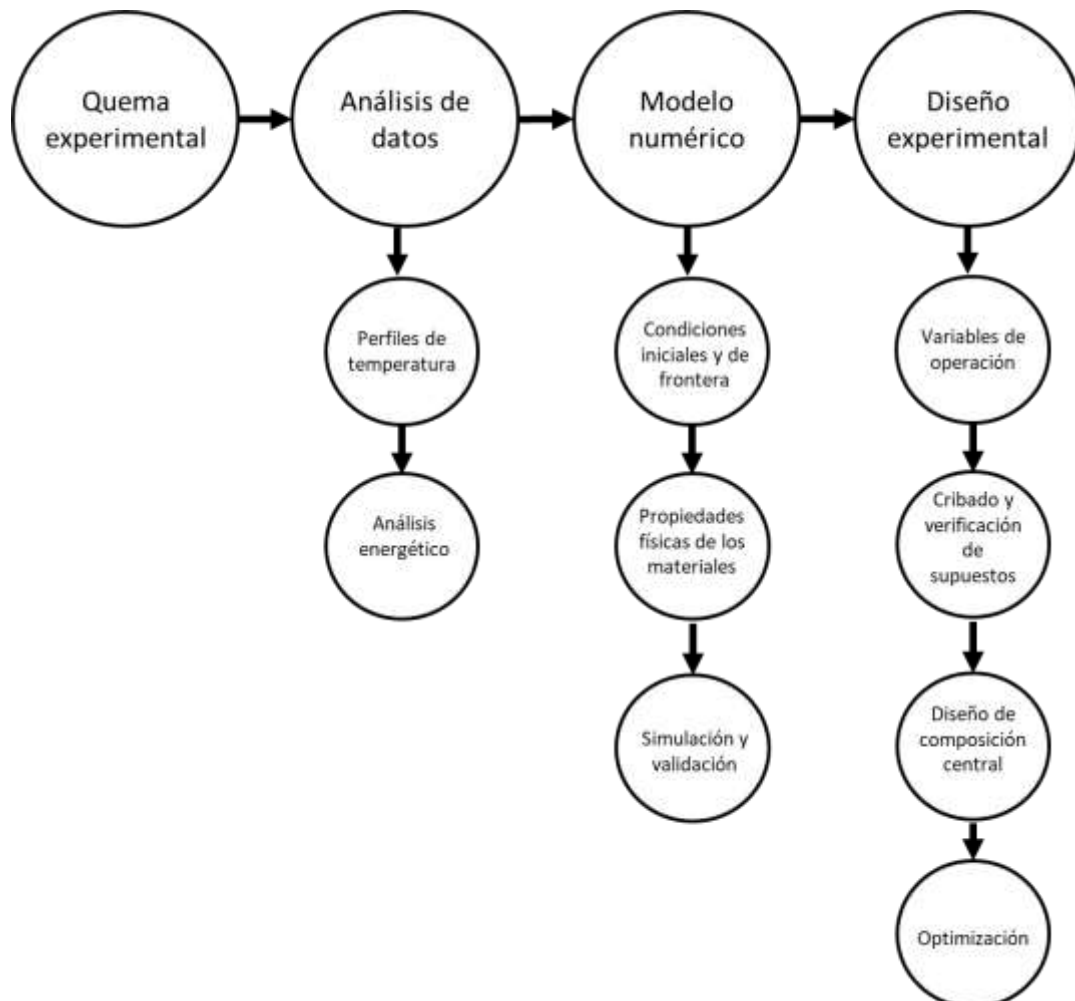


Figura 12. Descripción de la metodología aplicada.

## 8.2 Análisis de Datos (Quemas Experimentales)

A continuación se describen las actividades realizadas durante las quemas experimentales. Fueron divididas en actividades de preparación, las cuales se ejecutan antes del inicio de quema, y actividades de ejecución durante la quema, que básicamente son de monitoreo.

### 8.2.1 Actividades de Preparación

La primera quema se realizó del día 18 al 19 de mayo, y la segunda 15 y 16 de junio de 2016 en un horno MK2, que está ubicado en el conjunto de ladrilleras llamadas “El Refugio” situadas en la periferia de la Ciudad de León, Guanajuato (Figura 13). A continuación, se describen las actividades principales de las quemas experimentales.



Figura 13. Localización de las ladrilleras “El Refugio”.

#### 1.-Dimensionamiento del horno

Se verificaron las medidas del horno las cuales sirven para la realización del modelo en CAD. Se tomaron las dimensiones, tanto internas como externas del horno, como se puede apreciar en la figura 15 y en el anexo B.



Figura 14. Horno MK2, El Refugio.



Figura 15. Dimensionamiento de horno.

## 2.- Perforaciones para termopares

Se realizaron las perforaciones donde se colocaron los termopares, de acuerdo a puntos estratégicos para conocer el comportamiento en todo el horno en cuanto a temperaturas (Figuras 16-18). La disposición se puede observar en la figura 17.



Figura 16. Perforaciones para termopares.

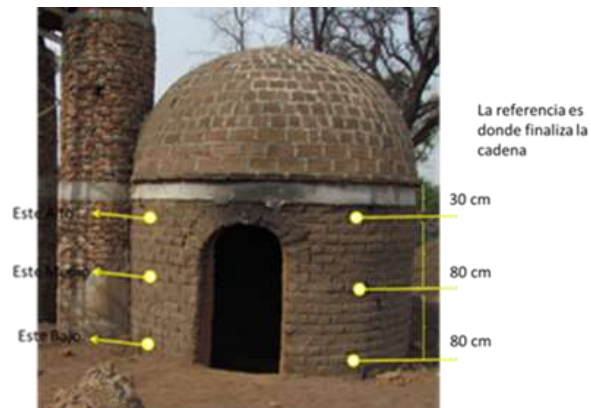


Figura 17. Localización de termopares.

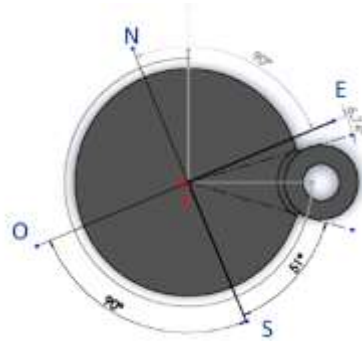


Figura 18. Localización de termopares.

### 3.- Verificación del acomodo de los ladrillos crudos (adobes) dentro del horno.

Otra actividad importante es el acomodo de los ladrillos dentro del horno, actividad que la realiza el operador del horno con algunos ayudantes. Se tomaron datos de cantidad de ladrillos en cada cama o tendido, cómo fue el acomodo, las distancias entre los ladrillos y se tomaron fotografías de cada tendido para el posterior diseño en CAD. En la tabla siguiente se presenta un resumen de la cantidad de ladrillos crudos por cama (ver anexo A).



Figura 19. Acomodo de adobes, primera cama.

### 4.- Ubicación de ladrillos seleccionados para evaluación de resistencia a la compresión.

La calidad del ladrillo artesanal es evaluada generalmente por el comprador, que en su mayoría son personas que lo utilizan para construcciones pequeñas (casas habitación), por lo cual su evaluación se basa en la forma, el color y en general de la apariencia del producto. Para dar una idea de cómo influye la temperatura alcanzada dentro del horno en la calidad del ladrillo se decidió evaluar la resistencia a la compresión en un laboratorio certificado (Laboratorio y consultoría LOA S.A. de C.V.). Los ladrillos fueron tomados de diferentes zonas estratégicas del horno y buscando una representatividad de la totalidad de los ladrillos.

Se marcaron ladrillos en la primera cama de la configuración de ladrillos y se marcaron los ladrillos que coincidían con los termopares, así como algunos de la última cama con una codificación que coincide con la de los termopares (Figura 20). Una vez realizada la quema se recogen estos especímenes para pruebas destructivas; los resultados se muestran en el capítulo 9.

Tabla 3. Nomenclatura para identificar los ladrillos de prueba.

Nomenclatura/ Localización
1 A (Primera cama sobre la puerta de alimentación)
1 P (Primera cama sobre la puerta de carga)
NB (Junto al termopar lado norte parte baja)
SB (Junto al termopar lado sur parte baja)
EB (Junto al termopar lado este parte baja)
OB (Junto al termopar lado oeste parte baja)
5 P (Cama 5 Junto a la puerta de carga)
NM (Junto al termopar lado norte parte media)
SM (Junto al termopar lado sur parte media)
EM (Junto al termopar lado este parte media )
OM (Junto al termopar lado oeste parte media)
11P (Cama 11 Junto a la puerta de carga)
11CH (Cama 11 Junto a la chimenea)
NA (Junto al termopar lado norte parte alta)
SA (Junto al termopar lado sur parte alta)
EA (Junto al termopar lado este parte alta)
OA (Junto al termopar lado oeste parte alta)
17A (Cama )
17P (Cama )
20A (Cama )
20P (Cama )

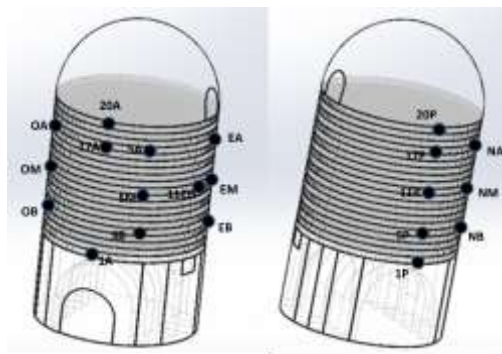


Figura 20. Localización de los ladrillos para las pruebas de resistencia.

## 8.2.2 Actividades Ejecutadas Durante la Quema.

### 1.-Medición de temperaturas internas

Se midieron las temperaturas internas por medio de catorce termopares, los cuales fueron conectados a un dispositivo de almacenamiento de datos (Figura 21), lo cual genera los perfiles de temperatura del horno. La Figura 22 muestra la disposición de los termopares y en la Tabla 4 su nomenclatura.



Figura 21. Dispositivo para almacenamiento de datos

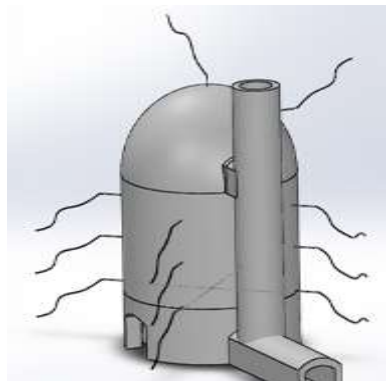


Figura 22. Localización de termopares.

Tabla 4. Nomenclatura termopares.

EA	Termopar Este Alto	SM	Termopar Sur Medio
EM	Termopar Este Medio	SB	Termopar Sur Bajo
EB	Termopar Este Bajo	OA	Termopar Oeste Alto
NA	Termopar Norte Alto	OM	Termopar Oeste Medio
NM	Termopar Norte Medio	OB	Termopar Oeste Bajo
NB	Termopar Norte Bajo	CH	Termopar Chimenea
SA	Termopar Sur Alto	CU	Termopar Cúpula



## 2.- Medición de temperaturas externas.

Otra de las mediciones importantes es la medición de la temperatura en las paredes externas del horno, lo cual se realizó por medio de pirómetro (termómetro de infrarrojo). El comportamiento de la cara este se puede observar en la Figura 24, ilustrativamente.



Figura 23. Pirómetro y cámara termográfica.

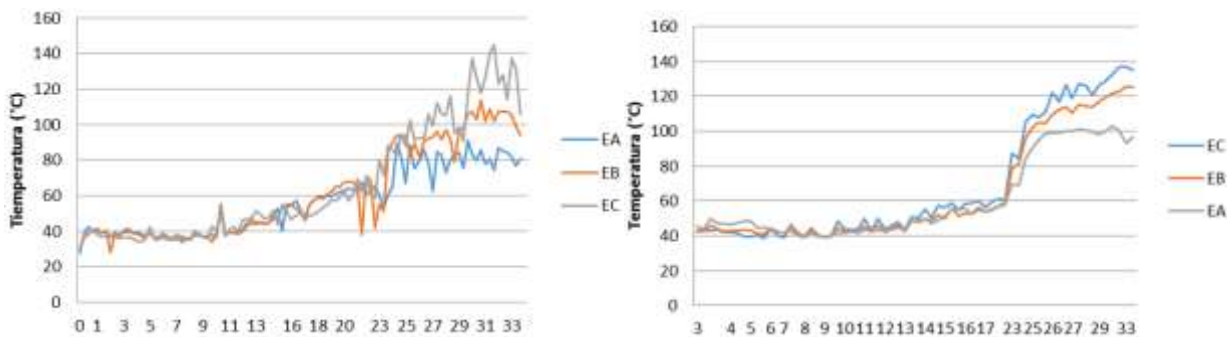


Figura 24. Temperaturas exteriores (con pirómetro), de la cara este del horno, quema 1.

También, se tomaron las temperaturas exteriores por medio de cámara termográfica, que fueron las que se tomaron como referencias para el cálculo de pérdidas de energía, debido a que muestran una mejor consistencia, debido a que toma imágenes bidireccionales en un plano y en un rango (x, y), este rango varía conforme la distancia que la persona se encuentre del horno. Con el software de la cámara termográfica podemos obtener temperaturas puntuales o bien obtener un promedio de estas. Esto hace que la información de la cámara termográfica sea mejor que la obtenida por el pirómetro.

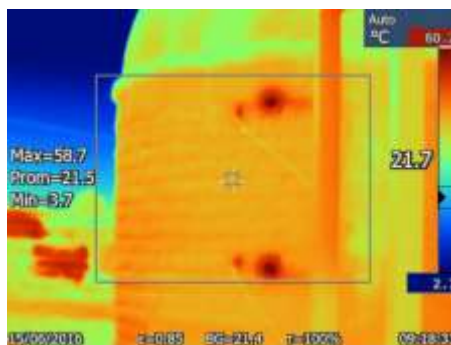


Figura 25. Toma de temperaturas por medio de cámara termográfica.

### 3.- Medición de condiciones ambientales

Al mismo tiempo, se midieron las condiciones ambientales de temperatura, velocidad del viento y humedad. Para la primera quema estas condiciones se midieron con un anemómetro y para la segunda con una estación meteorológica portátil. En las Figuras 27 y 28 se pueden ver las temperaturas ambientales, esta imagen nos sirve para ilustrar una de las mediciones que se realizaron. Estas mediciones sirven para el cálculo de las pérdidas de energía.



Figura 26. Anemómetro digital y estación meteorológica portátil.

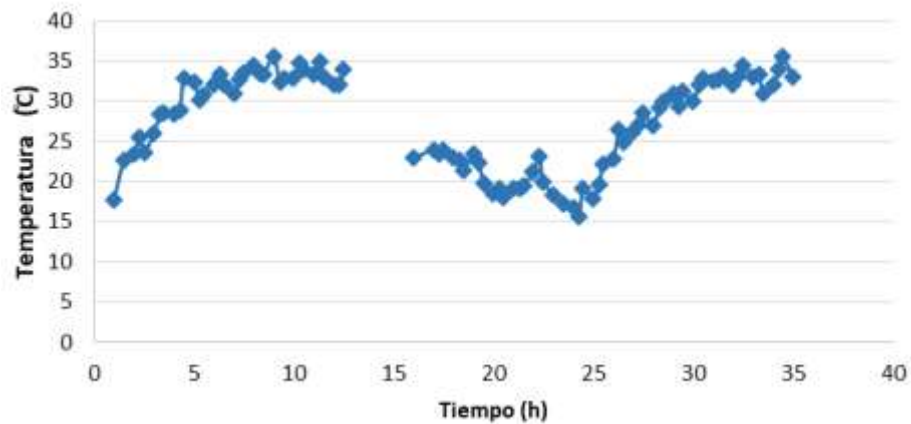


Figura 27. Temperaturas ambientales, quema 1 (mayo 2016).

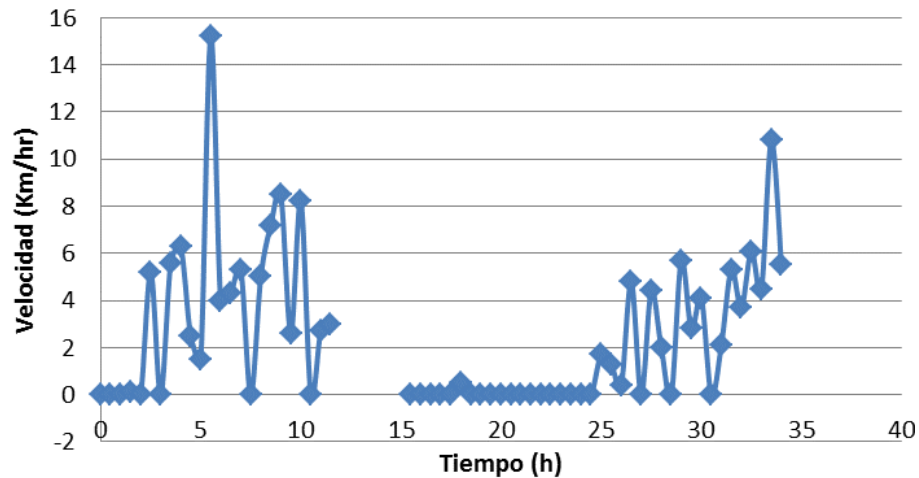


Figura 28. Velocidad del viento, quema 1 (mayo 2016).

Para la segunda quema, se contó con una estación meteorológica portátil por lo que se dispuso de datos más constantes para conocer el comportamiento de los vientos, así como de temperaturas ambientales (ver Figura 29).

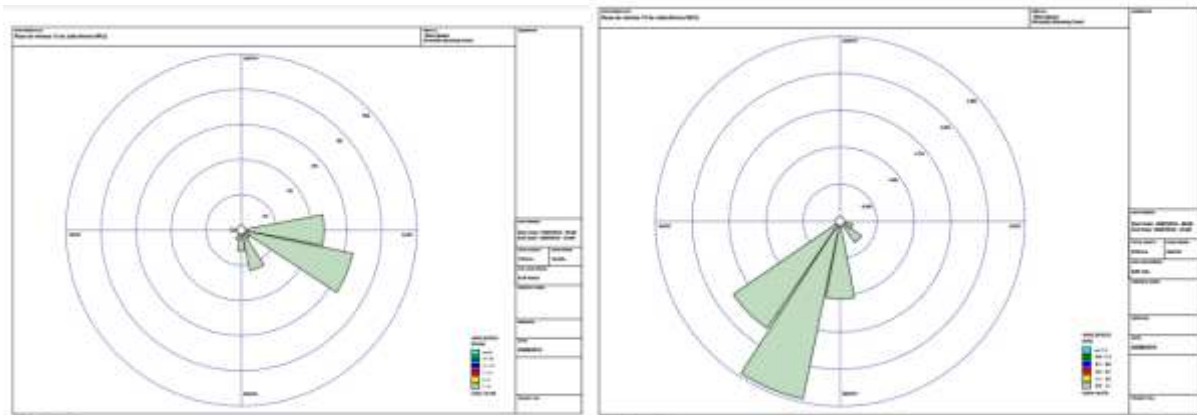


Figura 29. Rosa de los vientos en la segunda quema junio 2016.

### 8.3 Análisis Energético

La energía suministrada al horno es proporcionada por el contenido energético del combustible que se alimenta y liberado por el proceso de combustión del mismo. La energía es dependiente del poder calorífico del combustible y por la cantidad del mismo. En la quema experimental realizada se utilizó de madera de pino proveniente de tarimas de desecho y de aserrín, acorde a la experiencia del ladrillero. El objetivo principal de uso de ese calor es cocer los ladrillos; sin embargo, hay otras pérdidas inherentes al proceso tales como pérdidas de calor por la pared, en los arcos fijos de soporte, en los gases de combustión, y el calor almacenado en los residuos orgánicos remanentes en el hogar. Otra incógnita que nos interesa saber es ¿cuál es la eficiencia energética del horno MK2?

### 8.3.1 Energía Total Suministrada

El calor de combustión total ofrecido al horno se calculó en base al calor de combustión individual de cada combustible alimentado de acuerdo a la ecuación 8.1, y al poder calorífico encontrado en la bibliografía (Kollmann, 1959).

$$Q_{total} = \sum P_i M_i \quad 8.1$$

Donde  $Q_{total}$  es la energía que ingresa al horno durante la quema (kcal);  $P_i$  es el poder calorífico del combustible  $i$  (kcal/kg);  $M_i$  es la masa del combustible  $i$  que ingresa al horno (kg).

Para el cálculo de la energía suministrada se consideraron los siguientes valores de combustión (Kollmann, 1959):

- Madera 4,438.0 kcal/kg.
- Aserrín 4,500.0 kcal/kg.
- Carbón 7,897.0 kcal/kg.

### 8.3.2 Energía Absorbida por los Ladrillos en Cocción

Para el cálculo del calor absorbido por los ladrillos el horno se dividió en 12 zonas, en correspondencia a la ubicación de cada uno de los 12 termopares (ver Figura 30). Cada conjunto de ladrillos se consideró como una zona correspondiente al termopar más cercano, por lo que se asumió que todos los ladrillos en la zona alcanzaron la temperatura máxima detectada por el respectivo termopar (aunque se sabe que perfiles internos de temperatura ocurren, se trató de mantener intacta la configuración de acomodo de ladrillos acostumbrada por el ladrillero). Para el cálculo se utilizó la ecuación 8.2 respecto al calor sensible del ladrillo.

$$Q_1 = MC_p(T_{max} - T_{inicial}) \quad 8.2$$

Donde  $Q_1$  es la energía absorbida por los ladrillos (kcal);  $M$  es la masa de los ladrillos (kg);  $T_{máx.}$  es la temperatura máxima alcanzada en la zona ( $^{\circ}C$ );  $T_{inicial}$  es la temperatura al inicio de la quema ( $^{\circ}C$ ).

Esta ecuación también se utilizó para calcular la energía necesaria para eliminar la humedad contenida en los ladrillos.

$$Q_2 = MC_p(T_{max} - T_{inicial}) \quad 8.3$$

Donde  $Q_2$  es la energía requerida para evaporar la humedad del ladrillo crudo (kcal);  $M$  es la masa de agua contenida en los ladrillos crudos (kg) para cada volumen;  $C_p$  es la capacidad calorífica del agua (kcal / kg • K);  $T_{máx.}$  es la temperatura máxima alcanzada en cada volumen ( $^{\circ}C$ ); y  $T_{inicial}$  es la temperatura de cocción inicial (ambiente) ( $^{\circ}C$ ).

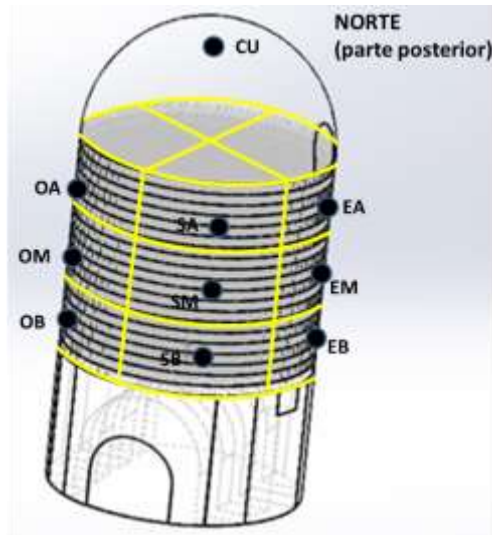


Figura 30. Horno MK2 dividido en secciones, para el cálculo de la energía absorbida por los ladrillos.

### 8.3.3 Energía Pérdida por las Paredes del Horno

Las pérdidas de calor que se dan a través de las paredes de un horno es uno de los factores más importantes a considerar en cuanto a pérdidas. Para el caso del horno MK2 se cuenta con paredes de suficiente espesor (30 cm) como para disminuir las pérdidas de este tipo.

Las correlaciones empíricas para flujos de calor por convección libre (Incropera & De Witt, 2006) en general son de la forma:

$$\overline{Nu}_L = \frac{\bar{h}L}{k} = C Ra_L^n \quad 8.4$$

Donde el número de Rayleigh es (Incropera & De Witt, 2006)

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\alpha} \quad 8.5$$

Para placa vertical se recomienda una correlación que se puede aplicar sobre todo el intervalo de Ra (Incropera & De Witt, 2006) y es de la forma:

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.0492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad 8.6$$

El número de Nusselt fue usado para determinar los coeficientes de transferencia de calor por convección. Para el cálculo de pérdidas por las paredes se consideraron los muros como una pared plana. Se estimaron los coeficientes de convección, tanto internos como externos ( $h_1$  y  $h_2$ ) y se calcularon las pérdidas por resistencias con las ecuaciones 8.7 y 8.8. Es aquí donde se utilizaron las temperaturas externas en la pared en las mismas posiciones de los termopares.

$$R_{total} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{1}{k A} + \frac{1}{h_2 A} \quad 8.7$$

$$Q_3 = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}}$$

8.8

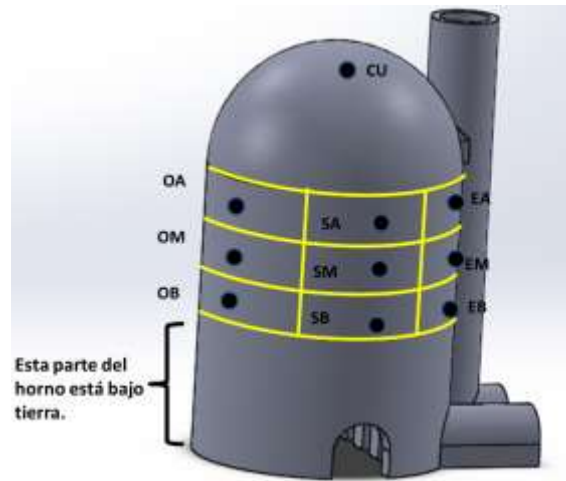


Figura 31. Horno MK2 dividido en secciones, para el cálculo de la energía absorbida por el muro del horno.

