

“Modelamiento y simulación de un horno túnel industrial”



CARLOS ANDRÉS GÓMEZ GUTIÉRREZ
Msc Ingeniería Química

FARID CHEJNE JANNA Ph.D
Director
Escuela de Procesos y Energía
Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas
Medellín
2010

Dedicatoria

A mi papá y mi mamá quienes han sido parte fundamental en mi vida, a mis hermanos y abuela, y todas aquellas personas de mi familia que de una u otra forma han incidido en mi formación.

A mi gran amor y novia Yamile quien ha estado a mi lado incondicionalmente durante muchos años, a su mamá, la abuela y la tía que han estado siempre acompañando.

A un gran maestro y amigo que ha sido un apoyo incondicional y que con sus palabras alentadoras como “excelente viejito” han sido una gran motivación para la realización de esta investigación, Farid Chejne.

Agradecimientos

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a Colciencias, A la Universidad nacional de Colombia (Facultad de Minas) y a Argos por su apoyo económico, a Ladrillera San Cristóbal por el soporte técnico brindado. También al grupo de Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas Tayea por sus valiosos aportes y acompañamiento durante la realización del proyecto y en especial a Jhon Camilo Parra quien ha sido un gran apoyo en al realización de mi trabajo.

Agradecer a mis compañeros y amigos Fredy Vélez, Jonathan, Carlos Ceballos, Farid Cortes, Carlos Valdez, Juan Manuel, Andrés Macia, Eliza, Jorge Montoya , Eder, Yolice y profesores que aportaron a mi proceso de formación como lo son el profesor Farid Chejne nuevamente, el profesor Alejandro Molina quienes tuvieron mayor incidencia en mi formación como investigador y a todas aquellas personas que de una u otra forma fueron mi apoyo y que se me escapa nombrarlos pero de corazón están ahí.

Contenido

LISTA DE TABLAS.....	5
LISTA DE FIGURAS	6
RESUMEN	7
1. INTRODUCCIÓN	8
2. ESTADO DEL ARTE Y ASPECTOS TEÓRICOS.....	12
3. GENERALIDADES DEL HORNO TUNEL INDUSTRIAL SIMULADO.....	17
4. IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN DEL MODELO CFD.	25
4.1 Generalidades del horno simulado.	28
4.2 Modelos y submodelos utilizados	30
4.2.1 <i>Modelo de combustión de No-premezcla</i>	34
4.3 Chequeo de independencia de mallas.....	40
5. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	43
5.1 Carbón pulverizado	43
5.2 Carbón pulverizado y gas de síntesis	46
6. CONCLUSIONES.	49
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características nominales del horno.....	17
Tabla 2. Valores medidos en el horno túnel.....	20
Tabla 3. Balance de masa del horno túnel.....	22
Tabla 4. Balance de energía del horno túnel.....	23
Tabla 5. Análisis elemental.....	31
Tabla 6. Análisis próximo.....	31
Tabla 7. Composición gas de síntesis.....	33
Tabla 8. Parámetros submodelos de combustión tomados de Factors influencing the ignition of flames from air-fired swirl Khare et all.....	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Consumo histórico y proyecciones de energía a nivel mundial (U.S. Dept. of Energy, Energy Information Administration, Annual Energy Report DOE/EIA-0383(2008) Washington, D.C.).....	8
Figura 2. Esquema horno túnel Ladrillera San Cristóbal.	19
Figura 3. Horno túnel zona de cocción	29
Figura 4. Representación computacional del horno.	30
Figura 5. Esquema ilustrativo de la creación del PDF.	31
Figura 6 . Esquema Ilustrativo de la forma de solución de los modelos utilizada por Fluent.....	40
Figura 7. Solución para la malla con 8000 celdas y con 27000 celdas aproximadamente.....	41
Figura 8. Esquema óptimo para la prueba de independencia de mallas.....	41
Figura 9. Comparación del perfil de temperaturas simulado y experimental a los 2 metros sobre el nivel del carro de los ladrillos.	44
Figura 10. Perfiles de concentración de O ₂ y CO ₂	44
Figura 11. Contornos de temperatura en el horno.	45
Figura 12. Perfiles de temperatura para el suministro en los diferentes puntos en la zona de quema.	47
Figura 13. Contornos de velocidad dentro del horno.	47
Figura 14. Perfiles de temperatura para el horno trabajando con carbón y gas de síntesis y carbón.	48

RESUMEN

La energía requerida en los procesos de cocción de ladrillo se obtiene generalmente por combustión directa de carbón, fuel oil o gas, mediante la cual se obtiene gases calientes que transfieren la energía al producto. Mediante este proceso se genera la energía suficiente para las diferentes etapas involucradas en el proceso, garantizando una curva de quema adecuada y exigida de acuerdo con los estándares de calidad, siempre y cuando se den las condiciones óptimas de contacto de gases calientes y producto.

El desarrollo del presente trabajo permitió simular los fenómenos de la transferencia de energía entre gases y producto durante la cocción de ladrillo en un horno túnel utilizando como combustible carbón y gas de síntesis, sustituyendo el carbón por gas de síntesis hasta en un 60% de la energía requerida por el horno. Para la solución del modelo y su respectiva simulación se utilizó como herramienta computacional el CFD (Fluido Dinámica Computacional), utilizado para resolver procesos gobernados por la transferencia de masa, momento, energía. El modelo fue satisfactoriamente validado con las curvas de cocción con carbón y fueron realmente medidas en el horno túnel de la Empresa Ladrillera San Cristóbal S.A., permitiendo predecir el comportamiento térmico del horno.

1. INTRODUCCIÓN

La industria depende en gran medida del proceso de combustión, la cual demanda energía, que a nivel mundial se espera que siga incrementándose rápidamente (ver Figura 1). Con base en las estadísticas energéticas mundiales (DOE/EIA-0383(2008) Washington, D.C.), cerca de un 88% de la demanda mundial de energía térmica es producido por la combustión de combustibles fósiles como el petróleo, gas natural y el carbón.

En casi todas las aplicaciones industriales de combustión, el calor puede ser transferido directamente desde la llama a la carga, o indirectamente, de la llama a un medio de transferencia de calor como un tubo de cerámica, por ello la gran cantidad de energía utilizada por la industria hace que la transferencia de calor en la combustión industrial un tema importante para explorar.

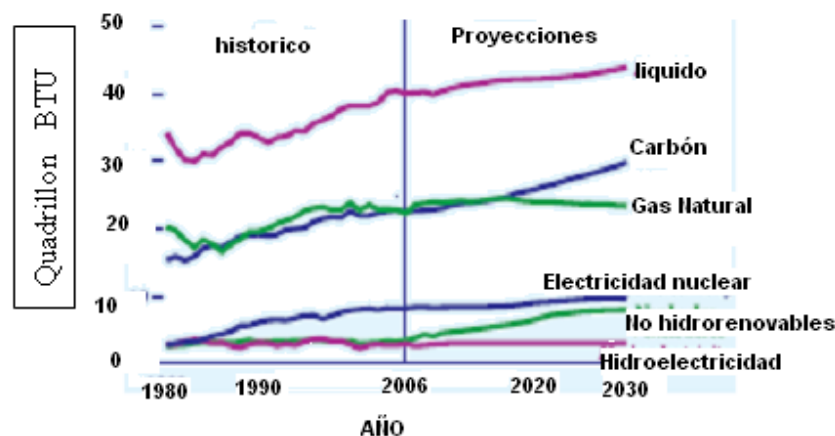


Figura 1. Consumo histórico y proyecciones de energía a nivel mundial (U.S. Dept. of Energy, Energy Information Administration, Annual Energy Report DOE/EIA-0383(2008) Washington, D.C.)

Los estudios realizados (Baukal Jr) hasta ahora han recomendado nuevas investigaciones sobre la transferencia de calor en la combustión industrial para aumentar la eficiencia del proceso, debido al consumo considerable de energía en la industria y en especial la combustión de combustibles fósiles: Esto ha permitido optimizar los procesos existentes y aumentar el rendimiento o la productividad en la industria competitiva; y por ello se hace necesario que las investigaciones que se realicen exista una sinergia entre la simulación y la toma de medidas experimentales.

El sector de la construcción hace necesario el consumo de ladrillo, no obstante, la producción de ladrillo es uno de los procesos macroconsumidores de energía en nuestro país. Los cambios o adaptaciones técnicas que se incorporen al proceso de producción de ladrillos no solo deberán tener como objetivo evitar la contaminación si no también disminuir los consumos energéticos enfocados al cumplimiento de los estándares internacionales de calidad. Los costos de producción y el nivel de la emisión de contaminantes están relacionados con el diseño del horno y el tipo de combustible utilizado para la cocción. Diferentes tipos de hornos se emplean a nivel mundial para la cocción de ladrillos (Richards, 1990; Hoopmans y Joseph, 1993; Jones, 1996).

Los hornos túnel para la cocción de la ladrillo fueron empleados mucho después de ser utilizados en otros campos tales como sanitarios, refractarios, loza, entre otros y fue después de 1960 donde se inicio una masiva introducción de dichos hornos en toda Europa.

El horno túnel es un canal rectilíneo, constituido por paredes verticales, una cubierta y rieles para que pueda desplazarse la obra cerámica, constituyéndose un equipo con carga

móvil con fuente de calentamiento fija. Durante el proceso el producto se somete a intercambios de calor y materia con los gases, provocando una serie de transformaciones físicas y químicas que modifican sus características y que a su vez influyen en los procesos térmicos de calentamiento y enfriamiento.

Dentro del proceso de cocción del ladrillo el fenómeno de la transferencia de calor es dominado principalmente por convección entre los gases calientes productos de la combustión y la carga; sin embargo, en la zona de cocción se involucra también fenómenos de transferencia de calor por radiación. En el presente trabajo se desarrolló e implemento un modelo que involucra el estudio de los fenómenos térmicos y fluidodinámicos que ocurren en el proceso de cocción en un horno túnel industrial considerando las tres etapas de precalentamiento, cocción y enfriamiento proceso posterior al secado del ladrillo y realizado en 2 dimensiones con el fin de conocer el punto de suministro del gas de síntesis, el comportamiento, sin afectar la curva del horno y conocer la combustión de la combustión del gas de síntesis y el carbón dado que el horno no podía suspender la producción diaria para dichos ensayos.

