

SIMULACION NUMERICA DE UN HORNO COLMENA DE LA EMPRESA
LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S USANDO MECANICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL. COMSOL®

EDWIN GONZALEZ BARAJAS
DIEGO ALEXANDER RODRIGUEZ AHUMADA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2014

SIMULACION NUMERICA DE UN HORNO COLMENA DE LA EMPRESA
LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S USANDO MECANICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL. COMSOL®

EDWIN GONZALEZ BARAJAS
DIEGO ALEXANDER RODRIGUEZ AHUMADA

Trabajo de Grado para optar por el Titulo de
Ingeniero Mecánico

Director
ING. CARLOS BORRÁS PINILLA. PhD., MSc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2014

DEDICATORIA

A mi madre.

DIEGO ALEXANDER RODRIGUEZ ARUMADA

DEDICATORIA

*A MI FAMILIA POR SU APOYO INCONDICIONAL,
A LOS AMIGOS QUE HAN ESTADO EN ESTE PROCESO,
YA ELLA(YM) POR SU GRAN AMOR.*

EDWIN GONZALEZ BARAJAS

CONTENIDO

INTRODUCCION.....	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
2. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO.....	23
2.1 OBJETIVOS GENERALES.....	23
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
3. MARCO TEORICO.....	25
3.1 INTRODUCCION A LA INDUSTRIA LADRILLERA Y SUS PROCESOS.....	25
3.2 PROCESO DE FABRICACION DE MATERIALES CERAMICOS.....	26
3.2.1 Extracción de la materia prima.....	26
3.2.2 Preparación de las materias primas.....	27
3.2.3 Secado.....	28
3.2.4 Cocción.....	29
3.3 GENERALIDADES DEL HORNO COLMENA.....	31
3.4 INTRODUCCION A COMSOL MULTIPHYSICS.....	33
3.4.1 Módulo de CFD.....	36
3.4.2 Módulo de transferencia de calor.....	38
3.4.3 Sincronización con SolidWorks.....	39
3.5 GENERALIDADES DEL CFD.....	40
3.5.1 Conservación de masa.....	42
3.5.2 Conservación de momento.....	43
3.5.3 Conservación de la energía.....	46
3.5.4 Modelo de turbulencia.....	49
3.6 MODELO DEL MEDIO POROSO.....	53
3.6.1 Ecuación de Brinkman.....	54

3.7 MODELO DE RADIACION	55
3.7.1 Radiación de superficie a superficie	55
3.8 CONDICIONES DE FRONTERA	57
3.9 DESCRIPCION TERMICA DEL HORNO.....	58
4 DESARROLLO DEL HORNO SIMULADO	62
4.1 REALIZACION DEL MODELO	62
4.2 CONSIDERACIONES PARA EL DESARROLLO	66
4.3 DISCRETIZACION	68
4.4 VALIDACION.....	72
5 PROPUESTAS DE OPTIMIZACION	77
5.1 PROPUESTA 1. Elevación de la carga.....	78
5.2 PROPUESTA 2. Espacio central en la carga.....	81
5.3 PROPUESTA 3. Modificación de altura de pantalla.....	84
5.4 PROPUESTA 4. Aislante en las paredes externas del horno.....	87
5.5 PROPUESTA 5. Aumento en el tiro de la chimenea.....	89
5.6 COMPARACION DE RESULTADOS	90
5.7 DOCUMENTACION MEJOR PROPUESTA.....	92
6 CONCLUSIONES.....	98
7 RECOMENDACIONES.....	101
BIBLIOGRAFIA.....	102
ANEXOS.....	106

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Descripción del horno tipo colmena	20
Figura 2. Modelo CAD del horno.....	21
Figura 3. Calidad del ladrillo dentro del horno finalizado el proceso de cocción. ...	22
Figura 4. Diagrama del proceso.....	26
Figura 5. Cantera	27
Figura 6. Esquema del proceso de fabricación del ladrillo	30
Figura 7. Esquema del horno colmena	33
Figura 8. Entorno de trabajo en COMSOL.....	34
Figura 9. Árbol de modelo.....	35
Figura 10. Diagrama del proceso CFD	41
Figura 11. Diagrama de esfuerzos sobre el elemento de fluido	43
Figura 12. Balance de energía.....	47
Figura 13. Fluctuación de la propiedad ϕ con el tiempo en un mismo punto en un fluido turbulento.	50
Figura 14. Balance de energía (esquema).....	59
Figura 15. Transferencia de calor en el horno	60
Figura 16. Balance de masa.	60
Figura 17. CAD horno real.	63

Figura 18. Fotografías del horno.....	63
Figura 19. Fotografía de la carga en el horno.....	64
Figura 20. Modelo CAD con carga.....	65
Figura 21. Simulación del horno, Flujo y temperatura.....	65
Figura 22. Elementos para mallar geometrías tridimensionales.	69
Figura 23. Mallado del modelo.....	70
Figura 24. Comparación de mallados.	70
Figura 25. Parámetros de la malla.....	71
Figura 26. Información de la malla.....	71
Figura 27. Ubicación termocupas en el horno.....	72
Figura 28. Temperaturas alcanzadas en el horno colmena.	73
Figura 29. Ubicación de los puntos de comparación en la simulación.....	74
Figura 30. Simulación con variación de la temperatura.	74
Figura 31. Comparación de resultados.....	75
Figura 32. Línea de referencia para comparación.	77
Figura 33. Elevación de la carga.....	78
Figura 34. Perfil de temperatura optimización 1.....	79
Figura 35. Temperatura en línea de referencia (elevación carga).	80
Figura 36. Propuesta de espacio en el centro de la carga.....	81
Figura 37. Perfil de temperatura optimización 2.....	82

Figura 38. Línea de comparación propuesta 2.....	83
Figura 39. Temperatura en líneas de referencia (espacio central).....	83
Figura 40. Altura de pared del fogón.....	84
Figura 41. Perfil de temperaturas con cambio de altura de pared.	85
Figura 42. Temperatura en línea de referencia (pantalla).....	86
Figura 43. Temperatura en línea de referencia (aislante).	87
Figura 44. Perfil de temperatura con aislante	88
Figura 45. Temperatura en línea de referencia (aumento del tiro).....	89
Figura 46. Temperatura en línea de referencia (resultados).....	90
Figura 47. Propuesta de espacio en el centro de la carga.....	92
Figura 48. Comparación perfil temperatura mejor propuesta.....	93
Figura 49. Comparativo Flujo dentro del horno mejor propuesta.	94
Figura 50. Deficiencia en las boquillas de alimentación.....	95
Figura 51. Carga en el horno	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Constantes del modelo de turbulencia.....	52
Tabla 2. Propiedades físicas de los materiales.....	66
Tabla 3. Comparación de los valores medidos y simulados.....	76
Tabla 4. Comparativo de resultados.....	91

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Algoritmo de simulación.....	107
ANEXO B. Tiro de la chimenea y flujo de los gases de salida.....	111
ANEXO C. Velocidad de entrada del aire.....	113
ANEXO D. Dimensiones del horno.....	114
ANEXO E. Combustión del carbón.....	115
ANEXO F. Área de salida de los gases.....	118
ANEXO G. Teoría logarítmica de la pared.....	120

RESUMEN

TITULO: SIMULACION NUMERICA DE UN HORNO COLMENA DE LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S USANDO MECANICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL. COMSOL®

AUTORES:

EDWIN GONZALEZ BARAJAS**

DIEGO ALEXANDER RODRIGUEZ AHUMADA**

PALABRAS CLAVES: Simulación numérica, horno colmena, CFD, optimización, COMSOL, transferencia de calor.

CONTENIDO:

En este proyecto de grado se busca el mejoramiento de los procesos de la industria ladrillera nacional más exactamente de la empresa LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S. con el fin de aportar a la optimización de sus procesos en especial del proceso de cocción del ladrillo y otros productos cerámicos, esto mediante el análisis y simulación a un horno colmena de la empresa con el uso de herramientas computacionales y posteriormente aportando una propuesta de optimización para el horno estudiado.

Como metodología de trabajo se realizó la visita a las instalaciones y documentación de trabajos anteriores para conocer las dimensiones del horno y variables de operación del proceso, más exactamente en el tiempo de quema plena de la carga, esto para obtener un modelo simulado del horno con una geometría en CAD y las físicas del proceso como lo son la transferencia de calor y mecánica de fluidos mediante el software COMSOL Multiphysics. Se validó el modelo con mediciones realizadas anteriormente al horno en estado de trabajo y posteriormente se propuso una serie de cambios en geometría del horno y distribución de la carga con el fin de escoger la que presentara el menor gradiente de temperatura y documentarla para dejarla a consideración de la empresa.

A partir de los resultados obtenidos de la temperatura en el modelo del horno simulado se propuso un cambio en la configuración en la distribución de la carga dentro del horno con el fin de reducir la diferencia de temperatura dentro de este y a partir de ello tener una cocción más homogénea de los productos.

*Trabajo de grado

**Facultad de ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica.

Director: Ing. Carlos Borrás Pinilla, PhD.

ABSTRACT

TITLE: NUMERICAL SIMULATION OF A BEEHIVE FURNACE COMPANY LADRILLOS Y ACABADOS S.A.SUSING COMPUTATIONAL FLUID MECHANICS. COMSOL ®

AUTHORS:

EDWIN GONZALEZ BARAJAS**
DIEGO ALEXANDER RODRIGUEZ AHUMADA**

KEY WORDS: Numerical simulation, beehive furnace, CFD, optimization, COMSOL, heat transfer.

CONTENT:

This project attempts to improve the processes of the brick industry in Colombia, more exactly in the brick company: "LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.", in order to contribute to the optimization of the cooking brick process and other ceramic products, this by the analysis and simulation of company's beehive furnace using computational tools and then propose an optimization of the furnace studied.

As a work methodology was carried out visits to the company's installations and obtained documents of the previous jobs to know the furnace's dimensions and process operating variables; more precisely at the time of full load burn this to get a simulated model of the furnace with CAD geometry and physical process such as heat transfer and fluid mechanics using the COMSOL Multiphysics software. The model was validated with measurements made previously to the furnace working and subsequently it was proposed a number of changes in the furnace's geometry and load distribution in order to choose the lowest temperature gradient and document it to leave a consideration of the company

From the results of the temperature obtained in the furnace model simulated was proposed a change in the configuration in the load distribution within the furnace in order to reduce the temperature difference inside of it and having a cooking more homogeneous of the products.

**Degree work

**Faculty of Physico-mechanical engineering's, Mechanical Engineering School
Director: Ing. Carlos Borrás Pinilla, PhD.

INTRODUCCION

En el proceso de fabricación de productos cerámicos existen diferentes operaciones que se realizan sobre la materia prima, esto con el fin de prepararla hacia la obtención de un producto final que posea una determinada calidad y que se mantenga cierta homogeneidad entre ellos, todo esto teniendo siempre en cuenta los recursos energéticos empleados y su optimización.

Uno de los procesos más críticos en la fabricación de productos cerámicos es la cocción, ya que es en este paso donde la materia prima adquiere sus propiedades finales de resistencia y capacidad de absorción, también por el alto consumo de energía que se entrega allí. Esto se lleva a cabo en diferentes tipos de hornos.

En este trabajo de investigación se busca determinar la posibilidad de optimización del proceso de cocción dentro de los hornos colmena, más específicamente dentro del horno de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S., que permita la reducción del gradiente de temperatura dentro de la carga, debido a que esta diferencia hace que la calidad y las propiedades de los productos cerámicos que allí se encuentran sea muy diferentes, con lo cual se obtienen productos de muy buena calidad en los puntos donde la temperatura es muy alta y productos de menor calidad donde la temperatura es baja.

Para esto se llevo a cabo la simulación del horno actual por medio del software COMSOL® Multiphysics donde se observó como era la variación de la temperatura dentro de este y se compararon los resultados con los datos experimentales tomados en el pasado para determinar qué tan válido era el modelo usado. Después de haber obtenido un modelo aceptable, comparado con los datos experimentales, se procedió a proponer y evaluar diferentes propuestas de cambio en la operación del horno que nos permitiera reducir la diferencia de temperatura dentro del mismo. Los trabajos encontrados sobre hornos de la

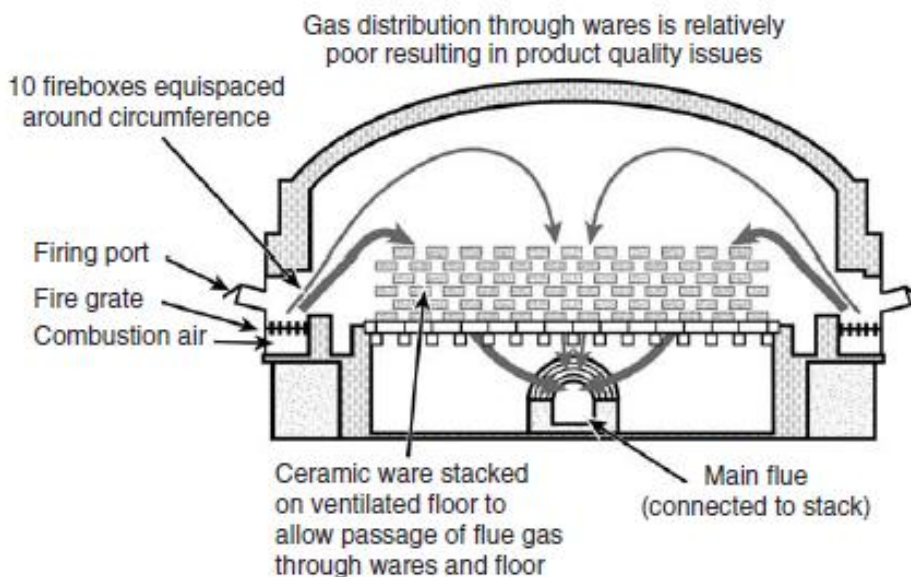
industria cerámica, se encargan de analizar los fenómenos térmicos de los principales hornos, pero no son específicos en analizar los hornos colmena, los cuales son los más usados en la industria regional. Por lo tanto, se usaron algunos modelos propuestos para el análisis de hornos ladrilleros.

Por último se seleccionó la mejor alternativa para reducir la diferencia de temperatura dentro de la carga.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la industria ladrillera uno de los procesos más importantes es la cocción del ladrillo, pues es en este proceso donde adquiere sus propiedades mecánicas que son su principal característica. Este proceso se puede llevar a cabo en diferentes tipos de hornos, los más usados en la industria ladrillera regional son los hornos tipo colmena o llama invertida [23], los cuales han sido utilizados durante muchos años por ser de fabricación artesanal y de simple operación. Una descripción sencilla del funcionamiento de este horno se puede ver en la figura 1.

Figura 1. Descripción del horno tipo colmena



Fuente: Industrial and process furnaces, Peter Mullinger and Barrie Jenkins

Y en la figura 2 se puede observar un modelo CAD del horno de la empresa LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S con sus doce quemadores y las rejillas de los gases de combustión.

Figura 2. Modelo CAD del horno



Fuente: Los autores.

En su operación estos hornos presentan algunos problemas, entre ellos se destaca el alto consumo de carbón que conlleva a altos costos de producción, la combustión incompleta que genera grandes cantidades de material particulado y la no uniformidad en el acabado del producto (figura 3), la causa de este último problema se atribuye a una distribución de temperaturas heterogéneas en el interior del horno con un alto gradiente de temperatura, según información del área de producción de la empresa LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S, este gradiente puede ser de hasta 350°C . Esta situación produce que los ladrillos ubicados en la parte alta y sobre la superficie de la carga tengan una mejor calidad que los ubicados en el centro de la carga en cuanto a resistencia mecánica y capacidad de adsorción factor que influye en la disminución de la productividad de la empresa y su competitividad.

Figura 3. Calidad del ladrillo dentro del horno finalizado el proceso de cocción.



Fuente: grupo DICBOT, Durante visita técnica a las instalaciones físicas, san Gil, 2009

Un estudio [18] inicial realizado a las instalaciones de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S con el ánimo de conocer la situación del proceso de cocción, nos lleva a plantear la necesidad de un estudio más profundo con herramientas modernas de análisis de procesos que permita obtener alternativas de solución más efectivas.

El interrogante que se busca desarrollar con esta investigación es el siguiente: ¿Es posible disminuir el gradiente de temperatura mediante cambios en la geometría interna del horno o en la distribución de los ladrillos dentro de este en el proceso de cocción en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S?

Para contestar esta pregunta se usara una simulación computacional, en primer lugar del horno y su funcionamiento actual con el fin de poder comparar los resultados de esta con medidas experimentales que ya han sido tomadas. Luego de esto se variaran diferentes parámetros geométricos y de distribución de la carga con el fin de encontrar la que muestra el menor gradiente de temperatura dentro de la carga.

2. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

2.1 OBJETIVOS GENERALES

Fortalecer la relación universidad – empresa a través del desarrollo del proyecto y la aplicación de los conocimientos adquiridos en el transcurso de la formación como Ingenieros mecánicos en especial en las áreas de mecánica de fluidos y transferencia de calor, que junto con técnicas numéricas permite el desarrollo de soluciones aplicadas a la industria de la región, en este caso al proceso de fabricación de ladrillos, enmarcado en el proyecto de investigación: OPTIMIZACION TERMOMECANICA DE HORNOS TIPO COLMENA del grupo DICBOT perteneciente a la escuela de Ingeniería Mecánica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer y analizar alternativas de optimización en el modelo propuesto, mediante la variación de parámetros del análisis CFD, como modificaciones en la geometría interna del horno, distribución de la carga dentro del mismo, flujo volumétrico de gases de ingreso y posibilidades de aislamiento térmico; buscando cuál de ellas permite reducir el gradiente de temperatura de los gases dentro del horno con respecto al actual, para así tener un producto final más homogéneo.
- Caracterizar la geometría actual del horno que nos permita la elaboración de un modelo CAD Y diagnosticar el estado actual de desempeño del horno colmena de la Empresa ladrillos y Acabados S.A.S para la

producción de ladrillos, identificando las variables importantes del proceso de cocción (temperaturas, Transferencia de calor, flujo de gases de combustión, aislamiento térmico).

- Desarrollar un modelo computacional del comportamiento del flujo de gases de combustión dentro del horno, mediante las herramientas de la mecánica de fluidos computacional (CFD) usando el software COMSOL MULTIPHYSICS cuya licencia ha sido adquirida por el grupo de investigación DICBOT.
- Documentar la propuesta de la mejor alternativa de optimización del horno, dejándola a consideración de la empresa para su implementación.

3. MARCO TEORICO

3.1 INTRODUCCION A LA INDUSTRIA LADRILLERA Y SUS PROCESOS

La fabricación de productos cerámicos es una actividad que data de aproximadamente hace 8000 años A. de C. Inicialmente se creaban recipientes y enseres en los cuales almacenar los alimentos. Con el paso del tiempo se fueron fabricando nuevos productos que dieron solución a muchos problemas del hombre como construcción de viviendas, herramientas de trabajo e implementos para la supervivencia.

La fabricación de ladrillos es una actividad que en el mundo se ha realizado de forma artesanal por mucho tiempo. Sin embargo, en el último siglo esta industria ha tenido una serie de cambios significativos los cuales han servido para mejorar la calidad de los productos cerámicos y disminuir el impacto que esta actividad ejerce sobre el medio ambiente, no obstante, este gran avance en la forma de producir ladrillos no ha llegado por igual a todos los países ya que esto depende principalmente de su legado cultural y su economía.

En Colombia la industria ladrillera sigue teniendo un método artesanal de producción, teniendo como principales desventajas la contaminación atmosférica que esta produce, la no homogeneidad del producto, el uso irracional de fuentes de energía no renovables como el carbón y la falta de eficiencia térmica.

El proceso de producción de ladrillos está conformado por tres diferentes grupos de operaciones (figura 4) que son: la preparación de la materia prima, la obtención del producto acabado y la comercialización y distribución del producto.

Figura 4. Diagrama del proceso



Fuente. Emilio Galán y Patricia Aparicio. Universidad de Sevilla

3.2 PROCESO DE FABRICACION DE MATERIALES CERAMICOS

3.2.1 Extracción de la materia prima

La arcilla que se usa para la fabricación del ladrillo proviene de la cantera (figura 5), también llamados barreros, estas suelen estar cerca de la fábrica y su extracción se lleva a cabo de forma mecánica usando retroexcavadoras. La explotación de las canteras es a cielo abierto.

Esta arcilla es transportada a la planta donde se dará inicio a su transformación.

Figura 5. Cantera



Fuente. Emilio Galán y Patricia Aparicio. Universidad de Sevilla

3.2.2 Preparación de las materias primas

El siguiente paso es obtener una materia prima óptima y de composición constante, para ello se llevan a cabo los siguientes pasos:

- molienda
- amasado
- moldeo

3.2.2.1 Molienda

La molienda consiste en la exposición de la arcilla a los elementos atmosféricos, además de la adición de los desengrasantes. El agua ayuda a disolver y eliminar las sales solubles y las heladas ayudan a eliminar los terrones.

3.2.2.2 Amasado

El amasado busca la perfecta homogenización de los elementos que constituyen la materia prima, los diferentes tipos de arcillas, los desengrasantes y los elementos sólidos con el agua. El amasado se puede realizar con diferentes maquinarias amasadoras y extrusoras. En el caso de la empresa LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S. se utiliza una extrusora para este proceso.

3.2.2.3 Moldeo

El moldeo es la operación por medio de la cual se le da forma a la materia prima ya preparada para obtener los diferentes productos, esto se lleva a cabo por medio de una extrusora la cual obliga al material a pasar a través de unos moldes los cuales dan la forma del producto final y su posterior corte.

Esta operación es de vital importancia para la calidad del producto ya que hay que asegurar que el material presente las mínimas variaciones posibles en cuanto a composición, granulometría y su contenido de humedad. La resistencia que ejercen las boquillas a la salida del barro aseguran que el material sea compacto y con un contenido de humedad bajo ya que de esto dependerán la resistencia y calidad final del producto.

3.2.3 Secado

Consiste en la eliminación de la mayor cantidad de agua del producto hasta dejarlo con una humedad relativa del 5%. La operación de secado debe llevarse a cabo elevando la temperatura de la cámara de forma gradual desde la temperatura ambiente hasta alcanzar una temperatura aproximada de 90°C, a una velocidad de 5°C cada 4 horas.

En la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. el tiempo estimado de funcionamiento para una nave de secado con 6.000 unidades de bloque H10 (aproximadamente 40 toneladas de arcilla) es de 24 horas.

3.2.4 Cocción

Esta operación se lleva a cabo en el horno después del encañado. Se denomina encañado a la disposición de las piezas en el interior del horno. La característica fundamental que debe tener el encañado para facilitar la transmisión de calor es un fácil acceso de los gases a cualquier punto de la carga. El calor se transfiere a la carga por convección forzada y radiación debido a la alta temperatura de los gases de combustión; dentro de la carga el calor se transfiere por conducción.

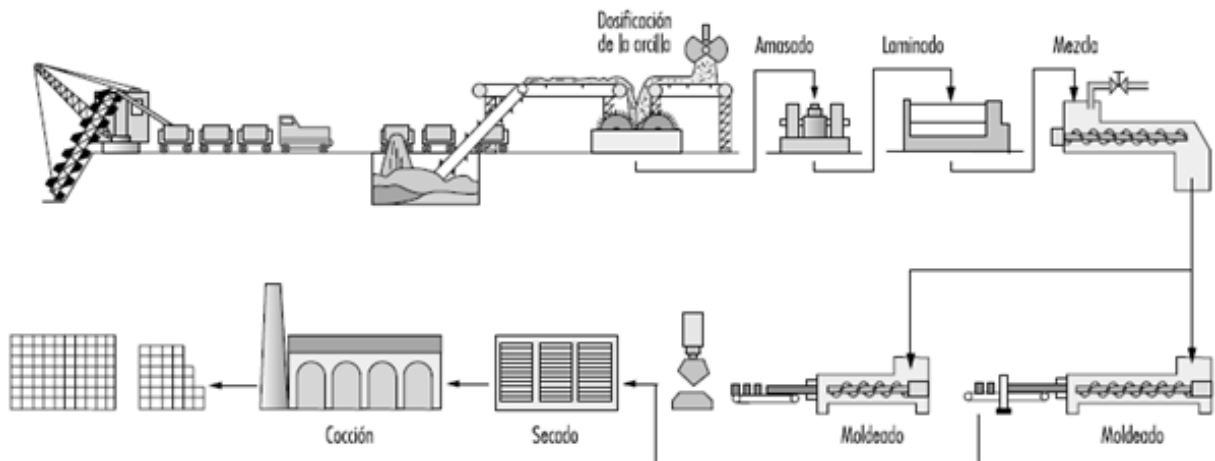
En general en el proceso de cocción de la obra cerámica se presentan las siguientes fases:

- La carga pierde humedad en dos etapas: en el secado y en la cocción. En el horno, hasta los 200°C tiene lugar la evacuación del agua residual no eliminada en el secado. Si esta eliminación no es gradual o si el contenido de agua es alto pueden producirse roturas debido a contracciones.
- Entre 200°C y 400°C se oxida el material orgánico.
- Entre 450°C y 650°C se modifica la estructura del material arcilloso. Por lo tanto se elimina el agua de constitución molecular, produciéndose una contracción y un endurecimiento irreversible.
- A 573°C ocurre la transformación alotrópica del cuarzo produciéndose una dilatación. Este proceso es reversible y tiene gran importancia en el enfriamiento.

