

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA



TESIS

ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN HORNO A GAS NATURAL PARA ROSTIZADO DE CARNES CON DISPOSITIVOS DE CAMBIO DE DIRECCIÓN DE FLUJO PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA TÉRMICA

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN
INGENIERÍA MENCIÓN EN DE APLICACIÓN
ENERGÉTICA DEL GAS NATURAL**

**ELABORADO POR
ING. ENRIQUE SARMIENTO SARMIENTO
ING. JORGE FAVIO SIFUENTES SANCHO**

**ASESOR
DSc. NAIN M. RAMOS ALVAREZ**

**LIMA – PERÚ
2020**

Dedicamos este trabajo a nuestros padres y a mi casa de estudios de la Facultad de Ingeniería Mecánica, FIM-UNI, los cuales fueron importantes en el desarrollo de mi tesis. También, a la empresa Corporación Progreso por brindarme su apoyo en la ejecución de mi trabajo.

Agradecemos a nuestro **asesor**, el DSc. Nain M. Ramos Álvarez por su paciencia, orientación y sus aportes, los cuales fueron importantes para culminar nuestra tesis.

Los autores

RESUMEN

Convencionalmente, la fabricación de hornos comerciales de cocción y dorado de alimentos es meramente explorado, evidenciándose en sus diseños componentes como: el quemador, la estructura del horno en forma de caja, y la estructura donde se ubican los alimentos. Particularmente en el Perú, los hornos para pollos a la brasa y a gas natural o GLP son diseños sin ningún estudio de ingeniería, sino son fabricados a partir de réplicas de otros diseños, esto origina bajas eficiencias en los hornos. El presente trabajo realiza la evaluación de la eficiencia térmica mediante la incorporación de deflectores de flujo en hornos comerciales, la cual es realizada mediante análisis numérico y experimental. El análisis numérico es desarrollado mediante un CFD (*Computational Fluid Dynamics*) en Ansys-Fluent, evaluando al horno con/sin los deflectores de flujo instalados en el interior del mismo. También, en la simulación numérica se considera un comportamiento del flujo turbulento tipo K-epsilon y una malla tipo celda no estructurada. En el caso del análisis experimental se realizó los experimentos del horno con/sin los deflectores de flujo, obteniéndose puntualmente valores de temperatura en la entrada, el interior y la salida de los gases calientes generados por el quemador del horno. Estos análisis son correlacionados a través de valores de temperatura y velocidades de los gases calientes al considerar el deflector de flujo. Al final, se obtiene aproximadamente una reducción de la

temperatura de salida de los gases en un 10%, una mejora del 10% en la eficiencia térmica, entre otras mejoras, resultando, un incremento total del 37% de la eficiencia térmica.

ABSTRACT

Conventionally, the manufacture of commercial ovens for cooking and browning food is merely explored, evidenced in its component designs such as: the burner, the box-shaped oven structure, and the structure where the food is located. Particularly in Peru, the ovens for grilled chickens are designs without any engineering study, but are manufactured from replicas of other designs, this causes low efficiencies in the ovens. The present work performs the evaluation of thermal efficiency by incorporating flow deflectors in commercial ovens, which is carried out through numerical and experimental analysis. The numerical analysis is developed by means of a CFD (Computational Fluid Dynamics) in Ansys-Fluent, evaluating the oven with/without the flow deflectors installed inside it. Also, in the numerical simulation, a K-epsilon type turbulent flow behavior and an unstructured cell type mesh are considered. In the case of the experimental analysis, the oven experiments were carried out with/without the flow deflectors, obtaining punctually temperature values at the inlet, the inside and the outlet of the hot gases generated by the oven burner. These analyzes are correlated through the temperature values and velocities of the hot gases when considering the flow deflector. In the end, approximately a 10% reduction in the outlet temperature of the gases is obtained, a 10% improvement in thermal efficiency, among other improvements, resulting in a total increase of 37% in thermal efficiency.