Este modelo fue simulado mediante herramientas CFD (Fluido Dinámica Computacional) utilizando un software comercial Fluent. El CFD es una técnica que durante las últimas tres décadas, se ha utilizado cada vez más para una variedad amplia de usos de la ingeniería. En principio, el uso de estas técnicas era acostumbrado solamente en los campos aeroespaciales y nucleares. Posteriormente, el uso se ha extendido a una variedad de situaciones físicas y procesos.

En la primera parte se presenta una revisión del estado del arte, generalidades del horno túnel y las generalidades de CFD, en la segunda parte se presentan las generalidades del horno simulado, los modelos y submodelos utilizados, luego los resultados y análisis de resultados obtenidos y por último las conclusiones.

2. ESTADO DEL ARTE Y ASPECTOS TEÓRICOS.

Dentro de los factores que impulsaron a las tecnologías innovadoras en la industria cerámica ha sido el aumento en los gastos de combustible. Así, durante el decenio de 1980, el objetivo principal de la industria de la cerámica es la reducción (o al menos la optimización) de consumo de energía. La mayoría de los desarrollos se centran en la mejora de la eficiencia energética de los hornos, dado que el funcionamiento de estos presenta el mayor consumo de energía de los procesos de producción de cerámica (Christos Agrafiotis, and Theocharis Tsoutsos).

La cerámica es definida como un material inorgánico, no metálico que se consolida y adquiere supropiedades deseadas en virtud de la aplicación de calor. Esta aplicación de calor en la práctica se lleva a cabo dentro de hornos a altas temperaturas, generalmente durante largos períodos de tiempo. Por lo tanto, la industria de la cerámica es, por definición (Ezio Facincani), una alta consumidora de energía (entre otras industrias como los son la de acero, cemento y vidrio). Todas estas industrias se caracterizan por hornos con largos tiempos de operación y altas temperaturas, además de la gran cantidad de energía que se consume durante el proceso de producción, el coste de la energía es un porcentaje significativo de los costes totales de producción y el consumo de combustible en el proceso de cocción comprende 80 - 85% del combustible total consumido en la producción de ladrillo (O. B. Gol'tsova et all.). La aplicación de tecnologías que involucren ahorros de energía, es una de las razones que dan relevancia a dicho problema, dado que generan un

impacto positivo en la crisis energética del mundo actual, la degradación del medio ambiente, así como en la reducción de los costos del producto.

Como lo plantea Hosny Z.(2004) después de poner en marcha el primer horno del túnel en la industria del ladrillo en Alemania en 1953, se hizo evidente que el consumo de energía real era mucho más alto que el ideal que es de 550 kJ/kg. Desde entonces se ha venido realizando una serie de trabajos que buscan mejorar aspectos de los hornos por tales como: técnicas de la cocción R.W. Richards (1990) y H. Lingl (1998), reducción de las salidas falsas del aire R. Riedel,(1989), control de la contaminación J. Denissen (1998). Además, se han desarrollado modelos matemáticos para investigar los efectos de diseños y parámetros de funcionamiento en el horno como los trabajos realizados por S. Vogat (1991), A.I. Hurst (1992), A.E. Van Duuren (1994) y muchas técnicas de conservación de energía en hornos industriales se han sugerido y se han puesto en ejecución como los trabajos realizados por A. Saber (1787), M.G. Carvalho (1997), M. Swidan (1997).

Para obtener ladrillos homogéneos de la alta calidad y de un índice razonable de consumo de energía, el flujo del calor de los productos de la combustión o el aire a la superficie del material debe ser máximo y eso puede ser absorbido totalmente, en este sentido se puede asegurar por ciertas medidas como se presenta en los trabajos hechos por H. Roth,(1987), J. Gao (1994), M.G. Carvalho (1997). Entre estas medidas, se encuentra la disposición de los ladrillos de tal forma que favorezcan la transferencia de calor por convección entre los productos de la combustión y/o aire y los ladrillos en la etapa de precalentamiento de manera uniforme, para que en la zona de cocción, donde se da la mayor transferencia de energía por convección dé el ajuste apropiado al ladrillo minimizando el consumo de

energía específica. Riedel (1989) fundamenta aún mas precisando que la convección es el factor decisivo para el funcionamiento del horno túnel y sin tomarla no es posible obtener resultados óptimos. A. Abbakumow (1967) midió la transferencia del calor de convección para la primera fila para un bloque de ladrillos y Schroeder y Jeschar (1970) posteriormente obtuvieron dos correlaciones para la transferencia de calor por convección en los bloques de ladrillos para Reynolds entre 20 y 400 y entre 400 y 4000, sin embargo, esto se considera como gama baja de Reynolds con respecto a los hornos modernos.

Dugwell y Oakley (1988) afirmaron que la correlación de Abbakumow subestimó el coeficiente de convección para la transferencia de calor en aproximadamente un 50% y presentaron el coeficiente de un horno simulado donde representan la columna entera de ladrillos por un bloque sólido de la magnesita del cromo. Los autores midieron la transferencia de calor entre el aire, los lados, la tapa y la parte posterior a la columna e hicieron caso omiso al patrón hidrodinámico real alrededor de los ladrillos en la columna, que afectaría sus resultados e indicaron que la semejanza cercana de Prandtl ha sido obtenida usando el aire en el modelo. Esto es porque el número de Prandtl para los gases del horno, y para el aire, se pueden considerar constantes y similares sobre el intervalo de la temperatura a la cual se estudio el fenómeno y Hosny Z.(2004) proporciona información confiable para el intercambio de calor por convección entre el aire y los ladrillos que representa los arreglos reales.

Dentro de los modelos desarrollados a nivel industrial el modelo base y el más referenciado en los diferentes trabajos de posteriores desarrollos es el de Gardeik y Scholz (1981), quienes presentan un modelo unidimensional para predecir el perfil de

temperaturas a lo largo del horno mediante el cálculo de la transferencia de calor donde supone: Paredes adiabáticas sin intercambio con el ambiente, no hay pérdidas de calor, la temperatura en cada punto es independiente del tiempo, la temperatura para los gases y el bloque de ladrillos en la sección transversal se considera constante, dichas variaciones solo se da en la dirección del flujo, para el análisis se toma un diferencial a lo largo del eje x , para el cálculo de la transferencia de calor se tiene en cuenta los efectos de la transferencia de calor por convección y por radiación involucrados en un término a' y el término de convección tuvo en cuenta la distribución de los ladrillos y a pesar de ser un modelo en una dimensión describe bien el comportamiento a lo largo del horno. Para el modelamiento de hornos túnel existe otro tipo de modelos, llamados modelos zonales donde el horno túnel se divide en la zona de gases y la zona de superficie sólida (comprende la carga y las paredes del horno), posteriormente se calculan las áreas totales de intercambio de calor utilizando relaciones analíticas con geometrías específicas o métodos Monte Carlo o métodos discretos de transferencia, estos modelos son eficientes para diseños rápidos, para control y para encontrar puntos óptimos de operación (Paúl Lybaert) y una de las recomendaciones que hace este autor es el trabajo de modelos CFD y la integración de los modelos zonales y los modelos CFD.

El modelamiento de hornos que utilizan combustibles para las transformaciones fisicoquímicas involucra fenómenos físicos como lo son: Flujo turbulento de los gases, transferencia de calor por conducción (entre la carga y en la estructura del horno), Convección (con los gases), radiación (gas-gas, gas-sólido, sólido-sólido), combustión (usualmente controlado por difusión), formación de contaminantes, entre otros.

Dada la cantidad de fenómenos físicos de estos sistemas, se requiere de técnicas de simulación numérica, para diseño, operación, optimización y control del horno, es por ello que diversos autores han trabajado para diferentes tipos de hornos dichas técnicas entre ellos Yiqun Wang e, R.I. Backreedy, A.M. Eaton, R. Vuthaluru, J. R. Fan, L.X. Zhou, A. J. M. Oprins, Risto, F. Marias.

Para la descripción de flujo turbulento en combustión de hornos modelo el $k-\varepsilon$ Estandar ha sido ampliamente utilizado T. F. Dixon, Shanmukharadhy, K. Marias, F., C. Tan, Gera, D., A. Saario, T. Weydahl, J. W. Rogerson, T. Abbas, V. Zarnescu., J.M. Sala. Para el término de radiación S. S. Sazhin afirma que una combinación de simplicidad y fiabilidad hace que el modelo P-1 sea especialmente atractivo para la modelización de procesos de transferencia de radiación térmica en procesos industriales y la distribución de temperaturas para hornos con carbón ha sido validada satisfactoriamente.

En este sentido se evidencia un amplio trabajo en el modelamiento de hornos en general pero para el caso particular de los hornos túnel la literatura es muy limitada y el modelamiento de estos se ha realizado bajo el enfoque de la transferencia de calor, y no se ha tenido en cuenta la interacción y la sinergia de los diferentes fenómenos físicos que ocurren.

3. GENERALIDADES DEL HORNO TUNEL INDUSTRIAL SIMULADO

En los hornos túnel la operación se realiza de forma continua, en donde, el ladrillo que se quema se desplaza lentamente a través del túnel en una serie de vagonetas, experimentando un calentamiento que genera un perfil de temperaturas para alcanzar las propiedades finales del producto. En la Tabla 1 se presentan las características nominales del horno y los balances de materia y energía (Informe Colciencias Implementación de la gasificación para un proceso de cocción en la ladrillera San Cristóbal.).

Tabla 1. Características nominales del horno.

PARÁMETRO	VALOR
Tipo	Horno Túnel
Modo de Operación	Continuo
Capacidad	300 ton/día
Combustible	Carbón
Tipo de quemador	CarboJet
Tiempo de residencia	24 horas

El horno está dividido básicamente en tres zonas (ver Figura 2.):

- Zona de precalentamiento.
- Zona de quema.
- Zona de enfriamiento.

La zona de precalentamiento, cuya longitud es aproximadamente $1/3$ de la longitud total del horno, se asocia al precalentamiento y calentamiento del ladrillo; las piezas alcanzan gradualmente la temperatura con el calor de los gases de combustión en contracorriente con la carga, los cuales son extraídos del horno mediante un ventilador. Seguidamente se encuentra la zona de quema donde se presenta la cocción del ladrillo, debido a la alta temperatura asociada a la combustión del carbón pulverizado mediante cuatro quemadores tipo CarboJet ubicados en la parte superior del horno que reparte a 80 entradas el carbón pulverizado o el gas de síntesis a lo largo y ancho de la zona de cocción.