- Entre 680°C y 800°C tiene lugar la descarbonatación (liberación de CO₂) de las arcillas calcáreas. El desprendimiento rápido de CO₂ puede producir roturas o burbujas. La descarbonatación debe finalizar antes de iniciar la vitrificación para evitar florescencias.
- Por encima de los 800°C inicia la vitrificación. La temperatura máxima requerida depende del tipo de material utilizado.

Es importante anotar que la temperatura de quema y el tiempo de permanencia en esta, inciden considerablemente sobre las propiedades del material; por ejemplo, se observa una mayor resistencia y menor porcentaje de absorción de agua en los materiales que han sido sometidos a mayores temperaturas y durante periodos de tiempo mayor. Al final los ladrillos se prueban mediante una inspección visual y prueba acústica, por lo tanto esto depende de la experiencia del ladrillero. En la figura 6 se puede ver un esquema más detallado del proceso de fabricación de ladrillos.

Figura 6. Esquema del proceso de fabricación del ladrillo



Fuente. Jonathan P. Hellerstein, Joel Bender y otros. Vidrio, cerámica y materiales afines.

En la industria ladrillera uno de los procesos más importantes es la cocción del ladrillo, pues es en este proceso donde adquiere sus propiedades mecánicas que son su principal característica. Este proceso se puede llevar a cabo en diferentes tipos de hornos.

3.3 GENERALIDADES DEL HORNO COLMENA

La cocción es el proceso más crítico debido al alto consumo de energía necesaria para fabricar los productos cerámicos. Es aquí donde el ladrillo adquiere sus propiedades mecánicas de resistencia, capacidad de absorción y contextura. Esta operación se lleva a cabo en hornos que pueden alcanzar los 1000°C, temperatura necesaria para que la calidad del ladrillo sea buena.

Para el proceso de cocción existen diferentes tecnologías disponibles, en general los hornos para cocción de ladrillos se pueden clasificar en:

- Intermitentes
- Semicontínuos
- Continuos

Como objeto de estudio de este proyecto solo se analizará el horno colmena que es un tipo de horno intermitente. Estos hornos son cámaras individuales en las que los productos y las fuentes de calor permanecen en un lugar fijo durante todo el proceso. La secuencia del ciclo es:

1. Entrada de los productos
2. Precalentamiento
3. Cocción de los productos
4. Enfriamiento de los productos
5. Salida de los productos

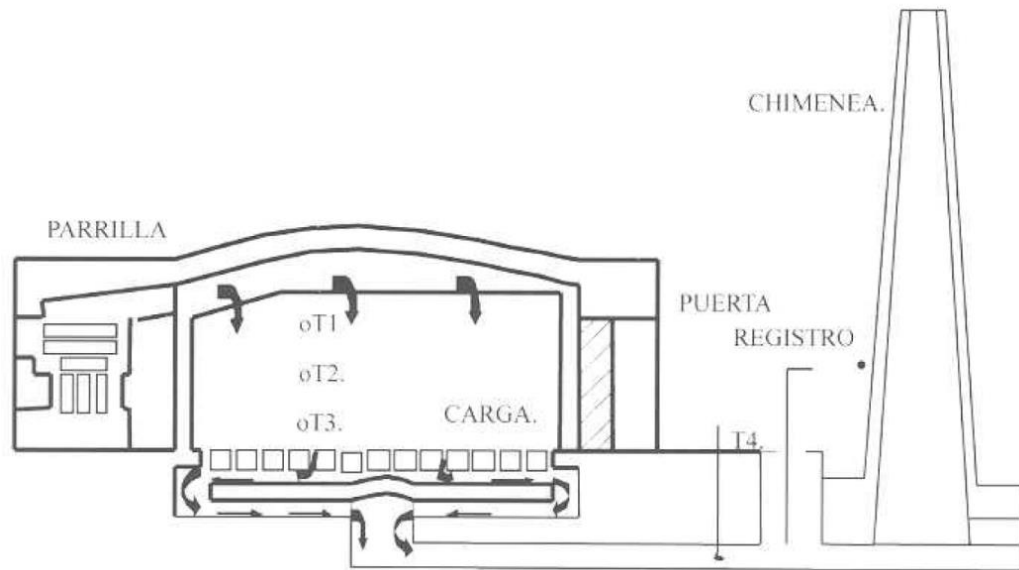
Los tiempos de cada una de estas operaciones varían dependiendo de la cantidad de producto a cocer, la calidad de la materia prima y la naturaleza del proceso.

El horno colmena es un tipo de horno intermitente en el cual la obra a cocer se introduce dentro de una cámara circular en cuyas paredes laterales están ubicados los fogones donde se quemara el carbón o combustible que entregara la energía térmica. Los gases producto de la combustión suben dentro del horno a través de la pared hasta la cima para luego atravesar la carga de arriba hacia abajo y salir por el área libre del piso debido al tiro natural que se genera por estos (por lo que también son llamados hornos de llama invertida), para luego abandonar los humos al ambiente por medio de una chimenea. La llama dentro del horno no tiene contacto directo con la carga debido a que los fogones tienen una pared separadora que evita que esto suceda.

Este tipo de hornos es de los más usados por la pequeña y mediana empresa debido a que entre los hornos intermitentes es de los más eficientes. Aun así su eficiencia es muy baja si se compara con los hornos continuos. En la figura 7 se puede ver un esquema de funcionamiento de estos hornos.

Según estudios [26] anteriores se puede considerar que las pérdidas de energía para un horno colmena están entre 40% y 80% del total de la energía aportada por el combustible.

Figura 7. Esquema del horno colmena

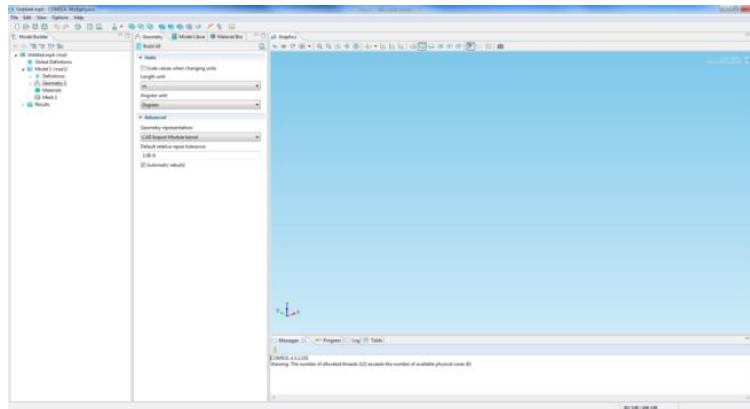


Fuente. Hornos ladrilleros a carbón, Ecocarbon.

3.4 INTRODUCCION A COMSOL MULTIPHYSICS

El entorno de simulación por computador es simplemente una traducción de la física del mundo real, leyes en su forma virtual. Lo ideal sería tener un entorno de simulación que incluya la posibilidad de añadir un efecto físico al modelo, en esto tiene que ver COMSOL.

Figura 8. Entorno de trabajo en COMSOL



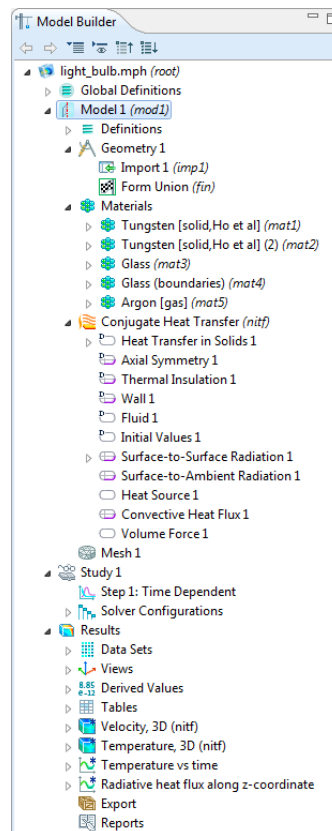
Fuente: Los autores.

COMSOL es una plataforma flexible que permite modelar todos los aspectos de la física relevante en los diseños. Se puede ir más profundo y utilizar los conocimientos para desarrollar soluciones a la medida aplicable a circunstancias únicas con este tipo de entorno de modelado que incluye todo. COMSOL da la confianza para construir el modelo que se quiera con la precisión del mundo real. Cada tipo de simulación incluida en el software tiene la capacidad de ser combinada con cualquier otra, esto muestra lo que sucede en el mundo real. Por ejemplo, en la naturaleza la electricidad va siempre acompañada de un efecto térmico, los dos son totalmente compatibles y este cumplimiento de compatibilidad garantiza modelos multifísicos consistentes y el conocimiento que no habrá que preocupar por la creación de una desconexión o modelo nuevo. Otro rasgo notable de la plataforma COMSOL es la adaptabilidad, a medida que el modelado necesita un cambio también lo hace el software, si se necesita incluir otro efecto físico, sólo debe agregarse.

El constructor de modelos es la herramienta donde se define el modelo, la forma de resolverlo, el análisis de los resultados y los informes. Se hace mediante la construcción de un árbol de modelo (figura 9). Se construye el árbol comenzando con uno por defecto, añadiendo nodos y editando la configuración del nodo. Todos

los nodos en el árbol de modelo por defecto son los nodos primarios de alto nivel. Se hace clic en ellos para ver una lista de nodos secundarios o subnodos que puede agregar. En los subnodos se realiza la parametrización de las dimensiones geométricas, especificación de tamaños de elementos de malla, definición de los barridos paramétricos (es decir, que las simulaciones se repiten para una variedad de diferentes valores de un parámetro). Una expresión de parámetro puede contener números, parámetros, constantes empotradas, funciones con expresiones de parámetros como argumentos, y operadores binarios.

Figura 9. Árbol de modelo



Fuente: Los autores.

3.4.1 Módulo de CFD

El Módulo de CFD es utilizado para comprender, predecir y diseñar el flujo en sistemas cerrados y abiertos. Estas simulaciones dan estimaciones precisas de los patrones de flujo, pérdidas de presión, las fuerzas sobre las superficies sometidas a un flujo, distribución de la temperatura, y variaciones en la composición del fluido en un sistema. Las capacidades generales del módulo de CFD incluyen flujos estacionarios y dependientes del tiempo en espacios bidimensionales y tridimensionales. Así mismo, Las interfaces de flujo de fluido utilizan cantidades físicas tales como la presión y velocidad de flujo, y las propiedades físicas tales como la viscosidad y la densidad para definir un problema de flujo de fluido. Hay diferentes interfaces de flujo, flujo laminar, flujo turbulento, flujo de una sola fase, y el flujo multifase.

Las interfaces de flujo de fluidos se basan en las leyes de conservación del momento, masa y energía. Estas leyes se expresan en las ecuaciones en forma de derivadas parciales que se resuelven junto con las condiciones iniciales correspondientes y condiciones de contorno. Las ecuaciones se resuelven usando formulaciones de elementos finitos estabilizados para el flujo de fluido, en combinación con los métodos de Newton amortiguadas y para problemas dependientes del tiempo diferentes algoritmos. Los resultados se presentan en una ventana de gráficos predefinidos para CFD. La forma de trabajo en el módulo de CFD es bastante sencilla y se puede describir mediante los siguientes pasos: definir la geometría, seleccionar el fluido a ser modelado, seleccionar el tipo de flujo, definir condiciones iniciales y de contorno, definir la malla, seleccionar un solucionador, y visualizar los resultados. Los pasos de malla y solucionador suelen llevarse a cabo automáticamente con una configuración predeterminada que está sincronizada para cada interfaz de caudal de fluido.

La naturaleza física de un flujo se caracteriza por un conjunto de parámetros tales como el número de Reynolds, el número de Mach y el número de Grashof. El número de Reynolds expresa la relación entre la fuerza de inercia y la fuerza de fricción, con esto, para valores muy pequeños del número de Reynolds el módulo ofrece la interfaz de flujo del arrastramiento, para valores intermedios la interfaz de flujo laminar, y para valores muy grandes la interfaz de flujo turbulento. En la rama de fluidos multifase se puede utilizar las interfaces de flujo de dos fases para modelar móviles, interfaces deformables separa dos fluidos diferentes, mientras que las otras interfaces en esta rama principalmente se utilizan en caso de suspensión de modelado de muchas partículas, gotitas o burbujas. Estas leyes de la física se convierten en conjuntos de ecuaciones en derivadas parciales con condiciones iniciales y de contorno correspondientes.

A diferencia de los análisis experimentales que se realizan con mayor frecuencia en un laboratorio y donde las medidas se limitan a un pequeño número de puntos una simulación CFD da un rango grande del campo de flujo, y una interpretación cualitativa de los campos de presión de flujo suele ser el primer paso hacia la creación o mejora de un diseño. Además de la vista cualitativa las simulaciones realizadas con el módulo de CFD dan estimaciones cuantitativas precisas de las propiedades del sistema, tales como el flujo medio a una diferencia de presión dada, el arrastre y la elevación de coeficientes de cuerpos sometidos a un flujo o la calidad del aire en una habitación ventilada, las tensiones de cizallamiento y las fuerzas de fluido en el sistema de boquilla. Para los estudios cuantitativos el módulo de CFD tiene una amplia gama de herramientas para la evaluación de resultados; por ejemplo, para evaluar la superficie y el volumen promedio se cuenta con valores máximos y mínimos, y los valores obtenidos (funciones y expresiones de la solución), así como también generar tablas y gráficos XY. Los estudios cuantitativos, por otra parte, forman la base para la optimización y el control que también puede mejorar en gran medida los productos y procesos pero por lo general en una serie de muchos pasos pequeños.

3.4.2 Módulo de transferencia de calor

El Módulo de Transferencia de Calor es utilizado en descripciones geométricas detalladas para estudiar la influencia de la calefacción y refrigeración en los dispositivos o procesos. Se tiene herramientas de modelado para la simulación de todos los mecanismos de transferencia de calor, incluyendo la conducción, convección, y radiación. Las simulaciones se pueden ejecutar para condiciones transitorias y constante en 1D, 2D, y 3D. El detalle de alto nivel proporcionado por las simulaciones realizadas con este módulo permite la optimización del diseño y las condiciones operativas en los dispositivos y procesos influenciados por la transferencia de calor. Se pueden realizar modelos con sistemas de conducción con conductividad térmica constante y en sistemas en los que la conductividad térmica es una función de la temperatura en sí o de cualquier otra variable de modelo, por ejemplo, composición química.

Este módulo incluye descripciones para la transferencia de calor en fluidos con transferencia de calor conjugado (transferencia de calor en sólidos y fluidos en el sistema) para ambos flujos laminar y turbulento; en el caso de flujo turbulento el módulo ofrece como alternativa los modelos de bajo Reynolds y alto Reynolds para describir con precisión la transferencia de calor conjugado. En el caso de la radiación se tiene expresiones para la radiación en la superficie a ambiente (por ejemplo, mediante la definición de las condiciones de frontera) y también mediante el uso de modelos de radiación de superficie a superficie, que incluye fuentes de radiación externos (por ejemplo, el sol), el sistema para la transferencia de calor con radiación de superficie a superficie se basa en el método de radiosidad. Además, el módulo también contiene la funcionalidad para la radiación en medios participantes, esta radiación cuenta con modelos para la absorción, emisión y dispersión de la radiación por el fluido presente entre las superficies radiantes; en muchos casos el uso de la condición de contorno de capa altamente conductora es la solución más fácil. El proceso de transferencia de calor se acopla fácilmente

con el problema de flujo de fluidos y las interfaces físicas incluyen características para describir la transferencia de calor en convección libre y forzada, incluyendo el trabajo de presión y calentamiento viscoso.

La base del módulo de transferencia de calor es el equilibrio de energía en un sistema estudiado, las ecuaciones de transferencia de calor se definen automáticamente por las interfaces físicas dedicadas para la transferencia de calor y flujo de fluido. Las formulaciones de estas ecuaciones se pueden visualizar con detalle para la validación y verificación. El flujo de trabajo en el módulo es sencillo y se describe por estos pasos: definir la geometría, seleccionar el material a ser modelado, seleccionar el tipo de transferencia de calor, definir la frontera y las condiciones iniciales, definir la malla, seleccionar un programa de solución, y visualizar los resultados.

La transferencia de calor está presente en la mayoría de los procesos físicos y fenómenos ya sea como un efecto secundario o como un efecto deseado; el módulo se puede utilizar con eficacia para estudiar una variedad de procesos, por ejemplo, para incluir los efectos de ventilación del edificio, para dar cuenta de turbulencia, de convección libre y la transferencia de calor, y para analizar el impacto de la generación de calor de un micro dispositivo electrónico y su refrigeración.

3.4.3 Sincronización con SolidWorks

LiveLink es una herramienta de COMSOL que permite la sincronización de la geometría de SolidWorks con COMSOL. La geometría sincronizada en el modelo COMSOL permanece asociativa con la geometría de SolidWorks, lo que significa que los ajustes que sean aplicados a la geometría, por ejemplo, la física o la configuración de malla, se conservan después de sincronizaciones posteriores,

además, obtener el control de las dimensiones de la geometría de SolidWorks desde el modelo COMSOL. El solucionador paramétrico puede actualizar automáticamente y sincronizar la geometría para cada valor nuevo, puede cambiar manualmente el valor del parámetro y realizar una sincronización. Además de la sincronización de la geometría entre SolidWorks y COMSOL, LiveLink incrusta el entorno de modelado de COMSOL en la interfaz de usuario de SolidWorks lo cual permitirá crear modelos de análisis sin dejar el entorno de diseño. Los modelos geométricos no siempre pasan sin problemas entre diferentes formatos de archivo debido al hecho que están representados de manera diferente, por lo tanto durante la importación de la geometría se comprueba si hay errores y repara automáticamente. La operación de reparación también elimina pequeñas características que caen dentro de la tolerancia en la importación. Con esto se pueden realizar simulaciones en modelos geométricos bastante complejos.

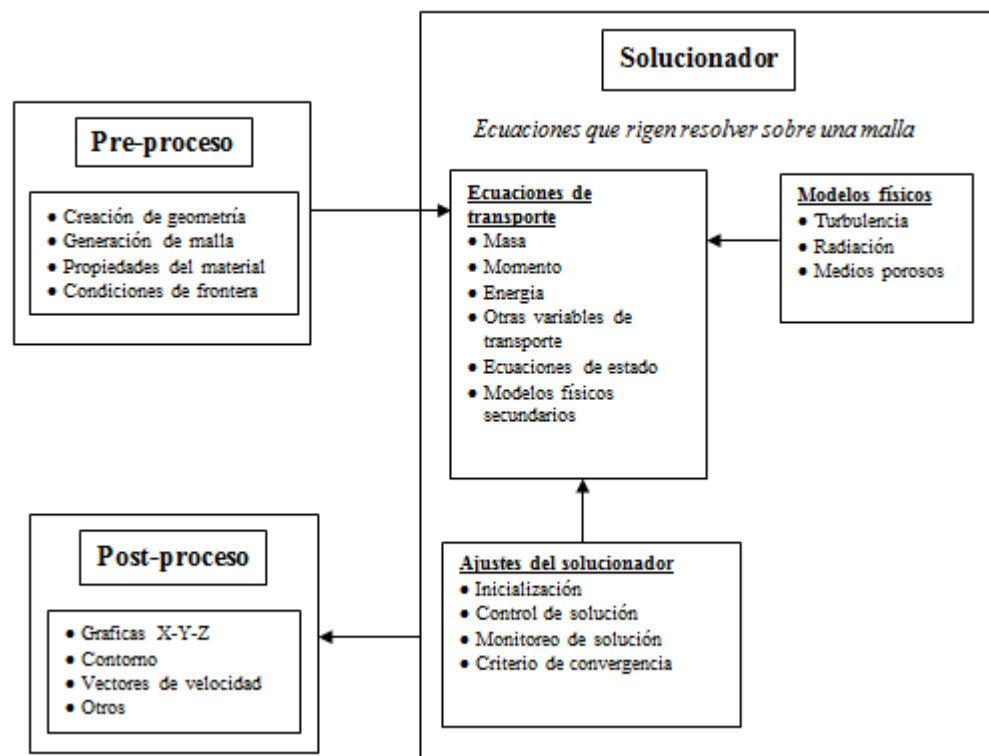
3.5 GENERALIDADES DEL CFD

Dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es un campo de estudio que utiliza elementos de la mecánica de fluidos y transferencia de calor que junto con el uso de herramientas informáticas y técnicas numéricas permite la solución de los problemas presentes en diferentes áreas de la ciencia e ingeniería. El rápido desarrollo de las tecnologías computacionales y a su vez la disminución de sus costos ha permitido el acceso a un gran número de investigadores y otros profesionales al uso de esta herramienta tanto en el ámbito académico como industrial.

En el CFD se utilizan técnicas numéricas para la simulación y solución de los problemas, el proceso de simulación se desarrolla mediante las siguientes etapas:

- a. Crear y definir la geometría
- b. Generación de la malla
- c. Establecimiento de las condiciones de frontera
- d. Definición de la propiedades del fluido
- e. Selección de parámetros numéricos y algoritmos de solución
- f. Definición de las condiciones iniciales
- g. Solución iterativa de las ecuaciones buscando el residuo mínimo
- h. Interpolación de los resultados a todo el sujeto de estudio
- i. Análisis de resultado

Figura 10. Diagrama del proceso CFD



Fuente: Los autores.

En la figura 10 se puede observar a grandes rasgos el proceso que se llevó a cabo en la simulación del horno. Las ecuaciones que gobiernan las propiedades del

flujo se derivan de las leyes fundamentales de conservación las cuales permiten tener una descripción total del flujo.

3.5.1 Conservación de masa

Para describir esta ley, se parte de un volumen de control fijo en el dominio y flujo cruzando este. La ley de la conservación de la masa requiere que el cambio en la masa dentro del volumen de control es equivalente a la masa que cruza la superficie S del volumen V. Esto en forma integral sería:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = - \int_S \rho \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} dS \quad (1)$$

Donde \mathbf{n} es el vector unitario normal a la superficie y ρ la densidad del fluido. Podemos aplicar el teorema de la divergencia de Gauss a la ecuación 1, el cual iguala la integral de volumen en la integral de un vector divergencia sobre la superficie que define el volumen. Por lo cual la ecuación 1 puede ser representada como:

$$\int_V \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) \right] dV = 0 \quad (2)$$

La ecuación anterior implica que:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (3)$$

La ecuación 3 es la ecuación de conservación de la masa en su forma de gradiente. En el sistema de coordenadas cartesianas esta puede ser expresada como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

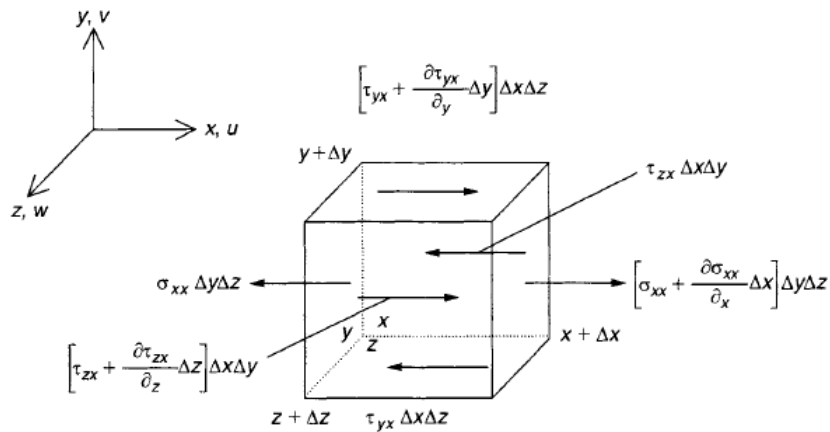
Donde u , v y w son las componentes de la velocidad en la direcciones x , y y z respectivamente. Cuando se tiene flujo en estado estable, la ecuación de la conservación de la masa (también llamada ecuación de continuidad) queda convertida en:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

3.5.2 Conservación de momento

Las ecuaciones de transporte de momento se basan en la segunda ley de Newton, el cual establece que la velocidad de cambio del momento de una partícula de fluido, es igual a la suma de las fuerzas que actúan sobre ella (figura 11).