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I:.....	3
INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. ANTECEDENTES REFERENCIALES	3
1.2. REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	9
1.2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	10
1.2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	10
1.2.3. JUSTIFICACIÓN	11
1.3. OBJETIVO (GENERAL Y ESPECÍFICO).....	11
1.4. HIPÓTESIS (GENERAL Y ESPECÍFICO)	12
CAPÍTULO II:.....	14
MARCO TEÓRICO.....	14
2.1. TIPOS DE HORNOS	14
2.1.1. HORNOS POR CONVECCIÓN NATURAL	15
2.1.1.1. CONVECCIÓN DIRECTA	16
2.1.1.2. CONVECCIÓN INDIRECTA	16
2.1.1.3. RE-CIRC.....	17

2.1.2. HORNOS POR CONVECCIÓN FORZADA	18
2.2. TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL PROCESO DE COCCIÓN	21
2.2.1. CONVECCIÓN	21
2.2.1.1. CONVECCIÓN NATURAL	22
2.2.1.2 CONVECCIÓN FORZADA	22
2.3. CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)	23
2.3.1. DOMINIO DEL FLUIDO	24
2.3.2. FLUJO LAMINAR	25
2.3.3. FLUJO TURBULENTO	26
2.3.3.1. K-epsilon	26
2.3.3.1. K-omega	27
CAPÍTULO III:	28
DESARROLLO EXPERIMENTAL DE UN HORNO CON/SIN DEFLECTORES DE FLUJO	28
3.1. PLANTAMIENTO DE LA HIPÓTESIS EXPERIMENTAL	28
3.2. DISPOSICIÓN EXPERIMENTAL	29
3.2.1. EQUIPAMIENTO	30
3.2.2. INSTRUMENTACIÓN	31
3.2.3. HERMETIZACIÓN	33
3.2.4. PRUEBAS DE MEDICIÓN	33
3.2.5. ESTUDIO DE CASOS	34
3.3. ANÁLISIS DEL EXPERIMENTO	39

CAPÍTULO IV:	42
IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA DE CFD PARA UN HORNO CON/SIN DEFLECTORES DE FLUJO	42
4.1. PRE-PROCESSING	42
4.1.1. CONDICIONES DE CONTORNO.....	43
4.1.2. MALLA DE ELEMENTOS	46
4.2. SOLVER.....	48
4.3. POST-PROCESSING.....	50
4.3.1 HORNO CONVENCIONAL (SIN DEFLECTORES).....	50
4.3.2 HORNO CON DEFLECTORES DE FLUJO.....	53
4.4. CORRELACIÓN EXPERIMENTAL	56
CONCLUSIONES	58
RECOMENDACIONES.....	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
ANEXO A:.....	68
MATRIZ DE CONSISTENCIA.....	68
ANEXO B:.....	69
DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SIMULACIÓN DE CFD EN ANSYS	69

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1. HORNO POR CONVECCIÓN DIRECTA [14].	16
FIGURA 2.2. HORNO POR CONVECCIÓN INDIRECTA [14].	17
FIGURA 2.3 HORNO POR CONVECCIÓN RE-CIRC [14].	18
FIGURA 2.4 HORNO POR CONVECCIÓN FORZADA CON SISTEMAS CONTROLADOS [12].	19
FIGURA 2.5 HORNOS POR CONVECCIÓN FORZADA UTILIZANDO AMORTIGUADORES AUTOMÁTICOS [12].	20
FIGURA 2.6. CONVECCIÓN NATURAL PARA UN HORNO COMERCIAL QUE HORNEA PANES [6].	22
FIGURA 2.7. CONVECCIÓN FORZADA POR CHORROS DE AIRE PARA UN HORNO [6].	23
FIGURA 2.8. DIAGRAMA DE FLUJO PARA UN PROCESO DE CFD [18].	24
FIGURA 2.9. CONDICIONES DE CONTORNO ESTABLECIDAS EN UNA SIMULACIÓN DE CFD [18].	25
FIGURA 2.10. LÍNEAS DE CORRIENTE PARA UN FLUJO LAMINAR EN UNA TUBERÍA EN FORMA DE "S" [22].	26
FIGURA 3.1. HORNO CONVENCIONAL, IDENTIFICANDO LOS COMPONENTES PRINCIPALES SIN LOS DEFLECTORES DE FLUJO.	29
FIGURA 3.2. TABLERO ELÉCTRICO CONTENIENDO 20 TERMOCUPLAS.	31
FIGURA 3.3. POSICIONAMIENTO DE LAS TERMOCUPLAS EN EL HORNO SIN DEFLECTORES.	32