### 8.3.4 Energía perdida a través de los arcos fijos del horno (arcos de soporte para los ladrillos)

El horno MK2 cuenta con arcos fijos cuya función es soportar todas las camas de adobe que se van a cocer. Las medidas del horno fueron utilizadas para determinar el volumen de los arcos equivalente en volumen de ladrillos a coser. De nuevo se utiliza la ecuación 8.2 para calcular el calor absorbido por los arcos.

$$Q_4 = MCp(T_{max} - T_{inicial})$$

8.9

Donde  $Q_3$  es la energía absorbida por los arcos (kcal);  $M$  es la masa total de los arcos (kg);  $T_{m\acute{a}x.}$  es la temperatura máxima alcanzada por los arcos ( $^{\circ}C$ );  $T_{inicial}$  es la temperatura al inicio de la quema ( $^{\circ}C$ ).

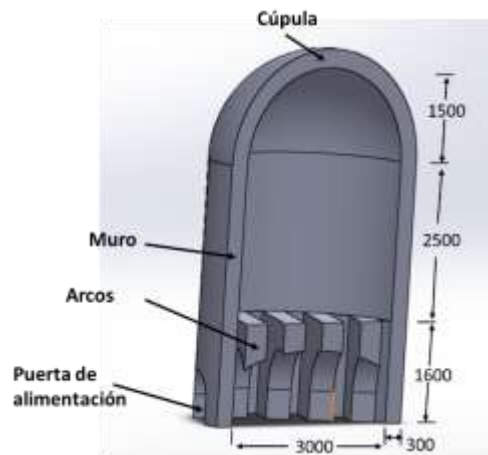


Figura 32. Ubicación de los arcos de soporte en el interior del horno MK2 (longitudes en mm).

### 8.3.5 Energía perdida a través de los gases de combustión

Para el cálculo aproximado de la pérdida de energía por los gases de salida por la chimenea, considerando combustión completa, se tomó como dato de temperatura de salida la lectura arrojada por el termopar colocado a la salida de la chimenea. Se evaluó la velocidad de salida de los gases al centro de la chimenea y se calculó el flujo en base a la ecuación Hagen-Poiseville (Bird, et al., 1999) respecto a la velocidad máxima de 3 km/hora (medida experimentalmente) y el tiempo de quema correspondiente.

$$Q_5 = \sum(V_i C P_i) T_{gases} \quad 8.10$$

Donde  $V$  es el volumen de salida de los gases, y  $C_p$  es la capacidad calorífica de los gases de combustión.

### 8.3.6 Residuos de Material

También se consideran los residuos del material combustibles (cenizas) con un calor de combustión de acuerdo a la bibliografía para la madera y el aserrín de forma proporcional.

## 8.4 Pruebas de Resistencia a la Compresión

La calidad del ladrillo artesanal es evaluada generalmente por el comprador. En su mayoría son personas que lo utilizan para construcciones pequeñas (casas habitacionales), por lo cual la valoración se basa en la forma, el color y en general la apariencia del producto. Para fines de investigación es preciso tener una evaluación objetiva del ladrillo obtenido, por lo que se realizaron pruebas de resistencia a la compresión en un laboratorio certificado (Laboratorio y consultoría LOA S.A. de C.V.). Los ladrillos fueron tomados de diferentes zonas estratégicas del horno (ladrillos contiguos a cada termopar) buscando una representatividad de la totalidad de los ladrillos dentro del horno, por lo que también fueron tomadas muestras de zonas donde no hubo termopar instalado (ver Figura 20 y Tabla 3).

Los adobes fueron marcados en las tres camas coincidentes con los termopares, así como algunos de la última cama con una codificación coincidente con la de los termopares. Una vez realizada la quema estos ladrillos fueron separados para pruebas destructivas por compresión.

## 8.5 Simulación Numérica, Volumen Finito

En este apartado se describe la metodología que se siguió para simular numéricamente el proceso de cocción de ladrillo en el horno MK2. Se trabajó el modelo geométrico virtual CAD (Solidworks 2015), con una apertura entre los ladrillos de 28 mm, de acuerdo al promedio medido experimentalmente, posteriormente se exporta la geometría al software Ansys Workbench, donde este se revisa en la plataforma Space Claim. Se realizó la discretización o mallado, se cargaron las propiedades y las condiciones iniciales y de frontera, los cuales son básicamente los pasos para tener listo el modelo y solucionarlo.

### 8.5.1 Geometría del Horno y Generación del Modelo en CAD

Se realizó el modelado geométrico del horno a escala 1:1 en el software Solidworks® 2015 (Figura 33). La configuración de los ladrillos en el modelo fue acorde al acomodo experimental, tanto el medio sólido como el medio fluido fueron definidos por medio de “named selection” para ser posteriormente exportados al software ANSYS (Figura 34). Es de suma importancia el desarrollo de un buen modelo geométrico, ya que de no ser así se pueden tener problemas al momento de realizar la discretización o mallado y al momento de la solución.



Figura 33. Geometría en Solidworks.

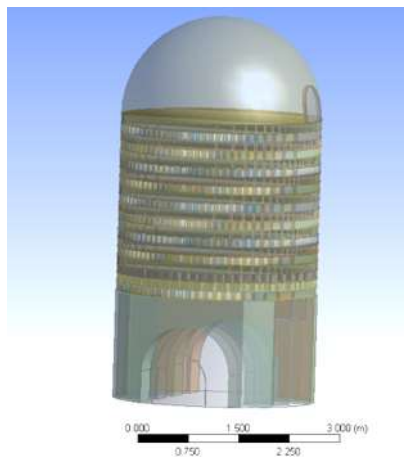


Figura 34. Geometría importada a ANSYS CFX.

### 8.5.2 Discretización (Malla)

Las limitaciones de la mente humana en ocasiones no 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 objeto de esta investigación. Los ladrillos internos constituyen la fase del dominio sólido en el modelo geométrico, mientras que los espacios entre los ladrillos establecen la fase del dominio fluido y La pared interna del horno la condición de frontera. Cada



fase “sólido y fluido” es discretizada por medio de una malla, la cual representa el diseño geométrico interno del acomodo de los ladrillos. En las regiones cercanas a las interfaces sólido-fluido se tienen aún más complicaciones numéricas, porque ahí los gradientes de temperatura y velocidad son mayores. El método por volumen finito permite mejorar los procesos (Zienkiewicz & Taylor, 2000) dividiendo el sistema en volúmenes de control, los cuales deben satisfacer las ecuaciones que rigen el fenómeno. Por lo tanto, las características y el número de estos volúmenes influyen considerablemente en el proceso de resolución numérica.

La plataforma de ANSYS CFX permite la selección de diferentes tipologías (geometría y tipo de elemento) para realizar el mallado del volumen de control. De esta forma se puede adaptar la discretización del problema a la forma de la geometría más acorde al dominio experimental. Para este horno en particular, la geometría circular dificulta la construcción de la malla, al tener ésta que ajustarse a la curvatura de la pared.

La discretización del modelo por volumen finito se realizó en la plataforma de ANSYS MECHANICAL y ANSYS CFD con mallas estructuradas, mallas no estructuradas y mallas híbridas. Lo anterior para mejorar la eficiencia del trabajo numérico de acuerdo a lo intrincado que pudiera ser la modelación del acomodo de los adobes. Las mallas estuvieron basadas en elementos 3D con tetraedros, hexaedros y combinados, de acuerdo al acomodo y curvatura de las paredes del horno.

La diferencia principal de los distintos elementos es el número de nodos con los que se resuelven las ecuaciones dentro de su volumen de control (Carrillo & Castillo, 2011). De la geometría del elemento depende la precisión de los cálculos del modelo; para el análisis de sensibilidad de malla se ejecutaron tres simulaciones, con un tamaño de malla respectivo de 1,5, 2,0 y 2,5 cm, en una cuarta parte del horno. Se utilizaron elementos hexaédricos, debido a que en la simulación de fluidos se recomienda que los elementos estén orientados al flujo del fluido (García -Cuevas Gonzalez, et al., s.f.). Se compararon los resultados entre sí respecto al tamaño de malla más pequeño, es decir, 1,5 cm; la comparación se realizó en tres ubicaciones, obteniendo los resultados siguientes:

Tabla 5. Características de las mallas en los modelos de prueba.

-Tamaño de malla (cm)	Tipo de malla	Diferencia promedio (C)	Porcentaje	Nodos	Elementos
1.5	Hexaédrico	0	0	7,529,420	1,998,676
2	Hexaédrico	1.61	0.46	4,002,248	1,195,233
2.5	Hexaédrico	7.9	2.25	1,607,618	471,584

Tabla 6. Tipos de elementos para mallado.

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

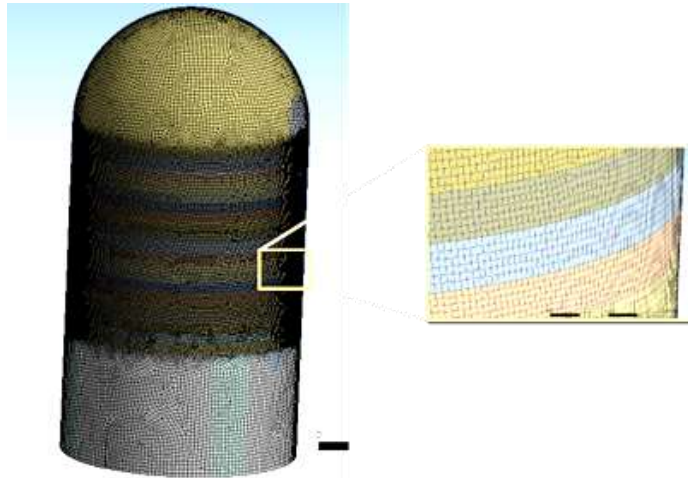


Figura 35. Discretización del modelo.

Los resultados sugieren trabajar con malla hexaédrica igual a 2.0 cm, lo cual corresponde a una diferencia mínima entre los resultados de los diferentes tamaños de mallas.

Tabla 7. Malla seleccionada para horno completo

Tamaño de malla (cm)	Tipo de malla	Nodos	Elementos
2	Hexaédrico	10,744,420.	3,548,425.

Uno de los factores considerados para definir la calidad de la malla es la ortogonalidad (Orthogonal quality) y oblicuidad (skewness). Contemplando que las recomendaciones de la calidad de malla indican valores de oblicuidad bajos y de ortogonalidad altos, se trata de mantener la calidad de oblicuidad mínima mayor de 0.25 y la ortogonalidad máxima menor 0.95 (Figura 35. Geometría importada de ANSYS CFX).

La Figura 36 nos muestra la calidad de malla ortogonal, la mayor parte de elementos presentan ortogonalidad arriba del 0.75. En la Figura 37 muestra cantidades mínimas de elementos con oblicuidad.

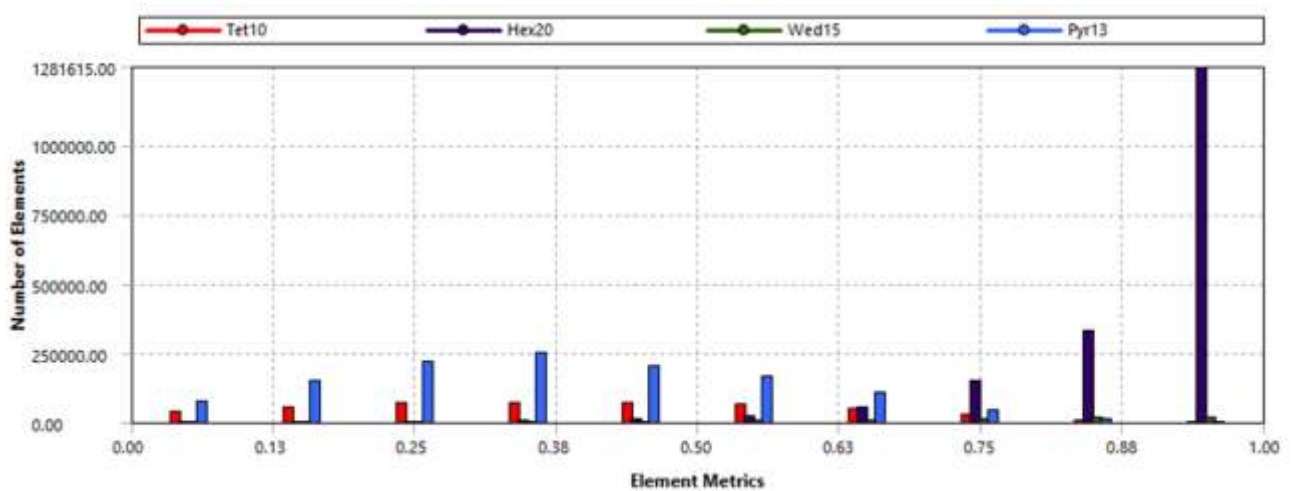


Figura 36. Calidad de malla ortogonal

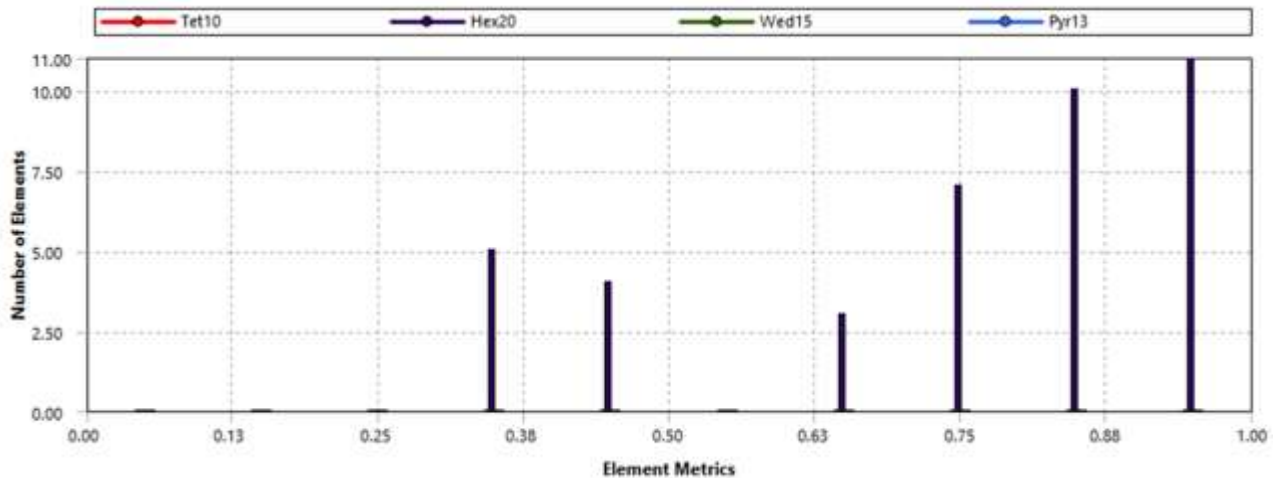


Figura 37. Calidad de malla oblicuidad.

### 8.5.3 Propiedades de los Materiales:

Para fines de la simulación en CFX se generan dos dominios. En este caso práctico un sólido (ladrillo) y el fluido (aire). En lo que respecta al dominio sólido (ladrillo), las propiedades se manejaron constantes durante la simulación. Fluido (aire) se manejó como un gas ideal; las propiedades que se manejan constantes durante la simulación se muestra a continuación.

Tabla 8. Propiedades físicas del ladrillo y del aire. Fuente: (Incropera & De Witt, 1999)

Propiedad	Ladrillo	Aire	Unidades
Conductividad térmica	0.69	0.0261	W/m·K
Capacidad calorífica	840	1,004.4	J/kg·K
Densidad	1,600	1.18	kg/m <sup>3</sup>

### 8.5.4 Condiciones Iniciales

Las condiciones iniciales son necesarias para especificar el arranque en la solución de este tipo de problemas, mientras que las de frontera acotan el dominio de la variable dependiente en la región de análisis. Las condiciones iniciales y de frontera fueron determinadas mediante los datos experimentales de una quema preliminar en el horno MK2, en este proyecto la primera quema debido a las condiciones ambientales que se presentaron. La temperatura al inicio de la quema fue de 20 °C. Las condiciones para la entrada del aire se manejan de 0 m/seg en sus tres componentes. La presión relativa se establece en 0 Pa, toda la simulación de quema se realiza bajo presión atmosférica de 1 atm.

### 8.5.5 Condiciones de Frontera

El punto de ejecución más importante del proyecto ha sido entender la forma natural de quemado de ladrillo por parte de los productores para que, con el uso de herramientas numéricas, sugerir cambios en los procesos de quemado tal que se obtuvieran quemados de ladrillo más eficientes. Al hablar de eficiencia se refiere a menos tiempo de quemado, menos consumo de combustible y menos tiempo de contaminación.

La idea principal de la investigación ha sido no modificar la forma de quemado, una de ellas corresponde a no cambiar el combustible utilizado. El cambio también implicaría reajustes a sus métodos por parte del ladrillero, y como la quema es con base a la experiencia, ellos ya tienen su combustible preferido para quemar ladrillo. El ladrillero Raúl Hernández, de ladrillera El Refugio de la ciudad de León Gto., quien hace las quemas en horno MK2, la mitad del combustible que utiliza son tarimas de madera de desecho, y la mitad es aserrín de gran tamaño de partícula, densidad, con pequeñas porciones de carbón vegetal. El Sr. Hernández consigue el combustible proveniente de madera de pino, pero como son desechos, trae gran variabilidad de tipos de tarima y tipos de aserrín, a veces contaminado con trazas de aceite u otras cosas. Identificar y cuantificar cada uno de los tipos, si acaso se pudieran separar, sería una actividad complicada.

En general ocurre lo mismo con todos los ladrilleros. Los combustibles usados difieren considerablemente de uno a otro, así como la humedad asociada a cada uno de ellos. Aun cuando exista un reglamento, muchos no respetan por que el hacerlo afecta la eficiencia económica de sus quemas.

Debido a la complejidad en la clasificación del combustible, tal que pudiera caracterizarse para obtener su calor de combustión, se optó por una alternativa de validación numérica por medio de perfiles de temperatura. En lugar de incluir en la simulación un modelo matemático de generación de calor de combustión, se tomó una función de temperatura experimental. Ello simplifica considerablemente el modelo de simulación, y considera implícitamente cualquier cambio en el combustible, así como la humedad asociada a él; además, simplifica relativamente el modelo de simulación.

Cada productor de ladrillos tiene su propio horno, y estos presentan su propio diseño geométrico, lo que implica tener modelos geométricos diferentes. Cada horno tiene una cámara de combustión diferente, tanto en forma como en tamaño. Esas son otras razones por las cuales se utilizan las mediciones de temperatura experimentales para simular el flujo de calor dentro del horno. En otras palabras, los termopares ubicados en las secciones inferiores del horno son utilizados como referencia para que el horno se caliente numéricamente a la misma tasa de cambio térmico medida experimentalmente. Conforme se va calentando el horno experimentalmente, se va calentado en horno numéricamente, es decir, la condición de frontera en el inferior del horno es una función matemática de la temperatura con respecto al tiempo. Invariablemente es un modelo transitorio que nos refleja el incremento de temperatura, como ocurre físicamente durante las quemas de ladrillo.

La entrada de aire al horno se localiza en la parte inferior del horno, lado sur. El perfil de temperatura del fluido presenta un aumento con respecto al tiempo y está relacionada directamente con el calor generado por la combustión (Figura 38).

La ecuación de entrada de calor es una de las condiciones más importantes para la simulación del horno MK2 y a su vez es difícil de medir. En enero de 2019 se realizó una tercera quema en donde se colocó un termopar para medir la temperatura sobre el piso de la cámara de combustión del horno. El perfil de temperatura se muestra a continuación.

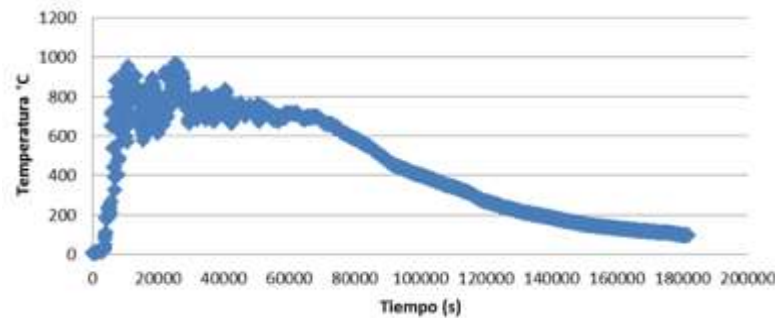


Figura 38. Comportamiento de la temperatura en la base del horno.

El termopar colocado sobre el piso de la cámara de combustión es para encontrar una ecuación que represente esa entrada de calor, se identifica que tiene un comportamiento similar al de una ecuación que representa un sistema de control de primer orden (Bolton, 2006) del tipo:

$$T = T_1(1 - e^{k_1 t}) \quad 8.11$$

Donde:

T= Temperatura

T1= Temperatura requerida

k= constante de amortiguamiento

t= tiempo

Aclarando que esta ecuación solo representa la parte del calentamiento. El enfriamiento consideró una ecuación de segundo orden del tipo:

$$T = A * e^{k_2 t} - B * e^{k_3 t} \quad 8.12$$

A continuación, se describe la forma en que se llega a la ecuación de entrada de calor para el modelo de simulación numérica del horno MK2.

1.-Se graficó el perfil de temperatura de los datos experimentales obtenidos mediante el termopar colocado en la base de la cámara de combustión. Estos datos también fueron filtrados mediante la instrucción Butter en Matlab, este filtrado de datos se realizó debido a que por la localización del termopar hay momentos en donde existe una variación alta en las temperaturas registradas, lo que nos provee los resultados que se muestran en la Figura 39.

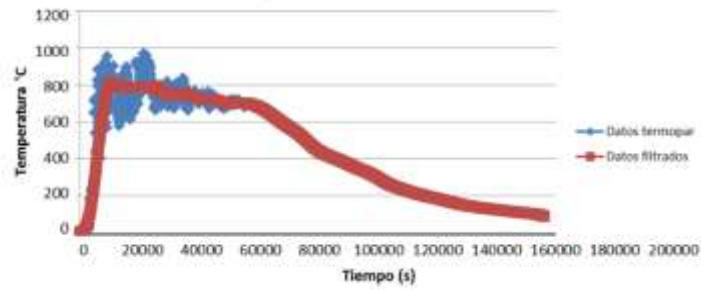


Figura 39. Comportamiento de la temperatura en la base del horno.

2.-Posteriormente, se busca adecuar una ecuación a la curva que forman los datos filtrados, lo anterior mediante la ayuda del software Minitab. El ajuste se realiza en dos etapas, la del calentamiento y la del enfriamiento.

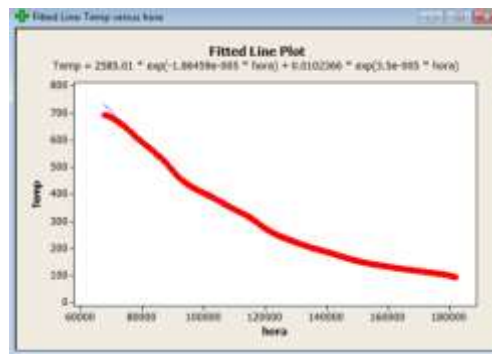


Figura 40. Adecuación de ecuaciones en Minitab

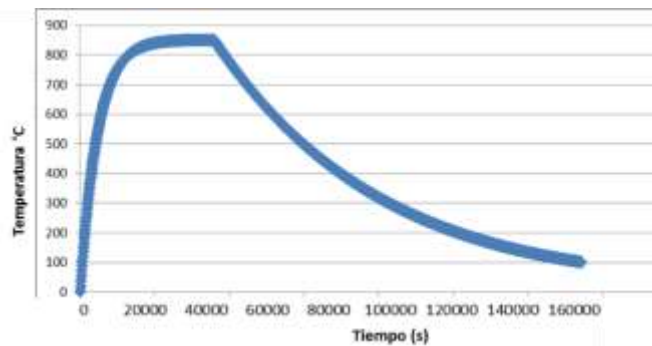


Figura 41. Grafica de las ecuaciones resultantes.

Las ecuaciones serían las siguientes:

$$T = 850 * (1 - e^{-0.00018*t}) \tag{8.13}$$

$$T = 1,890 * e^{-0.000018t} + 0.0102 * e^{0.000035t} \tag{8.14}$$

Para la primera ecuación  $t$  toma valores de 0 y hasta las 12 horas (43,200 s), que es el tiempo durante el cual la quema se lleva a cabo, y en la segunda ecuación  $t$  toma valores a partir de 12:00:01, es decir, a partir del primer segundo después de las 12 h.