Figura 11. Diagrama de esfuerzos sobre el elemento de fluido



Fuente: TU, Jiyuan; YEHO, Guan Heng y LIU, Chaoqun. Computational /fluid Dynamics

Para derivar esta ley física, comenzamos considerando un elemento de fluido como se muestra en la figura 11, en el cual se establece que la sumatoria de las

fuerzas que actúan sobre este elemento es igual al producto de su masa y la aceleración. Si se considera esta ley en la componente x , se obtiene:

$$\sum F_x = ma_x \quad (6)$$

Donde F_x y a_x son las componentes de fuerza y velocidad en la dirección x respectivamente. La aceleración a_x es simplemente el cambio con respecto al tiempo de la velocidad u , por lo tanto tenemos,

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad (7)$$

También podemos obtener la masa del elemento, la cual sería el producto de la densidad y el volumen, por lo tanto m es $\rho\Delta x\Delta y\Delta z$. Con esto, el lado derecho de la ecuación queda convertido en

$$\rho \frac{Du}{Dt} \Delta x\Delta y\Delta z \quad (8)$$

En el lado izquierdo de la ecuación tenemos dos tipos de fuerzas que el fluido en movimiento experimenta, estos son las fuerzas en el cuerpo (*body forces*) y las fuerzas de superficie (*surface forces*). El tipo de fuerzas en el cuerpo que pueden afectar el cambio de momento en el fluido son por ejemplo la gravedad, centrifuga, coriolis y fuerzas electromagnéticas. Estos efectos son usualmente incorporados en la ecuación de momento como una fuente adicional que contribuye con los esfuerzos. Las fuerzas de superficie en la dirección de la componente de velocidad u como se ve en la figura 11, que deforman el elemento de fluido son τ_{yx} y τ_{zx} , el esfuerzo normal σ_{xx} también contribuye a esto. Haciendo la suma de estas fuerzas que actúan sobre el elemento en la dirección de la componente u de la velocidad, podemos tener la ecuación de momento en la coordenada x , la cual es:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \sum F_x \quad (9)$$

Igualmente se puede obtener la ecuación de momento para las coordenadas y y z

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \sum F_y \quad (10)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \sum F_z \quad (11)$$

Los esfuerzos normales σ_{xx} , σ_{yy} y σ_{zz} son debido a la presión p y el esfuerzo normal viscoso τ_{xx} , τ_{yy} y τ_{zz} actuando perpendicular al volumen de control. La ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento se puede escribir de forma abreviada de la forma

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\nabla p + \rho \vec{f} + \nabla \cdot \tau \quad (12)$$

Donde τ es el tensor de esfuerzos.

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Newton estableció que el esfuerzo cortante en un fluido es proporcional al gradiente de la velocidad. Para lo cual Stokes estableció:

$$\tau_{xx} = \lambda(\nabla \cdot \vec{V}) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad (14)$$

$$\tau_{yy} = \lambda(\nabla \cdot \vec{V}) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad (15)$$

$$\tau_{zz} = \lambda(\nabla \cdot \vec{V}) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad (16)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (17)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (18)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left[\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right] \quad (19)$$

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \quad (20)$$

Donde μ es el coeficiente de viscosidad dinámica y λ representa el segundo coeficiente de viscosidad.

Esto se puede aplicar a las ecuaciones de cantidad de movimiento en tres dimensiones y obtener una expresión solo en función de la velocidad y la presión. [25]

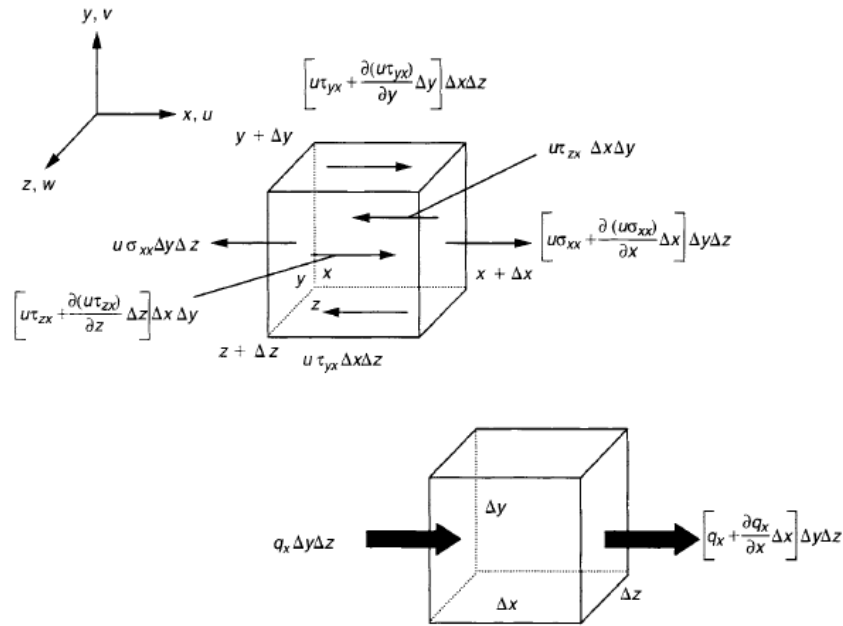
El programa usa el algoritmo SIMPLE para relacionar la presión y la velocidad.

3.5.3 Conservación de la energía

A partir de la Primera Ley de la Termodinámica podemos deducir la ley de la conservación de la energía haciendo un balance sobre el elemento de fluido (figura 12).

$$\begin{array}{l} \text{Cambio de energía} \\ \text{en el tiempo} \end{array} = \Sigma \dot{Q} + \Sigma \dot{W} \quad (21)$$

Figura 12. Balance de energía



Fuente: TU, Jiyuan; YEHO, Guan Heng y LIU, Chaoqun. Computational /fluid Dynamics

Análogo a la ley de conservación del momento, para un elemento de fluido en movimiento podemos representar el cambio de la energía en el tiempo en el plano cartesiano como:

$$\rho \frac{DE}{Dt} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (22)$$

Los términos representados por $\sum \dot{Q}$ y $\sum \dot{W}$ describen las velocidades de transferencia de calor neta y en trabajo neto hecho por fuerzas de superficie sobre el fluido respectivamente.

El trabajo neto hecho por fuerzas de superficie es igual al producto de la fuerza y la componente de la velocidad en la dirección de la fuerza, esto se realiza para todas las componentes de la velocidad, lo que resumiendo nos puede dar la siguiente ecuación

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \frac{\partial(u\sigma_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(v\sigma_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(w\sigma_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} - \frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (23)$$

Los flujos de energía q_x , q_y y q_z pueden ser formulados mediante la Ley de Fourier de conducción de calor, la cual relaciona el flujo de calor con el gradiente de temperatura local:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (24)$$

$$q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (25)$$

$$q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (26)$$

Donde k es la conductividad térmica. Si se aplica esto a la ecuación, y teniendo en cuenta el esfuerzo normal, la ecuación de energía se convierte en

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T}{\partial z} \right] - \frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} + \Phi \quad (27)$$

Los efectos debido al esfuerzo viscoso pueden ser agrupados en la ecuación de energía en la función disipación de energía Φ la cual es

$$\Phi = \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \quad (28)$$

Con las ecuaciones de conservación anteriormente mencionadas se puede tener una descripción completa del fluido y sus propiedades siempre y cuando este sea laminar. No obstante en la mayoría de los procesos donde intervienen fluidos, este se comporta de manera turbulenta, lo cual hace que describir este flujo sea más complejo.

3.5.4 Modelo de turbulencia

Turbulencia es una propiedad del campo de fluido y es caracterizado principalmente por un amplio rango de escalas de flujo, las escalas más largas que ocurren que dependen de la geometría, las escalas más pequeñas que fluctúan rápidamente y todas las escalas entre ellas. La tendencia de un fluido para convertirse en turbulento es medida por el número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (29)$$

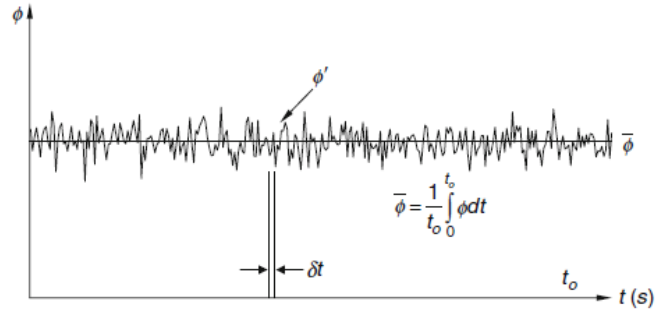
Donde ρ es la densidad, U es la velocidad, μ es la viscosidad dinámica del fluido y L la longitud en donde se desarrolla el fluido. Fluidos con alto número de Reynolds tienden a convertirse en turbulentos y este es el caso de la mayoría de aplicaciones en ingeniería.

Las ecuaciones de Navier – Stokes pueden ser usadas en las simulaciones de flujo turbulento, aunque esta requiere un número amplio de elementos para capturar el amplio rango de escalas en el fluido.

Las aproximaciones tipo RANS que en ingles es llamada como Reynolds–Averaged Navier-Stokes han sido muy estudiadas y resultan bastante útiles en la mayoría de los problemas practicos resueltos mediante técnicas numéricas. Una vez el flujo se convierte en turbulento todas las cantidades fluctúan en el tiempo y en el espacio. Muy pocas veces vale la pena el excesivo costo computacional de obtener información detallada acerca de las fluctuaciones. Una representación promediada a menudo proporciona suficiente información acerca del flujo. El RANS divide las cantidades del flujo en un valor medio y una parte fluctuante:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (30)$$

Figura 13. Fluctuación de la propiedad ϕ con el tiempo en un mismo punto en un fluido turbulento.



Fuente: YEHO, Guan Heng y YUEN, Kwok Kit. Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering.

Donde ϕ puede representar cualquier cantidad escalar del flujo. En la figura 13 se puede ver esto mejor representado. El componente medio de la propiedad ϕ se obtiene haciendo la integral del valor instantáneo de la propiedad:

$$\bar{\phi} = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \phi dt \quad (31)$$

Donde t_0 es el tiempo promediado de la simulación, usualmente grande comparada con la escala de tiempo de fluctuación.

Este enfoque presenta una manera atractiva de caracterizar el flujo turbulento por los valores medios de las propiedades del flujo (\bar{u} , \bar{v} , \bar{w} , \bar{p} , etc.) con su correspondiente componente fluctuante (u' , v' , w' , p' , etc). Hay que notar que el tiempo medio de la componente fluctuante ϕ' es por definición cero.

$$\bar{\phi}' = \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \phi' dt \equiv 0 \quad (32)$$

En muchas aplicaciones de ingeniería el conocimiento del valor medio de las propiedades es casi siempre de mayor significado que sus componentes

fluctuantes. Si aplicamos lo anterior a las ecuaciones de continuidad y conservación del momento, podemos obtener las ecuaciones de conservación promediadas en el tiempo. Las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes se obtienen como:

$$\nabla \cdot (\bar{u}) = 0 \quad (33)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u}\bar{u}) = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \bar{u} - \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \tau^R \quad (34)$$

El término τ^R es también llamado tensor de esfuerzos de Reynolds, el cual para 3D consiste de nueve componentes:

$$\tau^R = -\rho(\overline{u'u'}) = -\begin{pmatrix} \overline{\rho u'u'} & \overline{\rho u'v'} & \overline{\rho u'w'} \\ \overline{\rho v'u'} & \overline{\rho v'v'} & \overline{\rho v'w'} \\ \overline{\rho w'u'} & \overline{\rho w'v'} & \overline{\rho w'w'} \end{pmatrix} \quad (35)$$

Para propósitos de ingeniería no es necesario resolver los detalles de las fluctuaciones turbulentas sino solo los efectos de la turbulencia sobre el flujo promedio, para ello existen diferentes modelos clásicos de una ecuación y dos ecuaciones. En este trabajo se seleccionó el modelo $k-\varepsilon$ estándar por su robustez y porque es uno de los que menos tiempo de cálculo por iteración requiere dentro de los modelos RANS.

El modelo $k-\varepsilon$ es uno de los modelos de turbulencia más usados en aplicaciones industriales. Este introduce dos ecuaciones adicionales de transporte y dos variables dependientes: la energía cinética de turbulencia, k , y la disipación de la energía cinética de turbulencia, ε .

La viscosidad turbulenta se escribe de la siguiente forma:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (36)$$

Donde C_μ es una constante adimensional.

El modelo estándar $k-\varepsilon$ usa las siguientes ecuaciones de transporte:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad}(k) \right] + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \varepsilon \quad (37)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \varepsilon U) = \text{div} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad}(\varepsilon) \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (38)$$

Las constantes del modelo son determinadas de forma experimental y los valores son listados en la siguiente tabla.

Tabla 1. Constantes del modelo de turbulencia

Constante	Valor
C_μ	0,09
$C_{\varepsilon 1}$	1,44
$C_{\varepsilon 2}$	1,92
σ_k	1,0
σ_ε	1,3

Fuente: los autores.

El modelo estándar $k-\varepsilon$ en COMSOL utiliza la función logarítmica de pared como se explica en el anexo G.

La energía se puede representar de la siguiente forma:

$$\frac{D}{Dt} (\bar{\rho} E + p) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right) + S \quad (39)$$

Donde k_{eff} y μ_{eff} son la conductividad y la viscosidad efectiva (fluido+turbulenta) y S un termino fuente volumétrico

3.6 MODELO DEL MEDIO POROSO

Uno de los objetivos principales en este proyecto es tener una aproximación de la temperatura de los ladrillos dentro del horno en la fase de cocción, para esto es necesario tener un modelo que simule dicha carga o poder representarla como es en realidad, esta última opción se hace prácticamente imposible debido a que dentro del horno pueden haber hasta 25.000 piezas cerámicas, por lo que representar gráficamente cada una y luego simularlas en conjunto se vuelve una tarea difícil.

Revisando la bibliografía sobre simulaciones en hornos ladrilleros, algunos autores [13] proponen simular dicha carga como un medio poroso, por medio poroso se quiere decir que se compone de una matriz sólida con espacios vacíos dentro de esta los cuales se encuentran interconectados.

Estos vacíos son llamados poros y se cuantifican con una propiedad llamada porosidad. La porosidad de un medio poroso se define como la fracción del volumen total que es ocupada por el vacío (por lo que este valor varía de 0 a 1)

La ecuación de momento de un medio poroso se conoce con el término de ley de Darcy, el cual define que el gradiente de la presión es proporcional a la velocidad y a la viscosidad dinámica del fluido e inversamente proporcional al término geométrico de porosidad k .

$$\nabla P = -\frac{\mu}{k} \vec{V} \quad (40)$$

3.6.1 Ecuación de Brinkman

Una alternativa a la ecuación de Darcy es la comúnmente conocida como ecuación de Brinkman. La cual, omitiendo los términos inerciales se puede tomar como:

$$\nabla P = -\frac{\mu}{k}\vec{V} + \hat{\mu}\nabla^2\vec{V} \quad (41)$$

En esta ecuación ahora tenemos dos términos de viscosidad (μ y $\hat{\mu}$). El primer término de viscosidad es el mismo que aparece en la ley de Darcy, el segundo es análogo al término Laplaciano que aparece en la ecuación de Navier – Stokes. El coeficiente $\hat{\mu}$ es una viscosidad efectiva.

La transferencia de calor en el medio poroso usa la siguiente versión de la ecuación de calor como modelo matemático:

$$(\rho C_p)_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_{eq} \nabla T) + Q \quad (42)$$

Donde C_p es el calor específico del fluido a presión constante, $(\rho C_p)_{eq}$ es el equivalente de la capacidad volumétrica de calor a presión constante, k_{eq} es la conductividad térmica equivalente, \mathbf{u} es el campo de velocidad y Q es el término fuente de calor. La conductividad térmica equivalente del sistema sólido-fluido, k_{eq} , es relacionado a la conductividad del sólido k_p y a la conductividad del fluido k por:

$$k_{eq} = \theta_p k_p + \theta_L k \quad (43)$$

El equivalente de la capacidad volumétrica de calor del sistema sólido-fluido es calculado por:

$$(\rho C_p)_{eq} = \theta_p \rho_p C_{p,p} + \theta_L \rho C_p \quad (44)$$

Aquí θ_p denota la fracción de volumen del material sólido y θ_L la fracción de volumen del fluido. En estado estable la temperatura no cambia con el tiempo, con lo cual el primer término del lado izquierdo de la ecuación 42 desaparece.

3.7 MODELO DE RADIACION

La radiación puede ser vista como una propagación de ondas electromagnéticas o como una función de propagación de partículas llamadas fotones. Un cuerpo que tenga una temperatura por encima del cero absoluto emite radiación térmica. Para que haya intercambio de calor por radiación entre dos objetos, no necesariamente debe existir un medio entre ellos, lo cual es la gran diferencia con la convección y la conducción. El medio en el que se propaga la radiación puede participar o no en la radiación. Un gas puede participar en la radiación en virtud de los aerosoles que contiene, los cuales pueden ser gotas líquidas, partículas de polvo y el hollín. Para este estudio se tomó como fluido de trabajo el aire ya que es el componente mayoritario de los gases de combustión de acuerdo al estudio isocinetico realizado. Por lo tanto se tomó la transferencia de calor por radiación entre superficies y de estas con sus alrededores.

3.7.1 Radiación de superficie a superficie

La transferencia de calor por radiación de superficie a superficie incluye la radiación con los alrededores y con otra superficie.

El flujo de calor por radiación de superficie a superficie está dado por:

$$q = e(G - \sigma T^4) \quad (45)$$

Donde e es la emisividad de la superficie, en un rango de 0 a 1, σ es la constante de Stefan – Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{T}^4$), G es el flujo de calor de ingreso por radiación o irradiación y se define como:

$$G = G_m + F_{amb}\sigma T_{amb}^4 \quad (46)$$

Donde G_m es la irradiación mutua, viniendo de otras fronteras en el modelo, F_{amb} es el factor de visión del ambiente, cuyo valor es igual a la fracción de campo de visión que no es cubierto por otras fronteras (por lo tanto, por definición $0 \leq F_{amb} \leq 1$), T_{amb} es la temperatura del ambiente lejano a la superficie.

Radiación de superficie a superficie requiere la evaluación precisa de la irradiación mutua, G_m . La radiación incidente en un punto de la frontera es una función de la radiación existente J en cada punto. Esta radiación a su turno es una función de G_m .

$$J = (1 - e)\{G_m(J) + F_{amb}\sigma T_{amb}^4\} + e\sigma T^4 \quad (47)$$

El modelo P1 es computacionalmente menos costoso y altamente confiable para este tipo de problemas por lo cual se seleccionó.

Todas las ecuaciones anteriores son solucionadas de forma secuencial por el software COMSOL® Multiphysics. Ver anexo A.

3.8 CONDICIONES DE FRONTERA

Las ecuaciones antes mencionadas de continuidad, momento, energía y turbulencia son las que gobiernan el fluido y su transferencia de calor. Sin embargo el comportamiento para diferentes casos que usen las mismas ecuaciones podría ser diferente. La razón de la diferencia yace en la especificación de las condiciones de frontera.

Las condiciones de frontera y a veces las condiciones iniciales que se requieren como especificación de arranque en la solución de problemas, dictan fuertemente la solución particular de las ecuaciones que gobiernan el fenómeno físico. Esto crea un particular significado en CFD como en otras simulaciones numéricas donde las condiciones de frontera influyen fuertemente en las ecuaciones que representan.

En las condiciones físicas de frontera para un fluido viscoso tenemos la condición de no deslizamiento, esta condición asume una velocidad relativa de cero entre la superficie y el fluido inmediato a esta. Si la superficie es estacionaria con el fluido pasando por esta, entonces todas las componentes de la velocidad pueden ser tomadas como cero:

$$u = v = w = 0 \quad (48)$$

Para la mayoría de los flujos es necesario definir al menos una velocidad.

$$u = f \quad (49)$$

Donde f puede ser un valor constante o un perfil de velocidad. Comúnmente las salidas de flujo son localizados en lugares donde el flujo es aproximadamente unidireccional y donde el esfuerzo de superficie toma valores conocidos. Para satisfacer la continuidad del esfuerzo, las fuerzas cortantes a lo largo de la frontera

superficial de flujo de salida son tomadas como cero, esto da la condición de salida de flujo:

$$\frac{\partial u}{\partial n} + \frac{\partial v}{\partial n} + \frac{\partial w}{\partial n} = 0 \quad (50)$$

Donde n es la dirección normal a la superficie de salida del flujo. Esta condición es comúnmente conocida como la condición de frontera de *Neumann*.

Análogo a la condición de no deslizamiento, podemos asociar la temperatura en la superficie de pared. Si la temperatura de la superficie la designamos como T_w , entonces la temperatura T de la capa de fluido que esta en contacto inmediato con la superficie es también T_w , por lo tanto:

$$T = T_w \quad (51)$$

Las condiciones de frontera que se tomaron aquí fueron el caudal de aire que entra por cada boquilla $Q_e = 0.126[\frac{m^3}{s}]$ (ver Anexo C), la entrada de calor se hace por medio de una temperatura asignada en la parrilla de 1000[°C].

Las variables de entrada del medio poroso son las del aire que sale de la parrilla por lo tanto la superficie de la carga se deja abierta con el fin de que las condiciones de frontera de esta sean las del medio cercano.

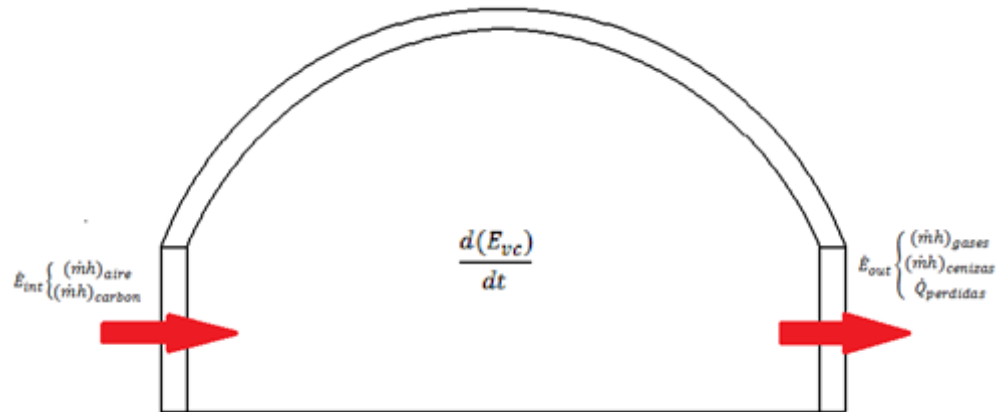
3.9 DESCRIPCION TERMICA DEL HORNO

Para tener una caracterización más completa del horno colmena, se hace un análisis termodinámico de este dentro de un volumen de control que permita identificar los aportes energéticos del aire y combustible, y las salidas de energía dentro de este. El análisis se hace para cuando el horno se encuentra en la etapa

de quema plena, es decir cuando el producto ya ha perdido toda la humedad residual y el calor que se aporta sirve para aumentar su temperatura.

En la figura 14 se puede observar un balance general de energía.