FIGURA 3.4. POSICIONAMIENTO DE LAS TERMOCUPLAS EN EL HORNO CON DEFLECTORES.....	33
FIGURA 3.5. DESARROLLO DE PRUEBAS CON EL HORNO CON/SIN DEFLECTORES.....	35
FIGURA 3.6. VISTA INTERIOR DEL HORNO, MOSTRANDO UN POLLO SIENDO ROSTIZADO POR EL QUEMADOR.....	36
FIGURA 3.7. CURVA TIEMPO VS TEMPERATURA, PARA EL HORNO CONVENCIONAL.....	37
FIGURA 3.8. VISTA INTERIOR DEL HORNO CON DEFLECTORES, MOSTRANDO UN POLLO SIENDO ROSTIZADO POR EL QUEMADOR.....	38
FIGURA 3.9. CURVA TIEMPO VS TEMPERATURA PROMEDIO, PARA EL HORNO Y LA CHIMENEA.....	39
FIGURA 4.1. MODELO GEOMÉTRICO DE HORNO SIN DEFLECTORES. A) SIN DEFLECTORES DE FLUJO. B) CON DEFLECTORES DE FLUJO.....	43
FIGURA 4.2. CONDICIONES DE CONTORNO. A) SIMETRÍA, SYMMETRY. B) DE PARED EN EL QUEMADOR, WALL. C) DE PARED EXTERNA DEL HORNO, WALL.....	45
FIGURA 4.3. CONDICIONES DE CONTORNO. A) SIMETRÍA, SYMMETRY. B) DE PARED EN EL QUEMADOR Y LOS DEFLECTORES DE FLUJO, WALL. C) DE PARED EXTERNA DEL HORNO, WALL.....	45
FIGURA 4.4. CONDICIONES DE CONTORNO DE OPENNING E INLET. A) HORNO SIN DEFLECTORES DE FLUJO. B) HORNO CON DEFLECTORES DE FLUJO.	46
FIGURA 4.5. MALLA NO ESTRUCTURADA, CON REFINAMIENTO EN LAS BOQUILLAS DEL QUEMADOR PARA EL HORNO SIN DEFLECTORES.....	47

FIGURA 4.6. MALLA NO ESTRUCTURADA, INDICANDO EL REFINAMIENTO EN EL QUEMADOR Y LOS DEFLECTORES DE FLUJO.....	48
FIGURA 4.7. PROPIEDADES DEL FLUJO EN EL INTERIOR DEL HORNO CON/SIN DEFLECTORES.	49
FIGURA 4.8. MODELO DE TURBULENCIA K-EPSILON.	49
FIGURA 4.9. PARÁMETROS COMPUTACIONALES.....	50
FIGURA 4.10. ISO-TEMPERATURAS DEL HORNO SIN DEFLECTORES, VISTA 2D.....	51
FIGURA 4.11. ISO-TEMPERATURAS DEL HORNO SIN DEFLECTORES, VISTA 3D.....	52
FIGURA 4.12. LÍNEA DE CORRIENTES DE LOS GASES CALIENTES PARA EL HORNO SIN DEFLECTORES, VISTA 2D.	52
FIGURA 4.13. LÍNEA DE CORRIENTES DE LOS GASES CALIENTES PARA EL HORNO SIN DEFLECTORES, VISTA 3D.	53
FIGURA 4.14. ISO-TEMPERATURAS DEL HORNO CON DEFLECTORES, VISTA 2D.....	54
FIGURA 4.15. ISO-TEMPERATURAS DEL HORNO CON DEFLECTORES, VISTA 3D.....	55
FIGURA 4.16. LÍNEA DE CORRIENTES DE LOS GASES CALIENTES PARA EL HORNO CON DEFLECTORES, VISTA 2D.....	55
FIGURA 4.17. LÍNEA DE CORRIENTES DE LOS GASES CALIENTES PARA EL HORNO CON DEFLECTORES, VISTA 3D.....	56
FIGURA B1. ETAPA DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS DEL HORNO SIN/CON DEFLECTORES DE FLUJO.	69