La tercera zona se destina al enfriamiento rápido, indirecto y directo de las piezas. El enfriamiento se realiza en contracorriente con el aire inyectado por la parte superior del horno mediante dos ventiladores en paralelo. Parte de este aire es utilizado como aire secundario de combustión y el resto es extraído después del enfriamiento por un ventilador que lo induce fuera del horno a una elevada temperatura.

En la Figura 2 presenta el esquema del horno túnel utilizado en la Ladrillera San Cristóbal.

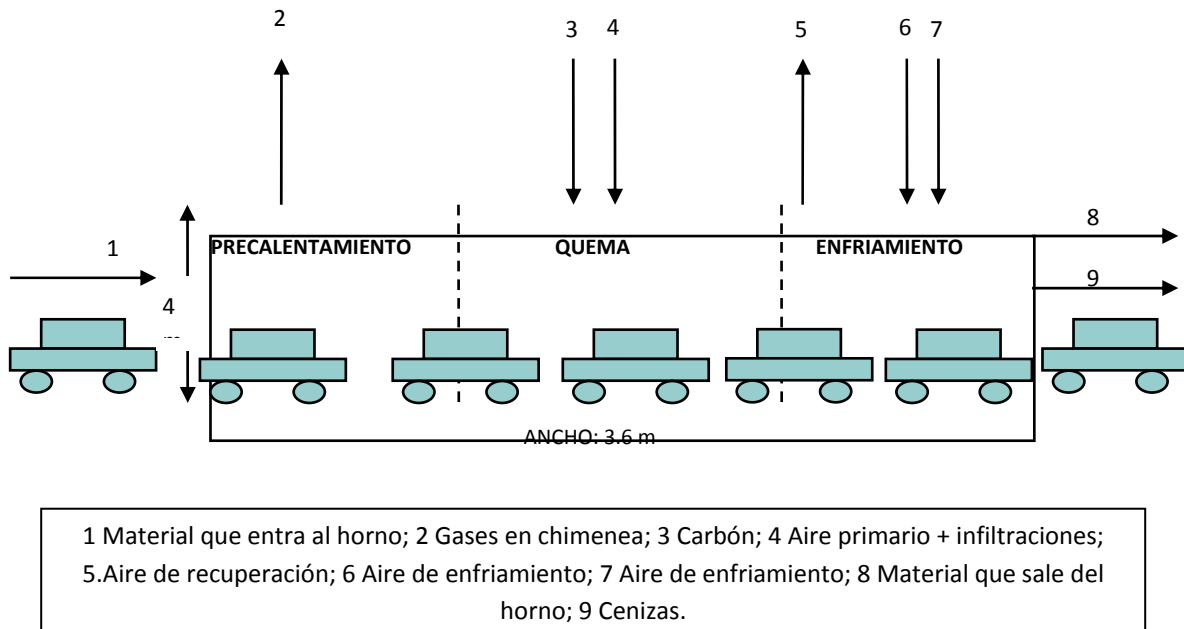


Figura 2. Esquema horno túnel Ladrillera San Cristóbal.

Para la validación del desempeño del modelo empleando la dinámica de fluidos computacional (CFD) que describa el comportamiento del horno con carbón como combustible fue necesario contar con los balances de masa y energía que permitieron caracterizar los distintos aspectos de funcionamiento del horno y fueron tomados del estudio que se realizó en el proyecto “implementación de la gasificación para el proceso de cocción en un horno túnel” como se presenta a continuación.

Para la abstracción en 2D del horno dada la distribución y la simetría del horno se realizó un corte lateral y se hicieron los cálculos de manera proporcional para conservar los flujos y las velocidades de las condiciones reales sabiendo que la profundidad de las geometrías en 2D en Fluent se toman como uno, y con todos los parámetros que se presentarán a continuación.

En la Tabla 2 se presentan los valores utilizados para el cálculo de los balances de masa y energía

Tabla 2. Valores medidos en el horno túnel.

DATOS	VALOR	UNIDAD
COMBUSTIBLE: Carbón		
Flujo	399.5	kg/h
PCS	23014.8	kJ/kg
Composición (%peso):		
%MV:	39.2	%
%Carbono Fijo:	38.4	%
%Cenizas:	11.5	%
%Humedad:	10.9	%
AIRE COMBUSTIÓN		
Temp. aire entrada	24.6	°C
Humedad relativa:	59.1	%
Relación aire combustible (Rac): ¹	8	kg aire/kg combustible
AIRE DE ENFRIAMIENTO		
Flujo de aire total:	14717.4	kg/h
Temp. aire entrada:	24.6	°C
AIRE RECUPERACIÓN		

DATOS	VALOR	UNIDAD
Flujo de aire total:	1794.1	kg/h
Temp. aire salida:	270	°C
RESIDUO PRODUCIDO		
Flujo de escoria vagoneta:	20	kg/h
Temp. residuo salida vagoneta:	638	°C
Indice de inquemados en residuo vagoneta:	55.4	%
TEMPERATURA PARED		
Temp. Derecha	36.2	°C
Temp. Izquierda	34.4	°C
Temp. Superior	48.3	°C
GASES DE COMBUSTIÓN		
Temp. gases en chimenea:	90.7	°C
Composición:		
O ₂ :	17.7	%
CO ₂ :	3.0	%
CO:	953	ppm
NO ₂ :	48	ppm
SO ₂ :	161	ppm
Exceso de aire:	517.9	%
OBRA CRUDA		

DATOS	VALOR	UNIDAD
Temperatura de obra cruda :	24.6	°C
%Humedad:	1.5	%
% Perdidas al fuego:	10.0	%
OBRA COCIDA		
Flujo de obra cocida:	7696.1	kg/h
Temperatura de obra cocida:	76.5	°C
MASA MUERTA ENTRADA		
Flujo de Masa Muerta:	4500	kg/h
Temperatura de Masa Muerta :	24.6	°C
MASA MUERTA SALIDA		
Flujo de Masa Muerta:	4500	kg/h
Temperatura de Masa Muerta :	108.0	°C

En las tablas 3 y 4 se presentan los resultados de los balances de materia y energía.

Tabla 3. Balance de masa del horno túnel.

PARÁMETRO	ENTRADAS	SALIDAS
	(kg/h)	(kg/h)
Combustible	399.5	
Aire Primario + Infiltraciones	7186.7	
Aire de Enfriamiento	14717.4	
Obra Cruda Seca	8423	

Agua Obra Cruda	128.2	
Masa Muerta	4500	
Aire de Recuperación		1794.1
Cenizas		103
Gases		21261.7
Obra Cocida		7696.2
Masa Muerta		4500
TOTAL	35354.9	35354.9

Tabla 4. Balance de energía del horno túnel.

PARÁMETRO	ENTRADAS (kW)	SALIDAS (kW)
Combustible	2554	
Obra Cocida		92.5
Gases		613.4
Energía CO		52.7
Energía Residuos Cenizas		524.1
Calores de Reacción		883.5
Aire de Recuperación		127.3
Masa Muerta		79.9
Pérdidas		180.5
TOTAL	2554	2554

Del análisis energético que se realizó al horno se encontró:

- El aire de recuperación que se extrae del horno es depositado al ambiente; este aire tiene un contenido energético importante debido a que sale a una temperatura de 270 °C .
- El calor sensible que poseen las cenizas a la salida del horno es elevado, debido a su alta temperatura.
- El porcentaje de oxígeno presente en los gases de chimenea es alto; sin embargo son valores permisibles en estos tipos de hornos, debido a la gran cantidad másica de aire de enfriamiento utilizada en el proceso.
- Las cenizas, los inquemados y el aire de recuperación representa aproximadamente un 26% de la energía del combustible y es la única energía que es posible recuperarla para aumentar la eficiencia del horno; ya que la energía de los gases de combustión no representa mayor provecho debido a su bajo valor de temperatura.
- El horno presenta muy buen sistema de aislamiento debido a las bajas temperaturas medidas en las superficies del mismo.

4. IMPLEMENTACIÓN Y SIMULACIÓN DEL MODELO CFD.

Modelos en CFD se basa en tres pilares importantes: En primer lugar, exige una comprensión de los fenómenos físicos involucrados en cualquier proceso. En segundo lugar, la física de los fenómenos debe traducirse en relaciones matemáticas. En tercer lugar, debido a la complejidad de no linealidad en las matemática, las ecuaciones que rigen debe resolverse mediante algoritmos numéricos. Un uso eficaz de esta herramienta se basa igualmente en cada uno de estos pilares. Cualquier error en uno de estos pilares se traduce en malas predicciones y puede conducir a conclusiones incorrectas y resultados potencialmente catastróficos. Para un uso óptimo, el ingeniero debe comprender la física, las matemáticas, y los métodos numéricos para determinar cuándo los resultados de la simulación representan la realidad.

El uso de herramientas CFD se ha incrementado en el tiempo debido a la reducción en el costo computacional dado que existen equipos de computo con altas capacidades para corridas en tiempos cortos, ya se encuentran disponibles mejores modelos físicos y detallados en códigos comerciales que ayudan a reducir los costes de explotación, mejora el rendimiento del producto, y aumenta la calidad del producto a través de la optimización del sistema. En algunos casos, ayuda a evaluar diferentes opciones de diseño que de forma experimental debido a las limitaciones de seguridad sería imposible evaluarlas. También da lugar a mejoras en la seguridad de las operaciones. Debido a que un modelo es tan bueno como los datos que representa, aunque se potencializa aún más cuando es realizado de la mano con experimentos. La CFD puede ayudar a identificar los principales experimentos necesarios en lugar de realizar todas las pruebas necesarios en un diseño factorial completo.

Esto permite que el investigador dedique más tiempo a los ensayos que lo llevará más cerca de una posible solución. De esta manera, ayuda a ampliar los métodos CFD en lugar de sustituirlos.

La Transferencia de calor juega un papel fundamental en los procesos de combustión industrial, donde el objetivo principal es transferir el calor de los productos calientes de la combustión a algún tipo de carga. En los procesos industriales, la radiación es a menudo el mecanismo predominante dadas las altas temperaturas que se manejan y la convección forzada también desempeña una función importante. Cuanto más eficiente son los procesos de transferencia de calor, mayor será la eficacia global del sistema. Esto es importante por muchas razones. Los gastos asociados al consumo de combustible son inversamente proporcionales a la eficiencia, la más alta eficiencia se logra con el menor consumo de combustible. La contaminación ocasionada por las emisiones es indirectamente proporcional a la eficiencia del combustible. Cuanto mayor sea la eficiencia, menor es el consumo de combustible y, por tanto, menor será la emisión por unidad de producto, Una eficiencia térmica alta también puede verse traducida en menos energía que se pierde a través de las paredes de la combustión, La mejora de la eficiencia térmica, por lo tanto, depende de la maximizar la transferencia de calor de los productos de combustión a la carga aquí radica la importancia de modelar y simular este tipo de procesos.