Figura 14. Balance de energía (esquema).



Fuente: los autores.

$$\frac{d(E_{vc})}{dt} = \dot{E}_{int} - \dot{E}_{out} \quad (52)$$

$$\dot{E}_{int} \left\{ \begin{array}{l} (\dot{m}h)_{aire} \\ (\dot{m}h)_{carbon} \end{array} \right. \quad (53)$$

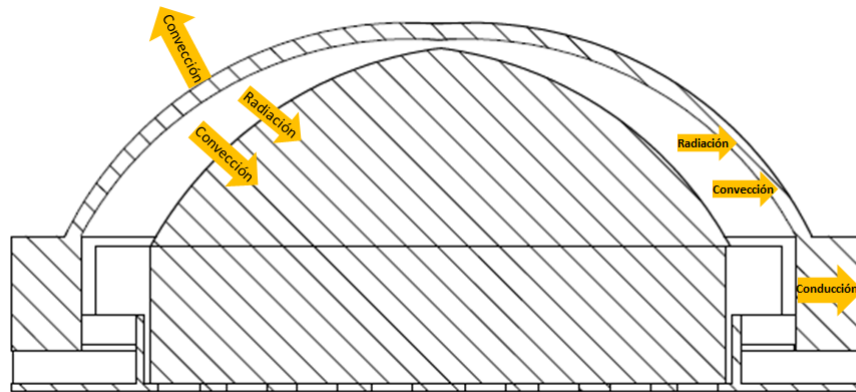
$$\dot{E}_{out} \left\{ \begin{array}{l} (\dot{m}h)_{gases} \\ (\dot{m}h)_{cenizas} \\ \dot{Q}_{perdidas} \end{array} \right. \quad (54)$$

$$\frac{d(E_{vc})}{dt} = (\dot{m}h)_{aire} + (\dot{m}h)_{carbon} - (\dot{m}h)_{gases} - (\dot{m}h)_{cenizas} - \dot{Q}_{perdidas} \quad (55)$$

Donde el $\dot{Q}_{perdidas}$ se debe al calor perdido por las paredes del horno y el calor entregado a la carga como calor sensible. La transferencia de calor a las paredes como se puede ver en la figura 13 es debido a la radiación y la convección en la

parte interna del horno, por conducción dentro de la pared y por convección en la parte exterior.

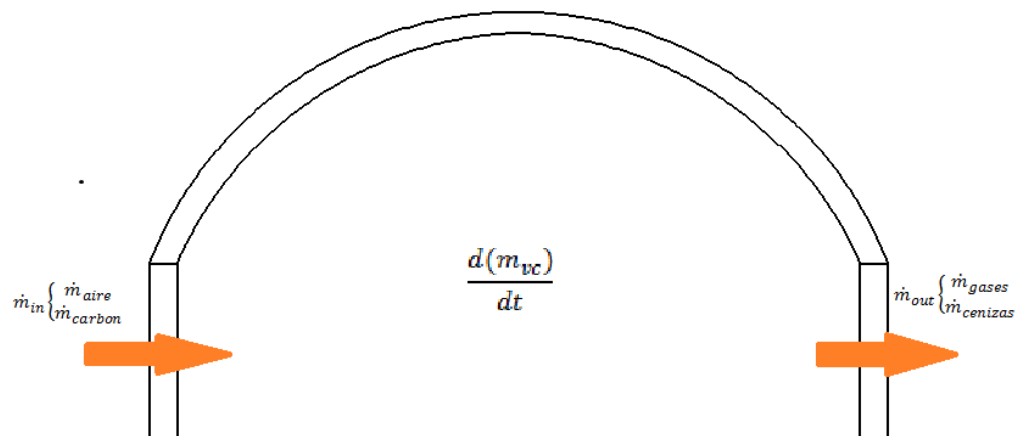
Figura 15. Transferencia de calor en el horno



Fuente: los autores.

En el balance de masa de la figura 16 podemos identificar en la entrada el flujo de aire y carbón necesarios para la combustión y el aporte que le hace.

Figura 16. Balance de masa.



Fuente: los autores.

El balance de masa en el horno para el proceso de quema plena sería de la siguiente forma:

$$\frac{d(m_{vc})}{dt} = \dot{m}_{int} - \dot{m}_{out} \quad (56)$$

$$\dot{m}_{in} \begin{cases} \dot{m}_{aire} \\ \dot{m}_{carbon} \end{cases} \quad (57)$$

$$\dot{m}_{out} \begin{cases} \dot{m}_{gases} \\ \dot{m}_{cenizas} \end{cases} \quad (58)$$

Reemplazando (57) y (58) en (56) daría en balance de masa.

$$\frac{d(m_{vc})}{dt} = \dot{m}_{aire} + \dot{m}_{carbon} - \dot{m}_{cenizas} - \dot{m}_{gases} \quad (59)$$

4 DESARROLLO DEL HORNO SIMULADO

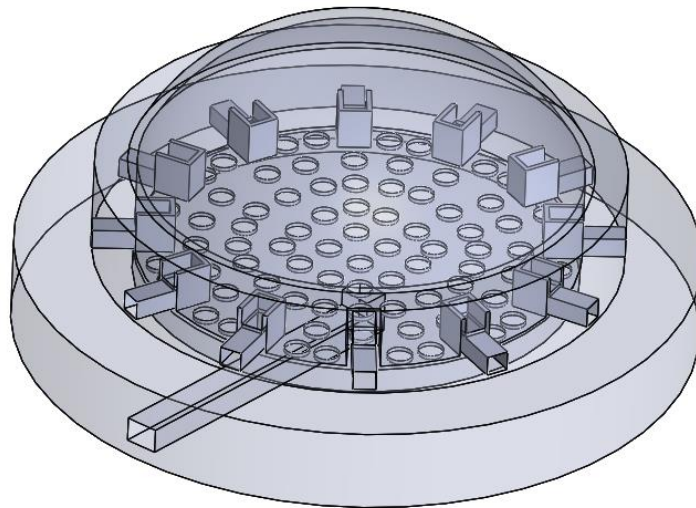
4.1 REALIZACION DEL MODELO

En este punto es donde entra el software de simulación multifísica con todas sus herramientas y se convierte en una herramienta muy importante teniendo en cuenta sus capacidades e instrumentos con los cuales podemos y necesitamos trabajar. Aunque el software (COMSOL Multiphysics) tiene un gran volumen de documentación en modelos, tutoriales y ejemplos de simulación multifísica disponible ninguno de estos entregaba las herramientas y protocolos que cubrieran a cabalidad la información relacionada con el objeto de estudio. Por lo tanto, es necesario recurrir a un proceso concienzudo de “prueba y error” para así poder encontrar una perspectiva de las capacidades y límites que el software brinda para esta investigación. Desde aspectos como los modelos matemáticos con los cuales se puede trabajar y aprovechar la entrega de los resultados hasta las mejores prácticas de simulación con respecto al tiempo de cómputo.

Se realiza un CAD en 3D (figura 17) con las dimensiones reales del horno base del análisis (Anexo D), teniendo en cuenta algunas simplificaciones necesarias para la reducción de la carga computacional; las boquillas de alimentación de carbón, respiraderos superiores y las puertas del horno (figura 18) se suprimen del modelo para simulación debido a que estas permanecen cerradas durante el proceso de cocción y las boquillas solo son abiertas en el momento de alimentar el horno con más carbón, además de esto se simplifican los agujeros de salida de los gases del horno hacia los ductos que dirigen estos gases a la chimenea, esto se debe a que el número de agujeros es muy grande (figura 19) creando alta carga computacional, por lo tanto, lo que se hizo fue hallar el número de agujeros por

metro cuadrado y calcular el área, luego con esta área se encontró un número más bajo de agujeros para así tener la misma área aproximada de salida y no crear una obstrucción al flujo en el modelo de la simulación. En el anexo F se encuentran los cálculos referentes a estos agujeros.

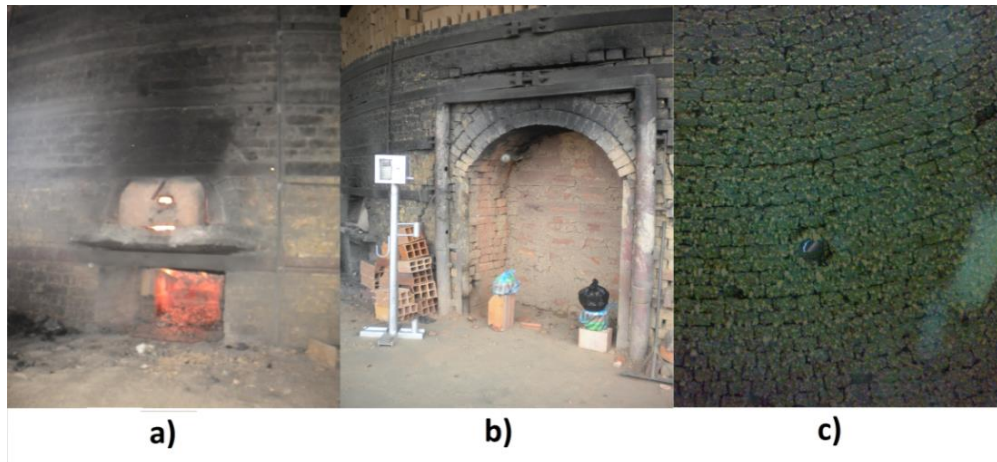
Figura 17. CAD horno real.



Fuente: los autores.

Figura 18. Fotografías del horno.

a) Boquillas de alimentación, b) puertas, c) respiraderos.



Fuente: los autores.

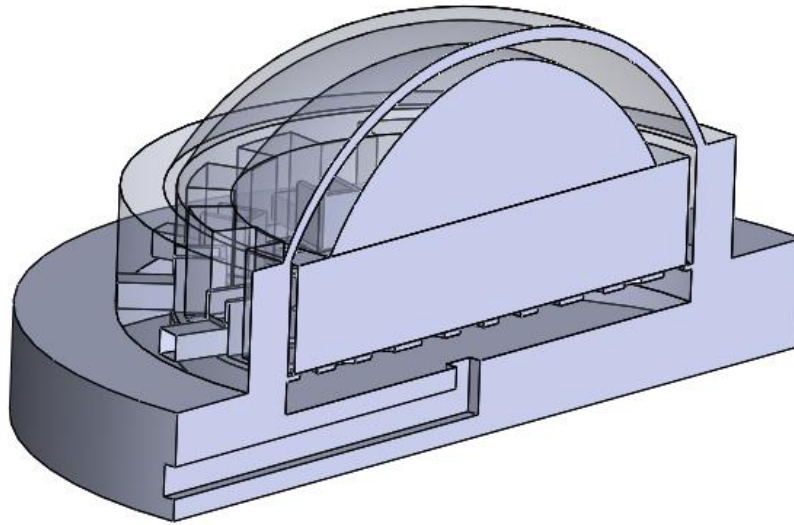
La parte más importante del proceso y complicada a la hora de realizar la simulación es el modelado de la distribución de ladrillo para cocción dentro del horno (carga) como lo podemos ver en la figura 19, la complejidad se basa en la distribución heterogénea de los diferentes elementos que constituyen esta carga, así como la gran cantidad de elementos que la conforman. Por esta condición y luego de la realización de estudios anteriores a otros hornos de cocción de ladrillo [13] se encontró que la mejor forma de realizar este modelo es definiéndolo como un medio poroso, y buscando así las propiedades de porosidad y permeabilidad apropiadas para la condición de este estudio. A partir de esto se modeló una geometría con las dimensiones y forma superficial de la carga dentro del horno y darle a este las propiedades de medio poroso, figura 20.

Figura 19. Fotografía de la carga en el horno.



Fuente: los autores.

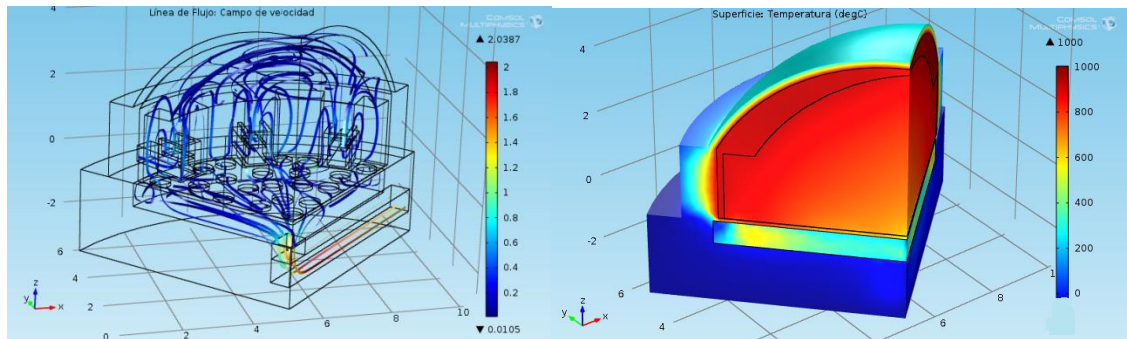
Figura 20. Modelo CAD con carga.



Fuente: los autores.

Utilizando los valores reales de las variables que influyen en el proceso como se mencionó en las condiciones de frontera, así como las propiedades de los materiales estructurales, carga y fluido de trabajo se desarrolla la simulación basada en el estudio del movimiento de los gases calientes dentro del horno, la distribución de la temperatura en el horno y la diferencia de temperatura dentro de la carga (figura 21).

Figura 21. Simulación del horno, Flujo y temperatura.



Fuente: los autores.

Tabla 2. Propiedades físicas de los materiales

MATERIAL	PROPIEDAD	VALOR
Horno (paredes)	Densidad	2000 [kg/m ³]
	Conductividad Térmica	0,658 [W/m*K]
	Capacidad térmica a presión constante	1000 [J/kg*K]
	Emisividad	0,91
Carga	Densidad	750 [kg/m ³]
	Conductividad térmica	0,94 [W/m*K]
	Capacidad térmica a presión constante	1000 [J/kg*K]
	Viscosidad dinámica	1000 [Pa-s]
	Porosidad	0,6
	Permeabilidad	0,987x10 ⁻¹² [m ²]
	Emisividad	0,94
Suelo	Conductividad térmica	1,5 [W/m*K]

Fuente: los autores.

4.2 CONSIDERACIONES PARA EL DESARROLLO

El horno simulado fue un horno tipo colmena, para efectos de ahorro de costo computacional se modeló solo un cuarto del horno real en el cual se tomaron 3 fogones. Esto es posible debido a que el horno presenta alta simetría por su forma circular. Para el interés de este proyecto de grado se simuló el proceso de cocción en su etapa de quema plena, es decir, después de que ha pasado la etapa de retiro de la humedad residual y cuando la temperatura en la cúpula del horno ha alcanzado aproximadamente los 850°C debido a que es aquí donde la

diferencia de temperatura en la carga es mayor. Para esto se tomaron las siguientes consideraciones:

- Estado estacionario.
- Las propiedades físicas de los gases de combustión varían con la temperatura.
- La transferencia de calor entre el gas y los productos y el gas y las paredes es por convección y radiación.
- Las propiedades físicas de la estructura del horno y la carga se mantienen constantes (densidad, conductividad, emisividad y calor específico).
- La velocidad del aire es constante y tiene el mismo valor en todas las entradas (Anexo B).
- Debido a la complejidad que presenta la simulación no se desarrolló la reacción de combustión [1], en su lugar se tomó la entrada de aire con paso por una parrilla a una temperatura menor a la temperatura de llama adiabática (Anexo E).
- Se tomó el aire como fluido de trabajo ya que este presenta el componente de mayor proporción en los gases de combustión a la salida de la chimenea, esta simplificación ayuda a que el programa no tenga que simular el comportamiento de cada uno de los componentes del gas de combustión, con lo que se disminuye el gran costo computacional que esto genera [17].
- En el proceso real los humos salen del horno por medio del tiro inducido que produce la chimenea. Para el modelo computacional se calculó el ΔP que produce la chimenea y se configuro como una condición en los agujeros a la salida del horno (Anexo C).
- En el horno los humos salen por una gran cantidad de pequeños agujeros en el piso de este, cuya área total de salida es de $5,7321 \text{ m}^2$, para efectos de la simulación se tomó el área equivalente de un cuarto del horno y se modelo con agujeros un poco más grandes que permitieran disminuir el

costo computacional de simular cada uno y el costo que esto genera (Anexo F).

Para el desarrollo de la simulación se tomaron diferentes módulos del software que nos permitieran representar los diferentes fenómenos físicos que se presentan en la etapa de quema plena. Como se ha mencionado anteriormente en este documento, la transferencia de calor se presenta de los gases hacia la carga y las paredes por convección y radiación.

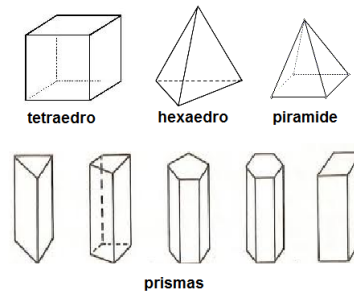
4.3 DISCRETIZACION

Un factor muy importante en la mecánica de fluidos computacional es la creación de la malla o discretización espacial, esto se debe a que el CFD tiene como objeto la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes para un flujo con características y geometría determinadas. Esto lo desarrolla por medio de métodos numéricos, en este caso por medio del método de elementos finitos utilizando una serie de puntos generados a partir de la discretización, es decir, la operación denominada “generación del mallado”. El tipo de malla y los elementos que la conforman dependerán del tipo de problema específico que se desea estudiar, pues cada malla es más apropiada en unos casos y no en otros.

Las mallas pueden ser de dos tipos, estructuradas constituidas en cuadriláteros en 2D o hexaedros en 3D, y las no estructuradas que emplean elementos triangulares en 2D o tetraédricos, prismas y pirámides en 3D (figura 22). La aplicación de este tipo de mallas depende tanto de la geometría a discretizar como del estudio a realizar, una malla del tipo estructurado presenta una mejor precisión en los resultados que las no estructuradas debido al ordenamiento de los elementos en memoria por el orden de las celdas, sin embargo las mallas de tipo no

estructurado presentan mayor flexibilidad en el caso de geometrías complejas lo cual representa una gran ventaja pues hoy en día la mayor parte de problemas que se resuelven son con este tipo de geometrías.

Figura 22. Elementos para mallar geometrías tridimensionales.

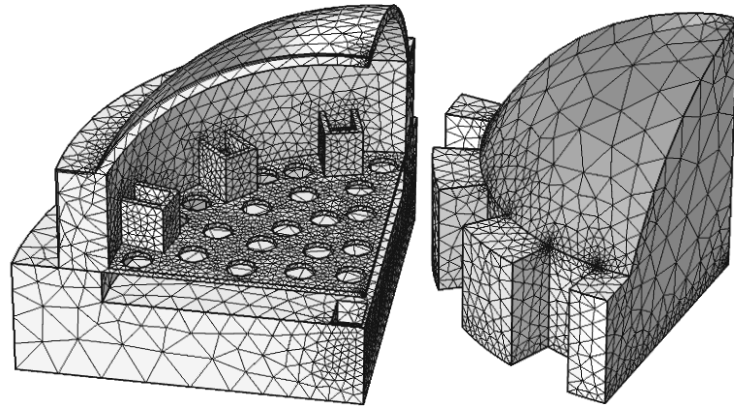


Fuente: Los autores.

La calidad de la malla está asociada a la densidad de los nodos, esquinamiento, suavidad, etc., y representa un papel importante en la estabilidad y exactitud de los resultados, una resolución pobre en las zonas críticas afectara las características del flujo. El cambio de volumen entre las celdas adyacentes o suavidad de la malla es un factor importante ya que un cambio rápido conlleva a un mayor error. Es por esto, que se aconseja mallar con alta calidad todo el modelo, pues no se sabe dónde se tienen zonas críticas.

En el presente proyecto se emplean mallados de tipo no estructurado compuesto por diferentes tipos de elementos prismáticos, tetraédricos, triangulares; pues la geometría del modelo además de ser compleja tiene grandes dimensiones lo cual no permite una malla de tipo estructurado. Por otra parte, un mallado no estructurado produce menos costos computacionales en capacidad de memoria que uno estructurado aunque si requiere más tiempo de cálculo. La complejidad física del modelo conlleva a que se tengan grandes cambios en el tamaño de los elementos de la malla y una densidad más grande en algunas zonas. Como se muestra en la figura 23.

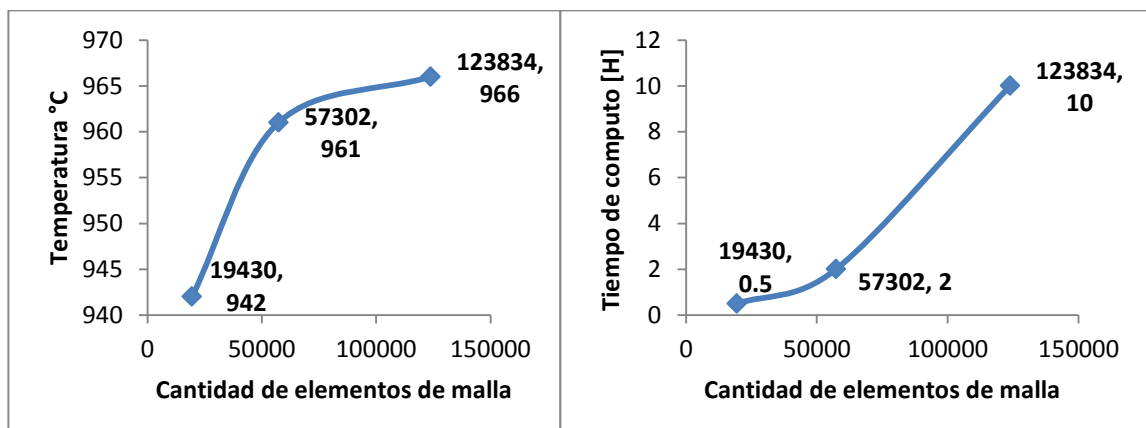
Figura 23. Mallado del modelo.



Fuente: Los autores.

El mallado realizado para el modelo es un mallado de tamaño normal con refinamiento en las esquinas y calibrado por la física general del modelo (figura 25), obteniendo el mallado de la figura 23 y con las características de la figura 26. Para escoger el tamaño de la malla realizada se tuvo en cuenta dos factores fundamentales, la calidad de los resultados y el tiempo de computo; en la figura 24 se puede apreciar la tendencia en calidad de resultados y el tiempo de computo de cada mallado, con lo cual se escoge la malla constituida por 57302 elemento pues entrega resultados óptimos en un tiempo calculo moderado.

Figura 24. Comparación de mallados.



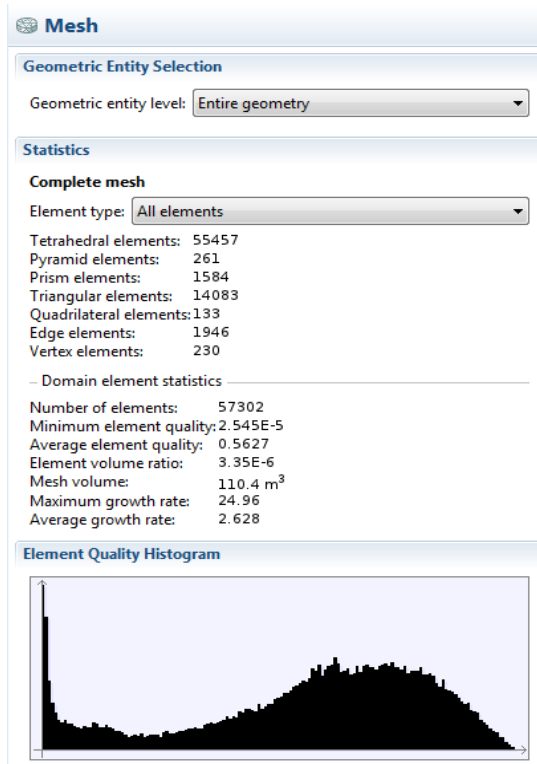
Fuente: Los autores.