LISTA DE TABLAS

TABLA 3.1. ETAPAS DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	30
TABLA 3.2. LECTURA DE TEMPERATURAS DESDE LA PRUEBA EXPERIMENTAL PARA EL HORNO CONVENCIONAL.....	36
TABLA 3.3. LECTURA DE TEMPERATURAS DESDE LA PRUEBA EXPERIMENTAL PARA EL HORNO CON DEFLECTORES DE FLUJO.....	38
TABLA 3.4. RESUMEN DE DATOS ESTADÍSTICOS PARA EL HORNO CONVENCIONAL.....	40
TABLA 3.5. RESUMEN DE DATOS ESTADÍSTICOS PARA EL HORNO CONVENCIONAL.....	41
TABLA 4.1. CONDICIONES DE CONTORNO PARA EL HORNO SIN DEFLECTORES.....	44
TABLA 4.2. CONDICIONES DE CONTORNO PARA EL HORNO CON DEFLECTORES.....	44

PRÓLOGO

El presente trabajo para optar el grado de Maestría en Ingeniería de aplicación energética del gas natural tiene como finalidad realizar la evaluación de la eficiencia térmica mediante un análisis numérico y experimental de un horno con deflectores de flujo. Para lograr dicho objetivo el trabajo está dividido en cuatro capítulos, las conclusiones y recomendaciones, los cuales son complementados con las referencias bibliográficas y anexos respectivos. A continuación, se comentará brevemente lo mencionado.

El capítulo 1, presenta una breve introducción sobre el estado actual de los hornos comerciales. También, en este capítulo se detalla la referencia bibliográfica adecuada para elaborar los antecedentes respectivos. Además, complementariamente son detallados expresamente la problemática que conllevan los hornos comerciales, la justificación por la cual se aborda este problema, y los objetivos según las hipótesis definidas al inicio de este estudio.

El capítulo 2, describe el marco teórico que son las bases fundamentales de la presente tesis. Estos fundamentos, son clasificados en tipos de hornos comerciales, mecanismos de transferencia de calor para cocción de alimentos y análisis por CFD. La información mencionada será detallada a través de artículos científicos, tesis, y libros competentes para este estudio.

El capítulo 3, detalla el desarrollo experimental para un horno con/sin deflectores, este análisis forma parte de un estudio desarrollado por Innóvate Perú de Produce,

por lo cual, este capítulo detalla el procedimiento a través de algunos pasos a seguir de la disposición experimental, mostrando imágenes del experimento, curvas de temperatura en el tiempo y tablas de temperaturas obtenidas desde la entrada, interior y salida del horno. Al final, brevemente es comentado el análisis de los datos obtenidos.

El capítulo 4, realiza la simulación numérica mediante CFD, utilizando el software Ansys-Fluent, para evaluar el comportamiento de los gases calientes procedentes del quemador. Este análisis es realizado considerando el horno comercial con/sin la incorporación de los deflectores de flujo. Los resultados mostrados son los campos de temperatura y el flujo de los gases calientes, los cuales son presentados en imágenes en 2D y 3D para una adecuada interpretación.

Además, de los capítulos descritos son presentados las conclusiones más significativas de esta tesis, observándose el cumplimiento de los objetivos planteados y la corroboración de las hipótesis formuladas al inicio de la investigación. También, son presentados las recomendaciones, estableciendo temas de interés que puedan ayudar a los futuros tesisistas.

Finalmente, son enumeradas las referencias bibliográficas utilizadas en el desarrollo de este trabajo. Complementariamente, en los anexos es presentado la matriz de consistencia y el diagrama de flujo implementado en las simulaciones por CFD.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

La presente tesis de maestría se desarrolla para dar soporte al sector de consumo por cocción de alimentos, los cuales utilizan hornos comerciales, pero debido a un patrón de diseño no son muy sofisticados, por lo cual según un análisis previo se observó que dicho horno puede mejorar su eficiencia mediante la implementación elementos que direccionan el flujo convectivo en el interior del horno. Este trabajo es parte de un proyecto gestionado por Innóvate Perú, el cual pertenece a una serie de etapas de dicho proyecto, en donde se realizó el estudio completo de este tipo de horno.