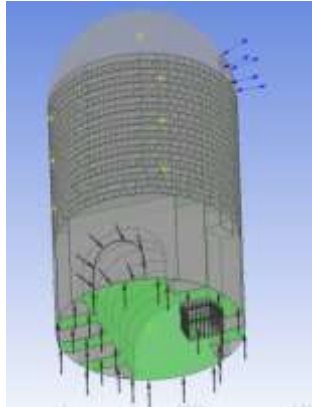


Figura 42. Localización de entrada de los gases (área de color verde).

### Ecuación Representativa de la Velocidad de los Gases

La velocidad de los gases de combustión no fue representada con un valor constante. Debido a las dificultades de su medición, se decidió usar una representación exponencial, basada en la utilizada por Corzo (Corzo, 2013) teniendo como límite la velocidad medida en la experimentación. Las velocidades se midieron en la entrada de la cocina reportando velocidades de hasta 0.165 m/s. La localización puede verse en la Figura 42.

$$Vel. = 0.165 \text{ m/s} - 0.1425 \text{ m/s} * e^{-0.000025s^{-1}*t} \tag{8.15}$$

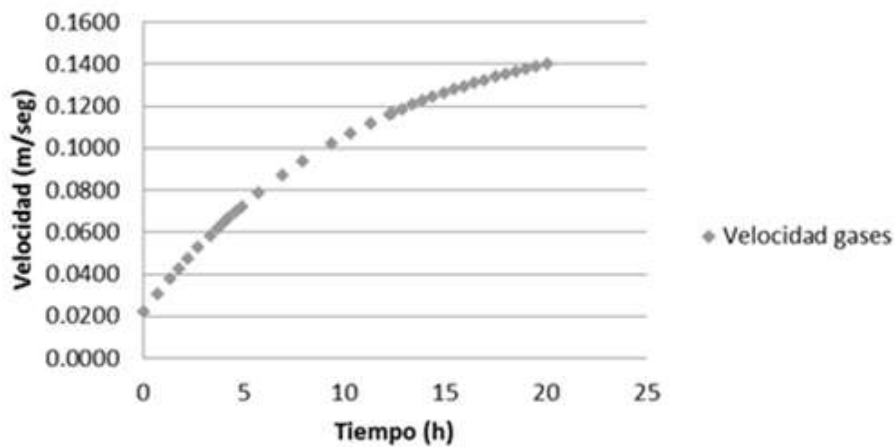


Figura 43. Grafica de la velocidad del fluido.

El horno MK2 requiere una condición de frontera de salida en la parte superior del horno, que corresponde al área de la chimenea. En la figura 48, se representa la salida de los gases de combustión al exterior. En la parte externa del horno las condiciones promedio fueron de 25 °C y 1 atm.

## Pared

Se tomó una condición de pared adiabática alrededor del horno. Esta condición representa una condición ideal para la función que ejercen las paredes externas del horno y está acorde a los cálculos realizados donde se muestra una pérdida de calor por las paredes del 4 %, pequeña como para que el modelo numérico considere el aislamiento de la pared con los respectivos cálculos que implica (los cálculos se presentan en el capítulo de resultados). En la Figura 44 se puede observar esta condición, destaca la ausencia de la pared en la figura, es decir, únicamente representando el fluido y el sólido (ladrillos). En el capítulo siguiente se muestran los resultados del análisis energético.

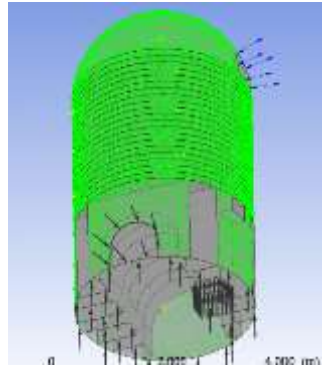


Figura 44. Condición adiabática.

Por último, se decidió simular el horno completo debido a que no presenta condiciones simétricas, principalmente debido a la colocación de la chimenea a un costado y no en el centro. Lo anterior se ilustra en el capítulo de resultados al ver los perfiles de temperatura experimentales y las imágenes de la simulación numérica.

### 8.5.6 Monitores

El software de Ansys CFX permite colocar monitores, en este caso de temperatura en los lugares que identifiquemos como convenientes. En las siguientes imágenes (Figura 45) se puede observar la localización de los termopares comparando su localización en la imagen de CFX y en una fotografía del horno. La colocación de los monitores corresponde a la misma ubicación donde se situaron los termopares en la parte experimental, estas corresponden a sus coordenadas ortogonales X, Y, Z.

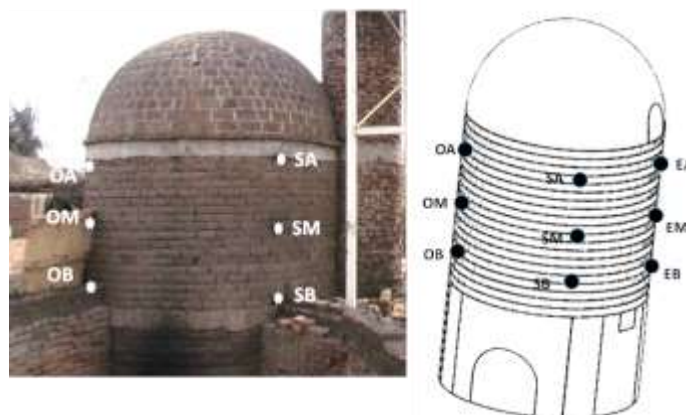


Figura 45. Localización de termopares y monitores.



Tabla 9. Nomenclatura, localización monitores de temperaturas.

SA	Sur alto	OA	Oeste alto
SM	Sur medio	OM	Oeste medio
SB	Sur bajo	OB	Oeste bajo
EA	Este alto	NA	Norte alto
EM	Este medio	NM	Norte medio
EB	Este bajo	NB	Norte bajo

Tabla 10. Localización de termopares por cama.

Localización de termopares	
cama	Nivel
5	Bajo
11	Medio
17	Alto

## 8.6 Diseño experimental

La metodología usada en este trabajo se presentó en la Figura 12, primero se requirió realizar una quema experimental para determinar las condiciones iniciales y de frontera del fenómeno en estudio mediante el análisis de los datos. El segundo paso es la parte de análisis de datos experimentales. En el tercer paso se realizó la simulación numérica del modelo y su validación. El paso cuatro ya es parte del diseño experimental y se desglosa en la etapa del cribado, comprobación de los supuestos del mismo, el experimento de composición central, se comprueban los supuestos del mismo y por último la optimización del modelo.

Con este diseño experimental se buscan mejores condiciones en el proceso de cocción de ladrillo artesanal en un horno MK2. Un diseño experimental en este tipo de hornos es difícil debido a la gran cantidad de recursos que se requieren; la simulación numérica nos presenta la oportunidad de experimentar de una manera que nos resulta más factible y menos costosa.

En base a entrevistas con los productores y consenso entre el equipo de trabajo, se determinaron las siguientes variables como las más influyentes.

Tabla 11. Variables influyentes en el proceso de cocción de ladrillo horno MK2.

	Factores	Códigos	Niveles	Unidades
<b>A</b>	Chimenea	-1(nivel bajo)	Una sola chimenea	Pza.
		1(nivel alto)	Chimenea Simétrica.(adicional)	
<b>B</b>	Arcos	-1(nivel bajo)	140 ancho por 46.5 alto	cm
		1(nivel alto)	155 ancho por 61.5 alto	
<b>C</b>	Puerta alimentación	-1(nivel bajo)	85 ancho por 35 alto	cm
		1(nivel alto)	125 ancho por 55 alto	
<b>D</b>	Acomodo ladrillos	-1(nivel bajo)	Separación 2.0 entre ladrillos en las tres últimas camas	cm
		1(nivel alto)	Separación 2.8 entre ladrillos en las tres últimas camas	
<b>E</b>	Convección	-1(nivel bajo)	0.165	m/s
		1(nivel alto)	0.265	

Las que tiene el modelo validado para estas variables se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Condiciones base (del modelo validado).

	Factores	Códigos	Niveles	Unidades
<b>A</b>	Chimenea	-1(nivel bajo)	Chimenea actual.	Pza.
<b>B</b>	Arcos	-1(nivel bajo)	140 ancho por 46.5 alto	cm
<b>C</b>	Puerta alimentación	-1(nivel bajo)	85 ancho por 35 alto	cm
		1(nivel alto)	Separación 2.8 entre ladrillos en las tres últimas camas	cm
<b>E</b>	Convección	-1(nivel bajo)	0.165	m/s

Se consideran como variables de salida dos características importantes en la quema, estas son la temperatura que alcanzan los ladrillos y que la temperatura dentro del horno sea lo más homogénea posible. Estas variables son:

- Temperatura promedio de los doce termopares Y1.
- Diferencia de temperaturas en los monitores (como medida tomamos la desviación estándar entre los monitores) Y2.

Se optó por un diseño  $2^k$  (Montgomery & Runger, 1996). Si se considerara un  $2^5$  sin replicas tendríamos un arreglo con 32 corridas, lo cual sería impráctico debido a que por las condiciones del modelo numérico el tiempo de simulación es demasiado largo.

Para este proyecto, por ser una simulación numérica no se requiere generar réplicas ya que los resultados serían exactamente iguales (con margen de error asociado al redondeo). También, debido al

tiempo de simulación, se optó por un diseño fraccionado para este problema, aunque se tienen las opciones de fraccionarlo a la mitad o a una cuarta parte, es decir, en lugar de generar 32 corridas experimentales solo se generarían 8 o 16.

Montgomery (1996) dice: “El diseño  $2^{k-1}$  es valioso para reducir el número de corridas requeridas para un experimento; a menudo se encuentra que fracciones más pequeñas proporcionan casi la misma información, pero con un costo menor. En general, un diseño  $2^k$  puede correrse en una fracción  $1/2^p$  conocida como diseño experimental fraccionado  $2^{k-p}$ , es así como una fracción  $1/4$  se conoce como diseño  $2^{k-2}$ , una fracción  $1/8$  se conoce como diseño  $2^{k-3}$ , una fracción  $1/16$  es un diseño  $2^{k-4}$  y así sucesivamente” (Montgomery & Runger, 1996).

Para la presente simulación numérica se optó por un diseño  $2^{k-2}$  o  $2^{5-2}$ , lo cual provee el siguiente arreglo:

Tabla 13. Alias para un Diseño de experimentos  $2^5$  fraccionado a  $1/4$ .

Notación de Yates	Corrida	A	B	C	D	E
		X1	X2	X3	X4	X5
(1)	1	-1	-1	-1	-1	1
a	2	1	-1	-1	1	-1
b	3	-1	1	-1	1	1
ab	4	1	1	-1	-1	-1
c	5	-1	-1	1	-1	-1
ac	6	1	-1	1	1	1
bc	7	-1	1	1	1	-1
abc	8	1	1	1	-1	1

Generadores del diseño D= -AB, E= AC

## 8.7 Horno MK en Serie

A continuación se presentan las consideraciones para un arreglo de hornos MK en serie. Esto con la intención de generar un modelo de cooperativa donde un grupo de ladrilleros pueda asociarse para quemar en hornos MK.

El horno MK2 tiene una desventaja. No puede aprovechar el calor acumulado en el horno filtro para iniciar el segundo ciclo de quema. Se han realizado cálculos que permiten una disposición serial que si permita quemar el horno filtro cuando los ladrillos que están con cierta temperatura.

Se analizó un diseño de hornos MK en serie para evaluar el número de cámaras que pueden incluir en una disposición MK-n como un proceso semicontinuo. Esto se hace debido al funcionamiento intrínseco del MK2, es decir, se pierde calor cuando la cámara del filtro se enfría antes de que iniciar el proceso de cocción se inicie.

Según lo diseñado por Márquez (2002), el sistema debería tener dos cámaras. Sin embargo, en las condiciones de funcionamiento actuales, solo es posible realizar medio ciclo. Durante la primera fase de la cocción de ladrillos, la cámara uno quema los ladrillos mientras que la cámara dos filtran la contaminación y pre-quema y calienta los ladrillos crudos a alrededor de 300 °C (como se midió experimentalmente). Sin embargo, no es posible aprovechar el calor de precalentamiento ya que la combustión en la cámara dos implica descargar y recargar la cámara uno. Para descargar la cámara uno, sus ladrillos deben ser ladrillos fríos manipulados a mano. Por lo tanto, la segunda fase del primer ciclo se comienza a quemar en la cámara dos con los ladrillos en bruto a temperatura ambiente en ambas cámaras. Ciertamente, se ahorrará algo de combustible debido al precalentamiento de los ladrillos, pero la pérdida de calor del precalentamiento también podría usarse si se pudieran agregar varias cámaras MK en serie. Desarrollamos un diseño MK-n para definir el número óptimo de una serie de cámaras MK que disminuye la pérdida de calor y aumenta la productividad. Se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones (los tiempos provienen de una serie de ciclos de combustión realizados en el horno MK2):

- Tiempo de carga de la cámara en condiciones de luz diurna: 12 h.
- Quemado realizado el día después de la carga de la cámara, en condiciones de luz diurna.
- Tiempo de cocción de los ladrillos en bruto: 12 h.
- Tiempo de quema de ladrillos pre cocidos, en condiciones de luz diurna: 9 h.
- Tiempo de enfriamiento después de la quema: 50 h a 50 °C.

Tiempo de descarga de la cámara en condiciones de luz diurna: 10 h.

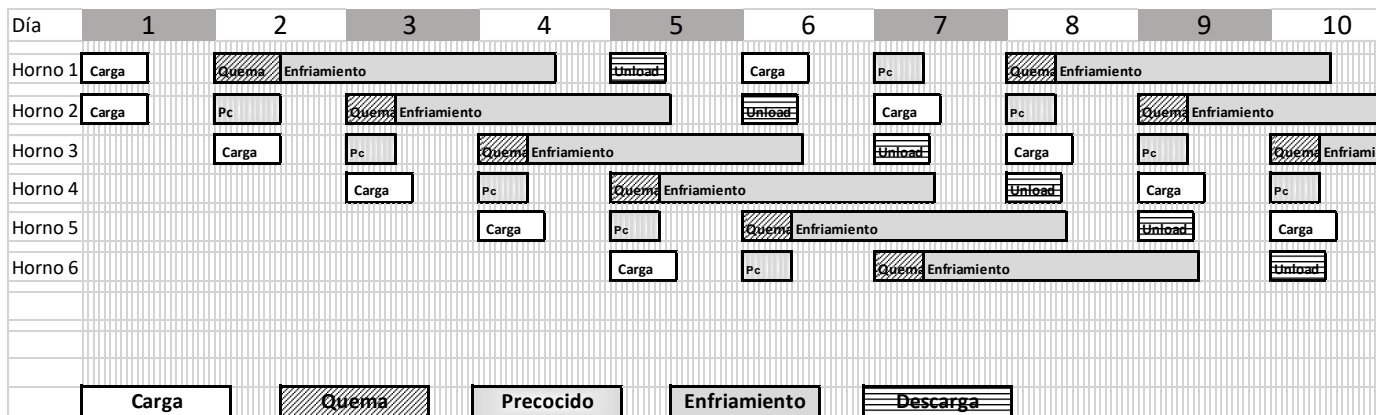


Figura 46. Esquema del proceso de quema de ladrillo en horno MK-n.

La Figura 46 muestra que una disposición MK-6 es la combustión óptima, es decir, en las condiciones indicadas anteriormente, cuando se quema la cámara 7 corresponde realmente a la cámara 1, por lo que se inicia un nuevo ciclo. Por lo tanto, si se construye un sistema MK en un campo de fabricación de ladrillos, se sugiere organizarlos en una configuración hexagonal, siempre que los ladrilleros acuerden quemar de vez en cuando como una unión cooperativa. Esta configuración es capaz de quemar hasta 33,000 piezas cada 6 días (por ciclo completo), con bastante competitividad respecto a la fabricación industrial de ladrillos.

## 9 Resultados

### 9.1 Resultados de la Quema Experimental

La quema experimental tiene una importancia alta, porque de esta obtenemos los datos con los que se alimenta el modelo numérico y posteriormente también se utiliza para evaluar (mediante una comparación) los resultados de la simulación. Antes de la simulación se realizaron dos quemas experimentales bajo las condiciones que maneja comúnmente el productor de ladrillos, las diferencias entre ambas fueron pocas. La comparación entre ambas fue necesaria para escoger cuales datos se usarían en la simulación.

#### 9.1.1 Quema 1 Comparada con Quema 2

Los datos mostrados en la Tabla 14 muestran diferencias en la temperatura ambiente y la humedad relativa promedio. Estas diferencias se dan considerando que en la segunda quema se presentaron momentos con lluvia moderada, diferencia principal entre las dos quemas. Por esta razón se optó por considerar los datos de la primera quema para la realización del modelo numérico además por que la mayor parte del año los productores realizan las quemas sin presencia de lluvia. Los datos de esta primera quema también son considerados posteriormente, como base para comparar las simulaciones.

Tabla 14. Resumen de datos de las dos quemas.

	Cantidad de combustible (kg)	Cantidad de residuos (kg)	Cantidad de ladrillos (pzas.)	Tiempo de alimentación (h:min)	Velocidad del viento promedio (m/s)	Espacio entre ladrillos promedio (cm)	Temperatura Ambiente Promedio (°C)	Humedad relativa Promedio	Intensidad de lluvia (mm/h)
<b>Quema 1 (mayo-2016)</b>	1530.6	94.5 kg 5 clavos	5105	12:10	0.33	2.8	31	27	N/A
<b>Quema 2 (Junio-2016)</b>	1612.1	101 kg 6 clavos	5097	12:20	0.6	3.4	22.36	67	11

#### 9.1.2 Perfiles de Temperatura

En la Figura 47 se observa el comportamiento térmico del horno MK2. Como se esperaba, las temperaturas más altas se obtienen en la zona baja del horno (SB, EB, NB, OB), alrededor de los 800 °C. Se observa también cierto paralelismo entre las curvas de los cuatro puntos monitoreados en este nivel (líneas con círculos). En la parte media del horno (SM, EM, NM, OM) se nota una marcada diferencia de aproximadamente 400 °C entre las temperaturas de los termopares de este nivel (línea continua), registrando las temperaturas más altas los termopares sur y este (SM, EM) respecto a los otros puntos cardinales. En la parte superior del horno esta diferencia de temperaturas se replica (línea con triángulos), solo que la diferencia de temperaturas es mucho menor (las temperaturas más altas también se registran en los puntos cardinales sur y este).

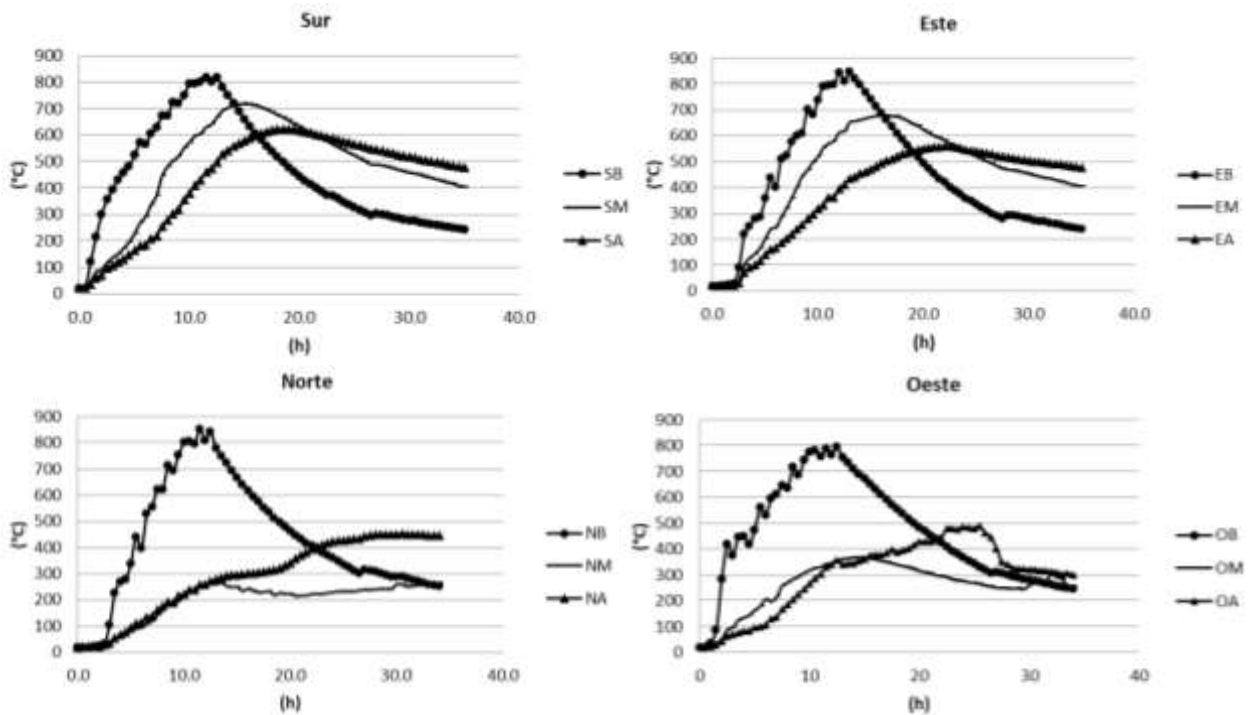


Figura 47. Comportamiento de las temperaturas del horno, quema 1.

## 9.2 Análisis Energético

Este análisis nos arroja la cantidad de energía suministrada y como es repartida. En la quema experimental se quemaron un total de 5,105 ladrillos, con 1,530.6 kg de madera de pino, aserrín y carbón vegetal como combustible, con una generación final de 90 kg de cenizas.

### 9.2.1 Energía Total Suministrada

Los combustibles se alimentaron de acuerdo a las siguientes cantidades:

- Madera 997.1 kg.
- Aserrín 533.5 kg.
- Carbón 47 kg.

Con los datos relativos al poder calorífico de cada uno de los combustibles se obtuvo la cantidad total de energía suministrada.

$$Q_{Total} = 7,197,038.0 \text{ kcal}$$

### 9.2.2 Energía Absorbida por los Ladrillos en Cocción

En cuanto a la energía consumida para el calentamiento de los ladrillos, un total de 5,105 piezas fueron procesadas. El  $C_p$  fue considerado constante para el ladrillo crudo (adobe) con un valor de 0.25 (kcal/kg K) (Fontalvo & Gutiérrez, 2014). Igualmente, se asumió una masa inicial y constante de 4.14 kg por adobe inicial (promedio de un muestreo de 30 especímenes). Es aquí donde se toma en cuenta las 12 zonas representativas de cada termopar (Figura 34), cuyas temperaturas máximas se muestran en la Tabla 15.

De acuerdo a las mediciones realizadas, los ladrillos en bruto contenían un promedio de 2,5 % de humedad. Estos datos se consideraron en el cálculo de la energía necesaria para evaporar el agua contenida en su interior. El Cp del agua se consideró constante e igual a 1,008 (kcal / kg • K) (Incropera and DeWitt, 2006).

Tabla 15. Temperaturas máximas por zona (°C).

	Sur	Este	Norte	Oeste
<b>Bajo</b>	830	868	872	820
<b>Medio</b>	719	682	277	369
<b>Alto</b>	623	559	454	488

Utilizando las ecuaciones 8.2 y 8.3 se obtuvo el siguiente resultado para la energía absorbida por los ladrillos y la energía necesaria para la evaporación.

$$Q_1 = 3,173,568.39 \text{ kcal}$$

$$Q_2 = 42,607.56 \text{ kcal}$$

### 9.2.3 Energía Perdida por las Paredes del Horno

Para el cálculo de las pérdidas por las paredes también se consideró en horno dividido en 12 zonas (figura 34), el área de la cúpula y la puerta de carga. Se utilizaron las temperaturas internas registradas por los termopares y las externas determinadas por el termómetro de infrarrojo. Se utilizaron las ecuaciones mostradas en la sección 8.3.3, obteniendo los resultados mostrados en la Tabla 16.

Tabla 16. Pérdidas por las paredes (kcal).

	Sur	Este	Norte	Oeste
<b>Bajo</b>	10,046.66	9,766.93	10,004.07	10,081.83
<b>Medio</b>	19,563.19	18,740.38	6,135.95	9,048.03
<b>Alto</b>	14,970.81	15,260.29	9,086.06	9,586.49
<b>Cúpula</b>	119,795.11	Door	18,355.56	

$$Q_3 = 280,441.43 \text{ kcal}$$

Es importante mencionar que el espesor de la puerta de carga de adobes es sensiblemente menor que el resto de la pared fija del horno. El ladrillero cierra la puerta con solo una capa de ladrillos cosidos y, aunque sella las fisuras con la misma mezcla de lodo utilizada para elaborar los adobes, la temperatura externa es mucho más alta que el resto de horno. Como resultado, se pierde una cantidad mucho mayor de calor por esa zona. En cuanto a la cúpula, se observa también un valor mucho más alto de pérdida, producto de la mayor área involucrada en el cálculo.