Figura 25. Parámetros de la malla

Element Size Calibrate for: General physics <input checked="" type="radio"/> Predefined Normal <input type="radio"/> Custom		Corner Settings Handling of sharp edges: Trimming Minimum angle for trimming: 240 deg Maximum angle for trimming: 20 deg Maximum layer decrement: 1	
Element Size Parameters Maximum element size: 0.878 m Minimum element size: 0.158 m Maximum element growth rate: 1.5 Resolution of curvature: 0.6 Resolution of narrow regions: 0.5		Transition <input checked="" type="checkbox"/> Smooth transition to interior mesh Number of iterations: 4 Maximum element depth to process: 6	
Angle Minimum angle between boundaries: 240 deg		Boundary Layer Properties Number of boundary layers: 2 Boundary layer stretching factor: 1 Thickness of first layer: Automatic Thickness adjustment factor: 5	
		Refinement Element size scaling factor: 0.35	

Fuente: Los autores.

Figura 26. Información de la malla

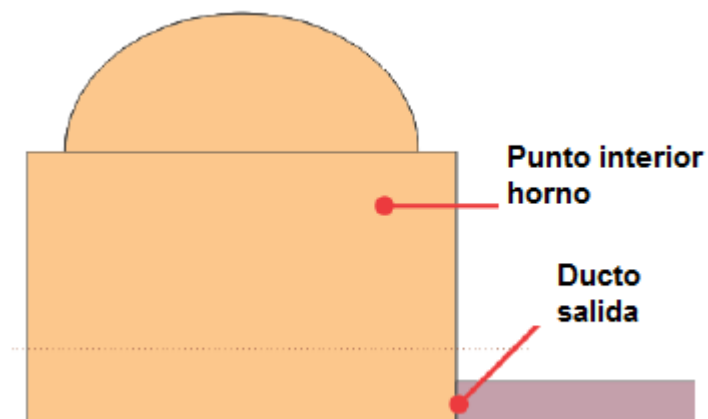


Fuente: Los autores.

4.4 VALIDACION

Los parámetros operacionales del horno y las propiedades de algunos materiales que influye en el proceso fueron tomados del proyecto de grado titulado: “Diseño de un sistema para la recuperación del calor residual en los gases de combustión de los hornos colmena en la empresa ladrillos y acabados S.A.S.” [8] En el cual se hace la medición de los parámetros de funcionamiento del horno colmena base de este estudio, así como de la temperatura en un punto interior del horno y el ducto de salida de los gases hacia la chimenea en el momento del proceso de cocción (figura 27).

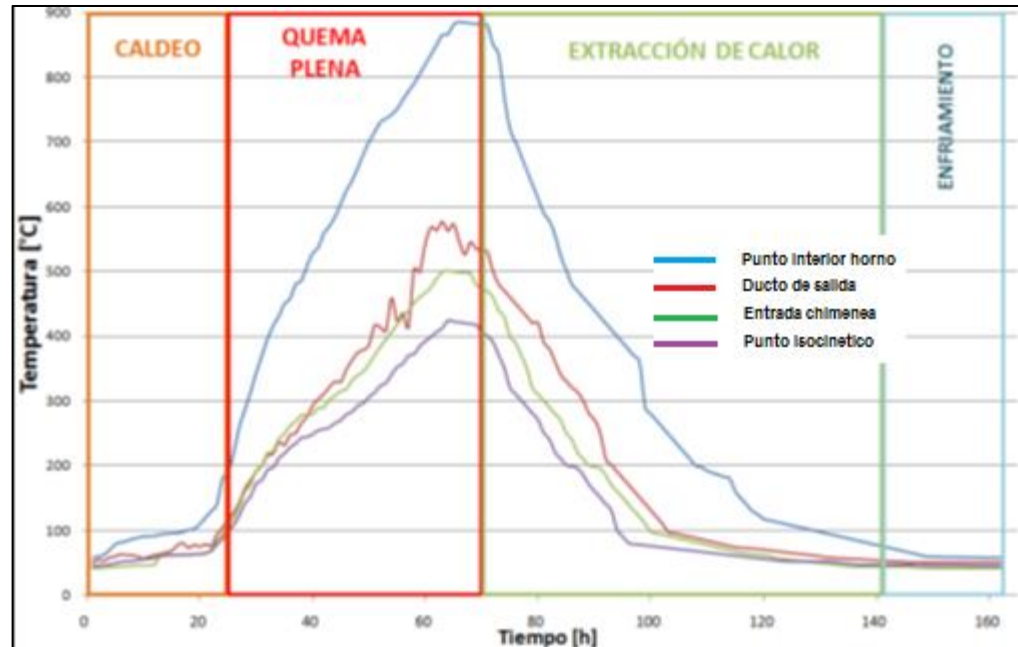
Figura 27. Ubicación termocuplas en el horno.



Fuente: Medina, Ana. Sistema recuperador de calor [8].

A partir de los datos obtenidos en esta medición se realizó una gráfica en la cual se pueden observar las distintas temperaturas respecto al tiempo del proceso (figura 28). Además de esto se observa como a diferentes temperaturas del horno la diferencia de temperatura entre el punto interior del horno y el ducto de salida por el cual se dirigen los gases a la chimenea cambia representado en el perfil azul y rojo de la gráfica.

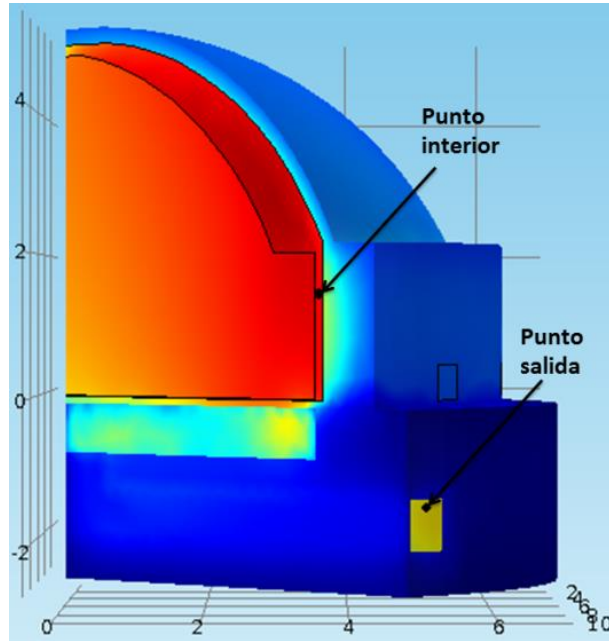
Figura 28. Temperaturas alcanzadas en el horno colmena.



Fuente: Medina, Ana. Sistema recuperador de calor [8].

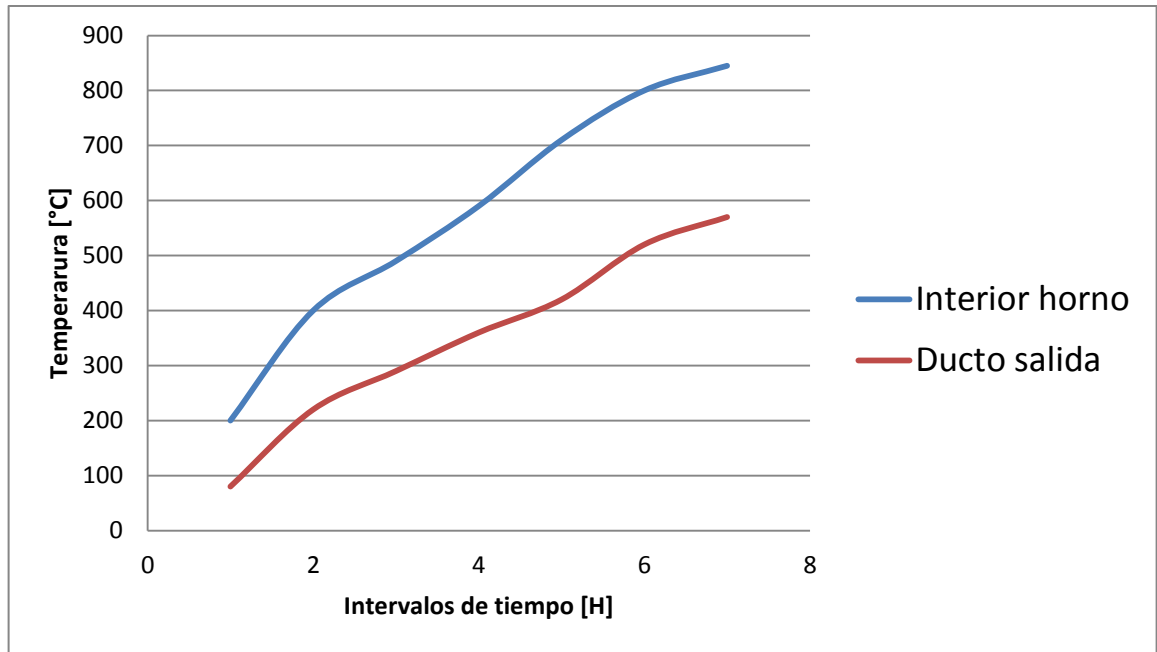
La figura 28 muestra las diferentes etapas del proceso de cocción del ladrillo mostrando las temperaturas y el tiempo de cada una de estas, sin embargo este estudio trata solo de la etapa de quema plena y particularmente en el momento de máxima temperatura dentro del horno ya que es en esta donde se presenta la mayor diferencia de temperatura en la carga. En base a esto se realizó una serie de simulaciones con cambios en los parámetros del proceso (temperatura en parrilla y velocidad de entrada) con el fin de comparar los valores encontrados en la medición realizada y los resultados arrojados por el modelo simulado. Se tomó en la simulación dos puntos correspondientes a la ubicación de los puntos de medición del interior del horno y el ducto de salida como se muestra en la figura 29.

Figura 29. Ubicación de los puntos de comparación en la simulación.



Fuente: Los autores.

Figura 30. Simulación con variación de la temperatura.



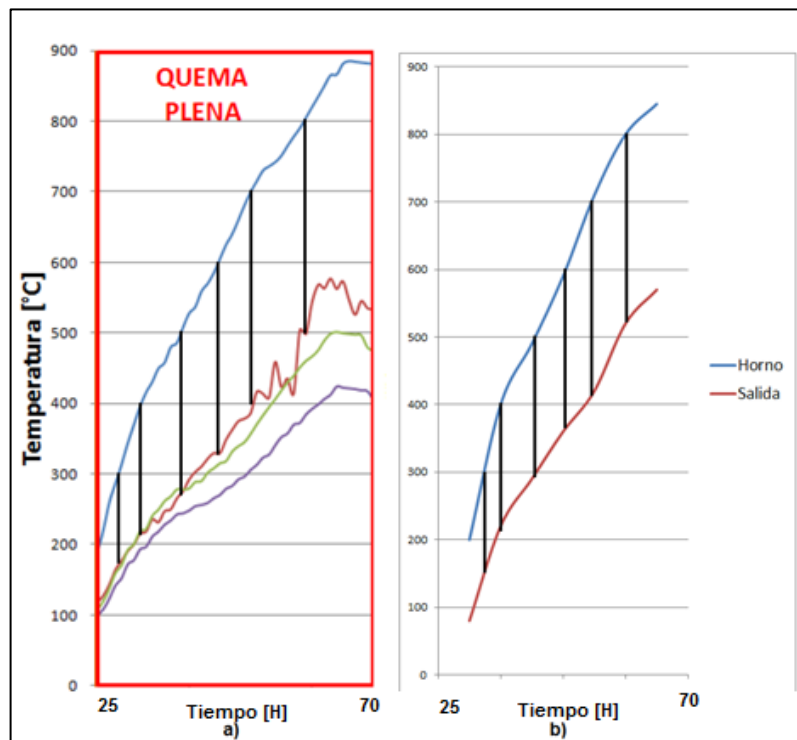
Fuente: Los autores.

En la figura 30 se puede observar el cambio en la diferencia de temperatura entre las líneas azul y roja que representan el modelo simulado, encontrando que entre más bajas son las temperaturas de operación la diferencia de temperatura entre los puntos también presenta una disminución.

A partir de las gráficas tanto de los datos medidos en el proceso y los resultados obtenidos a partir de la simulación se obtienen los valores de las diferencias de temperatura entre los puntos interior del horno y ducto de salida.

Figura 31. Comparación de resultados.

a) Temperaturas medidas, b) Temperaturas de la simulación.



Fuente: Los autores.

En la figura 31 se tiene los gráficos de los datos experimentales y valores arrojados por la simulación, en esta podemos apreciar las líneas verticales que representan el cambio en la temperatura entre el interior del horno y la salida de

los gases a la chimenea. Estas líneas comienzan en unos puntos fijos en la curva que representa la parte interior del horno y finaliza en la gráfica referente a la salida de los gases, con esto podemos saber el valor del cambio de temperatura y así sacar la diferencia entre los valores hallados y los medidos para encontrar el error de la simulación y validar su veracidad. Estos valores se encuentran en la tabla 3.

Tabla 3. Comparación de los valores medidos y simulados.

Temperatura superior	Temperatura salida medición	Temperatura salida simulación	Diferencia	% error
800	300	270	30	11,11
700	300	280	20	7,14
600	270	230	40	17,39
500	230	210	20	9,52
400	180	180	0	0
300	130	140	10	7,14
Error promedio				8,71

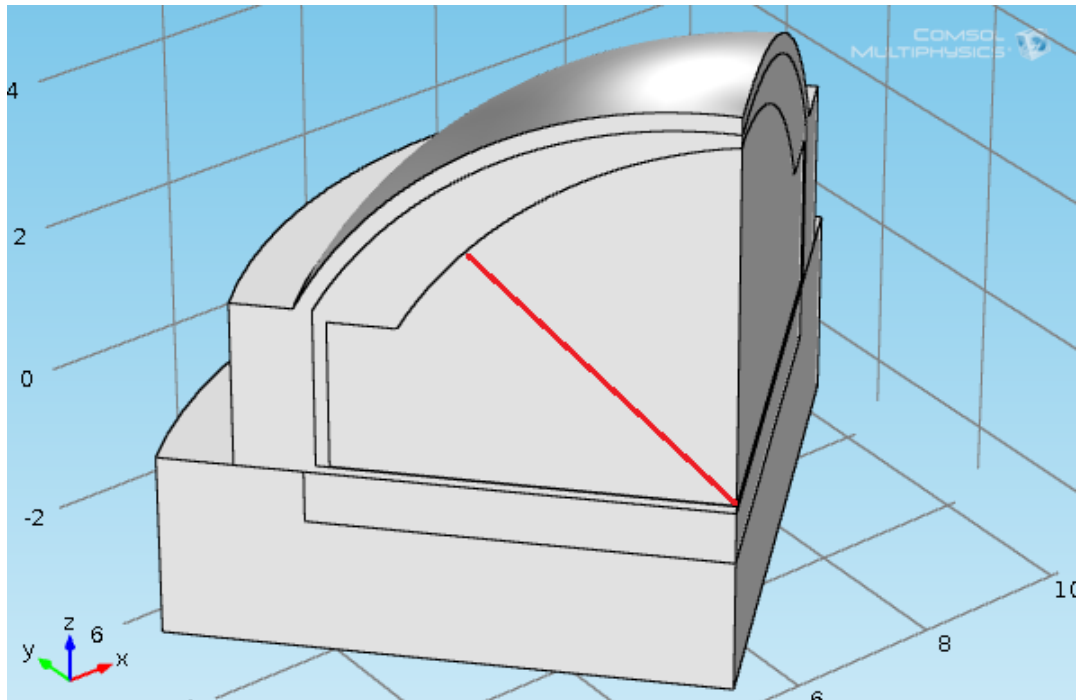
Fuente: Los autores.

En la tabla 3 se observa los valores de temperatura en los diferentes casos, así mismo podemos apreciar la diferencia entre los valores y el porcentaje que tiene unos respecto a los otros. Analizando los resultados se encuentra que el error cambia en los diferentes puntos analizados, sin embargo el promedio de este error es de un poco menos del 9% lo cual es un valor bajo teniendo en cuenta los factores por los cuales este error se presenta, la calibración de los equipos utilizados para la medición de las temperaturas en el horno durante su proceso de cocción, la precisión de las termocuplas utilizadas, la fiabilidad del código utilizado en el field-point, así mismo, las simplificaciones realizadas a los elementos que interviene en el proceso para realizar la simulación.

5 PROPUESTAS DE OPTIMIZACION

Como objetivo de realización de trabajo se tiene: Proponer y analizar alternativas de optimización en el modelo propuesto. En base a esto se toma como referencia el estudio del cambio de temperatura con respecto a una línea que atraviesa la carga desde su punto más caliente al menos caliente, pues se tiene una diferencia de temperatura de aproximadamente 320°C y el cual influye en las características del producto final. La línea de referencia para comparar el estado actual del horno y las propuestas de optimización se muestra en la figura 32.

Figura 32. Línea de referencia para comparación.



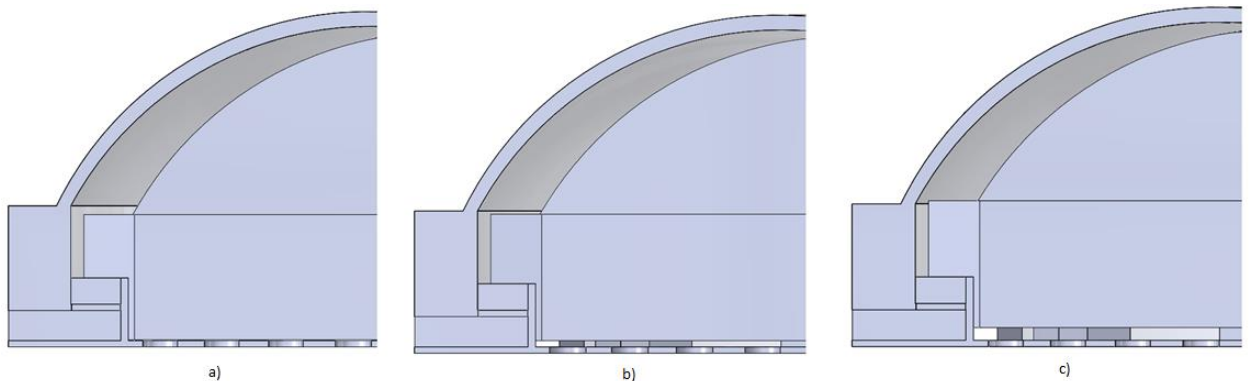
Fuente: Los autores.

5.1 PROPUESTA 1. Elevación de la carga.

Consiste en el levantamiento de la carga dentro del horno con el fin de tener un espacio por donde circule de forma más rápida y/o menos obstruido el fluido para con esto se dé un arrastre de flujo más rápido a la parte inferior de la carga y así tener una diferencia de temperatura menor en esta. Para mirar la influencia de la altura en el cambio del gradiente se hizo el estudio con 2 alturas distintas y se analizó el resultado como se ve en la figura 33.

Figura 33. Elevación de la carga.

a) Sin elevación, b) elevación 10 cm, c) elevación 20 cm.

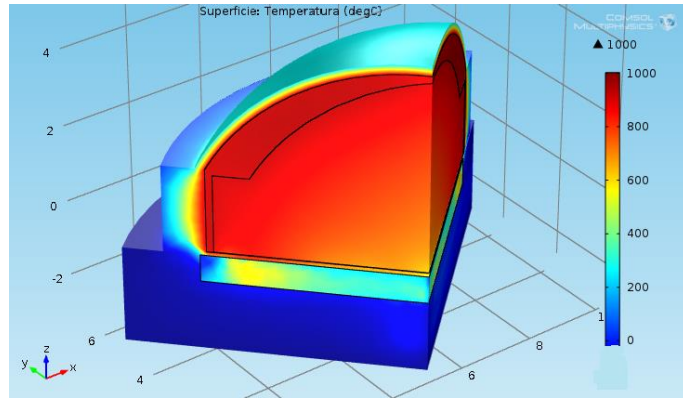


Fuente: Los autores.

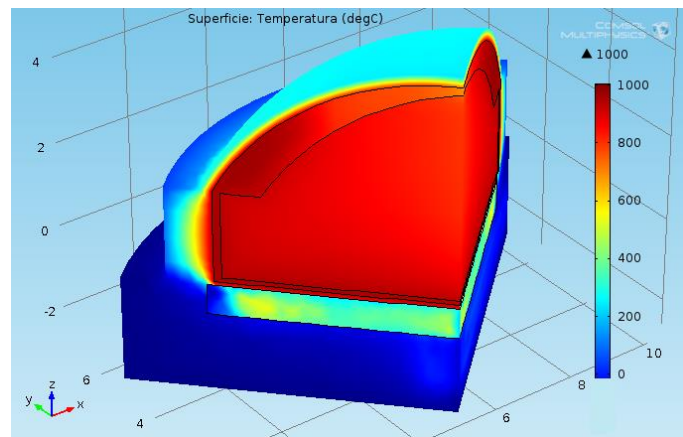
Inicialmente se elevó la carga una distancia de 10 centímetros y posteriormente 20 centímetros, luego se realizó la simulación para mirar como esta variación afectaba la diferencia de temperatura en la carga.

Figura 34. Perfil de temperatura optimización 1.

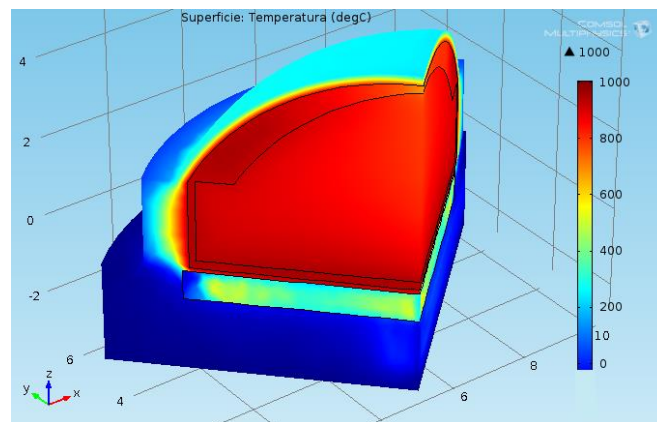
a) Sin elevación, b) elevación 10 cm, c) elevación 20 cm.



a)



b)

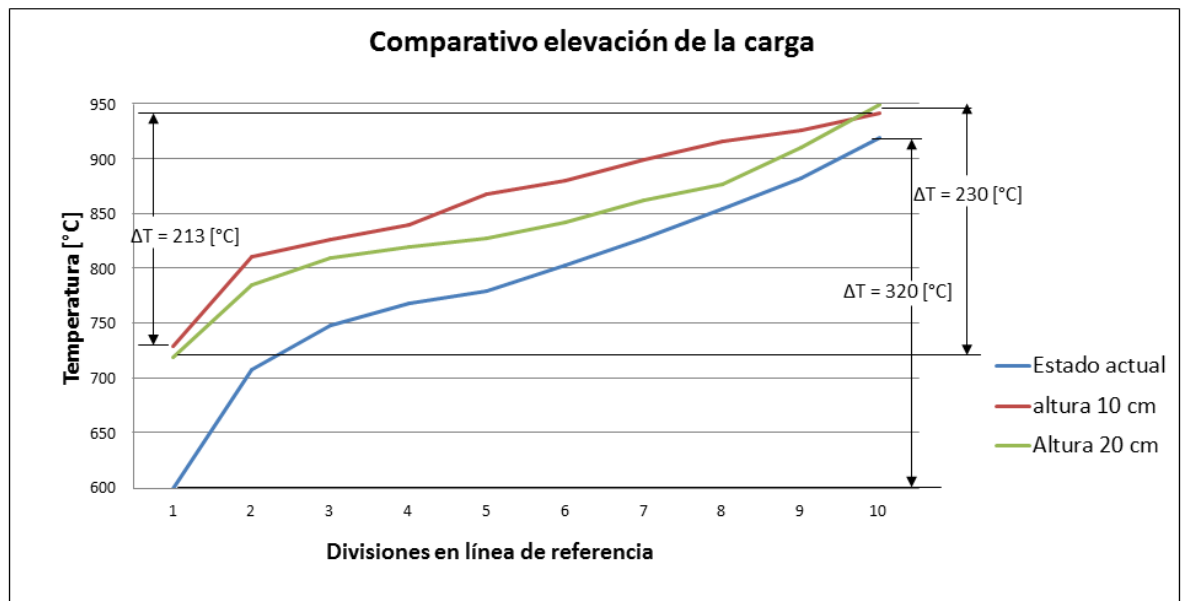


c)

Fuente: Los autores.