A continuación, son descritos los trabajos que forman parte del sustento de la presente tesis. Además, son comentados la problemática, justificación y objetivos que forman parte del planteamiento de la tesis.

1.1. ANTECEDENTES REFERENCIALES

Un entendimiento sobre los aspectos termodinámicos y sostenibles ya fueron tratados en el pasado por diferentes investigadores, los cuales mencionan resultados puntuales sobre las causas, consecuencias de los aspectos mencionados. A seguir, mencionaremos el estado de arte desarrollado en esta tesis y complementariamente en cada revisión se realizará una descripción adicional para un mejor entendimiento del lector.

Blikra et al. [1], desarrolla un modelo matemático en 3D de los fenómenos de transporte que describe la cocción del músculo del bacalao en un horno de convección, determinándose varias propiedades que son un aporte importante en esta línea de investigación. Las propiedades son el módulo de almacenamiento, la capacidad de retención de agua y la fracción de energía utilizada para la evaporación en función de la temperatura. El modelo presentado por este autor fue validado con excelentes resultados. También, para minimizar la pérdida de peso y controlar los cambios de calidad que dependen del calor, el proceso de cocción se puede optimizar utilizando modelos matemáticos de transferencia de calor y masa, en donde el calor se transfiere del aire caliente a la superficie del lomo por convección y radiación, y de la placa de cocción por conducción. El calor se transporta desde la superficie hasta el centro del lomo por conducción y convección. El transporte de masa a través del lomo es impulsado por difusión y convección.

Landi et al. [2], realiza una evaluación técnica y medioambiental demostrando un predominio del horno eléctrico con respecto al horno de gas, el cual presenta un impacto aproximado de 3 veces mayor que el horno de gas en las categorías de impacto de cambio climático, ecotoxicidad del agua dulce y ecotoxicidad marina, mientras que, para el agotamiento del ozono, el agotamiento de los fósiles, el agotamiento de los metales y las categorías de transformación de la tierra natural, los resultados son similares, con un ligero predominio del horno eléctrico (aproximadamente 2-5%).

Shevade et al. [3], expone que el equilibrio térmico y la optimización del rendimiento en los hornos comerciales es un problema complicado que requiere un conocimiento profundo de la incidencia de chorros de aire turbulentos múltiples, por lo cual es creado un modelo en 3D de estos hornos, estableciendo un número de parámetros

de alto impacto, los cuales son variados mediante un enfoque sistemático. Analizando la distribución de la velocidad y la fuga de aire del horno al aire circundante para optimizar el consumo de energía. También, se estudian el flujo de calor superficial y el coeficiente de transferencia de calor. Además, a través del proceso de optimización, se selecciona una configuración de horno que opera con un rendimiento aproximado de 20% superior al horno inicial.

Burlon et al. [4], recomienda que la mejor forma de enfrentar el cambio climático en las sociedades es mediante la reducción del consumo de energía, siendo esta problemática un gran desafío y apremiante para la época actual. Para lograr este propósito energético es necesario la mejora continua de la eficiencia de los sistemas térmicos, de la transferencia de calor, de estrategias de diseño adecuadas, las cuales, en su fase inicial de propuesta, son desarrolladas a priori y validados experimentalmente de acuerdo con protocolos de prueba implementados en un prototipo, logrando de esta manera un ahorro potencial de energía.

La estrategia para un ahorro significativo en términos masivos de energía se puede implementar con éxito en el sector de servicios de alimentos, donde los aparatos de cocina presentan muchas posibilidades para mejorar el ahorro de energía. Por lo tanto, una metodología de diseño no solo debe considerar condiciones de operatividad estable, sino también los comportamientos transitorios dentro del equipo, los cuales son descritos por medio de modelos dinámicos específicamente desarrollados.