Para el fluent que fue el software de fluido dinámica computacional CFD utilizado, fue necesario especificar las condiciones del problema que se resolvió, así como suministrar

ciertos parámetros de resolución para que el programa consiguiera encontrar una correcta solución del problema. Los pasos metodológicos que se siguieron son:

1. Especificación de la geometría del horno teniendo en cuenta que el horno se simuló en dos dimensiones y marcando claramente las entradas de aire, la zona de recuperación, las inyecciones de carbón y la salida de gases en la chimenea.
2. Creación de la malla, o celdas en las que van a ser calculadas todas las variables. La malla puede ser estructurada o no estructurada. La malla estructurada está formada por rectángulos o paralelepípedos ordenados, que pueden deformarse para adaptarse a las superficies curvas de la geometría. La malla no estructurada está habitualmente formada por triángulos o tetraedros y, en cualquier caso, no tiene un orden matricial. Este último tipo de mallado es mucho más sencillo de ajustar a formas complejas que el anterior, aunque tiene un alto costo computacional y para nuestro caso en particular se usó una malla estructurada formada por rectángulos.
3. Definición de los modelos que se van a utilizar como son los modelos de energía, turbulencia, modelo de combustión y los modelos que describen los fenómenos de transferencia, calor y masa. Estos modelos deben estar seleccionados en el software.
4. Especificación de las propiedades del fluido, tales como la viscosidad, la densidad, las propiedades térmicas, entre otras. Fluent maneja las ecuaciones de variación de estas propiedades con la temperatura, la presión, etc.
5. Imposición de las condiciones de frontera, que controlan los valores de ciertas variables en los límites del dominio de la solución. Esto consiste en tomar valores fijos de la presión, velocidad y temperatura, o de sus gradientes. También hay que

imponer condiciones para las variables de turbulencia de acuerdo al modelo que se esté utilizando y es muy importante el conocimiento del proceso real que se este simulando.

6. Introducción de las condiciones iniciales, para el caso del horno que se considere un problema cuasi-estacionario, es preciso introducir al programa unos valores iniciales de las variables, de los cuales partirá el proceso iterativo.
7. Control de los parámetros que afectan la resolución numérica del problema. Durante el proceso interactivo se actúa definiendo los tipos de discretización, variando los factores de relajación y fijando los criterios de finalización de las iteraciones de acuerdo a los parámetros establecidos al inicio de la simulación que para nuestro caso se le hizo un seguimiento a la temperatura de salida de los gases de chimenea.
8. Proceso de cálculo. Durante el mismo se monitorea la convergencia y se controla la evolución de las variables en algunos puntos.
9. Análisis de la solución. Comprobación y validación de que la resolución es correcta y estudio de los resultados.

4.1 Generalidades del horno simulado.

El horno simulado corresponde a un horno túnel para la producción de ladrillos, cuya longitud es de 85 mts de largo y una altura de 3.6 mts, internamente se encuentran 21 bloques de ladrillo, cada bloque con 2.8 mts de ancho y 1.86 mts de alto. Para representar la distribución de los ladrillos se supuso cada bloque como un medio poroso, se tomo una

vista lateral que esta representada por la entrada de aire secundario, una salida de recuperación de energía, 16 inyecciones de combustible y la salida de gases en la chimenea, además se considero despreciable los efectos térmicos de las transformaciones fisicoquímicas de la carga.

En la Figura 3 se presenta la zona de cocción y se muestra la forma de distribución de las inyecciones; sin embargo, se realizaron algunas abstracciones e idealizaciones para disminuir el costo computacional.



Figura 3. Horno túnel zona de cocción

La malla en dos dimensiones que representa el interior del horno se construyó utilizando el preprocesador de CFD GAMBIT®. Este software se utilizó para crear la geometría del horno realizando una abstracción del horno real y llevarlo a una geometría en 2D y posteriormente se subdivide el horno en celdas de tamaño uniforme para realizar el cálculo numérico que resuelve los modelos planteados para simular este sistema. Se utilizaron

aproximadamente 8000 celdas computacionales con forma rectangular en la Figura 4 se presenta un esquema de la malla creada para las tres zonas del horno, cada bloque interno del horno representa un arreglo de ladrillos con una porosidad para simular la configuración en la cual se disponen los ladrillos a la hora de iniciar el proceso de cocción.

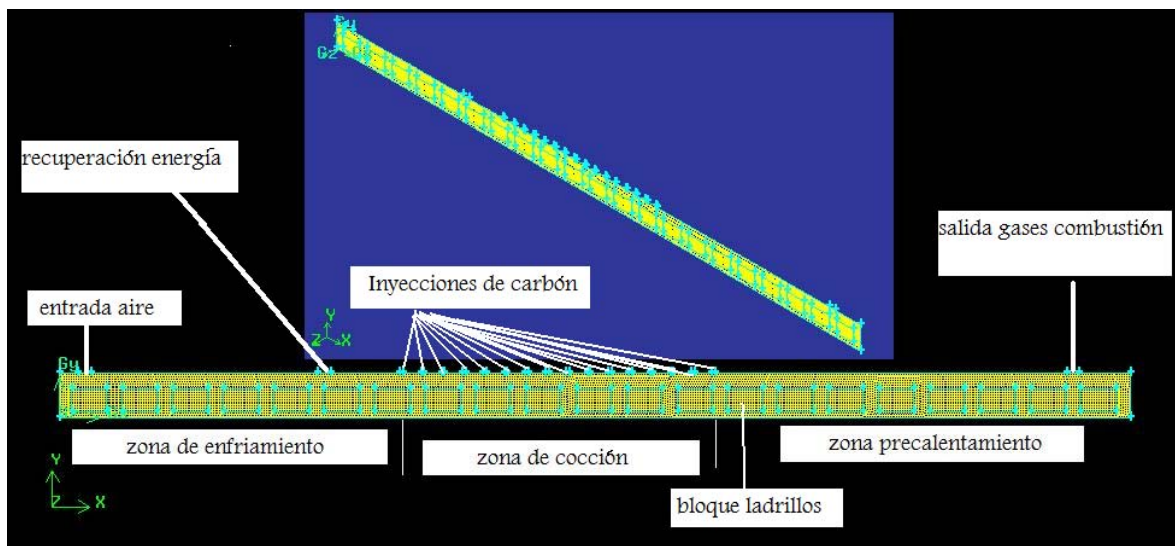


Figura 4. Representación computacional del horno.

4.2 Modelos y submodelos utilizados

Para representar la combustión del carbón se utilizó el modelo de combustión de no-premezcla el cual utiliza los conceptos de fracción de mezcla, de Función de Densidad de Probabilidad (FDP) y la condición de equilibrio químico. Para la generación de de la tabla de la función de densidad de probabilidad se utilizó el análisis próximo y el análisis elemental que se presenta en la Tabla 5Tabla 6.

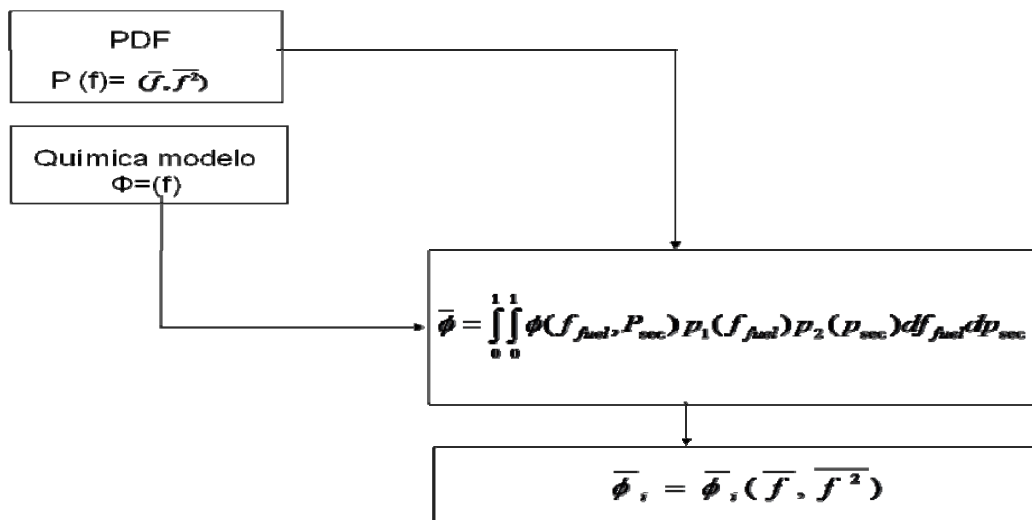
Tabla 5. Análisis elemental

Elemento	%
Carbono	60.4
Hidrógeno	5.2
Nitrógeno	1
Azufre	0.4
Cenizas	13.96
Oxígeno	18.8

Tabla 6. Análisis próximo.

Humedad residual	9.32
Cenizas	13.96
Material volátil	40.19
Carbono fijo	36.53
Azufre total	0.4

En la Figura 5 se presenta el esquema mediante el cual fluent genera la función de distribución de probabilidad para predecir las composiciones en el equilibrio.

**Figura 5.** Esquema ilustrativo de la creación del PDF.

Para el modelo de combustión de no premezcla se usó el modelo de dos fracciones de mezcla. Para el caso del carbón, se tomó el carbón sólido como la primera fracción y el material volátil como la segunda fracción. Para el caso del gas de síntesis se tomó el carbón y material volátil como una fracción y la composición del gas de síntesis teórico como se presenta en la Tabla 7 como la segunda fracción de mezcla. Este planteamiento resuelve las ecuaciones de transporte de uno o dos escalares conservados, o las fracciones de masa, sin la resolución de ecuaciones de las especies individuales. En resumen, las ecuaciones de transporte para la fracción de mezcla y su varianza fueron resueltos. El mecanismo de reacción por lo tanto no podría ser definido explícitamente por los usuarios. La concentración de especies se podrían predecir de los campos de la fracción de la mezcla y la interacción entre la turbulencia y la química se consideró con una función de densidad de probabilidad de forma (PDF) (Fluent 6.2 User's Guide, 2005). Algunas de las ventajas principales de este enfoque son la formación de las especies intermedias y los efectos de la disociación se tienen en cuenta. En la creación de la tabla de PDF para la combustión de carbón y gas de síntesis el modelo de la química de equilibrio y el sistema de combustión no adiabática fueron elegidos, como lo ha hecho Stastny et al. (2002). Los otros parámetros necesarios son poder calorífico inferior del carbón y el gas de síntesis, la composición del combustible y la composición del oxidante. Con el análisis próximo y elemental del combustible utilizado en la ladrillera y con el valor calorífico presentados en las Tabla 5 y Tabla 6, FLUENT define las especies presentes que en el caso particular en total fueron 29.