### 9.2.4 Energía perdida a través de los arcos fijos del horno (arcos de soporte para los ladrillos)

Los arcos fijos del horno tienen un volumen equivalente a 1,611 ladrillos. La ecuación 8.2 fue usada para calcular el calor absorbido por los arcos:

$$Q_4 = 1,333,908.0 \text{ kcal}$$

### 9.2.5 Energía Perdida a Través de los Gases de Combustión

La energía perdida por los gases de combustión (ecuación 8.3) considera el perfil de temperatura obtenido por el termopar ubicado en la chimenea. Se calculan volúmenes promedio de gases de combustión en función de las mediciones de velocidad de salida de los gases, para luego realizar la sumatoria de resultados:

$$Q_5 = 1,715,125.63 \text{ kcal}$$

### 9.2.6 Residuos de Material

El peso de material residual (cenizas) registrado fue de 90 kg en proporción 50.3 : 49.7 de madera y aserrín. El cálculo nos lleva a:

$$Q_6 = 401,373.0 \text{ kcal}$$

### 9.2.7 Calor Total

El resumen del cálculo energético se muestra en la Tabla 17. Se puede notar que la mayor pérdida de calor está en los gases de combustión, por lo que la principal área de oportunidad está en lograr que ese calor se transfiera de manera más eficiente a los ladrillos en cocción. La energía perdida por las paredes del horno es relativamente pequeña, efecto de los 30 cm de espesor de la pared. Aunque no se han mostrado las temperaturas externas, la zona baja del horno tiene temperaturas más altas que la parte de arriba. Una pared más gruesa en la parte de abajo del horno sería de ayuda para inclusive lograr una pared 100 % adiabática en todo el volumen del horno. La cúpula pierde más calor no solo por el área mayor que posee, sino también porque su espesor es también más delgado que la pared circular del horno. La eficiencia total del horno se estima en un 44.09 %, es decir, menos de la mitad de la capacidad calorífica almacenada en el combustible llega realmente al ladrillo en cocción. Esta es otra área de oportunidad a fin de incrementar la energía que realmente se transfiere a los adobes.



Tabla 17. Resumen del consumo energético

	(kcal)	(kcal)	(%)
<b>Total de energía generada por la combustión</b>	-7,197,038.80		100
<b>Energía consumida en la cocción de los ladrillos (Q<sub>1</sub>)</b>		3,173,568.39	44.09
<b>Energía consumida para eliminar la humedad (Q<sub>2</sub>)</b>		42,607.56	0.6
<b>Energía perdida por las paredes del horno(Q<sub>3</sub>)</b>		280,441.43	3.89
<b>Energía perdida en los arcos (Q<sub>4</sub>)</b>		1,333,908.00	18.53
<b>Energía perdida en los gases (Q<sub>5</sub>)</b>		1,715,125.63	23.83
<b>Energía perdida asociada a las suposiciones del modelo de transferencia de calor</b>		250,014.79	3.4
<b>Total de pérdidas de energía</b>		6,795,665.80	94.5
<b>Ceniza residual (Material inorgánico que no genera calor contenido en el combustible) (Q<sub>6</sub>)</b>		401,373.00	5.5
<b>Balance (Total de ingresos menos total de egresos)</b>	-7,197,038.80	7,197,038.80	0

El estimado de 3.4 % de pérdidas es debida a las suposiciones de los cálculos, tales como propiedades constantes de los materiales, aproximaciones de temperatura de cada una de las 12 zonas consideradas, las correlaciones empíricas del modelo de cálculo de pérdidas de calor por las paredes, velocidad promedio de salida de los gases, masa inicial de cada adobe, etc.

La Tabla 18 compara el horno MK con el horno reportado por Hinojosa-Ledesma y Velasco-Hurtado (2004) en términos de energía consumida en la cocción del ladrillo. No se puede hacer una comparación objetiva porque la referencia no proporciona información sobre el peso de los ladrillos; lo que está claro es que el horno MK2 experimentado aquí, para 5,500 piezas, duplica la eficiencia reportada por Hinojosa-Ledesma y Velasco-Hurtado (2004), en un horno de 14,000-15,000 piezas. Significa que el horno MK2 podría ser una buena alternativa en el ahorro de energía para la quema de ladrillos en comparación con lo reportado por Hinojosa-Ledesma y Velasco-Hurtado (2004). Además, la Tabla 19 compara los resultados obtenidos en este trabajo con los de Munguía-Guillen *et al* (2012) para cinco cocciones de ladrillos en tres hornos MK2 diferentes, ellos reportan (en algunos casos) mejores eficiencias de transferencia de calor que las obtenidas aquí para procedimientos de combustión similares; a partir de la información proporcionada por Munguía-Guillen *et al.* (2012), no es posible evaluar la razón de las diferencias en las eficiencias de transferencia de calor, pero pueden ser atribuibles a variables como el espaciado de los ladrillos, la formulación de los ladrillos, la técnica de alimentación de combustible, uso de ventilador, por ejemplo.

Tabla 18. Comparación energética del horno MK y el horno (HL) analizada por Hinojosa-Ledesma y Velasco-Hurtado (2004).

	MK		HL	
	(kcal)	(%)	(kcal)	(%)
<b>Energía total suministrada</b>	7,197,038.80	100	14,048,170.00	100
<b>Energía consumida en la cocción de ladrillos</b>	3,173,568.39	44.09	3,224,033.00	22.95
<b>Energía perdida</b>	4,023,470.41	55.91	10,824,137.00	77.05

Tabla 19. Comparación con los resultados reportados por Munguía –Guillen et al (2012).

	Toneladas de ladrillo por quema.	Energía suministrada (kcal/ton de ladrillo)	Ladrillos cocidos (%).
Horno 2 (San Miguel de Allende), quema 1.	16.2	358,509.00	60.0
Horno 1 (San Miguel de Allende), quema 2.	16.2	860,421.60	50.0
Horno 2 (San Miguel de Allende), quema 3.	20.5	358,509.00	50.0
Horno 2 (San Miguel de Allende), quema 4.	9.9	1,003,825.20	50.0
Horno 3 (Aguascalientes), quema 5.	39.0	1,386,234.80	90.0
Horno (El Refugio, León, México)	21.13	340,607.61	31.5

### 9.3 Pruebas de Resistencia a la Compresión

Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión de acuerdo a la norma NMX-C-404-ONNCCE (Tabla 20). La resistencia mínima de acuerdo a la norma mexicana es de 70 kg/cm<sup>2</sup>, por lo que podemos observar que solo los ladrillos de la parte inferior cumplen con la especificación.

Tabla 20. Resultados de la resistencia de los ladrillos de prueba

LOCALIZACIÓN	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )	TEMPERATURA (°C)
1 A (Primera cama sobre la puerta de alimentación)	102.75	980
1 P (Primera cama sobre la puerta de carga)	93.77	860
NB (Junto al termopar lado norte parte baja)	103.37	872
SB (Junto al termopar lado sur parte baja)	60.85	830
EB (Junto al termopar lado este parte baja)	76.77	868
OB (Junto al termopar lado oeste parte baja)	107.63	820
5 P (Cama 5 Junto a la puerta de carga)	106.31	990
NM (Junto al termopar lado norte parte media)	54.86	276
SM (Junto al termopar lado sur parte media)	59.94	719
EM (Junto al termopar lado este parte media )	43.78	680
OM (Junto al termopar lado oeste parte media)	40.59	369
11P (Cama 11 Junto a la puerta de carga)	31.85	410
11CH (Cama 11 Junto a la chimenea)	38.48	470
NA (Junto al termopar lado norte parte alta)	37.99	450
SA (Junto al termopar lado sur parte alta)	38.78	623
EA (Junto al termopar lado este parte alta)	43.55	559
OA (Junto al termopar lado oeste parte alta)	49.76	489
17A (Cama )	42.9	500
17P (Cama )	50.27	560
20A (Cama )	38.28	470
20P (Cama )	37.89	460
1 A (Primera cama sobre la puerta de alimentación)	102.75	980
1 P (Primera cama sobre la puerta de carga)	93.77	860

## 9.4 Simulación Numérica

La Simulación numérica presentada aquí no incluye la serie de corridas numéricas preliminares llevadas a cabo. Los resultados numéricos de validación no solo se comparan con las temperaturas experimentales, si no que se analizan para obtener información que no se puede conseguir experimentalmente.

### 9.4.1 Validación con Resultados Experimentales

Los resultados de la simulación numérica se compararon con las temperaturas de quema experimental, representada en este caso por la línea de referencia. Para calcular el error se calcula mediante el porcentaje de error medio absoluto PEMA (Hanke & Reitsch, 1996).

$$PEMA = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|valor\ real - predicción|}{valor\ real}}{n} \quad 9.1$$

La simulación fue ejecutada por un tiempo equivalente a 14 horas, 12 de las cuales representan el periodo experimental de alimentación de combustible al horno. Los cálculos de temperatura obtenidos son similares a los experimentales, con un error promedio de 9.8 %. Esto nos permite considerar que el modelo numérico es representativo de lo que ocurre experimentalmente durante el calentamiento del horno.

La Figura 48 muestra el comportamiento térmico del horno, donde se comparan los resultados numéricos y experimentales, en este caso se ejemplifica con el punto cardinal este. La comparación de la temperatura tomada en la quema experimental en línea continua y la temperatura registrada en la simulación, bajo las condiciones experimentales de quemas dadas y las suposiciones del modelo. La totalidad de comparaciones se incluye en el anexo C.

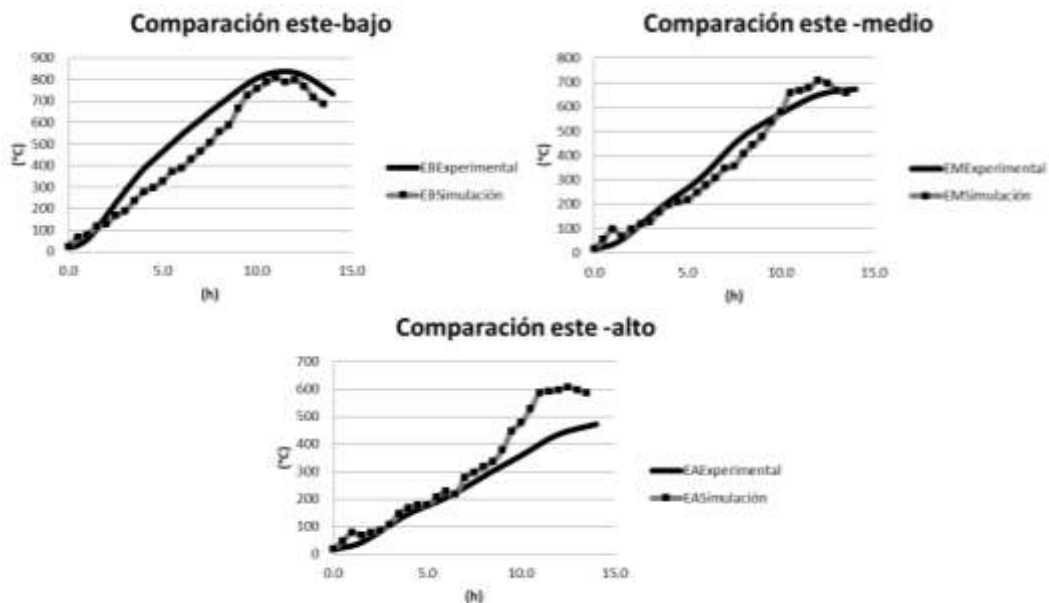


Figura 48. Graficas de la validación de temperaturas lado Este

### 9.4.2 Comportamiento Térmico Interno del Horno MK

Los resultados experimentales muestran las temperaturas en la frontera del volumen de control, es decir, en la pared interna y en 12 posiciones únicamente. El software, sin embargo, provee información térmica del horno que no puede ser obtenida en campo: comportamiento térmico de gases y sólido en todo el volumen de control, es decir, dentro del horno y en la frontera del mismo, información que puede ser utilizada para la toma de decisiones de mejora. Estos puntos se denominan ubicaciones de los monitores de temperatura en la simulación. La Figura 49 muestra el comportamiento térmico en la pared interna, observando el incremento de temperatura gradual que ocurre en el horno completo a lo largo del tiempo y en el caso de la imagen a las 12 horas de simulación. El calor entra por toda la base del horno, haciendo representativa la ubicación del combustible que ocurre en una quema real. El aire entra por la puerta de alimentación (frente) y sale por la chimenea (arriba a la derecha). Es notable la tendencia hacia mayores temperaturas del lado de la chimenea, lo que valida la asimetría térmica interior del horno, tal como fue ya reportada (Lara-Mireles, et al., 2020). Además, la simulación numérica nos muestra las temperaturas de los arcos fijos de soporte, las cuales no pueden ser medidas experimentalmente porque se pondría en riesgo la integridad estructural de los mismos (de los termopares). Es notable que al final de las 12 horas los arcos completos muestran una temperatura uniforme y muy alta, arriba de los 800 °C, lo que indicaría que si fueran originalmente de ladrillo crudo quedarían perfectamente bien cocidos.

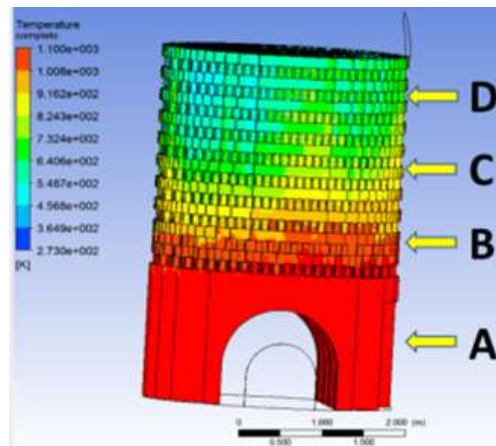


Figura 49. Comportamiento térmico en el interior a las 12 horas.

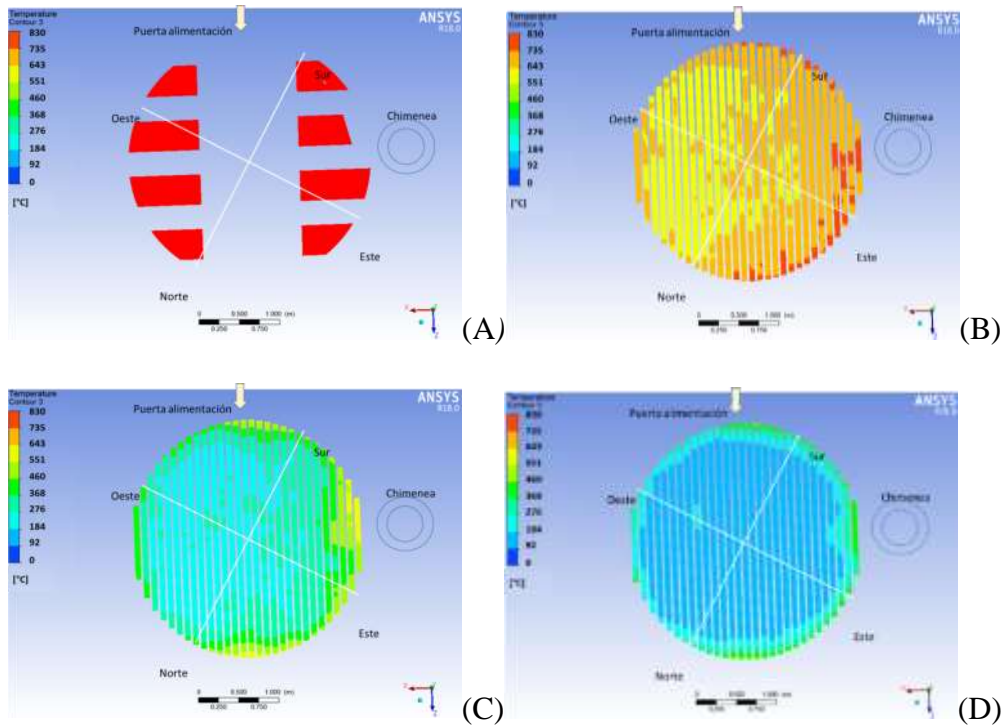


Figura 50. Comportamiento térmico visto en forma de rebanada a las 12 horas

La Figura 50 complementa la información numérica con cortes horizontales del horno en los niveles indicados por la Figura 49 a las 12 horas de simulación. En el nivel A la temperatura es homogénea en toda la base de los arcos de soporte, mientras que el nivel B muestra una tendencia hacia mayores temperaturas del lado de la chimenea. Este comportamiento lo confirman los cálculos numéricos mostrados gráficamente en los niveles C y D. Pero, además, es notable observar que las zonas cercanas a la pared están más calientes que la parte interior del horno (algo complicadísimo de medir sin dañar o acomodar experimentalmente los ladrillos internos). Es decir, la pared circular provoca que el acomodo de ladrillos no pueda ajustarse al contorno interior circular del horno, lo que obliga a dejar espacios vacíos entre los ladrillos y la pared. En las camas superiores estos espacios son mucho más grandes que el espaciado entre ladrillo y ladrillo, lo que da lugar a una zona de libre paso de los gases calientes de combustión, lo que a su vez genera mayores temperaturas cerca de la pared.

En la Figura 51 se puede apreciar la distribución de temperaturas en diferentes momentos.

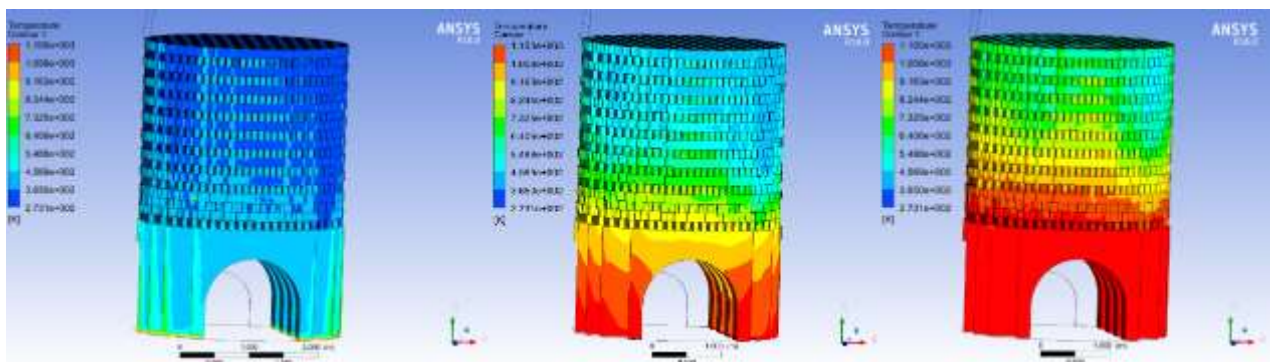


Figura 51. Comportamiento de la temperatura alcanzada en distintos momentos.

### 9.4.3 Comportamiento del Aire Caliente

La Figura 52 muestra algunas líneas de corriente del aire a diferentes tiempos de simulación (visto el horno de frente). Las tonalidades de las líneas se mantienen entre verde y azul, excepto junto a las paredes, indicando un pequeño y relativo incremento de velocidad de gases con respecto al tiempo. Se nota una relación del aumento de la temperatura en las zonas de mayor velocidad del aire, donde se observa una tonalidad amarilla, que coincide con la orilla del horno, validando los resultados de temperatura mostrados en la Figura 53.

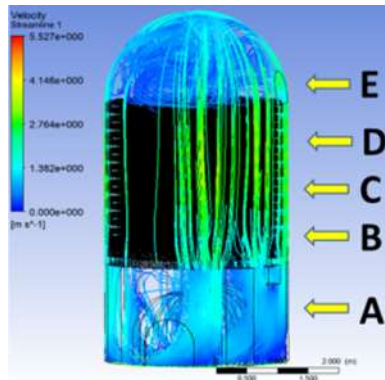


Figura 52. Comportamiento del fluido en el interior del horno durante la simulación a las 12 horas.

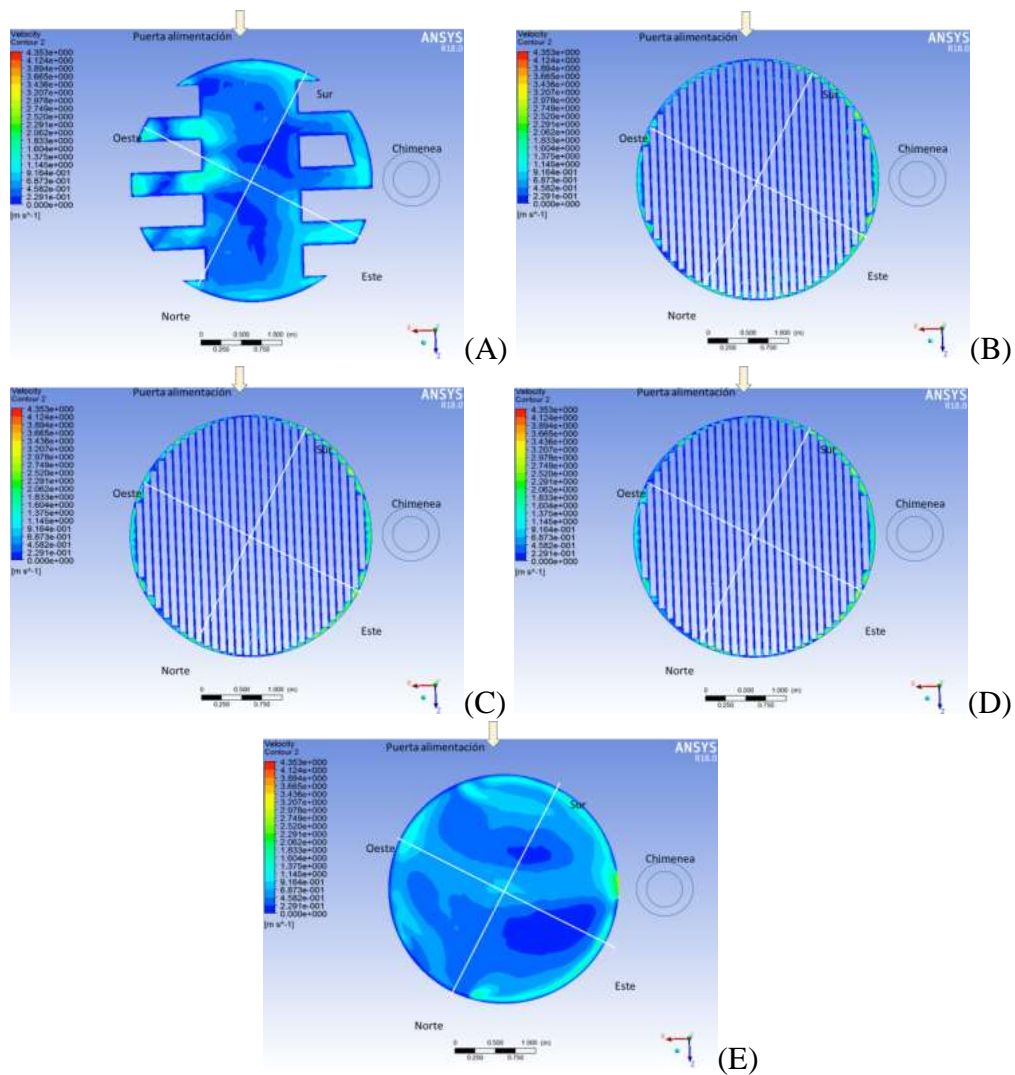


Figura 53. Comportamiento del fluido visto en forma de rebanada a las 12 horas

Cálculos basados en los resultados mostrados en la Figura 53 muestran que el flujo másico de gases de combustión se desplazan mayormente por la orilla del horno. Este comportamiento prueba de nuevo la influencia del acomodo de los ladrillos para el buen flujo del aire caliente. La Tabla 21 muestra los resultados del flujo de los gases alrededor del horno respecto al área interna; 75 % del aire que entra al horno por la puerta de alimentación de combustible fluye por la orilla del horno. El aire caliente incrementa más la temperatura en la periferia del horno que en el centro, zona donde en realidad se desea que la temperatura aumente más. El rediseño debe incluir menores espacios junto a la pared mientras que mayores espacios entre ladrillos.

Tabla 21. Flujo de los gases

	(kg/s)	proporción
Orilla del horno	0.32	0.75
Parte central del fluido	0.10	0.25

#### 9.4.4 Perfil Interno de Presión

Las imágenes mostradas en la Figura 54 nos muestran que las presiones más altas se encuentran en la parte alta del horno, incrementándose gradualmente desde presiones negativas en la base hasta presiones positivas en la parte superior. Es el efecto del tiro de aire de la chimenea, en conjunto con la geometría abovedada del horno. Junto a la chimenea se encuentra la presión mayor calculada numéricamente, justificando de nuevo el flujo de aire mayor que se desplaza en la zona. Sin embargo, contrario a lo que ocurre con las temperaturas, las presiones son muy simétricas, es decir, no importando el punto cardinal, si se respeta el nivel, la presión es constante.