La figura 34 muestra en su gama de colores que los resultados obtenidos tienen cambios entre la condición sin elevación y las de carga elevada, pero una diferencia muy pequeña en las diferentes alturas de elevación. Para tener una mejor comparación de los resultados se analiza la línea de referencia y se grafican los datos de las diferentes simulaciones figura 35.

Figura 35. Temperatura en línea de referencia (elevación carga).



Fuente: Los autores.

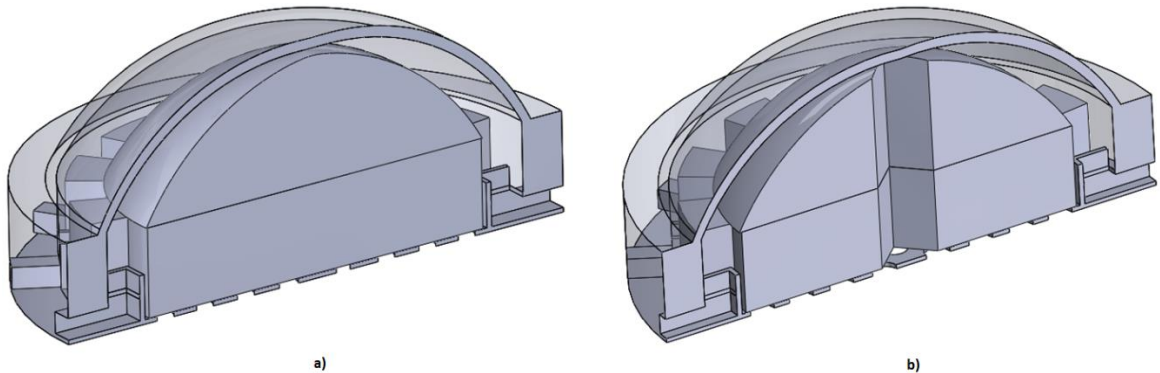
En la figura 35 podemos apreciar la reducción en la diferencia de temperatura dentro de la carga en la línea de referencia con respecto a la configuración real y las propuestas de elevación, teniendo 320°C de diferencia en la condición real y de 213 y 230°C en las elevaciones de 10 y 20 centímetros respectivamente. Encontramos también que entre una distancia de elevación y otra la variación no es significativa.

5.2 PROPUESTA 2. Espacio central en la carga.

Lo que se propone en esta optimización es dejar un espacio o conducto en la parte central de la carga (figura 36) que la atraviese de forma vertical con el fin de conseguir que el flujo de gases calientes que hay dentro del horno pasen por este conducto y calienten la carga desde su parte central y no solo desde la zona perimetral. El diseño propuesto consiste en una geometría cuadrada con área de 1 metro cuadrado.

Figura 36. Propuesta de espacio en el centro de la carga.

a) Forma real, b) con espacio propuesto.

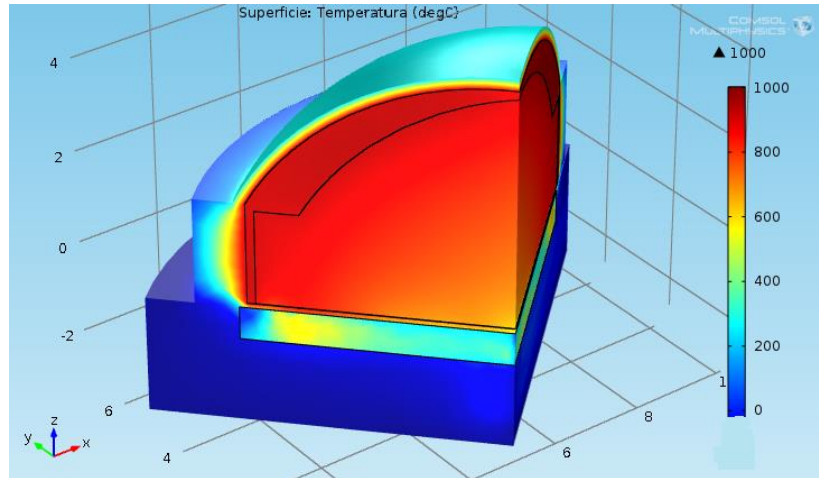


Fuente: Los autores.

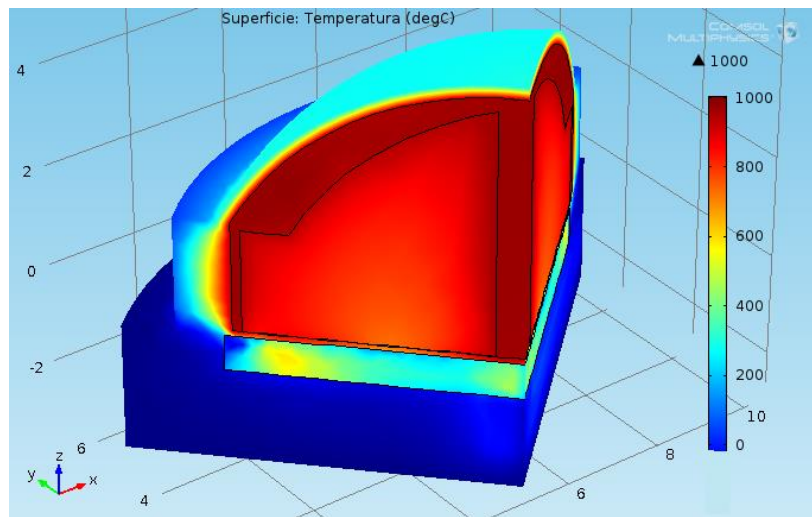
Puesto que la forma de los elementos que constituyen la carga del horno es mayormente en forma de cubo rectangular (excepto la teja) se propone esta geometría cuadrada para el espacio de salida sabiendo que puede tener otra forma ya que la carga del horno se hace de forma manual y cada distribución varía entre sí.

Figura 37. Perfil de temperatura optimización 2.

a) Sin arreglo, b) con espacio en el centro de la carga



a)



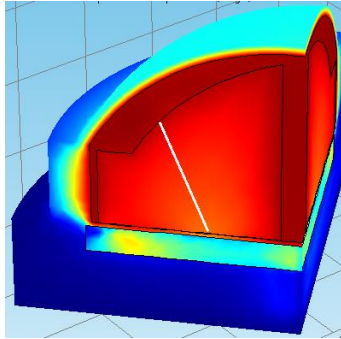
b)

Fuente: Los autores.

En la figura 37 observamos como el perfil de temperatura cambio considerablemente entre una y otra simulacion, cambiando tambien el lugar menos caliente dentro de la carga y visualmente mostrando un diferencia de temperatura menor a la que se tiene actualmente. Como el cambio de temperatura en la propuesta ya no se da proporcional con la linea que se tiene en la carga

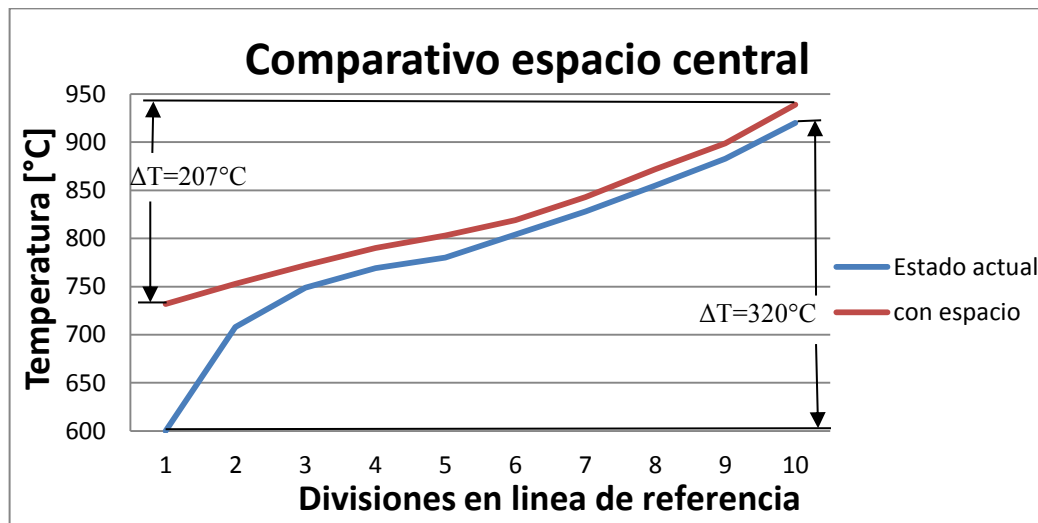
actual, trazamos otra línea que una los puntos mas y menos caliente en la carga para así tener el valor de diferencia de temperatura y compararlo con los valores actuales (figura 38).

Figura 38. Línea de comparación propuesta 2.



Fuente: Los autores.

Figura 39. Temperatura en líneas de referencia (espacio central).



Fuente: Los autores.

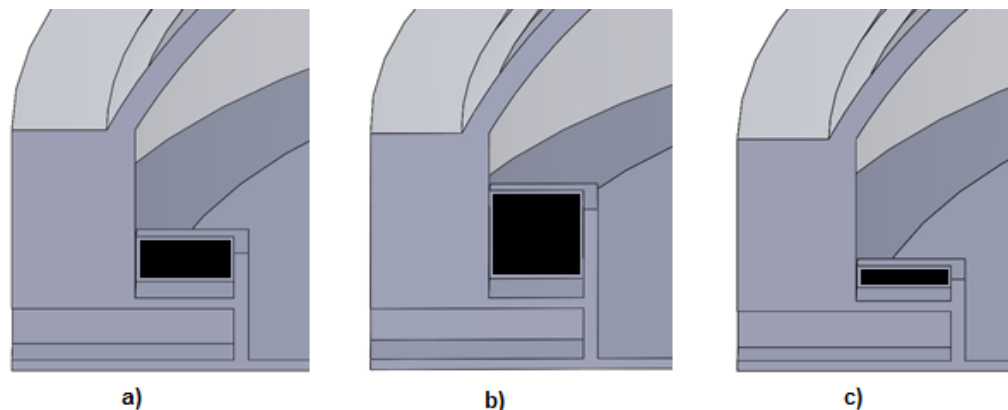
En la figura 39 podemos apreciar como los perfiles de temperatura varían entre una y otra simulación, teniendo una menor variación de temperatura el que representa la propuesta. Encontrando a partir de estos valores una variación de 207°C dentro de la carga con lo cual podemos ver que se tiene una mejora y esta propuesta cumple con su objetivo.

5.3 PROPUESTA 3. Modificación de altura de las paredes del fogón.

Estudiando la geometría del horno se encontró que un cambio fácil de realizar en este sería la modificación en el tamaño de las paredes del fogón que retienen y ayudan a dirigirla llama y el flujo inicial de los gases dentro del horno, por esta razón se hizo un par de variaciones en estas paredes con el fin de encontrar que tanto podía ayudar en la disminución de la diferencia de temperatura estudiada. Inicialmente se realizó un aumento en el doble del tamaño actual de las paredes y posteriormente se hizo una reducción en la mitad de la altura real (figura 40) con el fin de observar que resultados se obtenían al realizar estos cambios opuestos entre sí.

Figura 40. Altura de pared del fogón.

a) Altura real, b) doble de la altura, c) mitad de la altura

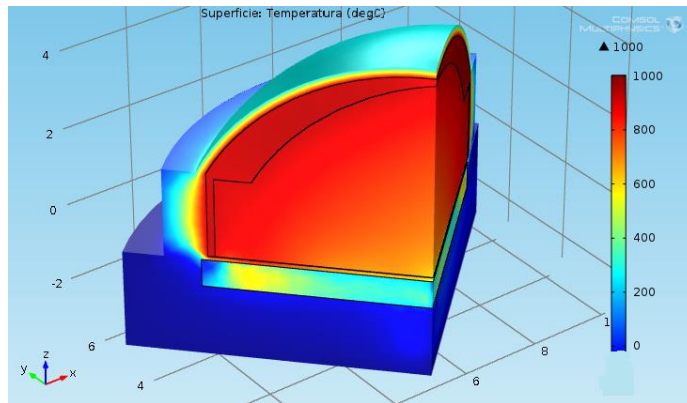


Fuente: Los autores.

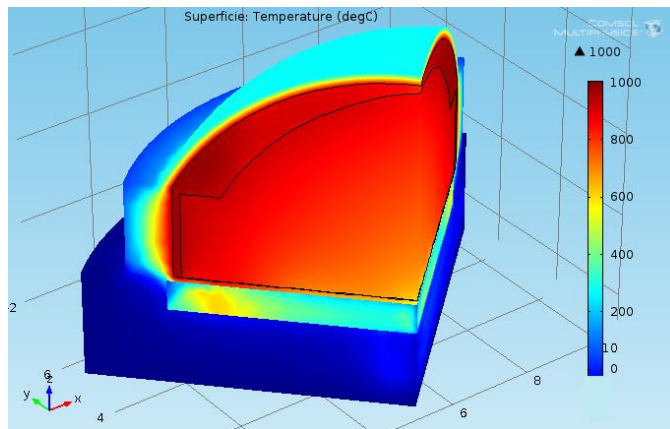
Como nos muestra la figura 40 y resaltado en color negro están las tres configuraciones distintas en altura con las cuales se desarrollaron los modelos de esta propuesta.

Figura 41. Perfil de temperaturas con cambio de altura de pared.

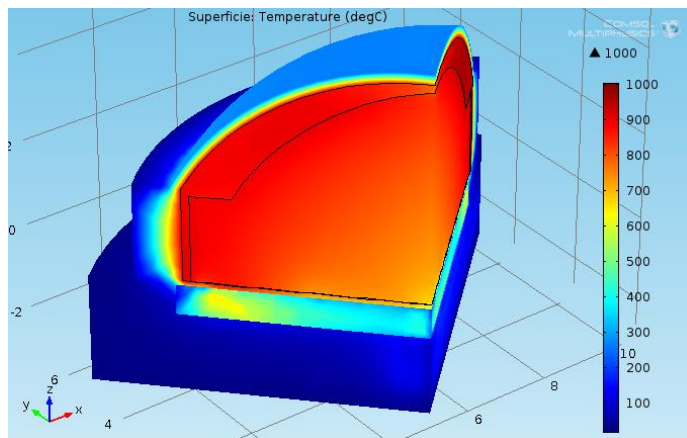
a) Altura real, b) doble de la altura, c) mitad de la altura



a)



b)

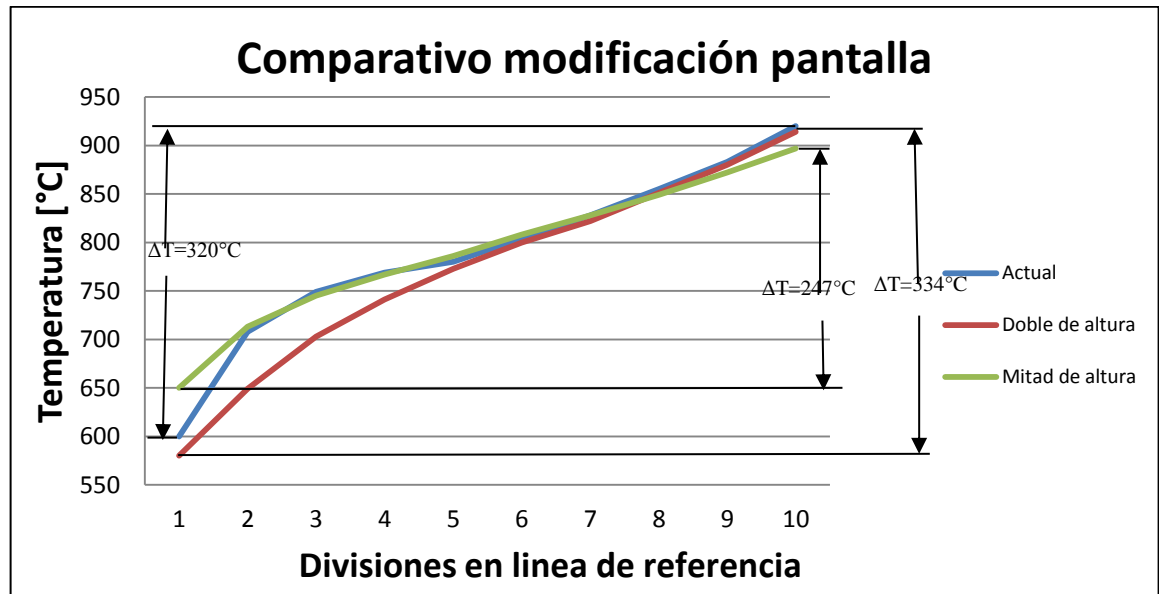


c)

Fuente: Los autores.

Como podemos observar en la figura 41 hay similitud en los resultados entre las tres configuraciones, por lo tanto analizamos los valores en la línea de referencia para mirar el cambio que hubiera entre los tres modelos.

Figura 42. Temperatura en línea de referencia (pantalla).



Fuente: Los autores.

En la figura 42 podemos ver y corroborar la similitud de los resultados en los tres modelos realizados, teniendo como delta de temperatura 320; 334 y 247°C en la altura real, el doble de la altura y la mitad de la altura respectivamente. Estos resultados nos muestran que el cambio en las pantallas no representa un cambio significativo aunque la reducción mostro mejores resultados que la ampliación y esto debido a que de esta forma los gases calientes entran en contacto con la carga desde una parte más baja de esta. La poca variación de los resultados se debe a que la carga por su distribución actúa como pantalla para direccionar los gases calientes hacia la parte superior del horno y por esto el cambio no es significativo.

5.4 PROPUESTA 4. Aislante en las paredes externas del horno.

Como alternativa en los objetivos del proyecto en la búsqueda de una optimización del horno se propuso la utilización de un aislamiento térmico y al intentar desarrollarlo en el programa de simulación (COMSOL Multiphysics) se encontró gran dificultad para integrar una capa que cubriera las paredes del horno y darle las características de aislante. Entre estas su característica principal es reducir el calor por conductividad hacia la pared exterior del horno y evitar así pérdidas de calor por esta condición. Por consiguiente se desarrolló un modelo en el cual se redujo la conductividad en las paredes del horno con el fin de aparentar esta capa aislante. El valor del coeficiente de conductividad se redujo un 50% del valor real (conductividad real 0,658 [W/m*K]; conductividad para representar aislamiento 0,329 [W/m*K]) y se realizó la simulación.

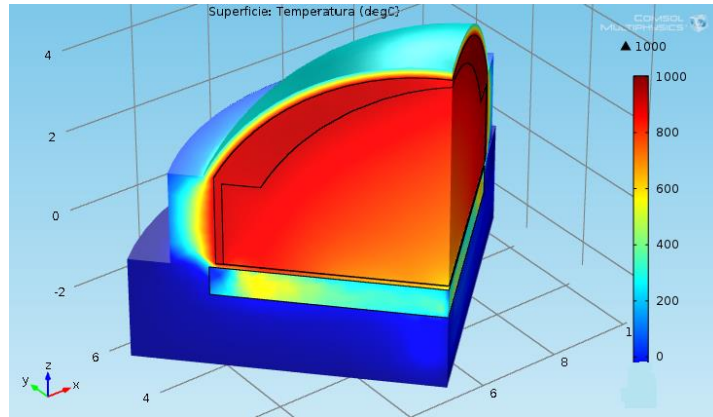
Figura 43. Temperatura en línea de referencia (aislante).



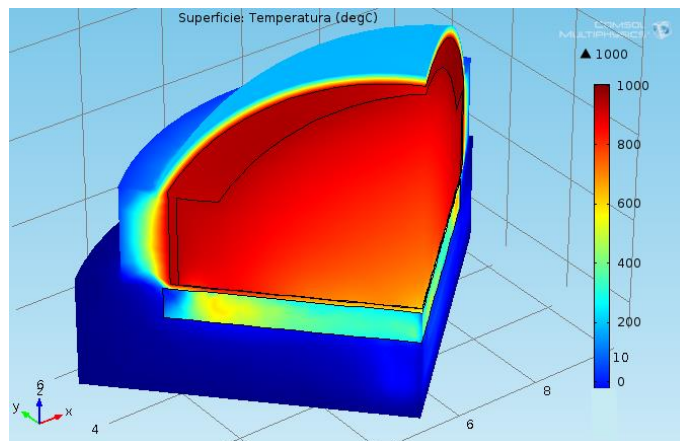
Fuente: Los autores.

Figura 44. Perfil de temperatura con aislante

a) Sin aislante, b) con aislante



a)



b)

Fuente: Los autores.

En la figura 43 podemos apreciar gran semejanza entre los dos modelos, por lo tanto tabulamos y graficamos los valores de temperatura en la línea de referencia para ambos y así ver el verdadero cambio.

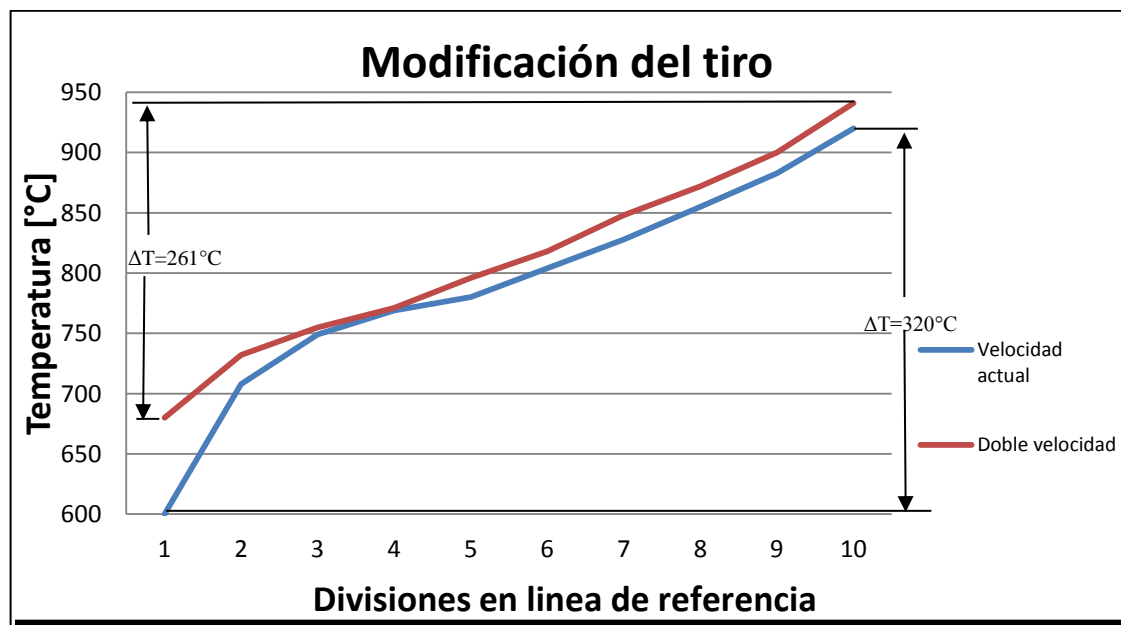
En la gráfica de la figura 43 podemos apreciar que los perfiles de la curva que representa las temperaturas en la línea de referencia son muy similares, mostrándonos que la utilización de un aislante térmico no cambiaría el gradiente dentro del horno, pero los resultados nos muestran un aumento global en la

temperatura dentro del horno. El delta de temperatura en la simulación con aislante es 324°C con lo cual se tiene un aumento de la diferencia.

5.5 PROPUESTA 5. Aumento en el tiro de la chimenea.

Con el fin de realizar modelos en los cuales no se hagan cambios en la geometría si no que se modifique las condiciones de operación, se simula un modelo en el cual se varía el tiro producido por la chimenea. Este aumento del tiro se representa variando la velocidad de entrada del aire al horno, ya que es el tiro de la chimenea el causante de la entrada de aire, se varía la condición de velocidad de entrada a 0.618 m/s equivalente al doble de la real con el fin de buscar un aumento en la velocidad con la cual los gases calientes entran en contacto con la carga.

Figura 45. Temperatura en línea de referencia (aumento del tiro).