Tabla 7. Composición gas de síntesis.

Componente	Fracción másica
N2	0.51
CO2	0.13
CO	0.35
H2	0.01

En la generación del PDF para la combustión del carbón, es un carbón alto en volátiles, para la desvolatilización se hizo uso de el modelo single rate y para la combustión el submodelo escogido fue el de kinetics/diffusion-limited que han sido los modelos que más se han utilizado y los parámetros fueron utilizados por Khare y compañeros y se presentan en la Tabla 8. **Parámetros submodelos de combustión tomados de Factors influencing the ignition of flames from air-fired swirl Khare et al.**

Tabla 8. Parámetros submodelos de combustión tomados de Factors influencing the ignition of flames from air-fired swirl Khare et al.

Parámetro	Valor
Modelo de desvolatilización	Single rate
Factor pre-exponencial (s^{-1})	2e5
Energía de activación	4.9eE7
Modelo combustión	Kinetic/diffusion-limited
Difusión másica	6.5e12
Factor pre exponencial	6.5e-12

Razón de cambio de la energía de activación	7.1e7
---	-------

4.2.1 Modelo de combustión de No-premezcla

El modelo propuesto hace predicciones mediante la resolución de las ecuaciones de conservación tanto para la fase gaseosa como para la fase sólida. Para la fase gaseosa se usa un planteamiento tipo euleriano, mientras que para la fase sólida (carbón) se usa un planteamiento tipo lagrangiano. El modelo consta de sub-modelos para la turbulencia, la radiación, la combustión gaseosa, la dispersión de partículas; la devolatilización y la combustión de las partículas. Para la fase gaseosa turbulenta se resolvieron las ecuaciones de conservación en estado estacionario para la masa, momentum, entalpía, fracción de mezcla y turbulencia.

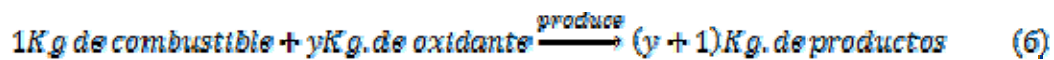
Los modelos utilizados para describir los comportamientos se tomaron en dos dimensiones y en coordenadas cartesianas y toman la siguiente forma general [Versteeg et al. 1995]:

$$\frac{\partial \rho u \Phi}{\partial x} + \frac{\partial \rho v \Phi}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + S + S_p \quad (5)$$

Donde ρ , Φ , Γ , S y S_p representan la densidad del fluido, una variable escalar general, coeficiente de intercambio de turbulencia, término fuente de la fase gaseosa y término fuente de la fase de partículas, respectivamente. La fase gaseosa y la fase discreta de partículas se acoplan mediante el término fuente de la fase discreta. La variable escalar

general puede representar: masa de la fase gaseosa ($\Phi = 1$), componentes de la velocidad, entalpía, fracción de mezcla, energía y disipación turbulenta, concentración de especies, etc.

La combustión en fase gaseosa se modeló usando el sub-modelo de fracción de mezcla que supone que la etapa controlante en la combustión es la turbulencia, la cinética química se considera demasiado rápida y de esta forma la combustión se puede representar de acuerdo con la siguiente suposición:



Junto con el principio de conservación de especies atómicas, se llega a definir la fracción de mezcla como:

$$Z = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,comb} - Z_{i,ox}} \quad (7)$$

Donde Z_i es la fracción másica para algún elemento i (C, H, O) presente inicialmente en la corriente de combustible. Estas fracciones de mezcla se calculan mediante ecuaciones de conservación similares a la ecuación (5). La interacción entre la química y la turbulencia se modela mediante una FDP de forma determinada y que se puede pensar como la fracción de tiempo que probablemente toma el fluido en la vecindad de un estado de fracción de mezcla Z .

Las trayectorias de las partículas se pueden determinar mediante balances de fuerzas sobre la partícula en un marco de referencia lagrangiano. En este balance se igualan las fuerzas que actúan sobre las partículas con su inercia y se puede escribir como:

$$\frac{d\mathbf{U}_P}{dt} = F_D(\mathbf{U} - \mathbf{U}_P) + g \frac{\rho_P - \rho}{\rho_P} + f_i \quad (8)$$

f_i es cualquier fuerza por unidad de masa que actúa sobre la partícula y F_D es la fuerza de arrastre, que tiene la siguiente forma:

$$F_D = \frac{3\mu C_D Re}{4\rho_P D_P^2} \quad (9)$$

C_D es el coeficiente de arrastre que para partículas no esféricas se expresa de la siguiente manera: [Fluent. 2005]

$$C_D = \frac{24}{Re_{sph}} (1 + b_1 Re_{sph}^{b_2}) + \frac{b_3 Re_{sph}}{b_4 + Re_{sph}} \quad (10)$$

$$b_1 = \exp(2.3288 - 6.4581\phi + 2.4486\phi^2) \quad (11)$$

$$b_2 = 0.0964 + 0.5565\phi \quad (12)$$

$$b_3 = \exp(4.905 - 13.8944\phi + 18.4222\phi^2 - 10.2599\phi^3) \quad (13)$$

$$b_2 = \exp(1.4681 + 12.2584\phi + 20.7322\phi^2 - 15.8855\phi^3) \quad (14)$$

$$\phi = \frac{s}{S} \quad (15)$$

Donde Φ es el factor de forma, que se define como la relación del área superficial (s) de una esfera que tiene el mismo volumen que la partícula al área superficial real de la partícula (S). El Re_{sph} se calcula con base en el diámetro de la esfera.

El modelo de devolatilización utilizado supone que la velocidad de devolatilización es de primer orden y que depende de la cantidad de volátiles que permanecen todavía en la partícula. Esta cinética simple se representa de la siguiente manera:

$$-\frac{dm_p}{dt} = k[m_p - (1 - f_{v,0})(1 - f_{w,0})m_{p,0}] \quad (16)$$

Donde m_p es la masa de la partícula en kg; $f_{v,0}$ es la fracción másica de volátiles presentes inicialmente en la partícula; $f_{w,0}$ es la fracción másica inicial de material que se volatiliza o evapora; $m_{p,0}$ es la masa inicial de la partícula en kg., k es una constante cinética en s^{-1}

El coeficiente cinético k tiene la forma funcional tipo Arrhenius; esto es, en términos de un factor pre-exponencial y una energía de activación. Este modelo requiere el conocimiento de estos dos parámetros.

Cuando la devolatilización se completa comienza la reacción química en la superficie de la partícula; en este modelo la velocidad de reacción puede estar limitada por la difusión del oxidante en la partícula o por la cinética de reacción. La velocidad de difusión se representa por:

$$R_1 = C_1 \frac{\left[\left(T_p + \frac{T_\infty}{2} \right) \right]^{0.75}}{D_p} \quad (17)$$

Mientras que la velocidad de reacción se representa mediante:

$$R_2 = C_2 \exp\left(-\frac{E}{RT_p}\right) \quad (18)$$

La velocidad de combustión de la partícula que incorpora el efecto combinado de la reacción y la difusión, queda representada como:

$$\frac{dm_p}{dt} = -\pi D_p^2 P_0 \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (19)$$

En este modelo el tamaño de la partícula es constante pero la densidad decrece.

La radiación se incorpora al modelo mediante el sub-modelo de radiación P-1 que se basa en la expansión en series de potencias de la intensidad de radiación. Cuando están presentes fases discretas de partículas el sub-modelo se puede presentar como [Fluent. 2005]:

$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla G) + 4\pi \left[\alpha \frac{\sigma T^4}{\pi} + E_p \right] - [a + a_p] G = 0 \quad (20)$$

Donde E_p es la emisión equivalente y a_p es la absorción equivalente de las partículas; ambas se calculan como:

$$E_p = \lim_{V \rightarrow 0} \sum_{n=1}^N e_{pn} A_{pn} \frac{\sigma T_{pn}^4}{\pi V} \quad (21)$$

$$a_p = \lim_{V \rightarrow 0} \sum_{n=1}^N e_{pn} \frac{A_{pn}}{V} \quad (22)$$

Donde e_{pn} , A_{pn} y T_{pn} , son la emisividad, área proyectada y temperatura de la partícula n. La suma se hace sobre todas las partículas en el volumen V .

En la Figura 6 se presenta un esquema ilustrativo de la forma de solución usada por fluent para resolver los modelos presentados en esta sección y son resueltos usando el método numérico de volúmenes finitos.