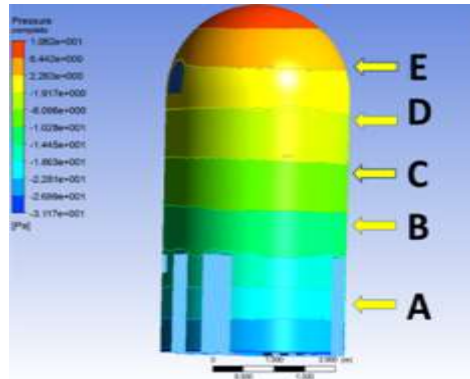


Figura 54. Comportamiento de los niveles de presión (Pa) interior del horno durante la simulación a las 12 horas.



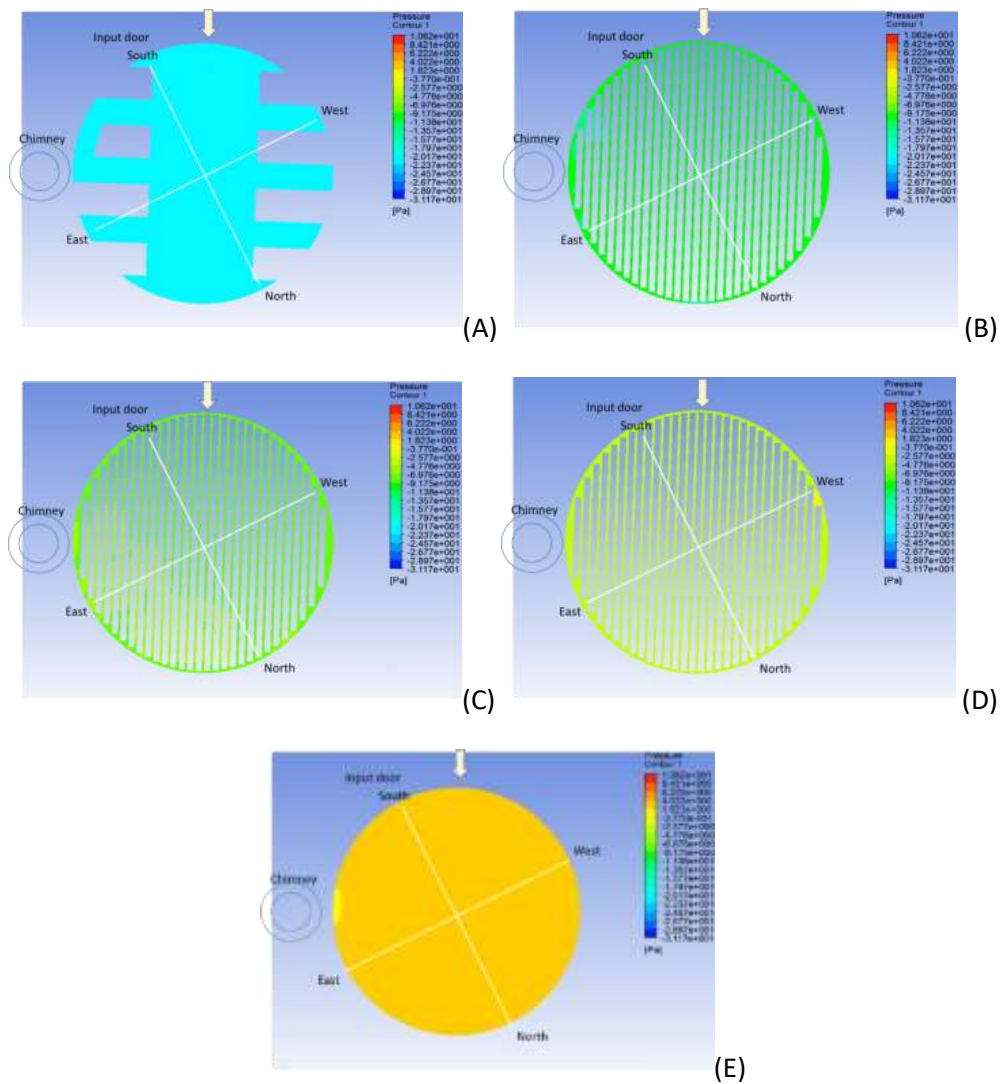


Figura 55. Comportamiento de los niveles de presión (Pa) interior del horno visto en forma de rebanada a las 12 horas.

### 9.4.5 Perfiles de Temperatura en el Centro del Horno

En fechas recientes (enero de 2019) se realizó una tercera quema experimental en el horno MK2, con la diferencia principal de que se pudieron incluir un mayor número de termopares. Esto es de utilidad para corroborar algunos datos que se obtuvieron en la simulación numérica. La Figura 57 muestra el perfil de la parte central del horno que corrobora lo mostrado en la Figura 50, en el centro en la parte media y alta presentan temperaturas inferiores a las horillas de la configuración de los ladrillos, aunque posteriormente (después de varias horas) se homogeniza la temperatura. El termopar de la parte central y alta (CA) fue dispuesto verticalmente sostenido de la cúpula, lo que ayuda a mantener esencialmente igual el acomodo de ladrillos para fines comparativos.

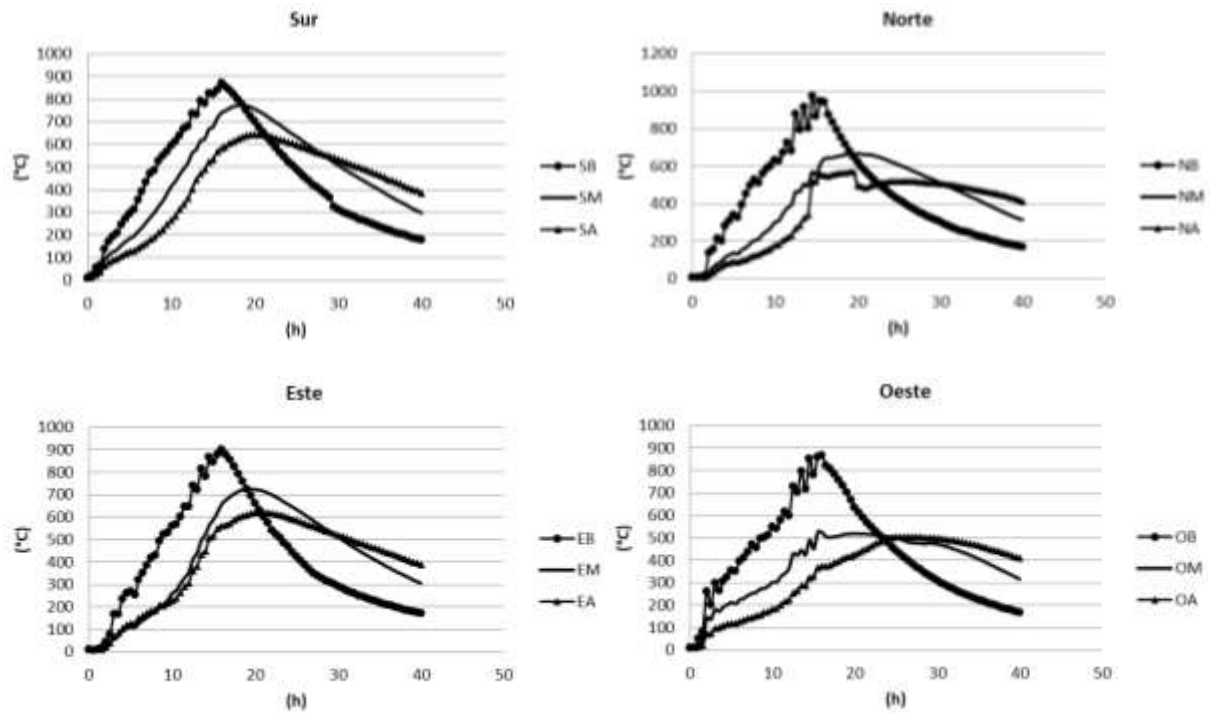


Figura 56. Comportamiento de las temperaturas del horno, quema 3.

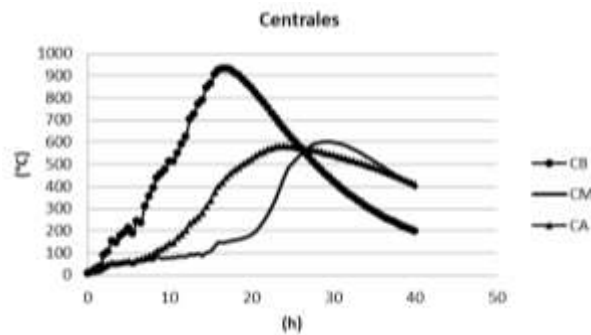


Figura 57. Temperaturas alcanzadas en la parte central del horno.

## 9.5 Diseño Experimental

En la sección anterior se hizo una descripción del diseño de experimental. En la Tabla 11 se describen las variables o factores que se consideraron como importantes y que fueron codificados como A, B, C, D y E. En la Tabla 22 se muestra el diseño experimental seleccionado y también los resultados de las simulaciones de cada modelo.

Tabla 22. Alias para un diseño de experimentos  $2^5$  fraccionado a 1/4.

Notación de Yates	Corrida	A	B	C	D	E	Temperatura promedio (°C)	Desviación estándar
		X1	X2	X3	X4	X5		
(1)	1	-1	-1	-1	-1	1	642	175
a	2	1	-1	-1	1	-1	573	142
b	3	-1	1	-1	1	1	589	240
ab	4	1	1	-1	-1	-1	530	121
c	5	-1	-1	1	-1	-1	529	123
ac	6	1	-1	1	1	1	701	235
bc	7	-1	1	1	1	-1	598	171
abc	8	1	1	1	-1	1	524	121

Generadores del diseño D= -AB, E= AC

Tabla 23. Cambios para un diseño de experimentos 2<sup>5</sup> fraccionado a ¼ en un horno MK2.

	Cambios en la simulación respecto al modelo validado	Máxima temperatura alcanzada (promedio 12 termopares)(°C)	% diferencial
Modelo validado		531	0 %
Modelo 1 de 8 (1)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acomodo de ladrillos propuesto (40% más cerrado). Aire forzado a la entrada (0.265 m/s)</li> </ul>	642	20 %
Modelo 2 de 8 (a)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dos salidas en lugar de una sola.</li> </ul>	573	7.9 %
Modelo 3 de 8 (b)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Arco Grande (33% más área).</li> <li>Aire forzado a la entrada (0.265 m/s).</li> </ul>	589	10.9 %
Modelo 4 de 8 (ab)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dos salidas en lugar de una sola.</li> <li>Arco Grande (33% más área).</li> <li>Acomodo de ladrillos propuesto (40% más cerrado).</li> </ul>	530	-0.1 %
Modelo 5 de 8 (c)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Acomodo de ladrillos propuesto (40% más cerrado).</li> <li>Puerta de alimentación de combustible grande (120% más área).</li> </ul>	529	-0.3 %
Modelo 6 de 8 (ac)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dos salidas en lugar de una sola.</li> <li>Acomodo de ladrillos propuesto (40% más cerrado).</li> <li>Aire forzado a la entrada (0.265 m/s).</li> </ul>	701	32.0 %
Modelo 7 de 8 (bc)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Arco Grande (33% más área).</li> <li>Puerta de alimentación de combustible grande (120% más área).</li> </ul>	598	12.6 %
Modelo 8 de 8 (abc)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dos salidas en lugar de una sola.</li> <li>Arco Grande (33% más área).</li> <li>Puerta de alimentación de combustible grande (120% más área).</li> <li>Acomodo de ladrillos propuesto (40% más cerrado).</li> <li>Aire forzado a la entrada (0.265 m/s).</li> </ul>	524	-1.3 %

### 9.5.1 ANOVA de pruebas experimentales para la temperatura promedio en el horno.

Se realizó el análisis de la varianza (ANOVA) en el programa Minitab. Se enviaron al error las variables A, C y la interacción BD por no presentar influencia en el modelo. Se consideran variables no significativas aquellas cuyo valor p es mayor al nivel de significancia, en este caso 0.05, quedando como a continuación se muestra:

Tabla 24. ANOVA para la temperatura promedio en el horno (mejor ANOVA)

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrados medios	f	p
<b>B: Arcos</b>	5,408.0	1	5,408.0	74.94	0.003
<b>D:Acomodo</b>	7,080.5	1	7,080.5	98.11	0.002
<b>E: Convección</b>	6,384.5	1	6,384.5	88.47	0.003
<b>B*E</b>	7,564.5	1	7,564.5	104.82	0.002
<b>Error residual</b>	216.5	3	72.17		
<b>Total</b>	26,654.0	7			
	$R^2$	99.19 %	$R^2$ adj.	98.10 %	

El mejor ANOVA es aquel en el que los efectos que claramente no son significativos se eliminan del análisis en la primera ronda y se mandan al error. Después de la primera ronda se revaloran los términos que estaban en una situación dudosa.

La Hipótesis sobre la igualdad de las medias de la temperatura se expresan de la siguiente manera:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_k = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0$$

Donde  $\tau_i$  representa los efectos de los tratamientos y se definen como desviaciones de la media global.

Se manejó un nivel de confiabilidad de 0.95, por lo que el criterio de rechazo de la hipótesis nula ( $H_0$ ) es 0.05 (rechazamos la hipótesis si al menos un valor p sea mayor a 0.05. Para la prueba f entre mayor sea el valor existe una mayor certeza de que los factores o sus interacciones tienen un efecto significativo en la explicación del modelo.

El coeficiente de determinación y de determinación ajustado ( $R^2$  y  $R^2$ adj) son dos de los estadísticos más útiles para medir la calidad global de un modelo, ambos comparan la variabilidad explicada por el modelo frente a la variación total. Se recomienda un coeficiente de determinación ajustado de al menos 70 % para fines de predicción, obviamente son deseables valores próximos al 100 % (Gutiérrez & De La Vara, 2008).

#### Verificación de los supuestos del modelo

La grafica de probabilidad normal tiene las escalas de tal manera que, si los residuos siguen una distribución normal, al graficarlos tienden a adecuarse a una línea recta. Esto se puede observar en la Figura 58 a.

Para verificar el supuesto de la varianza constante, que es graficando los predichos contra los residuos, si los puntos se comportan de manera aleatoria (sin patrón claro o contundente) entonces es señal de que se cumple el supuesto. Esto se puede observar en la Figura 58 b.

El supuesto de independencia puede verificarse si se grafica el orden en que se colectó un dato contra el residuo correspondiente. De esta manera si se detecta una tendencia o patrón no aleatorio claramente definido existe evidencia de una correlación entre los errores y, por lo tanto, el supuesto de independencia no se cumple. Para el caso de esta experimentación se cumple el supuesto de independencia Figura 58 c.

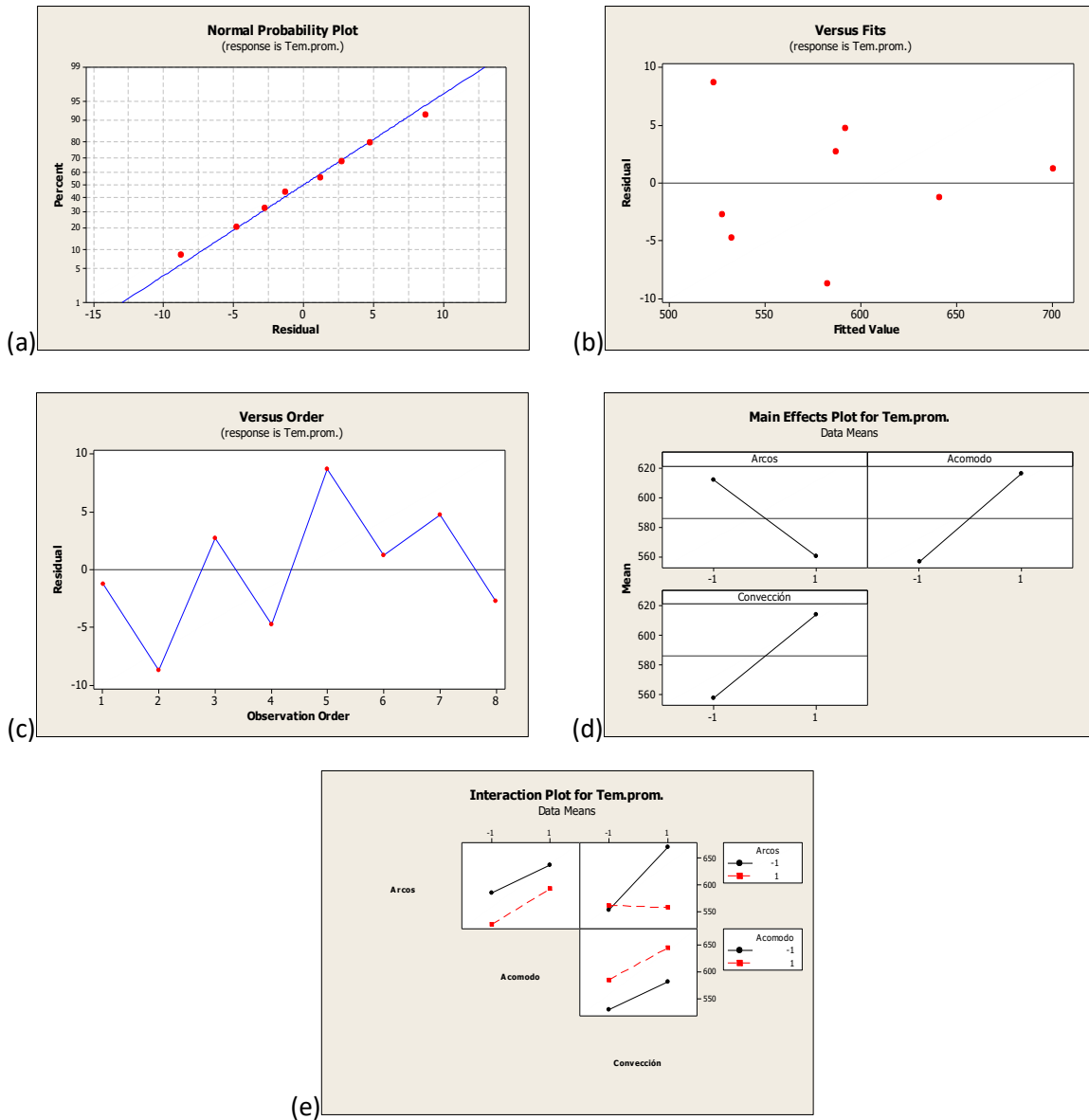


Figura 58. Graficas de la primera corrida experimental para verificación de los supuestos.

De acuerdo a las figuras anteriores se concluye que no hay problemas en los supuestos de varianza constante y normalidad.

### 9.5.2 ANOVA de pruebas experimentales para la desviación estándar de las temperaturas.

Para la segunda variable de respuesta (la desviación estándar de las temperaturas), también se realizó el ANOVA con los resultados que se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25. ANOVA para la desviación estándar de las temperaturas.

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrados medios	f	p
D:Acomodo	8,128.1	1	8,128.1	17.48	0.014
E: Convección	5,460.1	1	5,460.1	11.75	0.027
D*E	1,485.1	1	1,485.1	3.19	0.148
Error residual	1,859.5	4	464.9		
Total	16,939.9	7			
	$R^2$	89.02 %	$R^2$ adj.	80.78 %	

Apoyándonos en los resultados del valor p estos deben ser menores a 0.05. Si este es el caso se rechaza la hipótesis nula y podemos concluir que existe una diferencia significativa entre los tratamientos. Observamos como la interacción D\*E resultó sin influencia en el modelo. Los valores de f de los factores D\* E respaldan la evidencia de que estos factores tienen una influencia significativa en el modelo y la variable de respuesta.

Los valores de  $R^2$  indica que el 89.02 % de la variabilidad es atribuida a los factores incluidos, respaldado a la vez por el valor de  $R^2$ adj.

Para la cual se tienen como variables significativas D y E.

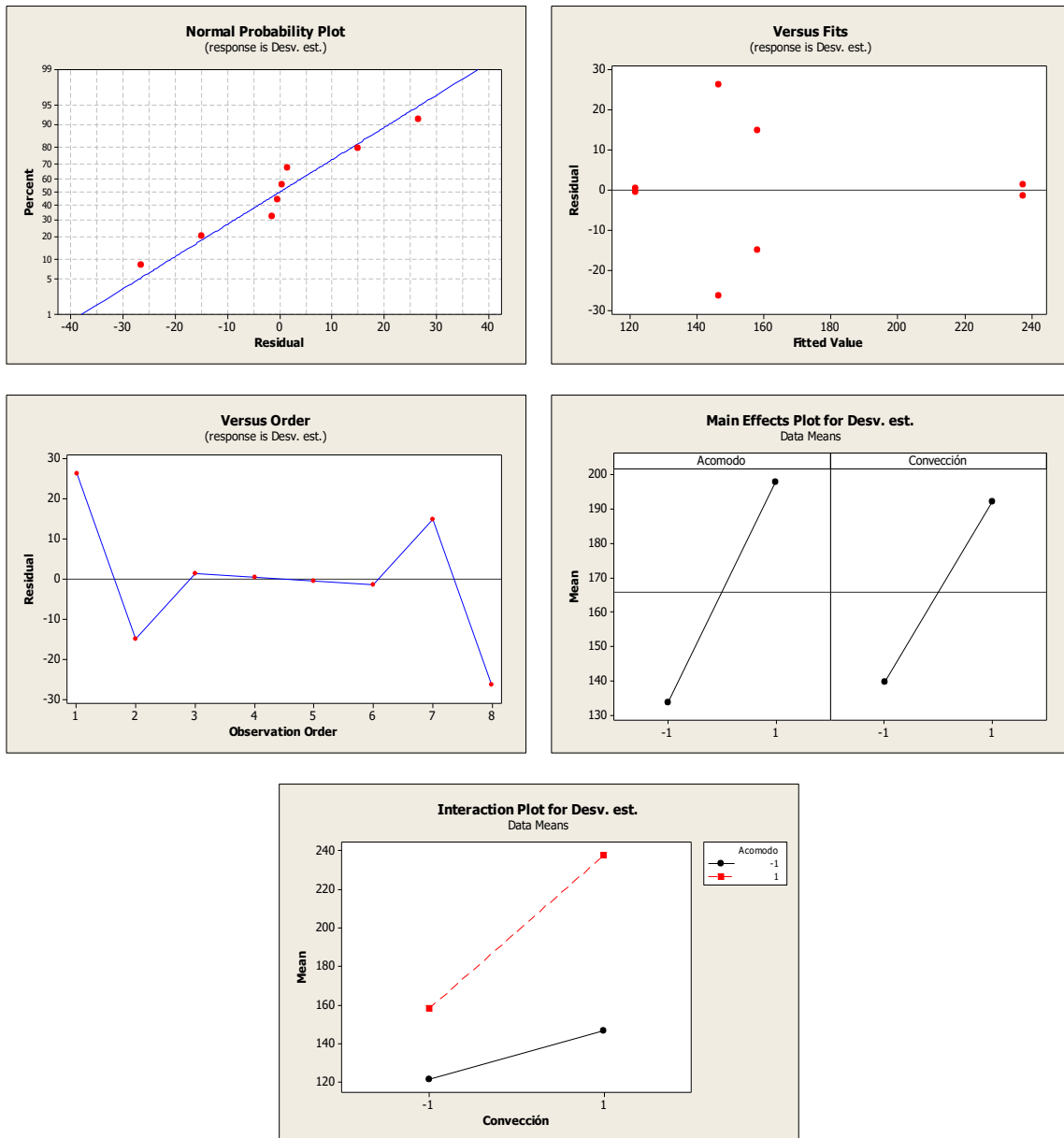


Figura 59. Graficas de residuos y efectos principales. (Para la tercera variable de salida)

### 9.5.3 Prueba de Falta de Ajuste

Se corre un modelo  $2^3$  completo con las variables que resultaron significativas en la etapa anterior (cribado), con punto al centro para prueba de falta de ajuste. La variable chimenea se fijó como está de manera original y la variable puerta de alimentación se fijó en su valor intermedio.



Tabla 26. ANOVA para la temperatura promedio en el horno.

Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrados medios	f	p
B: Arcos	5,202.0	1	5,202.0	68.0	0.014
D:Acomodo	6,962.0	1	6,962.0	91.01	0.011
E: Convección	6,384.5	1	6,384.5	83.46	0.012
B*E	8,192.0	1	8,192.0	107.08	0.009
D*E	18.0	1	18.0	0.24	0.676
Curvatura	3,173.4	1	3,173.4	41.48	0.023
Error residual	153.0	2	76.5		
Total	30,084.9	8			

	$R^2$		$R^2$ adj.	
		99.49 %		97.97 %

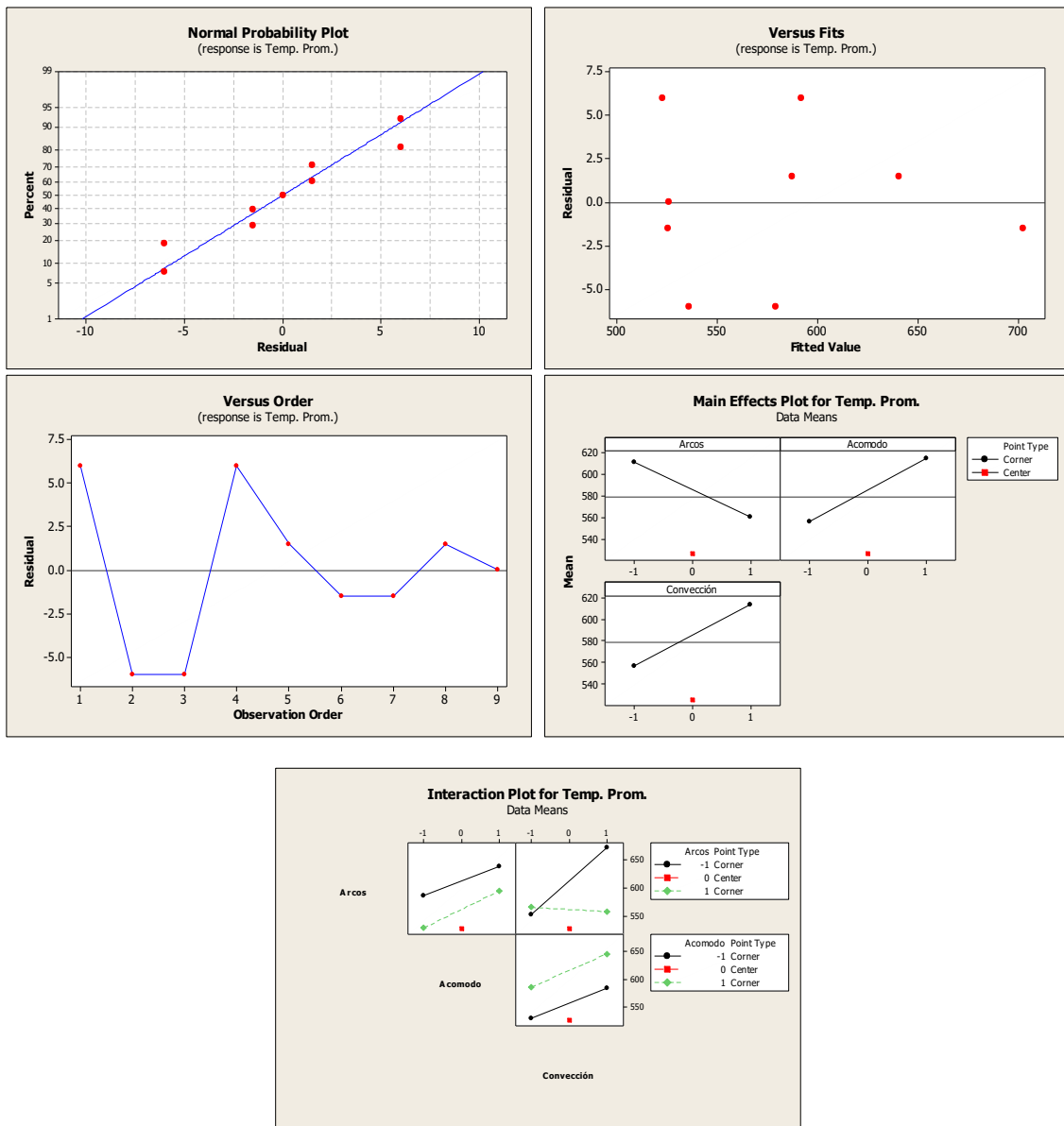


Figura 60. Graficas de residuos y efectos principales. (Para prueba de falta de ajuste)

#### 9.5.4 Optimización del Modelo

La metodología de superficie de respuesta implica tres aspectos: diseño, modelo, y técnica de optimización. Es típico considerar más de una variable (características) para lograr productos con mejor calidad y propiedades. La importancia de la optimización simultánea radica en que, por lo general, los óptimos individuales no son las mismas combinaciones de los factores de control. Esto hace necesario buscar una solución compromiso, donde todas las variables tengan un nivel satisfactorio. A esta solución compromiso se le llama óptimo simultáneo.

Para la búsqueda del punto óptimo tenemos que considerar que se tienen que optimizar dos variables de respuesta de manera simultánea. Por lo antes expuesto se busca una solución compromiso, donde las dos variables tengan un nivel satisfactorio (Gutiérrez & De La Vara, 2008). Para esto podemos usar el método de la función de deseabilidad.

El diseño de composición central (DCC) es un diseño para superficie de respuesta, utilizado con frecuencia debido a su flexibilidad. Se puede construir a partir de un diseño factorial completo  $2^k$  o fraccionado agregando puntos sobre los ejes o al centro.

El número de corridas al centro y la distancia de los puntos axiales ( $\alpha$ ) deben escogerse de manera adecuada, dependiendo de las propiedades que se quieren en el DCC. Para esta investigación:

$$\alpha = F^{\frac{1}{4}}$$

Donde F es el número de puntos en la parte factorial.

Se procede a hacer un diseño de composición central con las variables que en su momento tuvieron efectos significativos B, D y E (ver Tabla 11). El modelo es el siguiente

Tabla 27. Diseño de composición central.

Orden	B	D	E	Resultado	
	X1	X2	X3	Y <sub>1</sub> (temperatura promedio en todo el horno)	Y <sub>2</sub> (desviación estándar de las temperaturas de los termopares)
1	-1	-1	-1	529	123
2	1	-1	-1	530	121
3	-1	1	-1	573	142
4	1	1	-1	598	171
5	-1	-1	1	642	175
6	1	-1	1	524	121
7	-1	1	1	701	235
8	1	1	1	589	240
9	-1.68	0	0	584	183
10	1.68	0	0	578	180
11	0	-1.68	0	574	187
12	0	1.68	0	601	197
13	0	0	-1.68	531	154
14	0	0	1.68	621	224
15	0	0	0	530	118
16	0	0	0	530	118
17	0	0	0	530	118
18	0	0	0	530	118
19	0	0	0	530	118
20	0	0	0	530	118
21	0	0	0	530	118
22	0	0	0	530	118
23	0	0	0	530	118

Los niveles que se manejaron son los presentados en la Tabla 28.

Tabla 28. Descripción de los niveles de los factores para diseño de composición central.

	<b>Factores</b>	<b>Códigos</b>	<b>Niveles</b>	<b>Unidades</b>
<b>B</b>	<b>Arcos</b>	-1(nivel bajo)	140 ancho por 46.5 alto	cm
		0 (nivel medio)	147.5 ancho por 54.5 alto	
		1(nivel alto)	155 ancho por 61.5 alto	
<b>D</b>	<b>Acomodo ladrillos</b>	-1(nivel bajo)	Separación 2.0 entre ladrillos en las tres últimas camas	cm
		0 (nivel medio)	2.4	
		1(nivel alto)	Separación 2.8 entre ladrillos en las tres últimas camas	
<b>E</b>	<b>Convección</b>	-1(nivel bajo)	0.165	m/s
		0 (nivel medio)	0.215	
		1(nivel alto)	0.265	

Los valores 1 y -1 son los valores de la tabla 11, el nivel 0 es el intermedio entre estos. En cuanto a los resultados del diseño de composición central (DDC) se corrió el análisis de la varianza con los siguientes resultados:

Para la variable de salida  $Y_1$  (temperatura promedio en todo el horno)

Tabla 29. ANOVA para la temperatura promedio en el horno DDC.

<b>Fuente</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Gl</b>	<b>Cuadrados medios</b>	<b>f</b>	<b>p</b>
<b>B: Arcos</b>	3,356.2	1	3,356.2	12.67	0.003
<b>D:Acomodo</b>	5,798.6	1	5,798.6	21.89	0.000
<b>E: Convección</b>	10,427.1	1	10,427.1	39.36	0.000
<b>B*B</b>	5,154.5	1	5,154.5	20.01	0.001
<b>D*D</b>	6,644.5	1	6,644.5	25.36	0.000
<b>E*E</b>	4,324.3	1	4,324.3	16.32	0.001
<b>B*D</b>	112.5	1	112.5	0.42	0.526
<b>B*E</b>	8,192.0	1	8,192.0	30.93	0.000
<b>D*E</b>	18	1	18	0.07	0.798
<b>Error residual</b>	3,443.7	13	264.9		
<b>Total</b>	47,471.3	22			
	$R^2$	92.75 %	$R^2$ adj.	87.72 %	

Para la variable de salida  $Y_2$  (desviación estándar de las temperaturas de los termopares).

Tabla 30. ANOVA para la desviación estándar de las temperaturas DDC.

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrados medios	f	p
B: Arcos	53.6	1	53.6	0.14	0.713
D:Acomodo	5,235.0	1	5,235.0	13.51	0.003
E: Convección	8,057.6	1	8,057.6	21.19	0.000
B*B	4,506.2	1	4,506.2	12.25	0.004
D*D	6,804.8	1	6,804.8	18.13	0.001
E*E	6,210.4	1	6,210.4	16.33	0.001
B*D	1,012.15	1	1012.15	2.66	0.127
B*E	722.0	1	722.0	1.9	0.191
D*E	1,512.5	1	1,512.5	3.98	0.067
Error residual	4,942.7	13	380.21		
Total	38,957.3	22			
	$R^2$	87.31 %	$R^2$ adj.	78.53 %	

El siguiente paso es aplicar el método de función de deseabilidad (Gutiérrez & De La Vara, 2008). De acuerdo a los resultados se supone que las variables de respuesta dependen de tres factores B, D y E. Los mejores modelos se muestran en la Tabla 31. El modelo se evalúa por medio de Minitab® se introducen valores objetivo en base a los resultados inferiores y superiores de los resultados (Tabla 32).

Tabla 31. Modelos de regresión.

Coefficiente	Y1	Y2
$\hat{\beta}_0$ (const.)	529.976	118.554
$\hat{\beta}_1(x_1)$	-15.676	0
$\hat{\beta}_2(x_2)$	20.606	19.391
$\hat{\beta}_3(x_3)$	27.632	24.290
$\hat{\beta}_{11}(x_1^2)$	18.265	17.118
$\hat{\beta}_{22}(x_2^2)$	20.563	20.831
$\hat{\beta}_{33}(x_3^2)$	16.497	19.770
$\hat{\beta}_{12}(x_1x_2)$	0	0
$\hat{\beta}_{13}(x_1x_3)$	-32.0	0
$\hat{\beta}_{23}(x_2x_3)$	0	13.750

Tabla 32. Valores objetivo en base a resultados de experimentación.

	Inferior	Superior
Y1	580	800
Y2	100	250

El software nos arroja la solución óptima:

$$B = -1.51191$$

$$D = -0.118915$$

$$E = 0.730929$$

Y sustituyendo en las ecuaciones los resultados son:

$Y_1 = 658$ ,  $Y_2 = 183$

### 9.5.6 Análisis por Simulación Numérica

Desarrollo de modelo geométrico virtual 3D

Se adecuo el modelo numérico de acuerdo a los resultados de la optimización, lo cual implicó ajustar el ancho de los arcos, el acomodo de ladrillos en las últimas tres camadas de cambio de 2.8 a 2.4 cm y el valor del aire forzado a 0.2515 m/s.

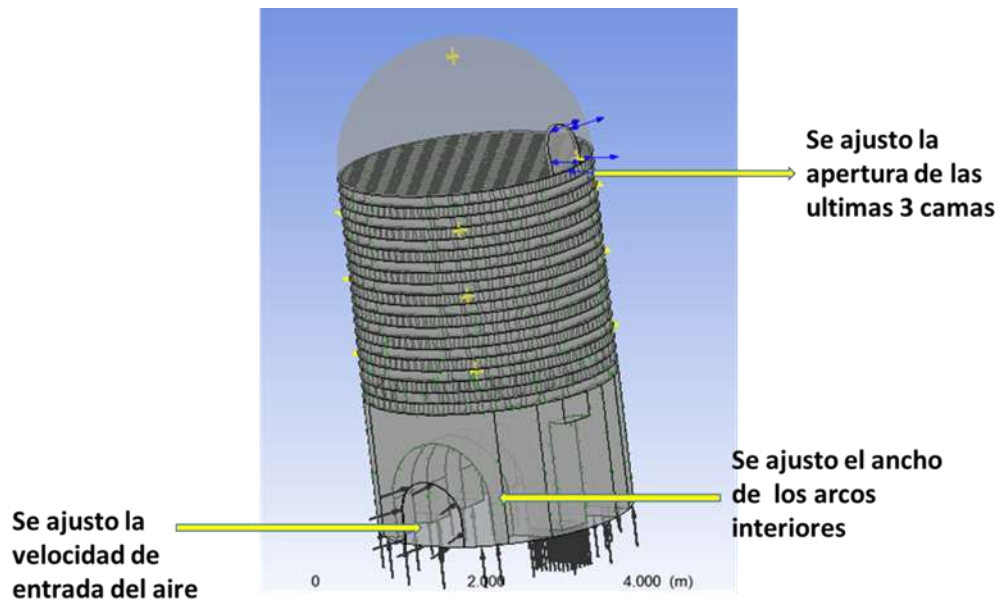


Figura 61. Variables que se ajustaron de acuerdo al modelo óptimo

Las condiciones iniciales y de frontera restantes se respetaron de acuerdo al modelo original.

Los resultados de la simulación en cuanto a las variables de respuesta es el siguiente:

$Y_1$  (temperatura promedio en todo el horno) = 649, el segundo mejor comparado con los modelos que se corrieron.

$Y_2$  (desviación estándar entre los termopares) = 175,

En los modelos donde se alcanza mayor temperatura promedio, también es mayor la desviación estándar. Es por ello que el modelo que nos arrojó la solución óptima no llega a superar a algunos de los otros modelos en las dos variables de respuesta. En la Figura 62 se muestra el comportamiento térmico del modelo conforme va avanzando el tiempo de la simulación.

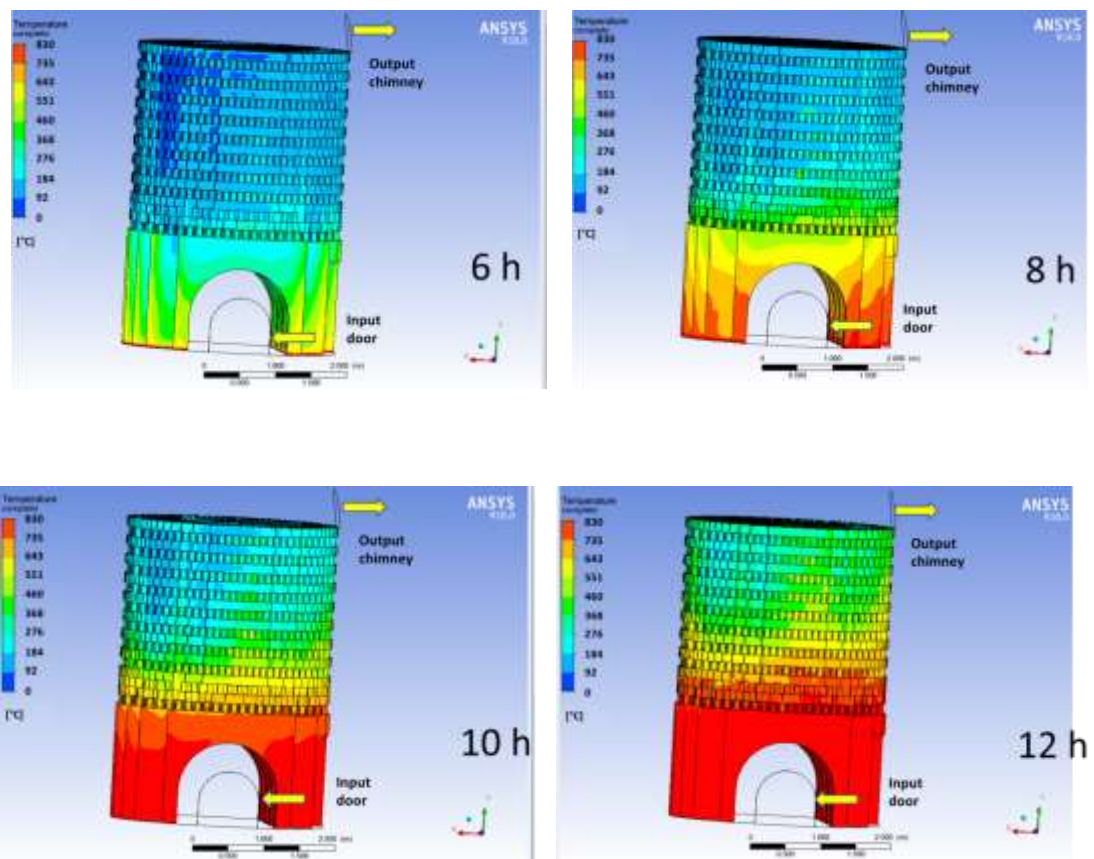


Figura 62. Imágenes del comportamiento térmico durante la simulación numérica)

## Conclusiones

En este trabajo se estudió el proceso de cocción de ladrillo artesanal en un horno MK, comenzando con quemas experimentales, para posteriormente simular numéricamente el proceso y finalmente encontrar una mejora con la ayuda de la simulación y el diseño de experimentos.

### Quema experimental

De la quema experimental se obtienen los perfiles de temperatura del horno. De acuerdo a estos, se alcanzan temperaturas máximas por arriba de 800 °C, pero estas temperaturas solo se consiguen en la parte inferior donde los ladrillos están más expuestos al calor generado por la combustión. Además, las temperaturas, tomando como referencia los puntos cardinales del horno, no son homogéneas ya que se alcanzan mayores temperaturas en los puntos sur y este, no así en los puntos oeste y norte. Al no tener un comportamiento simétrico la posibilidad de simular solo una fracción del horno quedó de lado. En resumen, de los experimentos concluimos que:

- Se alcanzan temperaturas máximas de alrededor de 800 °C, pero solo en la parte inferior del horno.
- Las temperaturas medidas en diferentes orientaciones del horno no son homogéneas.
- La simulación de una fracción del horno no sería representativa, debe simularse el horno completo.

### Pruebas de resistencia a la compresión

En base a las pruebas de resistencia a la compresión aplicadas a ladrillos colocados de forma estratégica, se puede observar que no todos alcanzan la resistencia mínima que exige la norma mexicana NMX-404-ONNCCE (70 kg /cm<sup>2</sup>). A partir de estos resultados se concluye que:

- Los ladrillos que alcanzan o sobrepasan la resistencia mínima están localizados en la zona baja donde sabemos que las temperaturas alcanzaron los 800 °C.
- Se deben buscar temperaturas entre 800 y 1,000 °C como mencionan otros autores (Martínez, et al., 2002), (Corzo, 2013), a lo largo y ancho de todo el horno.

### Análisis energético

Del análisis energético se puede deducir como es repartida toda la energía que es suministrada al horno.

- La energía aprovechada para la cocción de los ladrillos fue el 44.09 %.
- La pérdida de energía que se da a través de la pared del horno (3.89 %) es relativamente pequeña, lo cual dio pie a la decisión de no incluir el muro exterior en la simulación y considerarlo adiabático.
- La energía consumida en el calentamiento de los arcos fijos fue del 18.53 %. Por lo tanto es necesario considerar la opción de que los arcos sean armados con ladrillo crudo para aprovechar esa energía en cocerlos.



## Simulación numérica

La simulación numérica aporta un modelo numérico validado del proceso de cocción de ladrillo artesanal en un horno MK para poder experimentar posteriormente, muestra cual es el comportamiento interno del horno (lo cual es muy difícil de observar de manera experimental), y provee información importante del comportamiento de los gases de combustión. A partir de la simulación numérica se encontró que:

- Aproximadamente el 75 % del flujo de los gases de combustión circulan por el espacio entre la pared y los ladrillos acomodados, por lo tanto hace ver la importancia del acomodo de ladrillos para redirigir el flujo de los gases hacia el interior, entre los espacios inter ladrillo.
- La simulación también nos muestra que es notable la tendencia a mayores temperaturas del lado donde está localizada la chimenea, lo cual fue también observado experimentalmente.
- La temperatura que se alcanza en los arcos de soporte (arriba de 800 °C) es muy alta. Si los arcos de soporte fueran armados con ladrillo crudo quedarían perfectamente cocidos.

## Diseño experimental

El diseño experimental, aplicado a la simulación numérica, permitió obtener un modelo numérico optimizado (de acuerdo a las variables que se tomaron en cuenta).

- Se determinaron como factores importantes y que influyen en las variables de salida: tamaño de los arcos de soporte, la velocidad de ascenso de los gases, y el acomodo de los ladrillos dentro del horno.
- El modelo optimizado entrega temperaturas promedio de 658 °C, con una desviación estándar de 183, la cual muestra una mejora respecto al promedio de la quema experimental (531 °C).
- El modelo optimizado se simuló obteniendo resultados de 649 °C, con una desviación estándar de 175.
- El modelo 7 alcanza temperaturas promedio de 701 °C, con un valor de desviación estándar de 235.

Se comprueba la hipótesis planteada, es decir, se logra mediante una configuración adecuada (de los factores que influyen en el proceso) alcanzar mayores temperaturas y una mejor homogeneidad de temperatura dentro del horno, esto mediante la aplicación de un modelo de simulación numérica mediante el entendimiento de la transferencia de calor y el flujo de fluidos dentro del horno y la aplicación del diseño experimental.

## ANEXO A

### Acomodo de los ladrillos

La tabla nos muestra la cantidad de ladrillos por cama, así como la cantidad total de ladrillos que se introdujeron al horno. En las imágenes siguientes se muestra como fue el acomodo de ladrillos.

Tabla A1. Cantidad de ladrillos por cama.

Cantidad de ladrillos por cama			
Quema 1		Quema 2	
Cama	Cantidad (pzas.)	Cama	Cantidad (pzas.)
1	206	1	202
2	258	2	252
3	260	3	259
4	259	4	252
5	258	5	254
6	256	6	260
7	259	7	258
8	261	8	256
9	258	9	255
10	259	10	259
11	257	11	259
12	257	12	259
13	257	13	259
14	257	14	259
15	257	15	259
16	257	16	259
17	257	17	259
18	257	18	259
19	257	19	259
20	258	20	259
Total	5105	Total	5097



Figura A1. Acomodo de ladrillo de manera lineal perpendicular a la puerta de alimentación, real y virtual. Cama 1

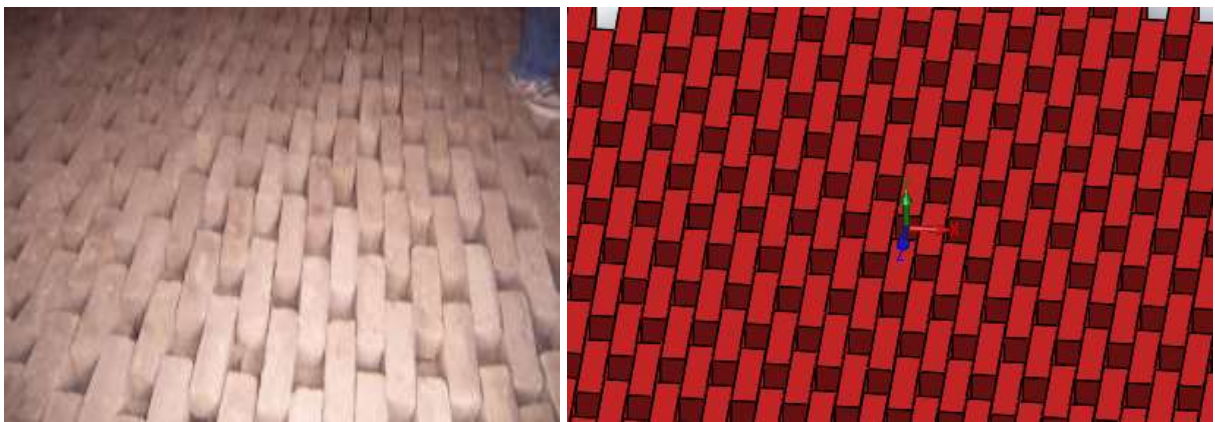


Figura A2. Acomodo de ladrillo de en forma de rejilla o malla perpendicular a la puerta de alimentación, real y virtual. Cama 2

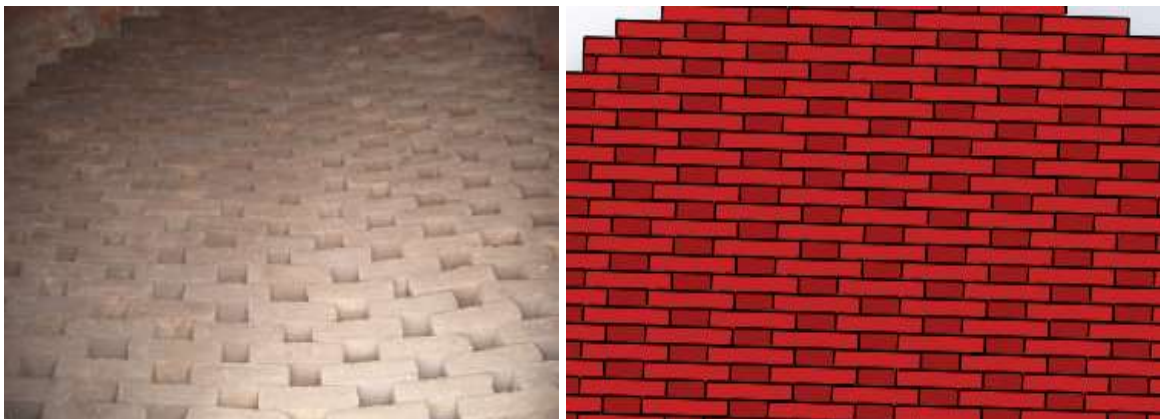


Figura A3. Acomodo de ladrillo de en forma de malla perpendicular a la puerta de alimentación, real y virtual. Cama 3



Figura A4. Acomodo de ladrillo de manera lineal. Cama 4, 5 y posteriores



Figura A5. Vista de la configuración de ladrillos desde la puerta por donde se carga el ladrillo.