Los hornos industriales operan en una secuencia de fases inestables (calentamiento de la cavidad, cambio de un modo de cocción a otro, e introducción y extracción de alimentos) intercalados con fases de cocción constantes. El modelo dinámico presentado en este documento define las ecuaciones de conservación de energía de

un horno, donde una fuente térmica de alta temperatura colocada dentro de su cavidad produce energía térmica irradiada y modulado en el tiempo, de acuerdo con una adecuada estrategia de control. También, este artículo menciona que para un horno se puede analizar mediante los siguientes enfoques:

- Metodologías desarrolladas mediante CFD, sean análisis tridimensionales o bidimensionales;
- Metodologías mediante sistemas con fines de control;
- Metodologías algebraicas;
- Aplicaciones por el método de capacitancia concentrada.

Además, complementariamente los autores proponen: una zona de potencia y una cavidad de cocción, donde dicho modelo, es capaz de predecir el comportamiento termodinámico de ambas zonas y permite evaluar el rendimiento energético general del dispositivo. Así, el horno funciona principalmente en convección forzada, por lo que se requería una estimación de los parámetros de convección con un procedimiento de ajuste para encontrar su valor promedio. Adicionalmente, son presentados los aportes de transferencia de calor por radiación, calculados por el método de radiación neta para cerramientos, obteniéndose con gran precisión.

Pinelli y Suman [5], realizan un estudio experimental y numérico mediante CFD de un horno de panificación rotatorio de convección forzada por aire. Particularmente, la metodología experimental incorpora la caracterización dinámica de termo-fluidos del horno rotatorio. Además, el aparato experimental puede funcionar en modo autónomo y en las condiciones reales de la cavidad en términos de temperatura y humedad. En el caso del modelo CFD, es representado un diseño en 3D del horno rotatorio de panificación. Al utilizar el modelo numérico, son correlacionados los resultados experimentales, resaltándose el patrón de flujo de aire dentro de la

cavidad del horno y comprendiendo cómo los panes cambian el patrón de flujo de aire dentro de la cámara de cocción a través de las simulaciones observadas. Estos análisis numéricos ayudaron en la mejora de estos hornos en términos de gestión del flujo de aire dentro de la cámara de cocción. Además, a través de estas mejoras, el usuario final (como por ejemplo los panaderos, ya sean industriales o artesanales) puede aprovechar varias ventajas en términos de ahorro de energía y reducción de productos horneados no conformes en relación con la localización de las zonas de recirculación y las zonas con mayor velocidad dentro de la cavidad del horno.

Walker [6], en su tratado de ciencia de los alimentos describe a la transferencia de calor por convección como una forma importante de cocción, la cual requiere un fluido en movimiento. También, señala que la convección puede ser “natural”, esto es, causada por la circulación de aire y vapor que resulta de las diferencias de densidad.

van der Sman [7], presenta un modelo numérico que describe el transporte de calor y masa durante la cocción de carne de pollo en túneles industriales. El transporte de masa es impulsado por gradientes en la presión de hinchamiento, teoría de Flory-Rehner [8], el cual relaciona la capacidad de retención de agua (WHC, *Water Holding Capacity*). Para temperaturas de cocción hasta el punto de ebullición y tiempos de cocción prácticos relevantes, el modelo ofrece una buena predicción del transporte de calor y masa y la pérdida total de humedad. En cambio, los autores señalan que, para temperaturas de cocción por encima del punto de ebullición, el modelo debe ampliarse con el crecimiento dinámico de los canales capilares de agua (goteo). Además, este artículo hace unas críticas sobre la teoría de Flory-Rehner que proporciona la base física adecuada para describir el cambio del WHC por una amplia variedad de factores como la sal y el pH.

Isleroglu et al. [9], comenta en su trabajo que el proceso de cocción es una etapa crítica en la preparación de la carne de ave para el consumo humano. Tres factores principales difieren entre las diversas técnicas de cocción: la temperatura en la superficie de la carne, el perfil de temperatura a través de la carne y el método de transferencia de calor (contacto, aire o vapor). La temperatura en la superficie de la carne es importante para el color, olor y sabor. El gradiente de temperatura influye en la velocidad y el alcance de los cambios en las estructuras proteicas de la carne, mientras que el método de transferencia de calor, especialmente la humedad, afecta el olor, el sabor y el color de la carne (Bejerholm y Aaslyng [10]). Por lo tanto, durante la cocción, se forman las propiedades sensoriales de la carne. El aumento de la demanda de los consumidores de productos saludables y de alta calidad ha llevado recientemente a un mayor interés en las nuevas tecnologías para cocinar carne y productos cárnicos. También, el método de cocción en horno es ampliamente preferido en el procesamiento comercial y la cocción doméstica de productos avícolas en lugar de freír debido a la baja digestibilidad y el alto contenido de grasa de los productos fritos (Danowska-oziewicz [11]). En la cocción en horno, el proceso de convección forzada se puede combinar con la inyección de vapor (cocción asistida por vapor) en la cámara del horno para reducir el tiempo de cocción y evitar la deshidratación de la superficie.