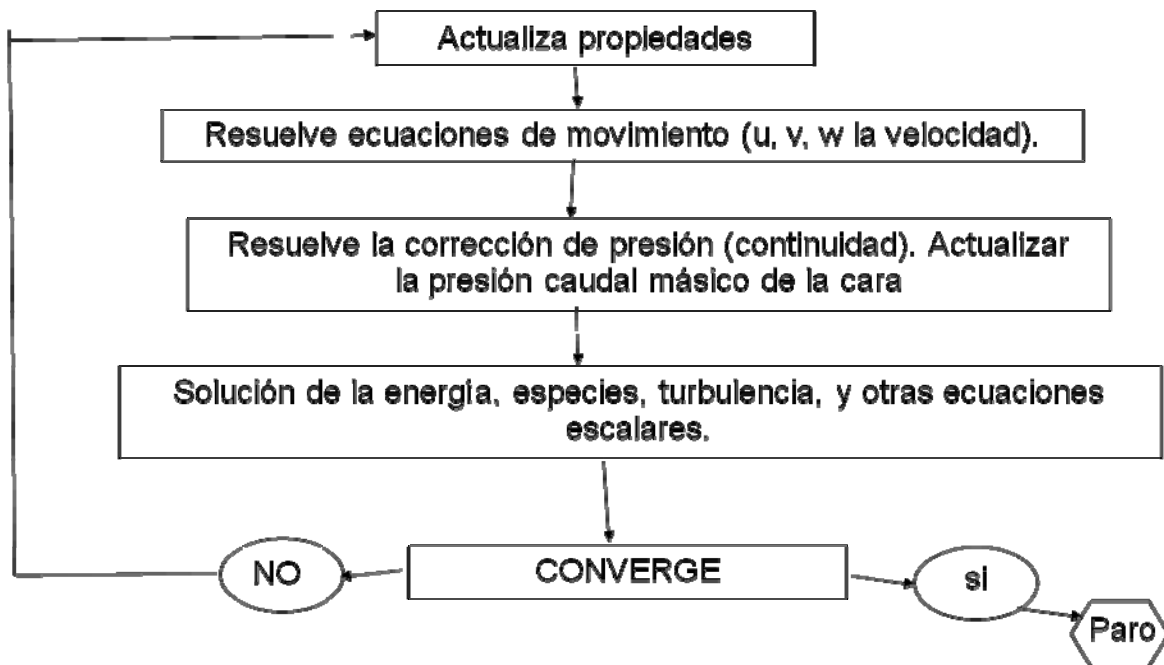


Figura 6 . Esquema Ilustrativo de la forma de solución de los modelos utilizada por Fluent

4.3 Chequeo de independencia de mallas.

La independencia de mallas se realiza con el fin de comprobar si la malla que se esta utilizando para resolver la simulación es la óptima o se necesitan nodos adicionales para encontrar una mejor solución, de esta manera se optimizan los recursos computacionales y los tiempos de simulación.

Tanto para el gas de síntesis como para el carbón se utilizo la misma malla por lo tanto se realizó la prueba de independencia con el gas de síntesis óptimo para el horno túnel de la

ladrillera con aproximadamente 27.000 nodos, triplicándose el número que se tenía, como se presenta en la Figura 7, la forma de presentar los resultados para probar independencia es clara que debe ser una variable que para el caso particular es la temperatura frente el número de nodos, pero la forma como se realizó para el caso particular del horno es garantizando que los nodos seleccionados se encuentran dentro de la zona plana de la curva exponencial.

Para la evaluación de la independencia de mallas se usó el método de gradiente de temperatura que es la variable más importante que se está evaluando.

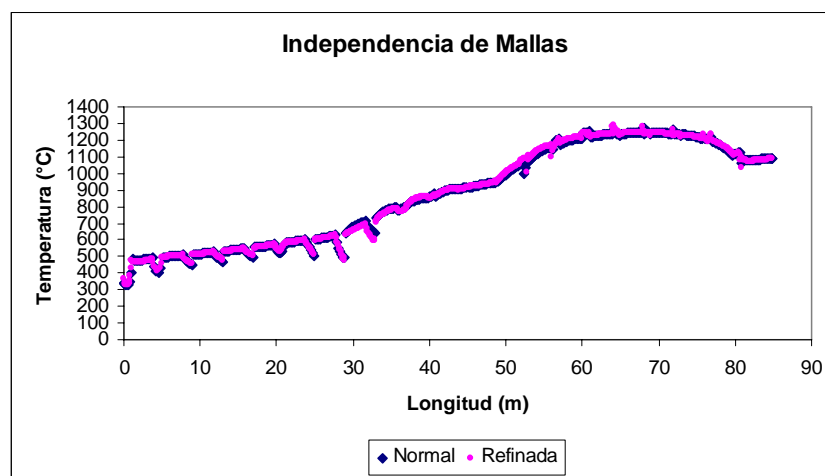


Figura 7. Solución para la malla con 8000 celdas y con 27000 celdas aproximadamente.

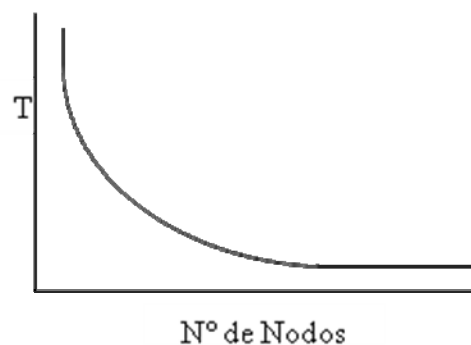


Figura 8. Esquema óptimo para la prueba de independencia de mallas

En la Figura 8 se presenta el esquema óptimo de para la prueba de independencia de mallas pero dado que refinando la malla se hizo 3 veces el valor inicial y los resultados se conservaron con ello se garantiza que estamos trabajando en la zona asintótica sobre el eje X.

5. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

En este trabajo se simuló la combustión del carbón en el horno, tal como ocurre en la operación en planta actual. Para validar la simulación se midieron (ver sección anterior) los flujos característicos de masa y energía en el horno y se realizó una extrapolación del horno en 2D y se compararon con los resultados de la simulación. El número de iteraciones fue de 27400 garantizando que en el 10% de las iteraciones se tuviera un valor constante en la temperatura de salida de los gases. Para el caso del gas de síntesis dado que aún no se tienen datos experimentales para la validación se realizó un modelo predictivo utilizando los mismos modelos, partiendo de la información del diseño del gasificador para realizar los respectivos cambios a la hora de realizar la sustitución parcial de combustible.

5.1 Carbón pulverizado

El objetivo principal de la simulación es la validación del perfil de temperatura como se presenta en la Figura 9 donde se valida el perfil de temperaturas obtenido mediante CFD y los datos experimentales tomados en planta. Es necesario aclarar que la forma como se presenta el perfil de temperatura muestra primero la zona de enfriamiento, luego la zona de cocción y por último la zona de calentamiento. Como se puede observar, el modelo predice bien la tendencia de los datos experimentales y si bien los datos para la zona de enfriamiento y precalentamiento no alcanzan las temperaturas inicial y final esperadas, esto se debe principalmente a la forma como se suministra el combustible que de acuerdo a las temperaturas que se tengan en el horno se suministra la cantidad de combustible y de aire.

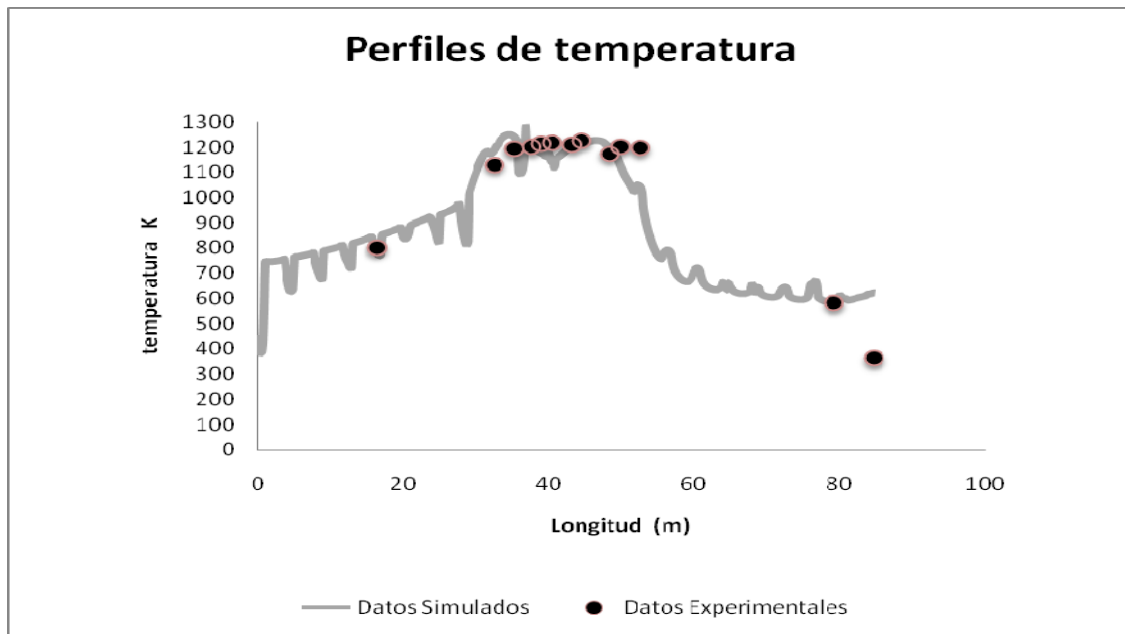


Figura 9. Comparación del perfil de temperaturas simulado y experimental a los 2 metros sobre el nivel del carro de los ladrillos.

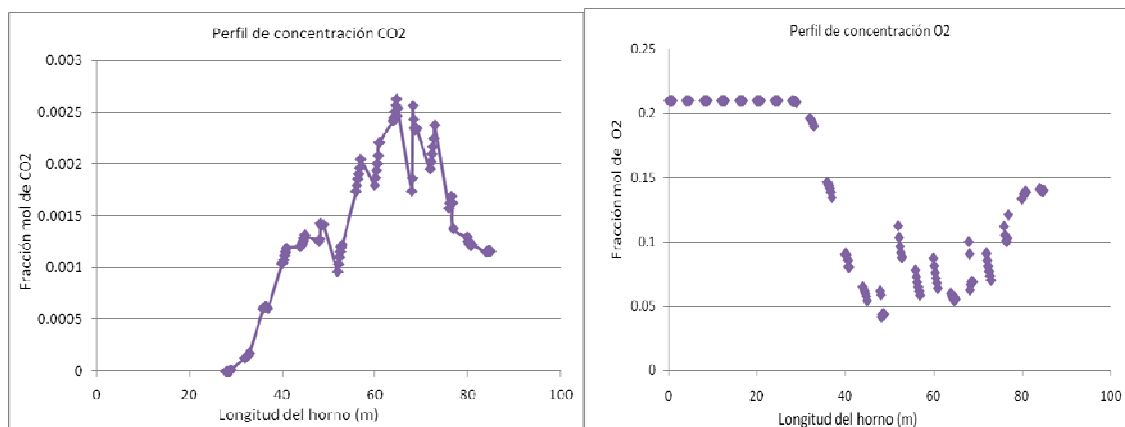


Figura 10. Perfiles de concentración de O₂ y CO₂

En la Figura 10 se presentan los perfiles de concentración de O₂ y CO₂. La zona donde existen los picos más altos de CO₂ se encuentra ubicada en la zona donde inicia el proceso de cocción que es la zona crítica para el consumo de combustible que es donde se tiene el

más alto consumo. En el punto donde se mide las emisiones en el horno los valores oscilan entre 1.8 y 4.0% y la simulación para el CO_2 presenta un valor promedio del 2% que se encuentra en el rango de oscilación lo que valida y predice satisfactoriamente las emisiones de CO_2 . La simulación no predice correctamente la formación de CO pues se utilizó el modelo de premezcla que considera equilibrio químico, el cual no reproduce correctamente las consideraciones cinéticas causantes de la formación de CO. Es decir, a las condiciones de salida del horno la concentración de CO en el equilibrio es muy baja y por lo tanto la simulación predice un bajo flujo del mismo.