## ANEXO B

### Dimensiones del Horno

En las siguientes imágenes se muestran las dimensiones principales de horno MK2 en que se trabajó.

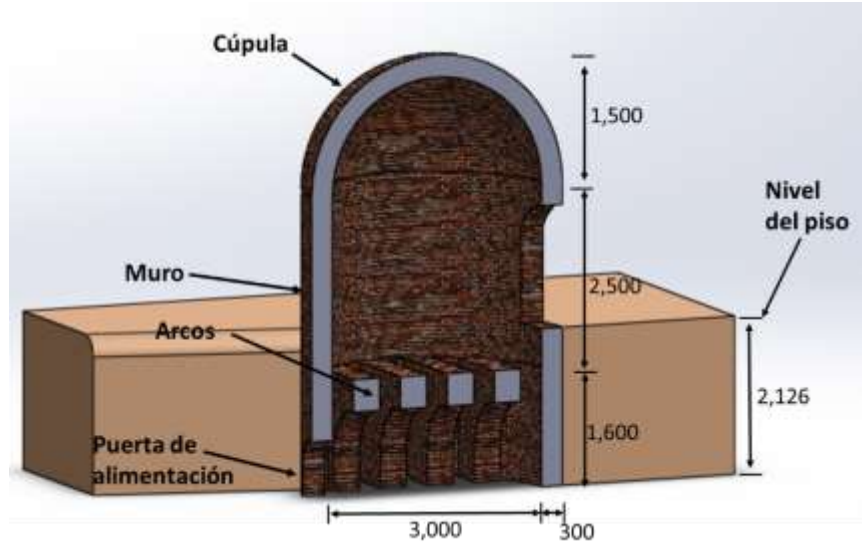


Figura B1. Vista interna del horno MK2 con sus principales dimensiones. Las acotaciones están en mm.

Tabla B1. Principales dimensiones del horno.

Característica	(mm)
Ancho de la pared	300
Ancho de los arcos	375
Altura de los arcos	1,600
Altura acomodo de ladrillos	2,500
Altura de la cúpula	1,500
Diámetro interior del cuerpo del horno	3,000

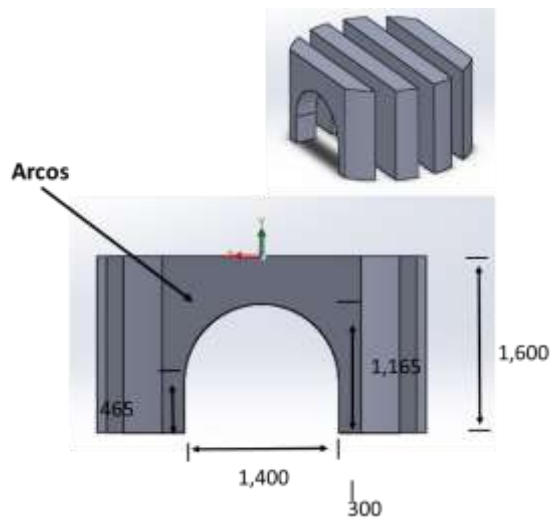


Figura A2. Vista de los arcos del horno MK2 con sus principales dimensiones. Las acotaciones están en mm.

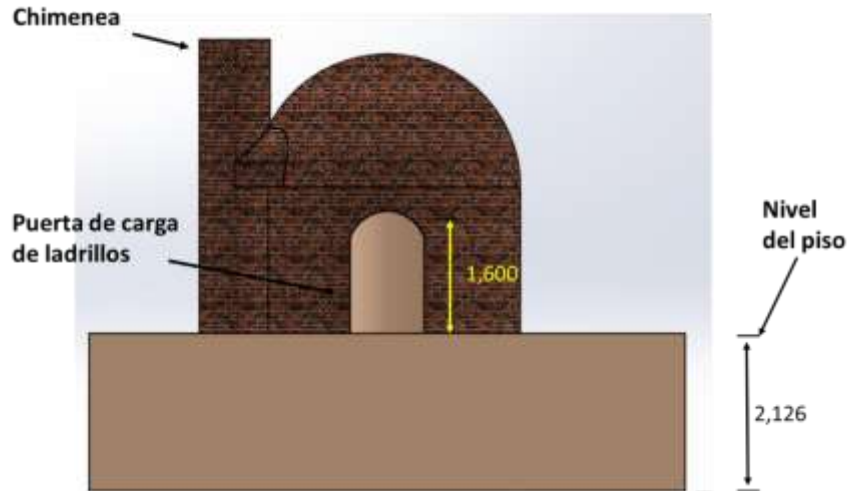


Figura A3. Vista frontal del horno MK2 con sus principales dimensiones. Las acotaciones están en mm.

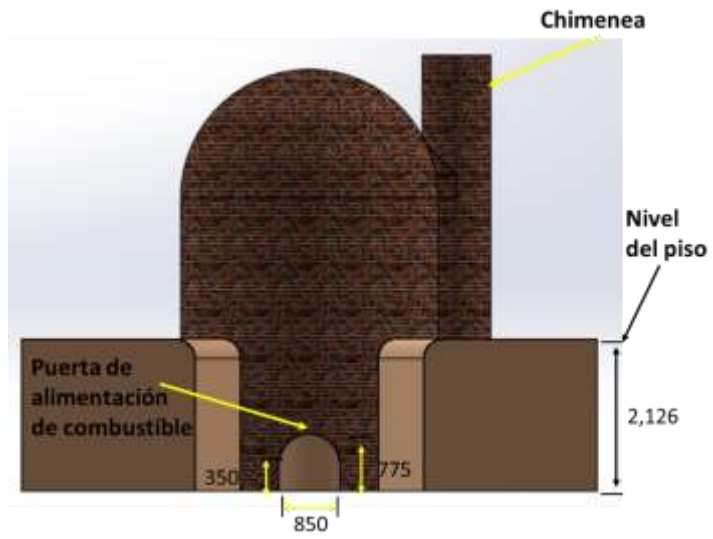


Figura A4. Vista posterior del horno MK2 con sus principales dimensiones. Las acotaciones están en mm.

## ANEXO C

Comparación de temperaturas obtenidas en las temperaturas experimentales vs corrida de validación.

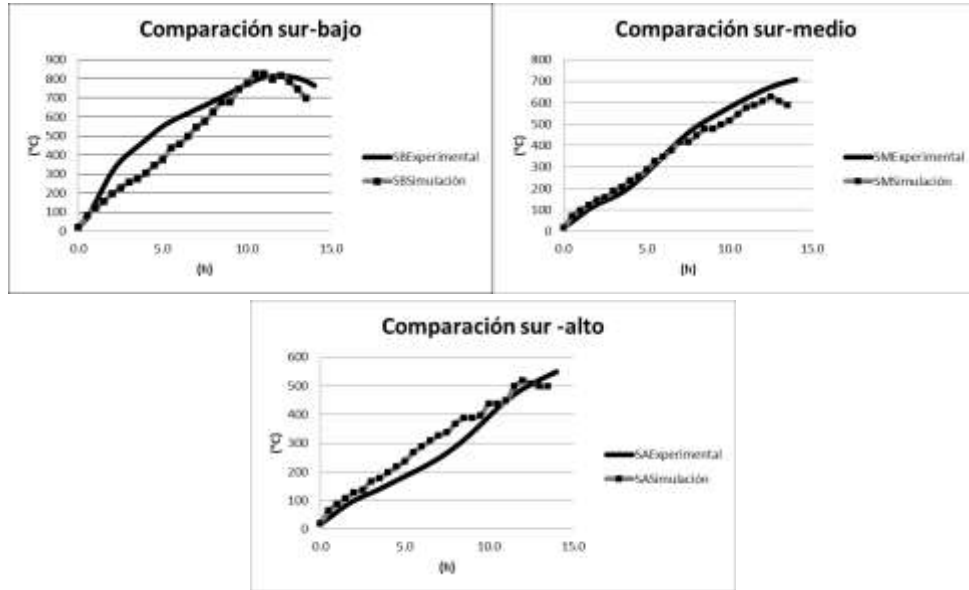


Figura C1. Graficas de comparación de temperaturas simulación vs experimental. Lado sur.

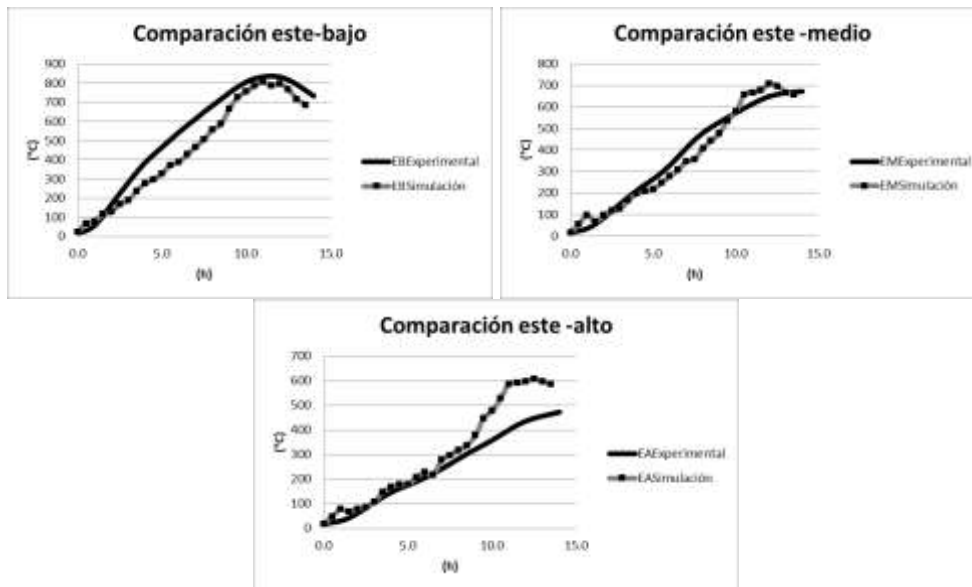


Figura C2. Graficas de comparación de temperaturas simulación vs experimental. Lado este.



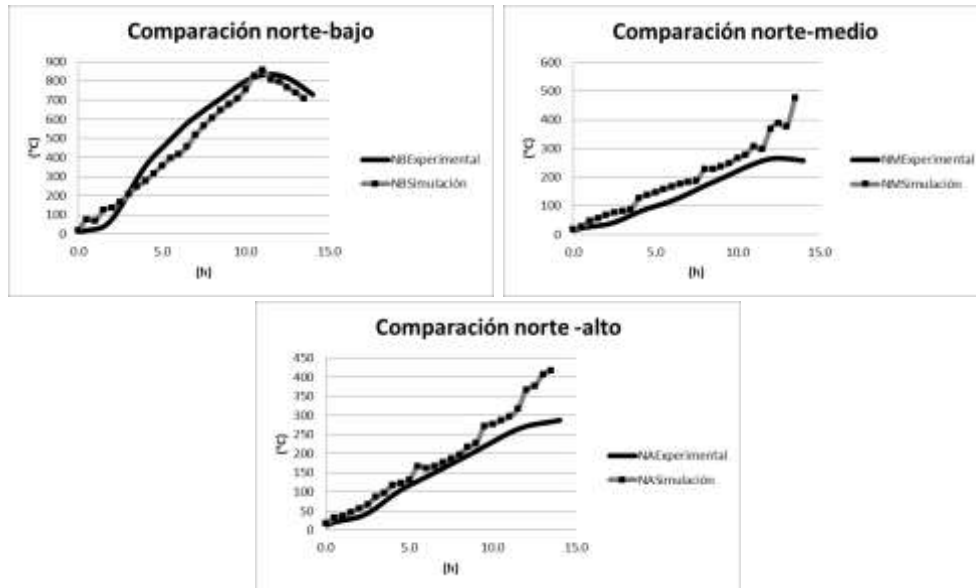


Figura C3. Graficas de comparación de temperaturas simulación vs experimental. Lado norte.

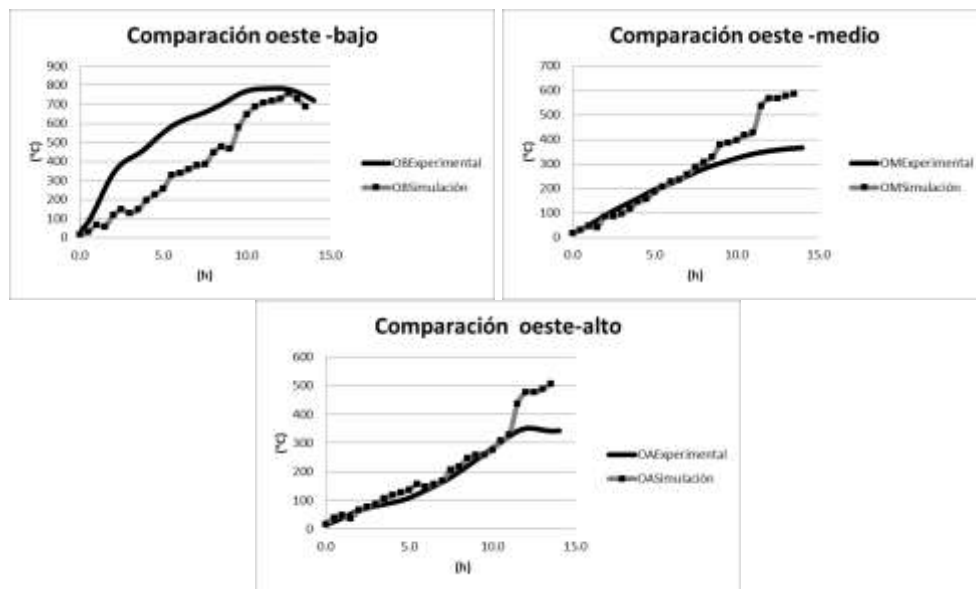


Figura C4. Graficas de comparación de temperaturas simulación vs experimental. Lado oeste.

## ANEXO D

Comparación de temperaturas obtenidas en la corrida de validación vs mejor opción del DOE.

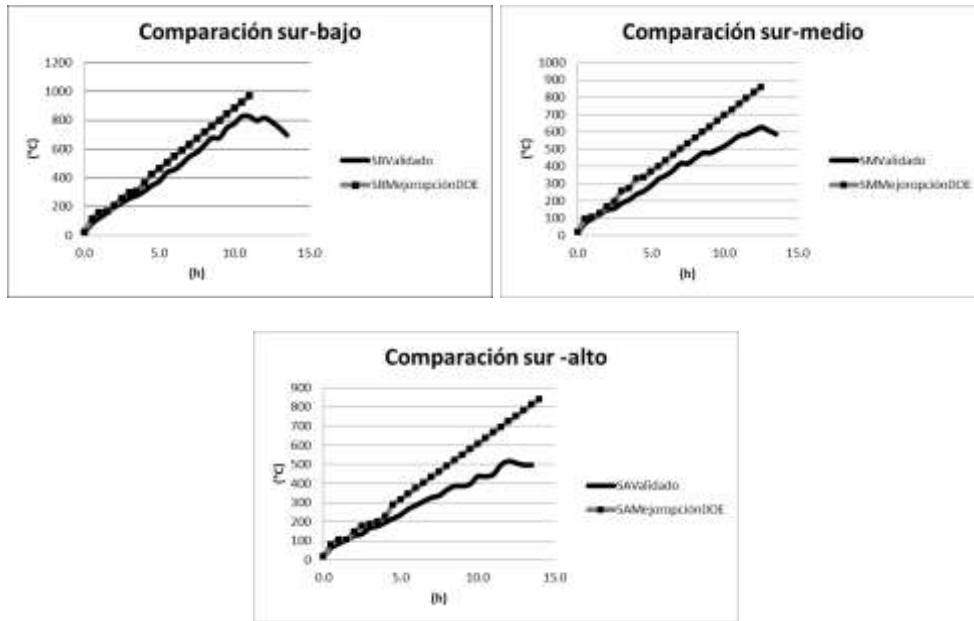


Figura D1. Graficas de comparación de temperaturas corrida validada vs mejor opción del DOE. Lado sur.

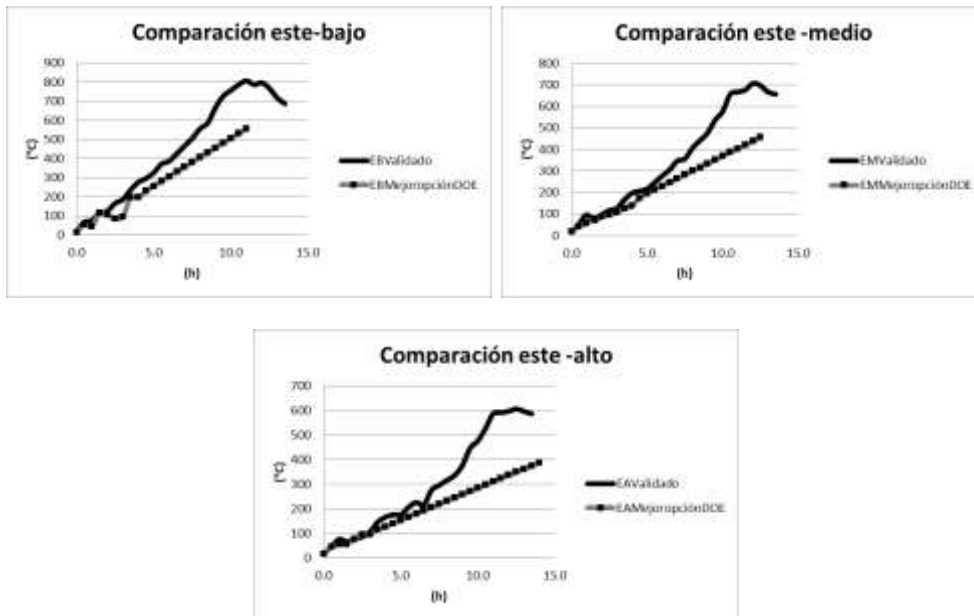


Figura D2. Graficas de comparación de temperaturas corrida validada vs mejor opción del DOE. Lado este.

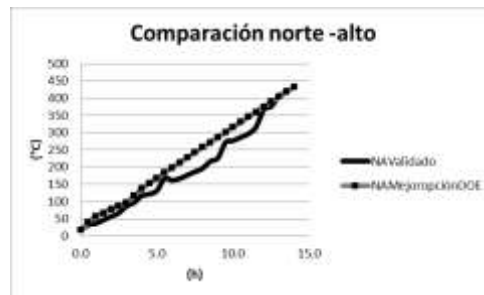
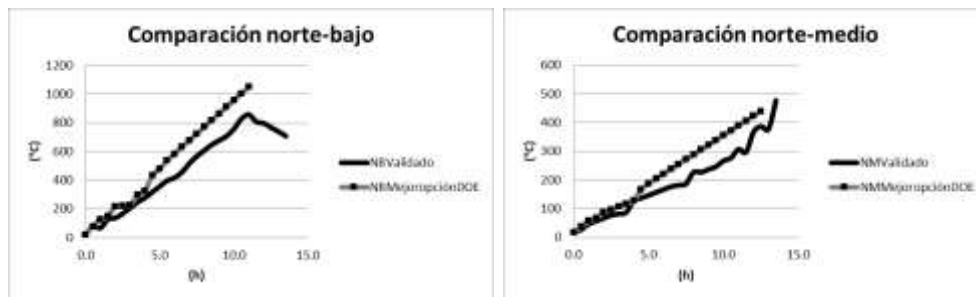


Figura D3. Graficas de comparación de temperaturas corrida validada vs mejor opción del DOE. Lado norte.

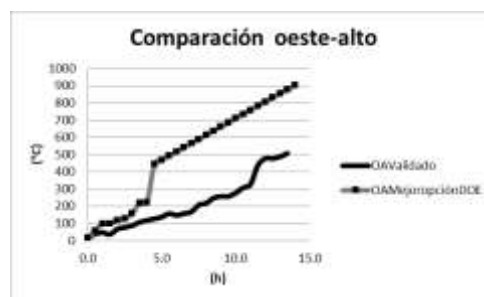
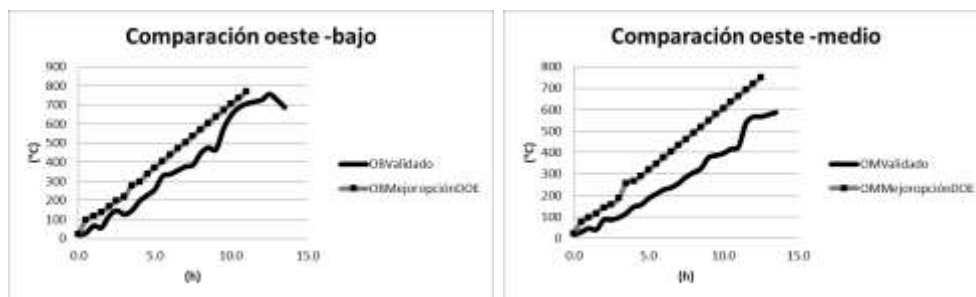


Figura D4. Graficas de comparación de temperaturas corrida validada vs mejor opción del DOE. Lado oeste.

## ANEXO E

Comparación de temperaturas obtenidas en la corrida de validación vs ultima quema experimental.

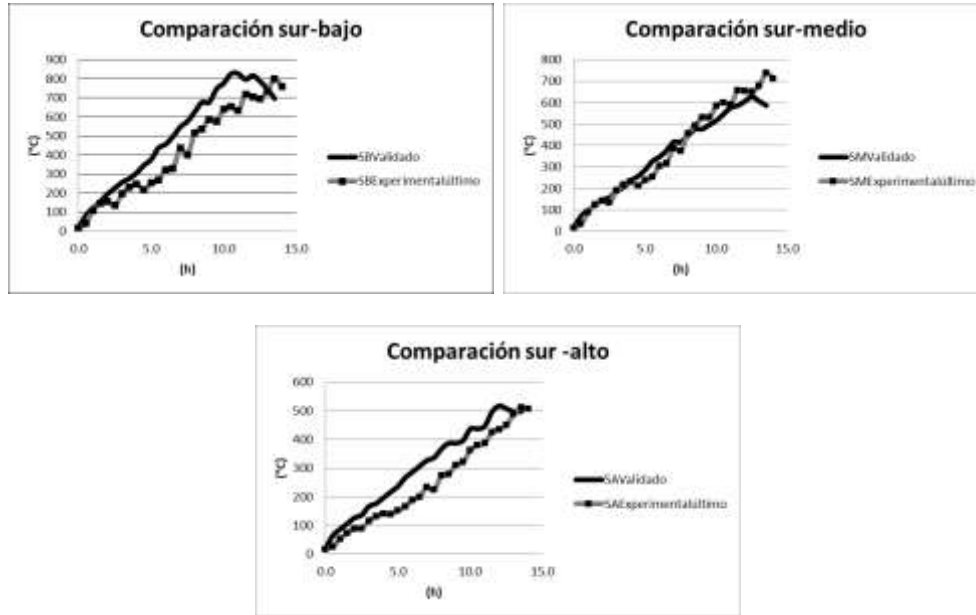


Figura E1. Graficas de comparación de temperaturas corrida de validación vs ultima quema experimental. Lado sur.

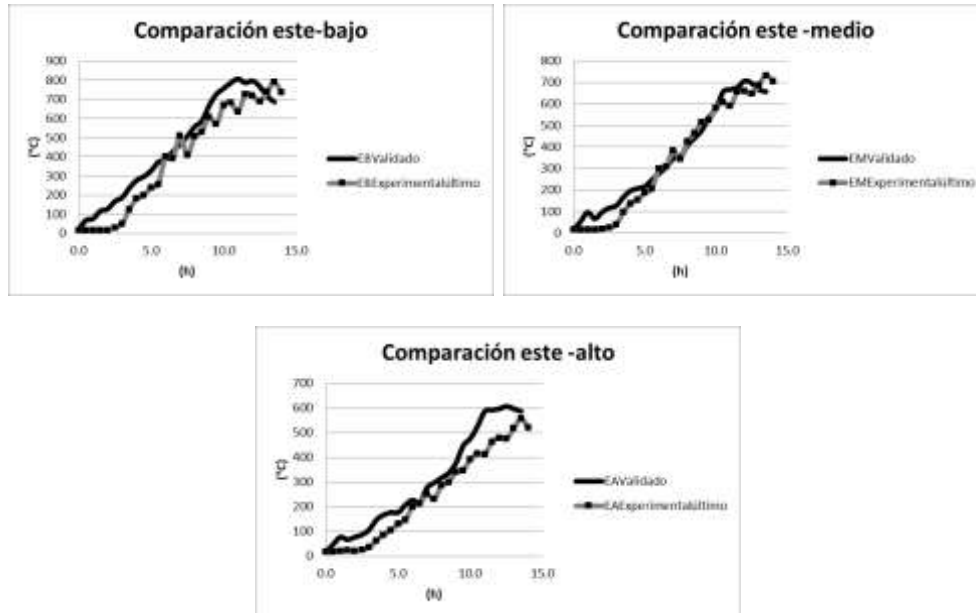


Figura E2. Graficas de comparación de temperaturas corrida de validación vs ultima quema experimental. Lado este.