Kerry [12], propone hornos de convección de aire forzado, eliminando la aleatoriedad de la distribución/circulación de aire de los sistemas tradicionales. Según esta propuesta, la velocidad del aire se controla dentro de estos hornos mediante el uso de ventiladores de circulación, o sistemas alternativos que pueden impactar significativamente en las tasas de transferencia de calor en la masa dentro de los productos finales.

Mistry et al. [13], proponen el estudio de la transferencia de calor por convección natural transitoria en recintos ventilados, el cual tiene múltiples aplicaciones, por ejemplo, la disminución de las pérdidas de calor en el interior de los hornos. Además, el artículo desarrolla una sólida metodología mediante CFD, desarrollándose experimentos para validar la etapa transitoria del fenómeno observado en un ciclo de horneado, los resultados muestran una discrepancia menor al 3%. El modelo de CFD considera una malla no estructurada, que utiliza elementos tetraédricos para el volumen interno de la cavidad, y considerada el tamaño de dichos elementos según las dimensiones cercanas a los calentadores, la apertura de la junta y la salida de ventilación. Para el proceso de desratización o enmallamiento se utilizó el software GAMBIT y TGrid. Los análisis fueron realizados en el software CFD-Fluent. En relación a las propiedades del fluido en el interior del horno se consideró un estudio de radiación, un flujo laminar-turbulento y condiciones de contorno de acuerdo al prototipo experimental desarrollado en este trabajo.

1.2. REALIDAD PROBLEMÁTICA

La tesis complementa la etapa final del proyecto de innóvate, Perú, en el cual se realizó un estudio en el país sobre la fabricación de hornos de cocción y dorado de pollos a la brasa, observándose que comúnmente los hornos son fabricados mediante réplicas o similitud a partir de otros diseños sin previos estudios de ingeniería, los cuales principalmente deben ser analizados mediante estudios estructurales, termodinámicos, mecánicos de transmisión de movimiento y potencia.

También, gracias al proyecto de investigación financiada por innóvate, Perú con la empresa Corporación Progreso y la Universidad Nacional de Ingeniería-UNI se ha iniciado el estudio de ingeniería para el desarrollo de la fabricación de hornos comerciales de pollos a la brasa o rostizados, incorporando el tema de “innovación”

mediante el cambio de la dirección de flujo, el cual forma parte del estudio de la presente tesis. Además, la innovación añade lavado automático después de su uso, cumpliendo las normas correspondientes.

1.2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

A partir de la realidad problemática sobre los hornos comerciales se observó una baja eficiencia térmica, debido a su proceso de fabricación, los cuales son elaborados por mediante replicas. Principalmente, el problema está relacionado con los gases de combustión que salen por la chimenea del horno a altas temperaturas. La estrategia planteada es tratar de retener estos los gases calientes en el interior del horno y lograr una mayor transferencia a través del posicionamiento de deflectores de flujo de acero inoxidable brillante. Así, es posible desviar los gases creando turbulencia a lo largo del interior del horno. Para verificar esta estrategia se intenta realizar una simulación numérica mediante CFD, y verificar la mejora de estos hornos al incorporar los deflectores de flujo.

1.2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Según lo establecido en el problema general, se tienen los siguientes planteamientos fundamentales:

¿Es factible desarrollar la mejora de la eficiencia térmica de los hornos rosticeros nacionales sin generar mayores costos de equipamiento?

Como formulación de problemas específicos, se tienen:

- 1) ¿Es factible desarrollar un conjunto de cambios en los flujos convectivos utilizando deflectores de flujo?
- 2) ¿Es posible analizar el problema de los cambios de dirección de los flujos convectivos mediante simulación de CFD?