En la

Figura 11 se presenta los contornos de temperatura del horno simulado arrojados en fluent.

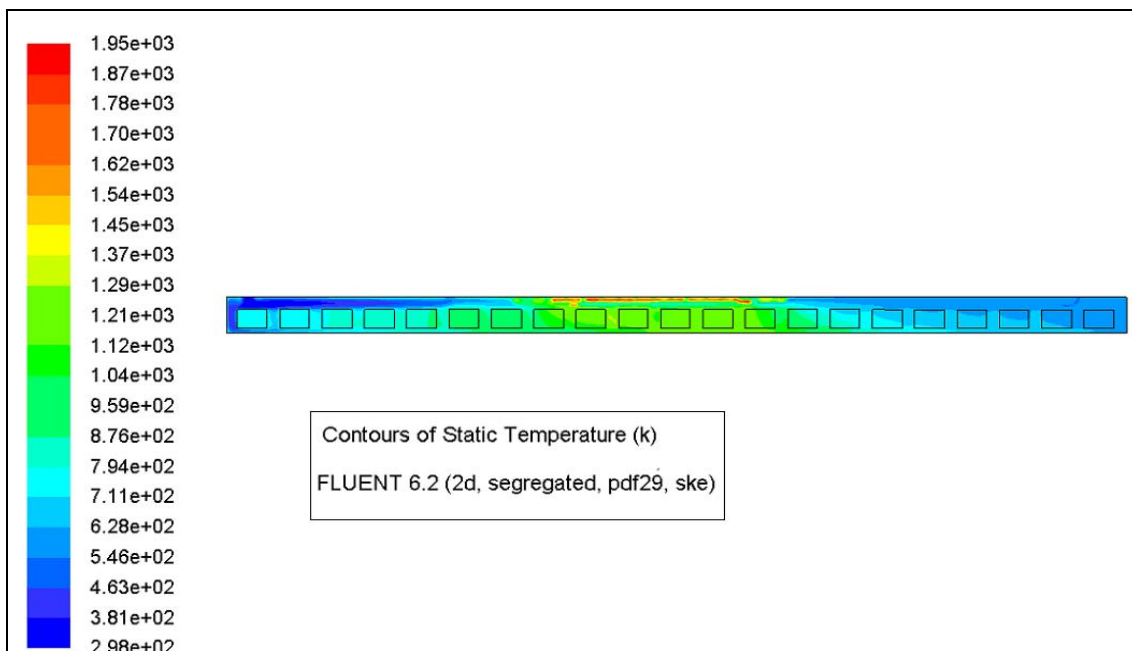


Figura 11. Contornos de temperatura en el horno.

5.2 Carbón pulverizado y gas de síntesis

Para las simulaciones con carbón y gas de síntesis se partió de la información teórica que se tenía para el diseño y puesta en marcha del gasificador que suministrará el combustible con las composiciones arrojadas por el software de modelamiento MGC4 desarrollado por Chejne y colaboradores. Se evaluaron diferentes alternativas para el ingreso del gas en la zona de cocción con el fin de predecir cómo se modifican las curvas de calentamiento en el horno y poder tomar acciones a la hora de implementar el gas de síntesis en el proceso de cocción de ladrillos.

En la Figura 12 se presenta los perfiles de temperatura para la el ingreso del gas en partes diferentes de la zona de quema, de acuerdo a los resultados predictivos arrojados por la simulación a medida que se acerca más la entrada del gas a la zona de enfriamiento el perfil de temperatura en la zona de quema se amplía mas y esto conlleva a que se debe aumentar el suministro de aire en la zona de enfriamiento por lo que lo más recomendado es ubicar la alimentación del gas en la zona inicial de quema y aumentar la carga para ajustar la curva en la zona de calentamiento y disminuir los tiempos de residencia en el horno.

Durante los ensayos experimentales en el horno, se apreció cualitativamente el exceso de gas cuando se inyecta el gas de síntesis en diferentes puntos de la zona de cocción.

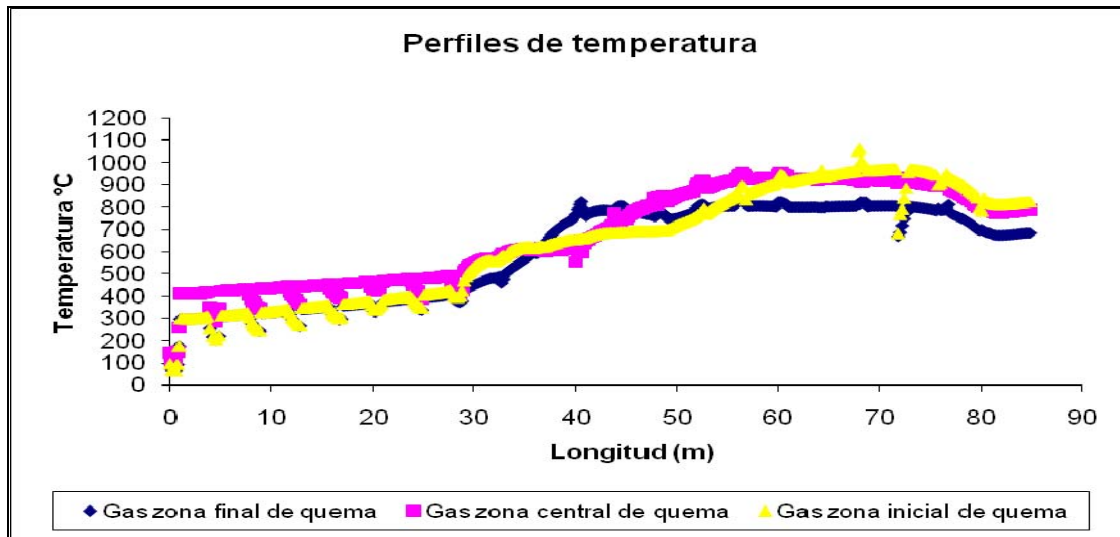


Figura 12. Perfiles de temperatura para el suministro en los diferentes puntos en la zona de quema.

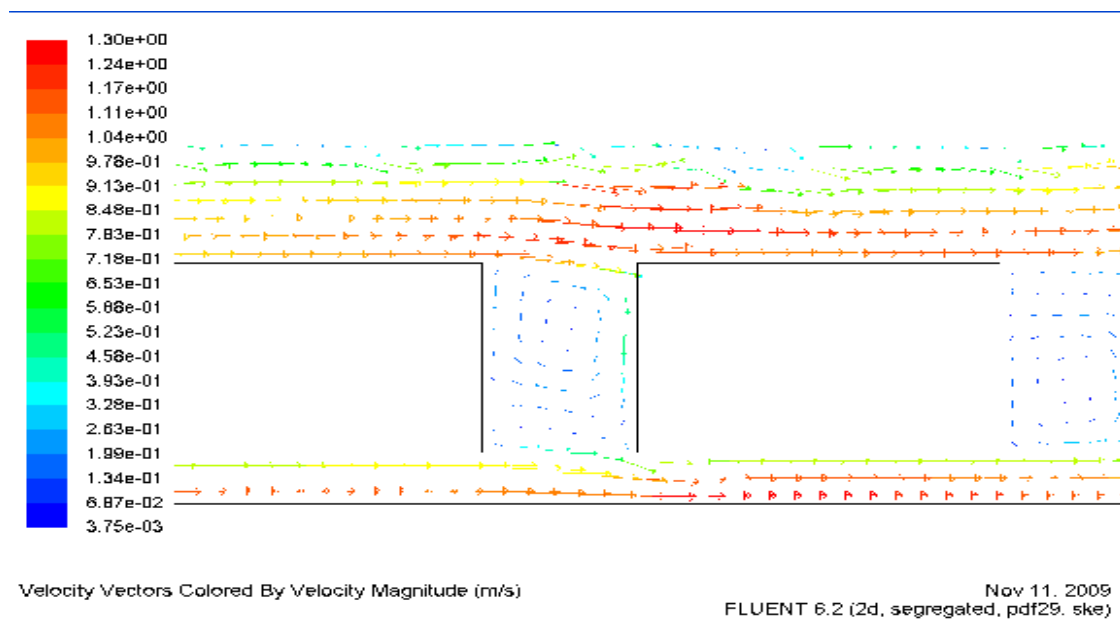


Figura 13. Contornos de velocidad dentro del horno.

En la Figura 13 se presentan los contornos de velocidad en el horno, las mayores velocidades se generan donde se encuentran las temperaturas más altas como era de

esperarse y las turbulencias que se forma entre los bloques dan explicación de la uniformidad de la temperatura a lo alto del horno.

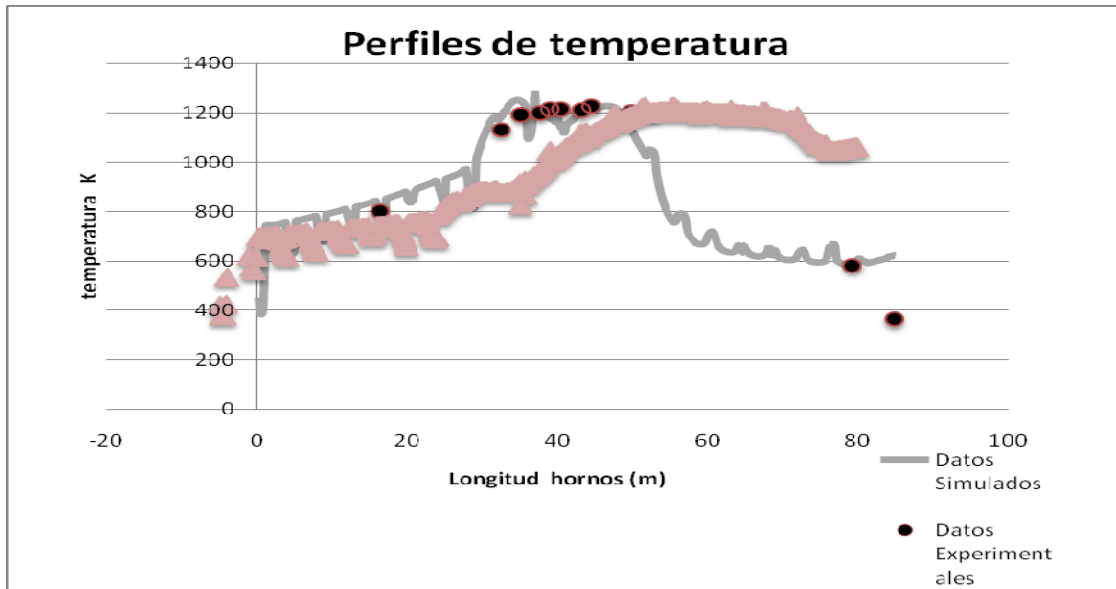


Figura 14. Perfiles de temperatura para el horno trabajando con carbón y gas de síntesis y carbón.