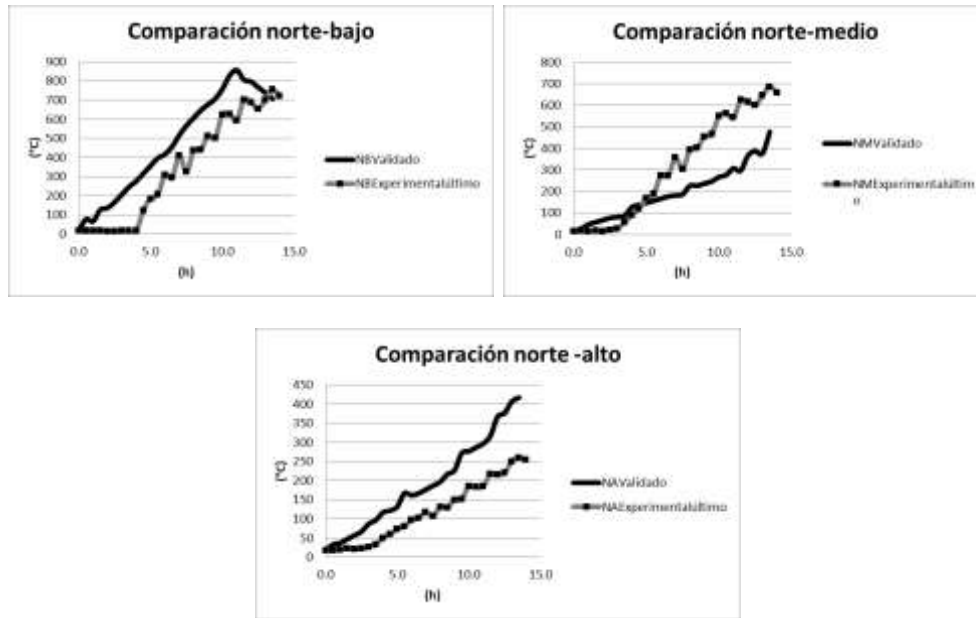


Figura E3. Graficas de comparación de temperaturas corrida de validación vs ultima quema experimental. Lado norte.

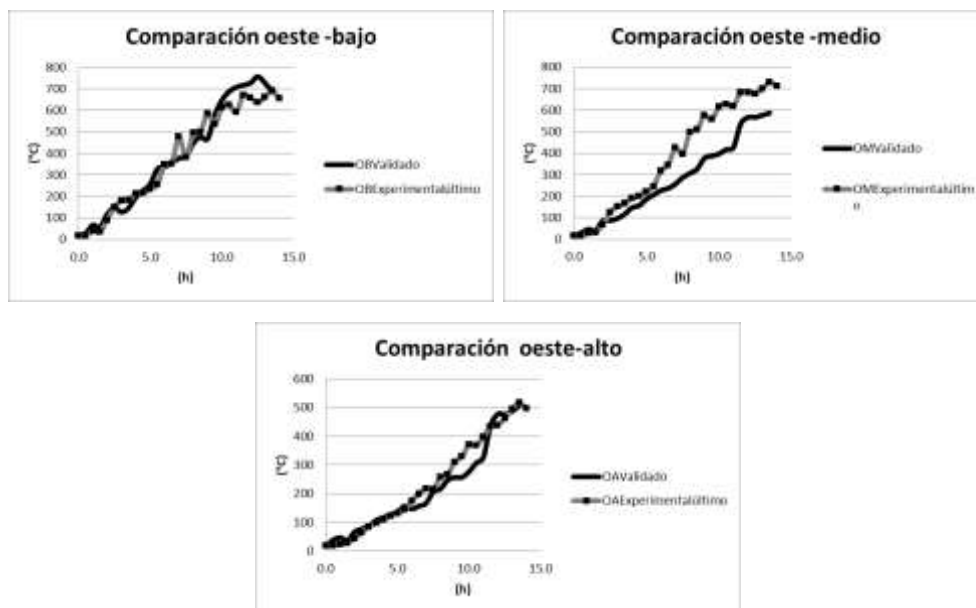


Figura E4. Graficas de comparación de temperaturas corrida de validación vs ultima quema experimental. Lado oeste.

## ANEXO F

Comparación de temperaturas obtenidas en la mejor opción del diseño experimental vs ultima quema experimental.

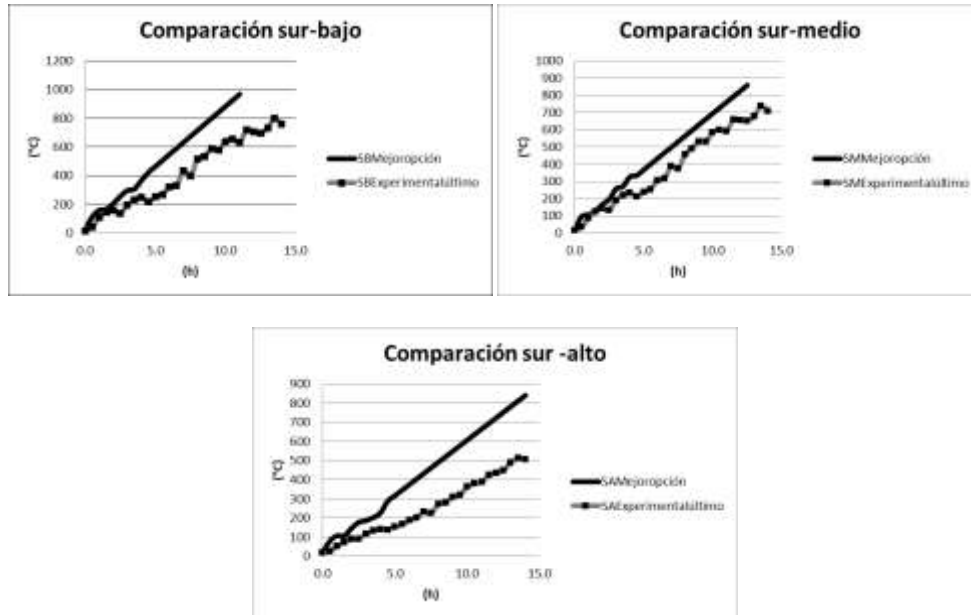


Figura F1. Graficas de comparación de temperaturas corrida de mejor opción del diseño experimental vs ultima quema experimental. Lado sur.

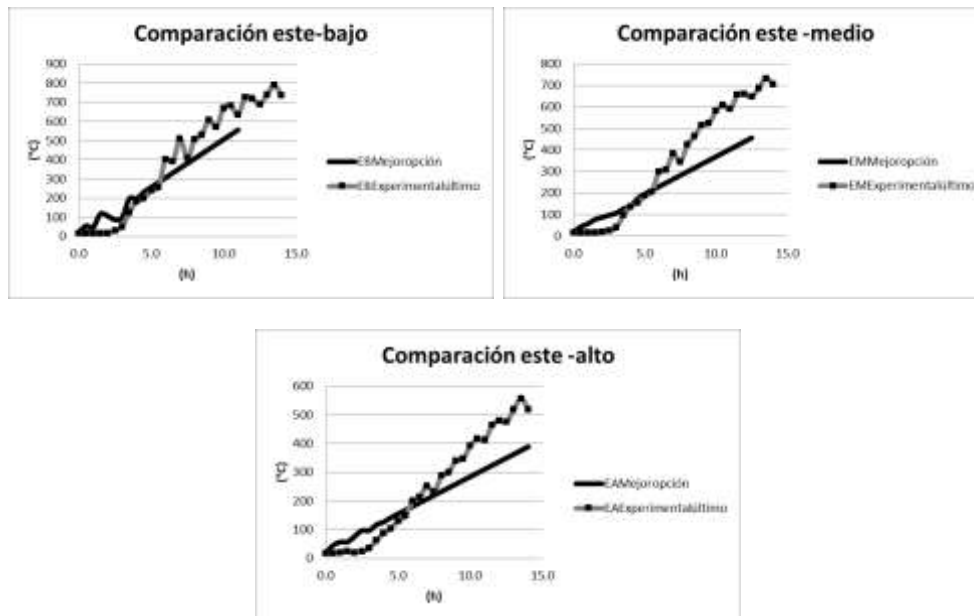


Figura F2. Graficas de comparación de temperaturas corrida de mejor opción del diseño experimental vs ultima quema experimental. Lado este.

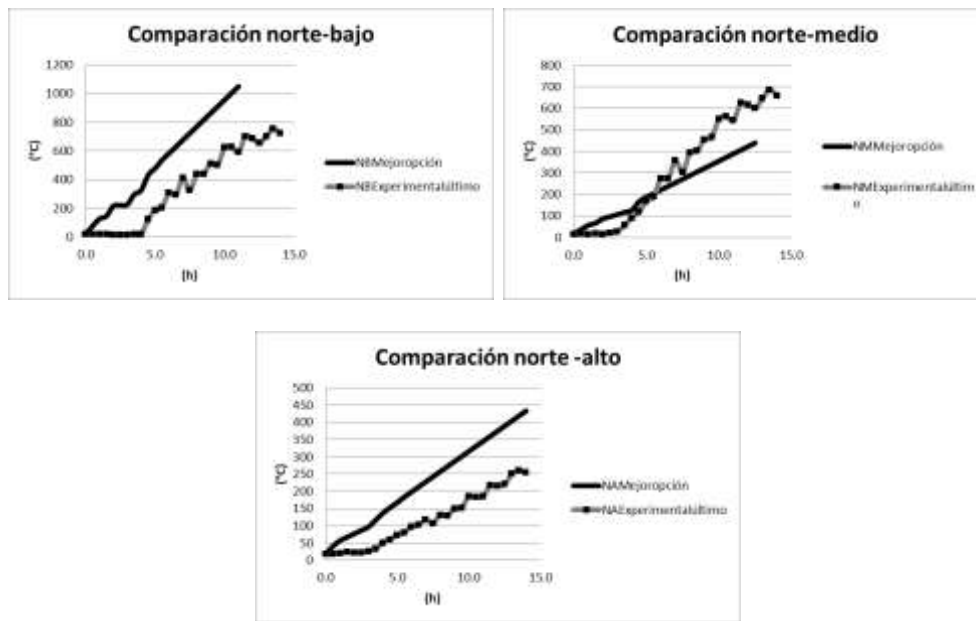


Figura F3. Graficas de comparación de temperaturas corrida de mejor opción del diseño experimental vs ultima quema experimental. Lado norte.

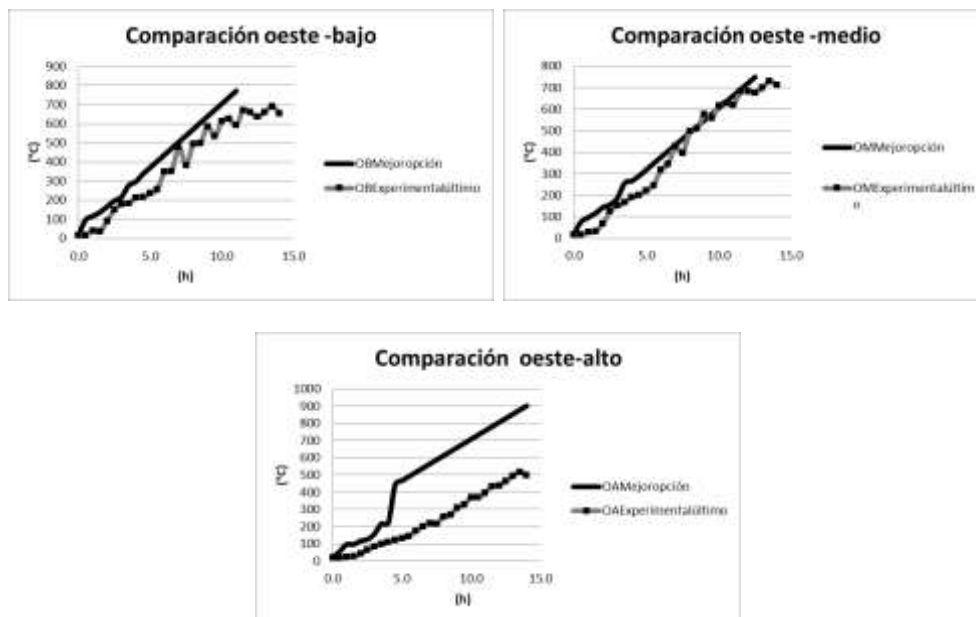


Figura F4. Graficas de comparación de temperaturas corrida de mejor opción del diseño experimental vs ultima quema experimental. Lado oeste.

## **ANEXO G**

### **Publicaciones.**

Durante el transcurso de esta investigación, los siguientes trabajos han sido publicados.

J. Lara-Mireles, S. Alonso-Romero, E. Frías-Chimal, R Zitzumbo-Guzmán, J. del Real-Olvera, L. Hernández-Mena. Analysis of the MK brick kiln thermal behavior Análisis del comportamiento térmico de un horno ladrillero tipo MK. Revista Mexicana de Ingeniería Química, Octubre 5 2020.

J. Lara-Mireles, S. Alonso-Romero, E. Frías-Chimal, R Zitzumbo-Guzmán. Ecuación representativa de la entrada de calor para la simulación numérica de un horno ladrillero. XLI Encuentro Nacional AMIDIQ, 22 al 24 de octubre 2020.

J. Lara-Mireles, S. Alonso-Romero, E. Frías-Chimal. Representación numérica de la cocción de ladrillos en un horno MK2. Congreso Interdisciplinario de Cuerpos Académicos CICA 2017, edición Internacional, 27 y 28 de setiembre 2017.



## Referencias

Abou-Ziyan, H. Z., 2004. Convective heat transfer from different. *Applied Thermal Engineering*, p. 171–191.

Anon., 2014. *ansys.com*. [En línea]  
Available at:  
<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+Fluent>  
[Último acceso: 27 Julio 2014].

Ansys, 2018. *Radiation Theory*, s.l.: Ansys Documentation.

Bellprat, O., 2009. *Brick Kiln Evaluation Study in the Bajío Region GTO, México*, México: Instituto Nacional de Ecología.

Bird, R. B., Stewart, W. E. & Lightfoot, E. N., 1999. *Fenómenos de transporte*. México: Limusa.

Blanc, T. L., 2008. *Actualización de la metodología y el inventario de emisiones para ladrilleras, 2008.*, s.l.: s.n.

Bolton, W., 2006. *Ingeniería de control*. segunda ed. México: Alfaomega.

Bruce, C. W., Corral, A. Y. & Lara, A. S., 2012. Development of Cleaner-Burning Brick Kilns in Ciudad Juarez, Chihuahua, Mexico. *Journal of the Air & Waste Management*, 57(4), pp. 444-456 (DOI: 10.3155/1047-3289.57.4.444).

Burden, R. L. & Faires, J. D., 1985. *Análisis Numérico*. México: Grupo Editorial Iberoamérica.

Cárdenas B., A. U. M. J. M. C. C. A., 2012. “*Evaluación preliminar del impacto ambiental por la producción artesanal de ladrillo: eficiencia energética y calidad del aire*”, Mexico, D.F.: s.n.

Cárdenas, B., Aréchiga, U. & Munguía, J., 2012. *Evaluación preliminar del impacto ambiental por la producción artesanal de ladrillo: eficiencia energética y calidad del aire*, Mexico D:F: INE.

Carrillo, J. & Castillo, L., 2011. Consideraciones del mallado aplicadas al cálculo de flujos bifásicos con técnicas de dinámica de fluidos computacional. *IV Jornadas de introducción a la investigación de la UPCT*.

Chávez, R.-H., 2008. Pollution Reduction and Energy Savings of a Coupled Two-Kiln System for Bricks Making. *American Institute of Chemical Engineers*, pp. 397-404.

CIATEC, 2015. “*Análisis de Mercado del Sector de la Construcción y Proyecto Piloto a Nivel Región Basado en un Portafolio de Políticas Públicas con el Objetivo de Reducir los CCVC de Ladrilleras Artesanales en México*”, México: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

competitividad, I. m. p. l., 2011. *Programa Especial de Cambio Climático para el periodo 2012-2020*. s.l.:s.n.

Corral Avitia, A. Y. y otros, 2009. La cartografía de riesgo como instrumento técnico para la reubicación de la industria ladrillera del Municipio de Juárez México. *Revista internacional de contaminación ambiental*, pp. 17-26.

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

Corzo, M. A. y otros, 2013. Representación por Volumen Finito de un Horno de. *Coloquio de Investigación Multidisciplinaria.*, pp. 578,587.

Corzo, M. A. y otros, 2013. *Representación por volumen finito de un horno de cocción de ladrillos*. Pachuca, Hidalgo, Mexico., Congreso Internacional de la SOMIM.

Fontalvo, E. d. J. & Gutiérrez, E., 2014. *Diseño de un horno para cocción de ladrillos refractarios, en una empresa del sector ladrillero.*, Barranquilla: Universidad autonoma del caribe.

García -Cuevas Gonzalez, L. M., Gíl Mejias, A., Navarro Garcia, R. & Quintero Igeño, P. E., s.f. *Mecánica de fluidos computacional: tipos de mallas y calidad de mallado*, s.l.: Universidad Politecnica de Valencia.

García, M., 2016. La disminución de la contaminación ambiental en las ladrilleras del estado de Guanajuato. *Reaxión*.

Gol'tsova, O., Klekovkin, V. & V.A., T., 2008. Development and approval of a mathematical model of a brick firing kiln. *Glass and Ceramics*, pp. 3-4.

González, P., 2010. *La introducción de hornos ecologicos en una comunidad ladrillera: Factores*, Tijuana, B.C., México: s.n.

Gutiérrez, H. & De La Vara, R., 2008. *Analisis diseño de experimentos*. Segunda ed. México D.F.: Mc Graw Hill.

Hanke, J. & Reitsch, A., 1996. *Pronósticos en los negocios*. Quinta ed. México: Prentice Hall.

Herrera Cuéllar, P. A. & Rodríguez Silva, L., 2011. *Caracterización de los hornos ladrilleros en la industria, proyecto colombia*, Bogotá: Programa eficiencia energetica en ladrilleras artesanales - EELA.

Hinojosa, O. & Velasco, C., 2004. Diagnóstico del trabajo de las ladrilleras artesanales en la ciudad de Oruro. *Revista Metalurgia No. 25*, pp. 42-49.

Hinojosa, O. & Velasco, C., 2005. Cálculo del balance térmico de un horno de fabricación de ladrillo artesanal. *Metalúrgica*, Issue 26, pp. 14-23.

Holman, J., 1999. *Transferencia de calor*. México: Compañía editorial continental S.A. de C.V..

Howell, J., 1992. *Thermal Radiation Heat Transfer*. 3th ed. Washington: Hemisphere Publishing Corporation.

Howell, J., 1998. The Monte Carlo Method in Radiative heat transfer. *Journal of Heat Transfer, 1997 Max Jakob Memorial Award Lecture*, Volumen 120, pp. 547-560.

Incropera, F. P. & De Witt, D. P., 1999. *Fundamentos de Transferencia de calor*. Mexico: Prentice Hall.

Incropera, F. P. & De Witt, D. P., 2006. *Fundamentos de Transferencia de calor*. Mexico: Limusa, Wiley.

Kollmann, F., 1959. *Tecnología de la madera y sus aplicaciones*.. Madrid: s.n.

Lara-Mireles, J., Alonso-Romero, S., Frías-Chimal, E. & Zitzumbo-Guzman, R., 2020. Analysis Of the MK2 Brick kiln thermal behavior. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 20(I), pp. 289-304.

Linares, y otros, 2015. Evaluación de daños a la salud respiratoria de niños expuestos a la producción artesanal de ladrillo. *Comunicaciones orales presentadas en el XII Congreso español de salud ambiental*, p. 107.

López Robles, J. L. & Gallegos Muñoz, A., 2008. *Estudio de quemado de ladrillo rojo para diferentes condiciones de operación*, Guanajuato: 5to. Verano Estatal de la Investigación, CONSEJO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL ESTADO DE GUANAJUATO.

Luby, S., Biswas, D., Gurley, E. & Hossain, I., 2015. Why highly polluting methods are used to manufacture bricks in Blangadesh. *Energy for Sustainable Development*, pp. 68-74.

Márquez, R. O., 2002. *Appropriate Chemistry For The Economically Limited People Of The Earth*. Las Cruces, New Mexico: New Mexico State University.

Márquez, R. O., 2011. *Construcción de Horno MK2*, San Miguel de Allende: s.n.

Márquez, R. O., 2011. *Operación y mantenimiento de los hornos ladrilleros tipo MK2*, s.l.: s.n.

Martínez, G., Jimenez, H. & Flores, J., 2002. Numerical Study on The operation of a cylindrical kiln for firing red brick. *Información Tecnológica*, 13(1), pp. 3-12.

Martínez, G., Jimenez, H. & Sandoval, O., 2003. Experimental Study on the Firing Process of Red Brick using Liquefied-Petroleum Gas. *Información Tecnológica*, pp. 73-82.

Montgomery, D. C. & Runger, G. C., 1996. *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. México: M.C. Graw Hill.

Moreira-Morcillo, E. L., 1989. *Modelaje de la transferencia de calor en un horno ladrillero*. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politecnica del Litoral.

Munguía, J. L., Cárdenas, B., Piña, J. C. & Arechiga, J. U., 2012. Análisis Energetico en hornos ladrilleros MK2. *II Congreso Internacional AMIDIQ*, pp. 3799, 3804.

Naciones Unidas, 1998. *PROTOCOLO DE KYOTO DE LA CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO*. s.l.:s.n.

Nicolau, V. & Dadam, A., 2009. Numerical and experimental thermal analysis of a tunnel kiln used in ceramic production. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical*.

Normas, D. G. d., 1976. *Ladrillos bloques ceramicos de barro, arcilla y/o similares*. México(D.F.): s.n.

ONNCCE, 2012. *NORMA MEXICANA NMX-C-404-ONNCCE-2012*, México: s.n.

Pinto, A. y otros, 2011. *Evaluación comparativa de la Inyección de aire forzado para combustión en la quema de artefactos cerámicos en horno caipira*, Rio de Janeiro: EELA.

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

Prasertsan, S., Thepaya, T., Prateepchaiku & Kirirat, P., 1997. Development of an energy efficient brick kiln. *international Journal of energy research*, pp. 1363-1383.

Prasertsan, S., Theppaya, T., Prateepchaikul & Kirirat, P., 1997. Development of an energy-efficient brick kiln. *International journal of energy research*, pp. 1363-1383.

Ramírez, J. R. y otros, 2004. Perfiles de temperatura de un horno ladrillero. *REVISTA MEXICANA DE INGENIERIA QUIMICA*, pp. 209-217.

Ramírez, M. A., Lucas, S. & Trapaga, G., 2008. Mathematical Modeling of Pottery Production in Different Industrial Furnaces. *Journal of Materials Engineering and Performance*, pp. 633-643.

Rodriguez, J. y otros, 2004. Perfiles de Temperatura de un HornoLadrillero. *Revista Mexicana de Ingenieria Quimica*, pp. 209-217.

Romo, M., Cordova, G. & Cervera, L., 2004. Estudio urbano ambiental de las ladrilleras en el municipio de Juárez. *Estudios Fronterizos*, pp. 9-34.

Romo, M. d. L., Cordova, G. & Cervera, L., 2004. Estudio Urbano-ambiental de las ladrilleras en el minicipio de Juarez. *Estudios Fronterizos*, vol.5 Núm 9, pp. 8-34.

Singer, F., 1960. *Industrial Ceramic*. London: Chapman and hall.

Tehzeeb, A., Bhuiyan, M., Jayasurita & Nira, 2012. Evaluation of Brick Kiln Performances Using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Energy and Environmental Engineering Journal*, pp. 86-93.

Versteeg, H. W., 1995. *An introduction to computational fluid dynamics, the finith volume method*. New York: Longman Scientific & Technical.

Violante, C. & Gallegos, A., 2003. *Estudio de la transferencia de calor conjugada aplicado CFD, para el diseño óptimo de horno ladrillero*, Salamanca, Guanajuato: 13vo. verano de investigación científica.

Wang, Q., Zhang, S. & Zhao, L., 2012. *The Numerical Simulation of Porous Brick Heat-transfer Property*, Chengdu, Sichuan, China: School of Civil engineering and Architectural.

Welty, J. R., Wicks, C. E. & Wilson, R. E., 1994. *Fundamentos de trabsferencia de momento, calor y masa..* México: Limusa.

Xu, C. & Liu, M., 2011. Experiment and Numerical Simulation on Axial Compressive Performance of Autoclaved FlyAsh Solid Brick Masonry Columns.. *Trans. Tianjin Univ.*, pp. 454-480.

Zienkiewich, O. & Taylor, R., 2000. *The Finite Element Method, The Basis*. s.l.:Butterworth Heinemann.