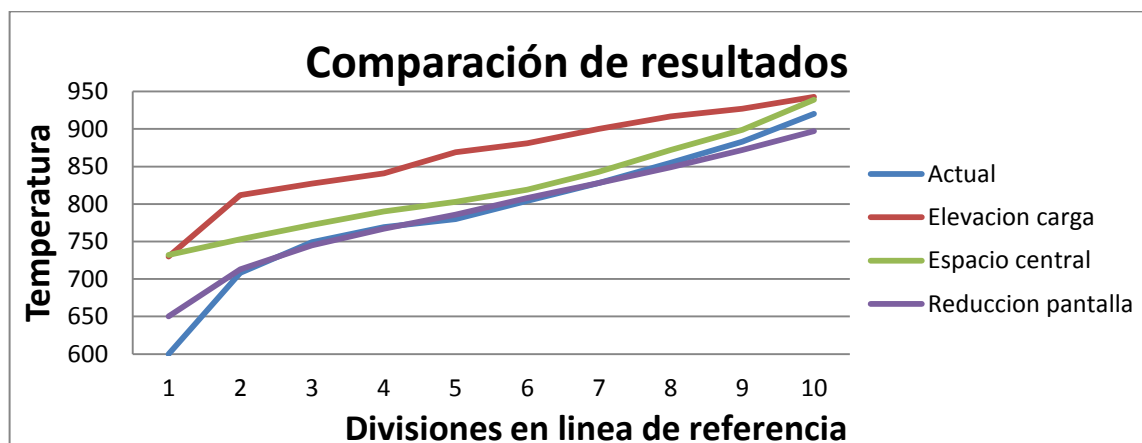
Fuente: Los autores.

La figura 45 nos muestra las temperaturas en la línea de referencia y observamos que los resultados con este cambio son similares a los actuales, cambiando principalmente la temperatura en la parte baja de la carga ya que el aumento se ve reflejado en esta parte. Encontrando para este caso una diferencia de temperatura de 261 °C.

5.6 COMPARACION DE RESULTADOS

A partir de los resultados obtenidos en cada una de las propuestas de optimización y los datos de la simulación de las condiciones actuales del horno se revisa y tiene en cuenta aquellas opciones que si presentan una mejora en la diferencia de temperatura dentro de la carga o cumplen con el objetivo del presente trabajo. Con estos datos se hace una gráfica en la cual se enfrentan estos resultados y así ver de forma clara las mejoras que se pueden tener a partir de estas propuestas. Como se hizo en las gráficas anteriores se toma como referencia la línea que abarca la carga entre su mayor y menor temperatura.

Figura 46. Temperatura en línea de referencia (resultados).



Fuente: Los autores.

En la figura 46 podemos observar los diferentes perfiles de curva de las propuestas que mejores resultados mostraron, entre las cuales está la elevación de la carga, el espacio central en la carga y la reducción de las paredes del fogón.

En la tabla 4 se hace el comparativo de los valores encontrados, las diferencias de temperatura de cada simulación y el porcentaje de reducción de cada una con respecto al valor actual.

Tabla 4. Comparativo de resultados.

	Temperatura máxima [°C]	Temperatura mínima [°C]	Delta temperatura [°C]	Porcentaje reducción [%]
Horno real	920	600	320	-----
Propuesta 1 (elevación de 10 cm)	943	730	213	33,43
Propuesta 1 (elevación de 20 cm)	950	720	230	28,12
Propuesta 2	939	732	207	35,31
Propuesta 3 (doble de la altura)	914	580	334	Aumento el ΔT
Propuesta 3 (mitad de la altura)	897	650	247	22,81
Propuesta 4	944	620	324	Aumento el ΔT
Propuesta 5	941	680	261	18,43

Fuente: Los autores.

En base a los datos obtenidos y mostrados anteriormente podemos darnos cuenta que la propuesta que mejores resultados entrega es la del espacio vertical que atraviesa la carga, esto se da gracias a que los gases calientes entran en contacto con más superficie de la carga y de forma más homogénea por toda esta. Sin

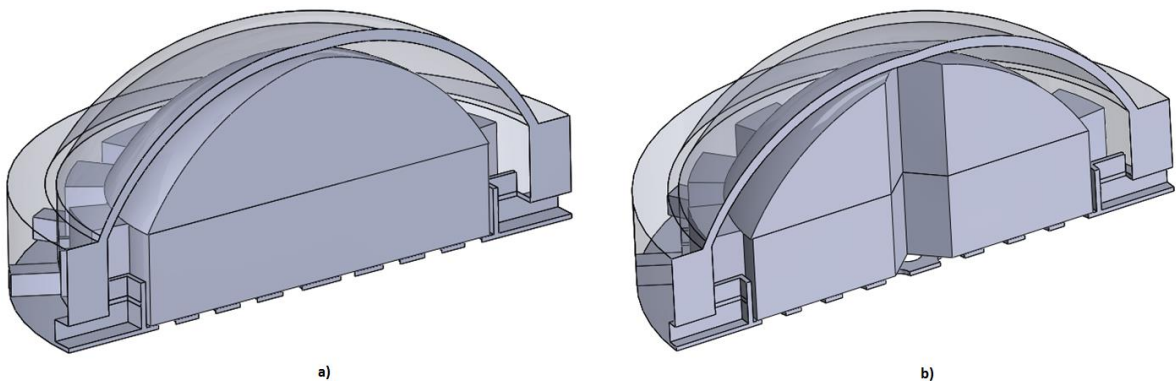
embargo, se presenta poca diferencia entre esta propuesta y la de elevar la carga 10 cm. Aun así, se escoge la propuesta del espacio central debido a la sencilla aplicación de esta, pues la propuesta de elevación de la carga conlleva a la implementación de una estructura adicional que permitiera el levantamiento de esta.

5.7 DOCUMENTACION MEJOR PROPUESTA

Como se vio en el apartado anterior y basado en los resultados obtenidos por medio de la simulación, la mejor de las propuestas de optimización realizadas es en la cual se pretende acomodar la carga de tal manera que se deje un espacio o conducto dentro de ella atravesándola de arriba hasta abajo (figura 47) con el fin de permitir que los gases calientes que se acumulan en la parte superior del horno desciendan por el interior de la carga para así tener un mayor área de contacto entre la superficie exterior de la carga y los gases producto de la combustión.

Figura 47. Propuesta de espacio en el centro de la carga.

b) Forma real, b) con espacio propuesto.

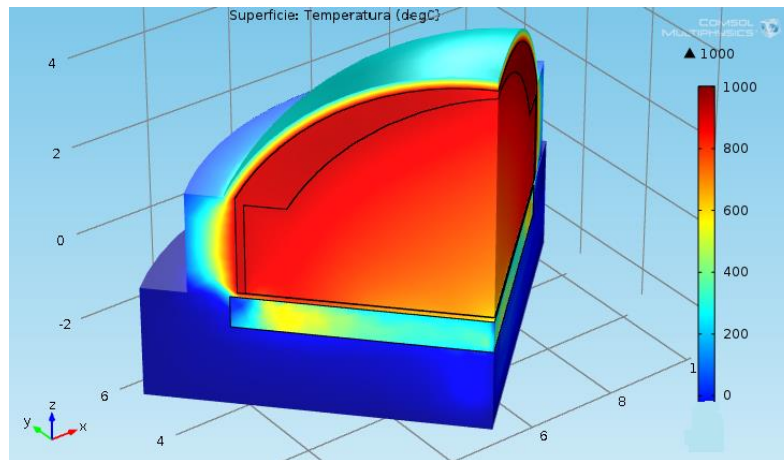


Fuente: Los autores.

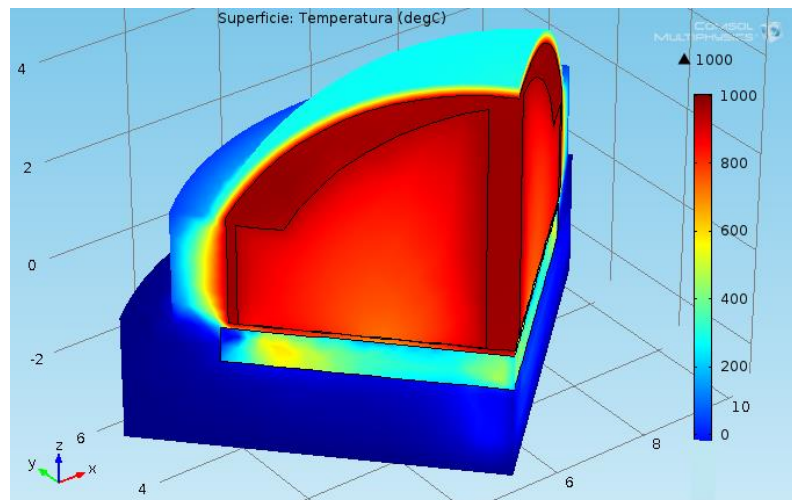
A partir de esta modificación geométrica de la distribución de la carga se encontró una reducción en la diferencia de temperatura de la carga del 35,31% con respecto al estado actual, lo cual es una mejora y conlleva una mayor uniformidad en la cocción de los ladrillos. En la figura 48 se puede apreciar como los perfiles de temperatura cambiaron significativamente.

Figura 48. Comparación perfil temperatura mejor propuesta.

a) Distribución actual, b) Distribución propuesta.



a)



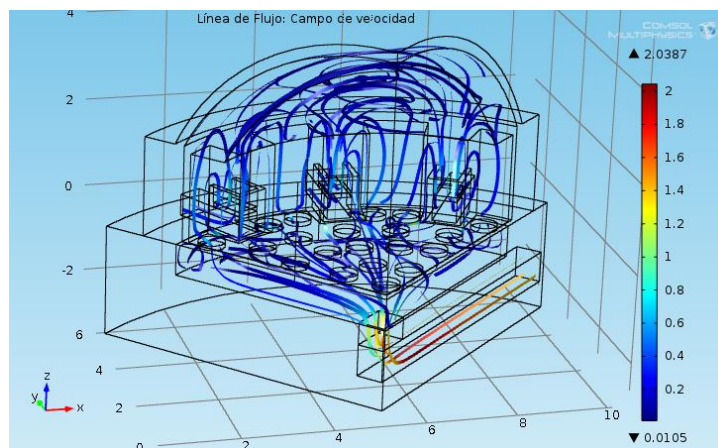
b)

Fuente: Los autores.

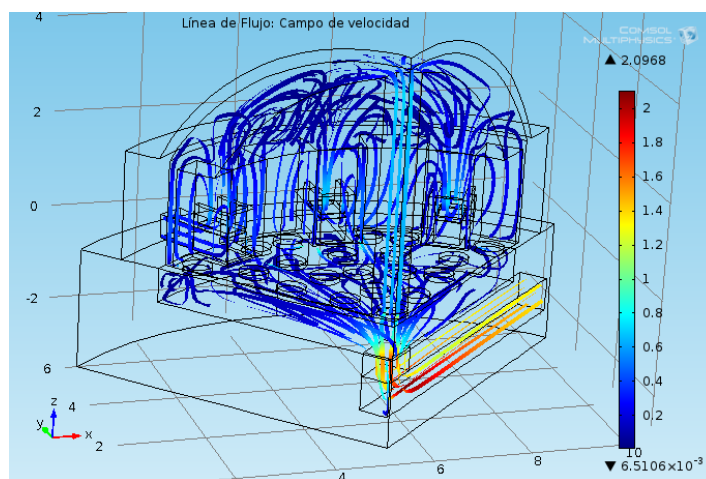
El movimiento del fluido es el principal cambio a partir de esta modificación, como se aprecia en la figura 49, pues los gases ya no solo van a descender abriéndose camino dentro de la carga si no que ahora se cuenta con el espacio central por donde fluirían sin dificultad. Junto con esto, los gases calientes tendrían mayor superficie de contacto por la cual entrar a la parte interior de la carga y por consiguiente calentar uniformemente los ladrillos a ser cocidos.

Figura 49. Comparativo Flujo dentro del horno mejor propuesta.

a) Distribución actual, b) Distribución propuesta.



a)



b)

Fuente: Los autores.

Debido a que el flujo se desplaza con menor obstrucción hasta la parte baja del horno en la cual se encuentran los agujeros por donde salen los gases calientes favorece al tiro de la chimenea que a su vez ayudaría en la solución de la pérdida del calor que se da en las boquillas de alimentación de carbón (figura 50), que se evidencio como problema en el proyecto de grado titulado “Desarrollo de una propuesta de optimización energética de los hornos colmena de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.” [18].

Figura 50. Deficiencia en las boquillas de alimentación



Fuente: Mantilla, Silvia y Ardila Lorenzo. Desarrollo de una propuesta de optimización.

Por otra parte se tienen aspectos no favorables en la propuesta, uno de ellos es la cantidad de producto que se dejaría de cocer debido al espaciamento propuesto, a partir de la observación se aprecia la distribución de la carga en el horno (figura 51) y se puede sacar un estimado por metro cuadrado de 20 ladrillos y una torre de 20 pisos. Con lo cual se tendría un total de 400 ladrillos (tomando como referencia el ladrillo H10) que se dejarían de producir con esta propuesta, lo cual equivale al 1,6% menos de producto.

Figura 51. Carga en el horno



Fuente: Los autores.

Otro aspecto poco favorable debido a esta propuesta es el de la temperatura que tendrían los gases a la salida, pues al ser más rápido y fácil el flujo del aire caliente hasta la parte baja se tendrá una temperatura de los gases a la salida mucho mayor. Esta alta temperatura tendría como desventaja el no cumplimiento de la norma (resolución 909 de 2008. Por la cual se establecen las normas y estándares de emisiones admisibles de contaminantes a la atmosfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones), en la cual se establece una temperatura máxima de salida para hornos discontinuos de 250°C. Sin embargo, el presente trabajo está enmarcado en una serie de proyectos de investigación dentro de los cuales se ha realizado otros estudios y proyectos en el que se encuentra el proyecto titulado “Diseño de un sistema para la recuperación del calor residual en los gases de combustión de los hornos colmena en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S.” UIS, 2013 [8]. El cual se basa en el aprovechamiento de este calor residual utilizándolo en el secado de productos con el fin de aumentar la producción.

De acuerdo a las ventajas y desventajas definidas en la propuesta de optimización que presento un mejor resultado con respecto a la diferencia de temperatura

estudiada y en conjunto con las demás propuestas realizadas en los diferentes proyectos efectuados a la empresa LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S. y sus hornos colmena sería viable el estudio experimental de esta propuesta con el fin de evidenciar un aumento en la eficiencia de estos hornos a partir de esta optimización desarrollada.

6 CONCLUSIONES

- Se realizó un modelo del horno colmena de la empresa LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S. Utilizando el programa de simulación COMSOL multiphysics con el fin de poder realizar modificaciones que produjeran un mejor resultado en el gradiente de temperatura dentro del horno.
- Se realizó la validación del modelo simulado a partir de los datos experimentales de temperatura tomados anteriormente al horno en el proyecto “DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA RECUPERACIÓN DEL CALOR RESIDUAL EN LOS GASES DE COMBUSTIÓN DE LOS HORNOS COLMENA EN LA EMPRESA LADRILLOS Y ACABADOS S.A.S.”. teniendo un porcentaje de error promedio entre las temperaturas de referencia de 8,71%.
- Se propuso cinco cambios distintos tanto de geometría del horno, como de distribución de la carga y variables del proceso con el fin de encontrar cuál de ellas nos entregaba unos mejores resultados con respecto al gradiente base del estudio teniendo en cuenta el ΔT de la carga, el cual para la propuesta 2 tuvo un valor de 207°C. siendo mucho menor que el valor de 320 °C que se tiene actualmente. También se encontró que algunas propuestas aumentaban el ΔT en lugar de disminuirlo.
- Se encontró que la propuesta de optimización que entregaba mejores resultados es en la cual se distribuye la carga de tal forma que se deja un ducto por donde los gases calientes podrán entrar en contacto con más superficie de la carga, además de llegar de forma más rápida a la parte baja de esta, haciendo que se tenga una temperatura más homogénea en todo

el horno y teniendo un porcentaje de reducción con respecto al estado actual de 35,31%.

- Se evidencio que la implementación de la propuesta con menor gradiente de temperatura tendrá como consecuencia directa de la homogenización de la temperatura dentro del horno la desventaja de presentar una temperatura de salida de los gases mayor a la actual con la cual no se cumpliría la norma ambiental en la cual se estipula un valor máximo de temperatura en la salida de la chimenea de 250°C. por lo cual sería necesario la implementación de un recuperador de calor que disminuyera la temperatura de los gases al tiempo que los aprovecha en otra parte del proceso como los propuestos en proyectos anteriores realizados al horno.
- Se encontró al realizar el modelo que los estudios referentes al como simular la carga de ladrillos en el horno es bastante compleja pues no presenta una homogeneidad en su distribución, por lo cual se utilizó el modelo de medio poroso basado en las ecuaciones de Brinkman para solucionar este problema.
- Se evidencio que a pesar que el programa COMSOL multiphysics es una gran herramienta y permite agregar varios problemas físicos a un solo modelo, fue necesario implementar diferentes módulos del programa los cuales fueron el LiveLink for SolidWork, transferencia de calor conjugada, transferencia de calor en medio poroso y ecuaciones de Brinkman, para poder abarcar toda la simulación geométrica y física del estudio.
- Se necesitó realizar el modelo geométrico en un programa de simulación CAD más específico como lo es SolidWords sincronizando con COMSOL por medio de su herramienta LiveLink, pues la creación del modelo CAD en

el programa COMSOL multiphysics no presenta unas herramientas fáciles para el desarrollo de geometrías complejas como la del presente proyecto.

7 RECOMENDACIONES

- En futuras simulaciones se recomienda adicionar el desarrollo de la combustión para obtener un modelo físico del horno más realista.
- La implementación de la mejor propuesta de optimización tendría una mayor viabilidad si es implementada junto con el sistema recuperador de calor de los gases residuales del horno propuesto en proyectos anteriores, ya que una consecuencia directa de la propuesta es una temperatura mayor que la actual en la salida de los gases.
- Validar el modelo desarrollado con un software que utilice volúmenes finitos en lugar de elementos finitos, debido a que el primero es más recomendable para este tipo de simulaciones de flujo.

BIBLIOGRAFIA

- [1].ARRIETA, A. CADAVID F. Y AMELL A. Simulación numérica de hornos de combustión equipados con quemadores radiantes. Artículo derivado del trabajo de grado de maestría “Simulación numérica de los fenómenos fluidodinámicos, térmicos y cinético-químicos presentes en un horno de pirolisis”. Grupo GASURE. Medellín. Universidad de Antioquia. 2011. 20 p.
- [2].BIANUCCI, Mario Averardo. El Ladrillo, orígenes y desarrollo. Catedra de introducción a la tecnología. Argentina, 2009.
- [3].CENGEL, Yunus. Transferencia de calor. 2 ed. México D.F.: McGraw-Hill.2004. 793 p.
- [4].CENGEL, Yunus y CIMBALA Jhon. Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicación. México D.F.: McGraw-Hill.2007. 956 p.
- [5].CHUNG, T. J. Computal Fluid Dynamics. Segunda edición. New York, USA: Cambridge, 2010. 1034 p.
- [6].COLCIENCIAS y UMPE. Ahorro de energía en la industria cerámica. Colombia, 2006.
- [7].COMSOL AB. COMSLO Multiphysics. Heat Transfer module user’s guide. 2012. 301 p.
- [8].COMSOL AB. COMSOL Multiphysics. Reference Guide. 2012. 749 p.

- [9]. ECOCARBON. Hornos ladrilleros a carbón. Medellín, Colombia: editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 1998. 133 p.
- [10]. Escuela politécnica superior de Avila. Materiales cerámicos. “material para la asignatura: ciencia y tecnología de los materiales”. Ingeniería técnica de obras públicas.
- [11]. FERZIGER, J.H. PERIC, M. Computational Methods for Fluid Dynamics. Tercera edición. Alemania: springer, 2002. 423 p.
- [12]. GALAN, Emiliano y APARICIO, Patricia. Materias primas para la industria cerámica. Universidad de Sevilla.
- [13]. GOMEZ, Carlos. Modelamiento y simulación de un horno túnel industrial. Tesis de maestría en Ingeniería Química. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas. 2010. 56 p.
- [14]. GOMEZ, Iñaqui. Determinación de la permeabilidad del bloque de termo arcilla de 24 cm. Journal of building physics. 12 p.
- [15]. HIRSCH, Charles. Numerical Computation of Internal and External Flows. Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. Segunda edición. Gran Bretaña: Elsevier, 2007. 696 p.
- [16]. INCROPERA, Frank y DEWITT, David. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Séptima edición. USA: Jhon Wiley & Sons, 2007. 1048 p.

- [17]. K2 INGENIERIA. Muestreo isocinético en una fuente fija en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. en la vereda de campo hermoso ubicado en el municipio de San Gil departamento de Santander. Santander: K2 Ingeniería, 2013. 36 p.
- [18]. MANTILLA, Silvia y ARDILA Lorenzo. Desarrollo de una propuesta de optimización energética de los hornos colmena de la empresa Ladrillo y Acabados S.A.S. Tesis de Grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico - Mecánicas. 2011. 91 p.
- [19]. MEDINA, Ana. Diseño de un Sistema para la recuperación del calor residual en los gases de combustión de los hornos colmena en la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. Tesis de Grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico - Mecánicas. 2013. 165 p.
- [20]. MININ, Igor V. y MININ, Oleg V. Computational Fluid Dynamics Technologies and Applications. Croasia: In Tech, 2011. 396 p.
- [21]. MULLINGER, Peter y JENKINS, Barrie. Industrial and Process Furnaces. Principles, Design and Operation. Hungria: Elsevier, 2008. 524 p.
- [22]. NEIRA, Olena. Simulación numérica de la distribución de temperaturas y flujo de aire en el horno de una cocina de uso doméstico. Tesis de Maestría. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana Ecuador. Unidad de postgrados. 2011. 104 p.

- [23]. PROGRAMA EFICIENCIA ENERGETICA EN LADRILLERAS ARTESANALES-DE AMERICA LATINA PARA MITIGAR EL CAMBIO CLIMATICO-EELA. Estudio tecnológico para definir el tipo de tecnología de horno apropiada para la reconversión de las ladrilleras artesanales, ingeniería básica y supervisión de montaje. Nemocon, COLOMBIA. 2011. 99 p.
- [24]. SAZHIN, S. SAZHINA, E. FALTSI-SARAVELOU y WILD, P. The P-1 model for thermal radiation transfer: advantages and limitations. Fuel. 1996, vol 75, num. 3, pp. 286-294.
- [25]. TU, Jiyuan; YEHO, Guan Heng y LIU, Chaoqun. Computational Fluid Dynamics. A Practical Approach. USA: Elsevier, 2008. 459 p.
- [26]. VARGAS, Zulay y ORJUELA, José. Análisis y propuesta de optimización del proceso de combustión del horno colmena (capacidad 25000 piezas) de la empresa Ladrillos y Acabados S.A.S. . Tesis de Grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico - Mecánicas. 2013. 173 p.
- [27]. VILLASEÑOR, J. Tema 5. Chimeneas. Universidad de Castilla-La Mancha. 2008.
- [28]. YEHO, Guan Heng y YUEN, Kwok Kit. Computational Fluid Dynamics in Fire Engineering. Theory, Modelling and Practice. USA: Elsevier, 2009. 532 p.

ANEXOS

ANEXO A. algoritmo de simulación.