En la Figura 14 se presentan los resultados de las curvas de temperatura para el horno trabajando con carbón pulverizado como combustible y trabajando con la sustitución del aproximadamente el 60% de carbón por gas de síntesis, se alcanza las temperaturas del proceso pero la curva no se logra dado que se trabajo con los valores de dimensionamiento y es una cantidad de energía suficiente para suplir hasta en un 85% la energía del horno, de allí que se tomen medidas para obtener la curva de quema sin modificación alguna.

6. CONCLUSIONES.

Existe un amplio trabajo en el modelamiento de hornos en general pero para el caso particular de los hornos túnel la literatura es muy limitada y el modelamiento de estos se ha realizado bajo el enfoque de la transferencia de calor, y no se ha tenido en cuenta la interacción y la sinergia de los diferentes fenómenos físicos que ocurren, en el modelo desarrollado se utilizaron los modelos físicos que se han utilizado para diferentes tipos de hornos.

Se desarrollo un modelo numérico CFD en 2D para la predicción de los perfiles de temperatura en un horno túnel industrial utilizando carbón pulverizado como combustible que fue validado satisfactoriamente, a partir de este modelo se simuló el comportamiento del horno trabajando con gas de síntesis parcialmente y se evaluó el ingreso del gas en las diferentes puntos de la zona de quema encontrándose que la mejor zona para la inyección del gas es en la parte inicial del proceso de quema dado que en la medida que se desplaza la zona de entrada se prolonga la zona de quema.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Abbas, T.; Awais, M. M.; Lockwood, F. C. An artificial intelligence treatment of devolatilization for pulverized coal and biomass in co-fired flames. *Combustion and Flame* 2003, 132(3), 305-318.

[2] A. J. M. J. M. Oprins, G. J. Heynderickx. (2003). Calculation of three-dimensional flow and pressure fields in cracking furnaces. *Chemical Engineering Science*, 58, 4883-4893.

[3] A.J. M. Oprins, G. J. Heynderickx. (2005). Improvement of a chain-hardening furnace by computational fluid dynamics (CFD) simulation. *Applied Energy*, 81, 260-276.

[4] A.M. Eaton, L.D. Smoot, S.C. Hill, C.N. Eatough (1999). CFD Components, formulations, solutions, evaluation, and application. *Progress in Energy and Combustion Science*, 25, 387-436.

[5]Baukal, Jr., C.E. (2001). Introduction. In: *Computational Fluid Dynamics in Industrial*

Combustion, edited by Baukal, Jr., C.E., Gershtein, V.Y., Li, X. p. 19-20, CRC Press,

Florida.

[6] Boming Yu (1994). Dynamic modeling of a tunnel kiln. *Heat Transfer engineering*, 15, 39-53.

[7] Dixon, T. F.; Mann, A. P.; Plaza, F.; Gilfillan, W. N. Development of advanced technology for biomass combustion – CFD as an essential tool. *Fuel* **2005**, 84(10), 1303-1311.

[8] D. R. Dugwell and D. E. Oakley (1988). A model of heat transfer in tunnel kilns used for firing refractories. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 31, 2381-2390.

[9] Ebru Mancuhan, Kurtul Kucukada (2006). Optimization of fuel and air use in a tunnel kiln. *Applied Thermal Engineering*, 26, 1556-1563.

[10] Energy Information Administration (2008). Annual Energy Outlook 2008. Consultado en noviembre 10, 2008 en www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/.

[11] Ezio Facincani (1993). Tecnología cerámica de ladrillo. San Vicente: Faenza Editrice Iberica S.L.

[12] F. Marias (2003). A model of a rotary kiln incinerator including processes occurring within the solid and the gaseous phases. *Computers and Chemical Engineering*, 27, 813-825.

[13] H. O. Gardiek and R. Scholz, Thermal technology for tunnel kiln firing in the ceramic industry, *Interceram.* 30,4-6 (1981).

[14] Hosny Z. Abou-Ziyan (2004). Convective heat transfer from different brick arrangements in tunnel kilns. *Applied Thermal Engineering*, 24, 171-191.

[15] Hussain, A., Ani, F.N., Sulaiman, N., Adnan, M.F. (2006). Combustion Modelling of an Industrial Municipal Waste Combustor in Malaysia. *International Journal of Environmental Studies*, Vol. 63, No. 3, p. 313-329.

[16] J. W Rogerson.; , J. H. Kent; Bilger, R. W. Conditional moment closure in a bagasse-fired boiler. *Proceedings of the Combustion Institute* **2007**, 31, 2805-2811.

[17] J. R. Fan, X. H. Liang, Q. S. Xu, X. Y. Zhang and K. F. Cen (1997). Numerical simulation of the flow and combustion processes in a three-dimensional, w-shaped boiler furnace. *Energy*, 22, 847-857.

[18] L.X. Zhou, L. Li, R.X. Li, J. Zhang (2002). Simulation of 3-D gas-particle flows and coal combustion in a tangentially fired furnace using a two-fluid-trajectory model. *Powder Technology*, 125, 226-233.

- [19] Maria da Graca Carvalho and Marcos Nogueira (1997). Improvement of energy efficiency in glass melting furnaces, cement kilns and baking ovens . Applied Thermal Engineering, 17, 921-933.
- [20] M. Chmielowski, E. Specht (2006). Modelling of the heat transfer of transport rollers in kilns. Applied Thermal Engineering, 26, 736-744.
- [21] O. B. Gol'tsova, V. S. Klekovkin, O. B. Nagovitsin, and S. V. Antonychev (2006). Heat losses in a tunnel kiln for brick firing. Glass and Ceramics, 63, 127-129.
- [22] P. J. Woodburn & R. E. Britter (1996). CFD Simulations of a Tunnel Fire Part I. Fire Safety Journal, 23, 35-62.
- [23] P. J. Woodburn & R. E. Britter (1996). CFD Simulations of a Tunnel Fire Part II. Fire Safety Journal, 26, 66-90.
- [24] Robert H. Essenhigh (2001). Studies in Furnace Analysis: Prediction of Tunnel Kiln. Energy & Fuels, 15, 552-558.
- [25] Risto V. FILKOSKI, Ljiljana L. PETROVSKI and Piotr KARAS (2006). Optimisation of pulverised coal combustion by means of CFD/CTA modelling. . Thermal Science, 10, 161-179.

- [26] Robert H. Essenhigh (2001). Studies in Furnace Analysis: Prediction of Tunnel Kiln performance by application of the integral Energy Equation. *Energy & fuels*, 15, 552-558.
- [27] Roy Koomullil, Bharat Soni, Rajkeshar Singh (2008). A comprehensive generalized mesh system for CFD applications. *Mathematics and Computers in Simulation*, 78, 605-617.
- [28] Rubini, P.(2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics. In: *PSE13 Process Simulation and Design Lecture Notes*. Cranfield University, UK, p. 6
- [29] R. Vuthaluru, H.B. Vuthaluru . (2006). Modelling of a wall fired furnace for different operating conditions using fluent. *Fuel Processing Technology*, 87, 633-639.
- [30] Saripalli, R., Wang, T., Day, B. (2005). *Simulation of Combustion and Thermal Flo in an Industrial Boiler*. In: Proceedings of 27th Industrial Energy Technology Conference, New Orleans, Lousiana, May 11-12 2005.
- [31]Shanmukharadhya, K. S. Simulation and thermal analysis of the effect of fuel size on combustion in an industrial biomass furnace. *Energy & Fuels* 2007, 21(4), 1895-1900.

[32]S. S. Sazhin, E. M. Sazhina, O. Faltsi-Saravelou and P. Wild (1996). The P-1 model for thermal radiation transfer: advantages and limitations. *Fuel*, 75, 289-294

[33]Stastny, M., Ahnert, F., Spliethoff, H. (2002). Three-dimensional Combustion Modelling of a Biomass Fired Pulverized Fuel Boiler. In: *Advanced Computational*

[34] *Methods in Heat Transfer VII*, edited by B. Sundén, C.A. Brebbia, WIT Press, Boston, p.439-448.

[35] S.P. Khare a, T.F. Wall a, A.Z. Farida , Y. Liu , B. Moghtaderi , R.P. Gupta (2008). Factors influencing the ignition of flames from air-fired swirl. *Fuel*, 87, 1042-1049.

[36] Sinem Kaya , Kurtul Kucukada ,Ebru Mancuhan (2007). Model-based optimization of heat recovery in the cooling zone of a tunnel kiln. *Applied Thermal* 2007),doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.04.002.

[37] Suhas V. Patankar (2002). Computational modeling of flow and heat transfer in. *Mathematics and Computers in Simulation*, 23, 222-231.

- [38] Thomás Norton and Da- Wen Sun (2006). Computational fluid Dynamics (CFD) an effective and efficient design and analysis tool for the food Industry:Review . *Thermal Science*, 17, 600-620.
- [39]Tan, C. K.; Wilcox, S. J.; Ward, J. Use of artificial intelligence techniques for optimisation of cocombustion of coal with biomass. *Journal of the Energy Institute* **2006**, 79(1), 19-25.
- [40] User's guide FLUENT 6.2. Fluent Incorporated. 2005
- [41] Weydahl, T.; Bugge, M.; Gran, I. R.; Ertesvag, I. S. Computational modeling of nitric oxide formation in biomass combustion. *Applied Mechanics and Engineering* **2002**, 7, 125-142.
- [42] Yiqun Wang and Lifeng Yan (2008). CFD Studies on Biomass Thermochemical Conversion. *International Journal of*, 9, 1108-1130.
- [43] Zarnescu, V.; Pisupati, S. V. An integrative approach for combustor design using CFD methods. *Energy & Fuels* **2002**, 16(3), 622-633.