Acoplamiento presión – velocidad, esquema SIMPLE

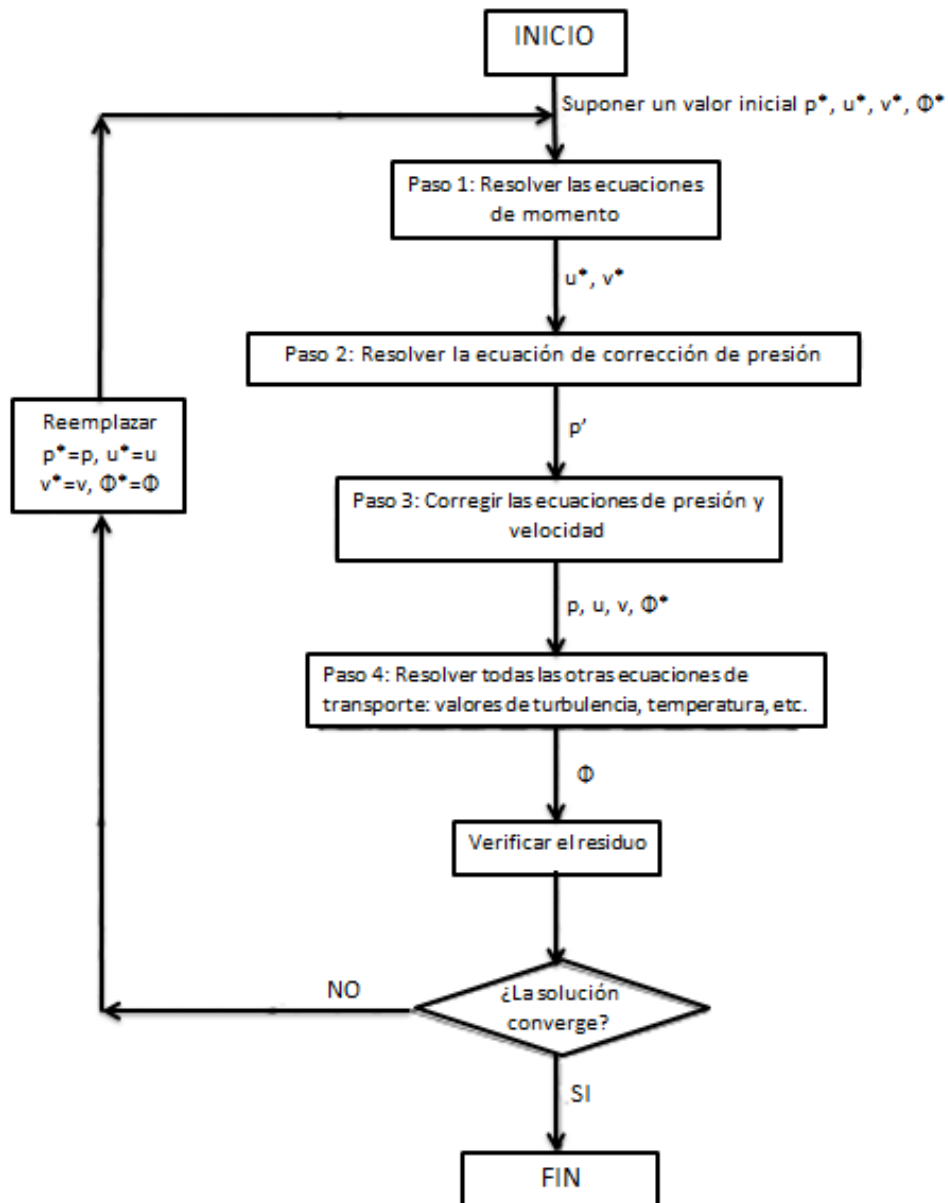
Anteriormente se han mencionado las ecuaciones de conservación para un fluido incompresible. Sin embargo la solución de las ecuaciones que gobiernan un sistema físico de CFD es complicado debido a la falta de una ecuación independiente para la presión.

El gradiente de presión es el que conduce el fluido en las ecuaciones de momento. Si se tiene en cuenta estas tres ecuaciones de momento, junto con la ecuación que aporta la continuidad, se tendría cuatro ecuaciones para cuatro variables dependientes u , v , w y p , pero ninguna ecuación independiente para la presión. La ecuación de continuidad es una restricción cinemática sobre el campo de velocidad, por lo tanto si se quiere vincular la presión con la velocidad en un flujo incompresible, una forma de realizarlo sería construyendo un campo de presión que a la vez garantice la ecuación de continuidad.

La forma de vincular la presión y la velocidad es por medio del algoritmo SIMPLE propuesto por Patankar y Spalding en 1972, que es el acrónimo de Semi-Implicit Method for Pressure Linkage Equations, y el cual es ampliamente aplicado en los códigos CFD. Este algoritmo, cuyo modo de trabajo se puede ver en la figura, supone un campo de presión el cual es usado para resolver las ecuaciones de momento. De la ecuación de continuidad se deduce una ecuación de corrección de la presión, la cual sirve para tener un campo de presión corregido, el cual a su vez es usado para actualizar la velocidad, los campos de presión y resolver todas las demás ecuaciones de transporte como turbulencia y temperatura. Como se puede observar este campo de velocidad es mejorado con cada iteración hasta que el criterio de convergencia es alcanzado para la velocidad y la presión. Un análisis más detallado de este algoritmo junto con las ecuaciones de corrección se

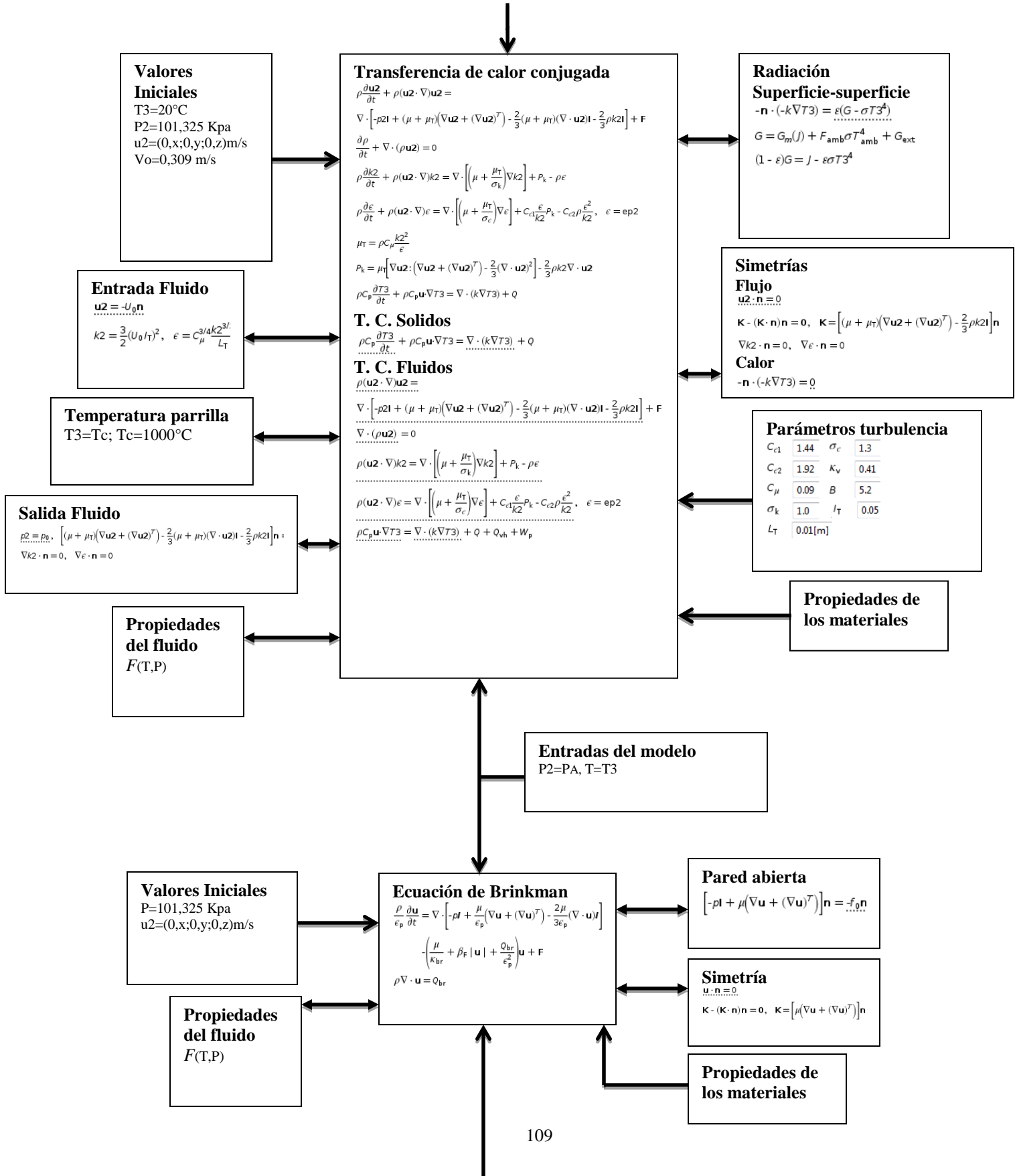
puede encontrar en libros como *Computational Fluid Dynamics, a practical approach* (Yeoh, Liu and Tu).

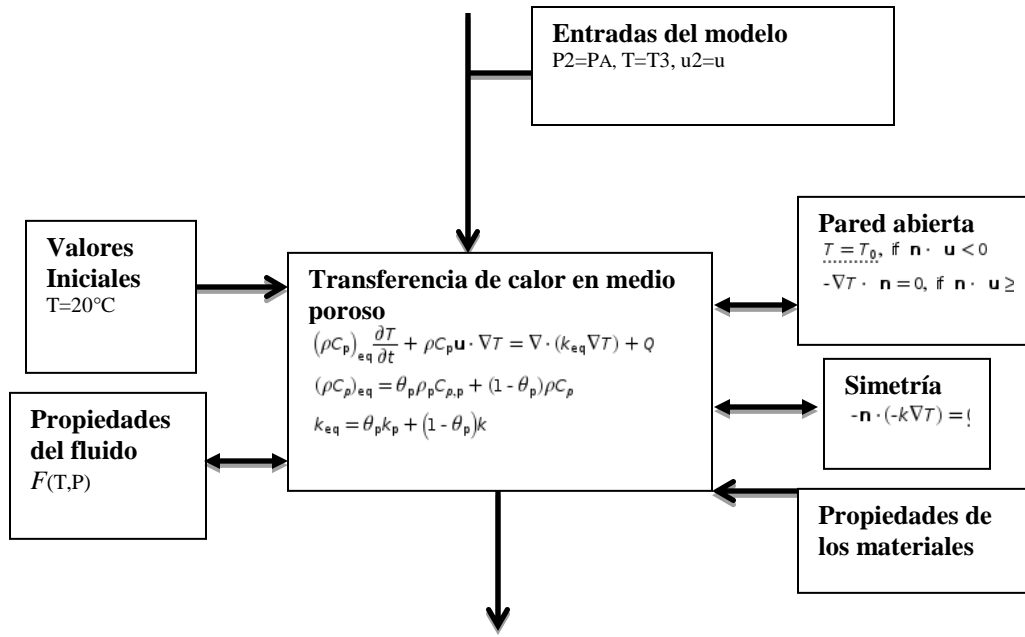
Figura. Algoritmo SIMPLE



Fuente: Los autores.

Figura. Paso 4, Ecuaciones del modelo.





Fuente: Los autores.

ANEXO B. Tiro de la chimenea y flujo de los gases de salida.

El tiro generado por una chimenea es el diferencial de presión que se crea debido al cambio en la densidad entre el gas que pasa por esta y el aire exterior, siendo la densidad del gas una función de la temperatura a la que se encuentre.

$$\Delta P = (\rho_a - \rho_g) \times g \times h$$

Dónde:

$$h = 17[m] \quad \text{Altura de la chimenea}$$

$$g = 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad \text{Constante de gravedad}$$

$$\rho_a = 1,204 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad \text{Densidad del aire a temperatura ambiente (T=25°C)}$$

$$\rho_g = F(T) \quad \text{Densidad del aire a temperatura de los gases en la chimenea}$$

La temperatura para la densidad de los gases en la chimenea varía conforme al cambio de temperatura en el horno.

El flujo de los gases por la chimenea dependerá del gradiente de presión o tiro generado por esta, y se relaciona de la siguiente manera

$$\Delta P \geq E_{cg} + \Sigma f$$

Dónde:

$$E_{cg} = \frac{1}{2} \rho_g V_g^2 \quad \text{Energía cinética de los gases}$$

$$\Sigma f = \frac{V_g^2}{2} f \rho_g \frac{h}{D} \quad \text{Caída de presión por rozamiento}$$

$$V_g = F(\rho_g) \quad \text{Velocidad de los gases.}$$

$f = 0,038$ Coeficiente de pérdidas por rozamientos

$D = 0,67$ [m] Diámetro hidráulico del ducto

A partir de la velocidad de los gases hallamos el caudal y flujo másico de estos

$$Q = V_g A \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$\dot{m} = Q_g \rho_g \left[\frac{kg}{s} \right]$$

ANEXO C. Velocidad de entrada del aire.

Basado en las mediciones realizadas al horno en proyectos anteriores se conoce el caudal de salida por la chimenea el cual se supone es el mismo que debe entrar por las boquillas del horno, por lo tanto se hallara la velocidad de entrada del aire a partir del caudal del fluido medido en la chimenea del horno.

Caudal en la salida de la chimenea o caudal total.

$$Q_T = 1.52 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

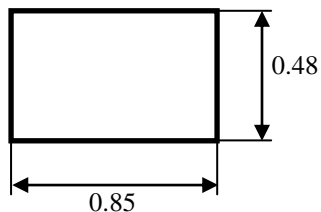
El caudal que entra al horno por las boquillas será igual al caudal total de salida dividido en el número de boquillas.

$$N = 12 \text{ entradas}$$

$$Q_e = \frac{Q_T}{N} \rightarrow Q_e = \frac{1.52}{12} \rightarrow Q_e = 0.126 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

La velocidad del aire de entrada la hallamos con el caudal y el área en la entrada.

Geometría de la entrada del aire



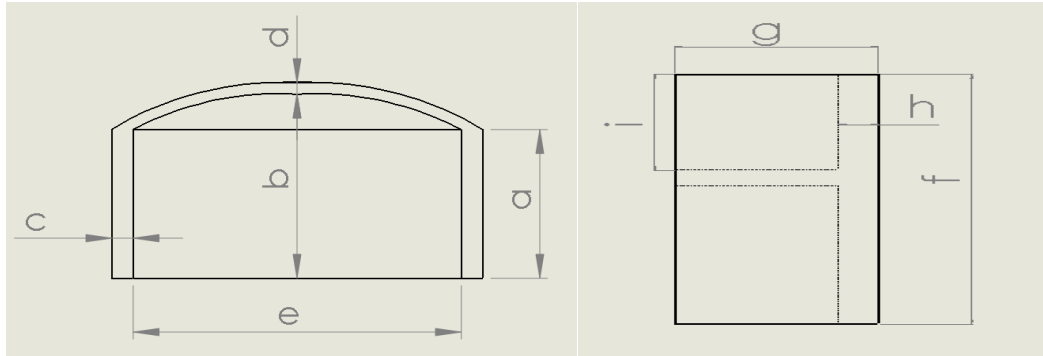
$$A = b \times h \rightarrow A = 0.85 \times 0.48 \rightarrow A = 0.408 [m^2]$$

$$V_e = \frac{Q_e}{A} \rightarrow V_e = \frac{0.126}{0.408}$$

$$V_e = 0.309 \left[\frac{m}{s} \right]$$

ANEXO D. Dimensiones del horno

Figura. Cotas dimensiones.

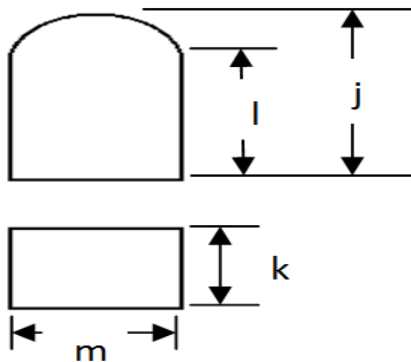


Fuente: Los autores.

- a. 2,15 m
- b. 5 m
- c. 1 m
- d. 0,23 m
- e. 8,6 m

- f. 1 m
- g. 0,92 m
- h. 0,12 m
- i. 0,65

Quemador:



- j. 0,8 m
- k. 0,48 m

- l. 0,5 m
- m. 0,85 m

ANEXO E. Combustión del carbón.

El calor liberado en el proceso de combustión aumenta la temperatura de los productos. Cuando este calor liberado no se pierde por transferencia de calor ni se realiza trabajo, entonces podemos tener una temperatura de los productos bastante alta, si a eso le sumamos que la combustión es estequiometría, es decir con el aire necesario para una combustión completa, entonces tenemos la temperatura de llama adiabática, el cual es un valor teórico de cuál es la máxima temperatura que se puede alcanzar. A pesar de lo ideal de este valor, hallarlo nos permite tener una mediana idea de que valores se pueden alcanzar.

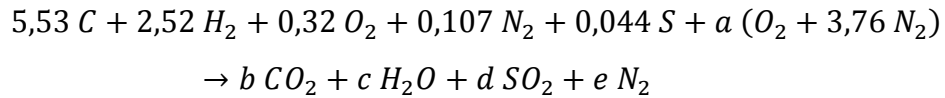
Para hallar la temperatura de llama, en este trabajo se usaron los análisis próximo y último más común para los carbones en la zona de Boyacá, lo cual se puede ver en la siguiente figura.

Figura. 1 Análisis próximo y último del carbón promedio en la zona Boyacá.

ANALISIS PROXIMO	
% Humedad	5,19
% Cenizas	11,55
% Material volátil	35,36
% Carbono fijo	47,89
Poder calorífico (Kcal/ Kg)	6678,04
ANALISIS ULTIMO	
% C	66,41
% H	5,04
% N	1,5
% O	10,19
% S	1,4

Fuente: Ecocarbon. Hornos ladrilleros a carbón.

Se hace un análisis estequiométrico en base molar para el combustible con aire teórico.



Dónde:

$$a = 6,514$$

$$b = 5,53$$

$$c = 2,52$$

$$d = 0,044$$

$$e = 24,6$$

Para hallar la temperatura de llama se usa la siguiente ecuación:

$$\Sigma N_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p = \Sigma N_r (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_r$$

Donde \bar{h}_f° es la entalpia de formación del compuesto, \bar{h} es la entalpia a una temperatura dada, \bar{h}° es la entalpia de referencia a presión y temperatura. N_p y N_r son el número de moles de los productos y los reactivos respectivamente.

Teniendo en cuenta que el aire y el combustible entran a las condiciones estándar de presión y temperatura (101,325 [Kpa] y 25[°C]), la ecuación para hallar la temperatura de llama adiabática queda convertida en:

$$PCI = N_{CO_2} (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_{CO_2} + N_{H_2O} (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_{H_2O} + N_{SO_2} (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_{SO_2} \\ + N_{N_2} (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_{N_2}$$

Tabla 1. Propiedades de los gases.

COMPONENTE	\bar{h}_f° [KJ/Kmol]	\bar{h}° [KJ/Kmol]	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
CO₂	-393520	11077	22,26	5,981X10 ⁻²	-3,501X10 ⁻⁵	7,469X10 ⁻⁹
H₂O	-241820	10029	32,24	0,192X10 ⁻²	1,055X10 ⁻⁵	-3,595X10 ⁻⁹
SO₂	-296800	11888	25,78	5,795X10 ⁻²	-3,812X10 ⁻⁵	8,612X10 ⁻⁹
N₂	0	8664	28,90	-0,157X10 ⁻²	0,8081X10 ⁻⁵	-2,873X10 ⁻⁹

Fuente: Los autores.

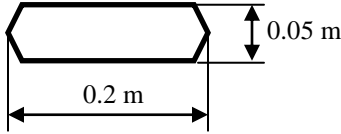
Donde para hallar la entalpia a cierta temperatura de cada producto se usó la tabla anterior y la siguiente expresión

$$\bar{C}_p = a + bT + cT^2 + dT^3$$

Hallar la temperatura de llama adiabática es un proceso iterativo, por lo tanto con la ayuda del programa EES se halo está en un valor aproximado de 2195[°C]

ANEXO F. Área de salida de los gases.

Geometría de los agujeros de salida



Área de cada agujero

$$A_{\text{agujero}} = b \times h = 0.2 \times 0.05 \rightarrow A_{\text{agujero}} = 0.01 [m^2]$$

Cantidad de agujeros por metro cuadrado = 27

Área de los agujeros de salida por metro cuadrado

$$A_m = A_{\text{agujero}} \times N \rightarrow A_m = 0.01 \times 27 \rightarrow A_m = 0.27$$

Área total del piso del horno

$$A_T = \frac{\pi \times d^2}{4} \rightarrow A_T = \frac{\pi \times 5.2^2}{4} \rightarrow A_T = 21.23 [m^2]$$

Como la simulación se simplifica a un cuarto de la geometría del horno entonces hallamos el área del cuarto de horno.

$$A_{\frac{1}{4}} = \frac{A_T}{4} \rightarrow A_{\frac{1}{4}} = \frac{21.23}{4} \rightarrow A_{\frac{1}{4}} = 5.31 [m^2]$$

Área de los agujeros de salida en el cuarto de horno.

$$A = A_{\frac{1}{4}} \times A_m \rightarrow A = 5.31 \times 0.27 \rightarrow A = 1.43 [m^2]$$

Para la simplificación se buscó un número de agujeros menor al real pero con un área equivalente, esto para reducir la carga computacional, así mismo, se decide hacer los agujeros con forma circular.

Numero de agujeros reales en el cuarto de horno:

$$N_R = N \times A_1 \rightarrow N_R = 27 \times 5.31 \rightarrow N_R = 143$$

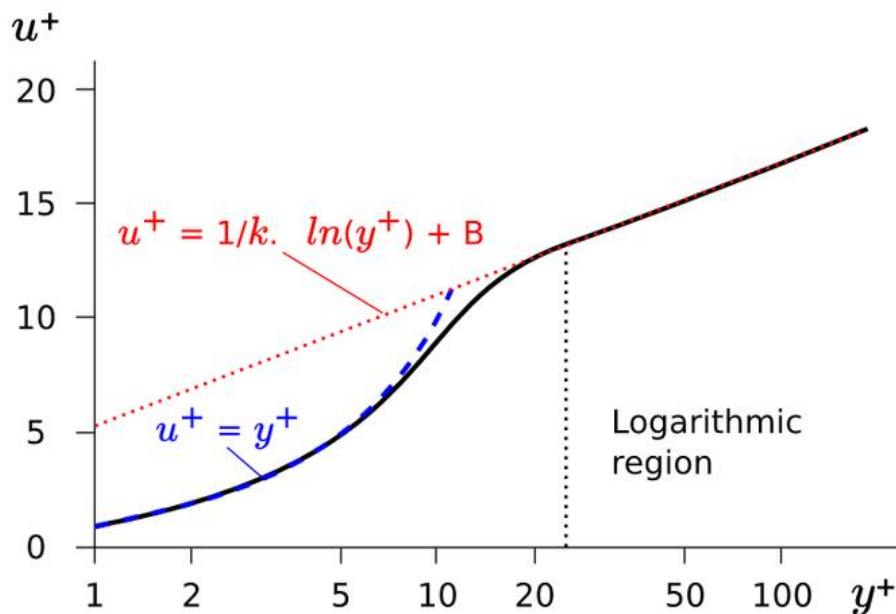
El número de agujeros que se toma es de 20 y se busca el diámetro de estos con respecto al área de salida hallada.

$$A = \frac{\pi \times d^2}{4} \times n \rightarrow d = \sqrt{\frac{1.43 \times 4}{\pi \times 20}} \rightarrow d = 0.30[m]$$

ANEXO G. Teoría logarítmica de la pared

La velocidad promedio de un flujo turbulento en ciertos puntos es proporcional al logaritmo de la distancia de un punto a la pared. Es técnicamente aplicable solo a partes del flujo que están muy cercanos a la pared como se puede ver en la figura.

Figura 1. Ley logarítmica de la pared.



Fuente: www.cfd-online.com

Esta ley logarítmica de la pared es en sí misma una solución para la velocidad media a un flujo paralelo a la pared y con alto número de Reynolds. Por lo tanto lo que esta ley propone es no calcular detalladamente los flujos cercanos a la pared donde los efectos viscoso son más influyentes, en cambio, hallar ese perfil con una formula logarítmica ya establecida, esto ayuda a tomar una buena aproximación al perfil del flujo con una formula más sencilla.

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln y^+ + C^+$$

Donde

$$y^+ = \frac{yu_T}{\nu}$$

$$u_T = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

$$u^+ = \frac{u}{u_T}$$

Donde y^+ es la distancia y a la pared, ν es la viscosidad cinemática del fluido, u_T es un término denominado fricción de velocidad, k es la constante de Von Kármán y C^+ es una constante. De los experimentos se ha encontrado que $k \approx 0,41$ y $C^+ \approx 5,0$ para una pared lisa.