1.2.3. JUSTIFICACIÓN

El estudio se justifica tratando de demostrar que el flujo laminar de convección natural mejora la transferencia de calor adecuando el flujo laminar a turbulento, generando turbulencias debido a los cambios de flujo en zonas propicias para mejorar la transferencia de calor por convección ya no lineal y en este caso con flujo turbulento. Además, es fundamental para esta justificativa la incorporación de deflectores de flujo, porque ellos ayudaran en aumentar la temperatura en el interior del horno, aportando no solo de manera convectiva sino también, generando radiación por sus superficies brillantes del acero inoxidable hacia los pollos en las barras rosticeras giratorias (espiedo).

De esta manera la presente tesis tiene carácter experimental y numérico del diseño de hornos comerciales con/sin deflectores de flujo que puedan aumentar la eficiencia térmica, lo cual ayudará a los comerciantes relacionados con estos hornos a mejorar su productividad. También, es importante señalar que este trabajo tiene un aspecto innovador.

1.3. OBJETIVO (GENERAL Y ESPECÍFICO)

Objetivo General:

Mejora de la eficiencia térmica dentro del horno, controlando los flujos de convección natural mediante dispositivos de cambios de movimientos de los gases calientes y retención de estos generando turbulencias para mejorar la transferencia de calor y bajar la temperatura de evacuación a través del ducto de salida (chimenea) del horno.

Objetivos Específicos:

Como objetivos específicos, se tienen:

- 1) Demostrar mediante CFD, que se pueden generar turbulencias en el flujo convectivo de los gases calientes desde el quemador.
- 2) Verificar mediante simulaciones de CFD los cambios de temperatura interna de los flujos convectivos para aprovecharlos en la cocción y dorado de las carnes.
- 3) Mejorar el aprovechamiento del calor y la eficiencia térmica colocando deflectores de flujo.
- 4) Incrementar la transferencia de calor interna creando flujos convectivos turbulentos.
- 5) Validar experimentalmente con mapeos de temperatura dentro del horno y correlacionarlos con las simulaciones de CFD.

1.4. HIPÓTESIS (GENERAL Y ESPECÍFICO)

Hipótesis General:

Es posible reducir las pérdidas de calor de los gases en la salida de humos a través del ducto de extracción de un horno, usando deflectores de flujo que desvíen los gases de combustión hacia zonas internas estratégicas para transferir el calor a los alimentos que se procesen, y mejorar la eficiencia térmica del horno y validar estos resultados con un análisis CFD.

Hipótesis Específicos:

- 1) Reducir la temperatura de los gases de combustión de salida, reducirá las pérdidas de calor.
- 2) Ubicar deflectores de flujo en posiciones estratégicas ayudara a orientar lo gases hacia los alimentos en cocción y aprovechar la transferencia de calor.

- 3) Dificultar la salida de gases por el ducto de evacuación conllevará a una mejor transferencia de calor a los alimentos cárnicos en proceso de cocción y dorado.
- 4) Producir un cambio de flujo de laminar a turbulento por medio de desviadores de flujo aumentará la transferencia de calor interno.
- 5) Simular los flujos convectivos utilizando el modelo K-epsilon ayudará a visualizar la formación de turbulencias en el interior del horno.

CAPÍTULO II:

MARCO TEÓRICO

Esta sección describirá aspectos teóricos de la presente tesis, explorando los diferentes tipos de hornos comerciales, los mecanismos de transferencia de calor para cocción y braseado de alimentos, y fundamentos sobre las simulaciones desarrolladas por CFD. Cada uno de estos tópicos incorporan revisiones desde artículos científicos, tesis de posgrado y libros, entre otras referencias.

2.1. TIPOS DE HORNOS

Principalmente existen dos tipos de hornos: hornos por convección natural y hornos por convección forzada, no explorando los hornos basados en mecanismos de conducción y radiación. En el caso de los hornos por convección natural dependen de las diferencias de temperatura dentro del horno para transferir calor a las muestras o alimentos. Siendo aplicados principalmente para secado, el cual requiere de un flujo de aire para:

- Hornear.
- Acondicionar.
- Curar.
- Precalentar.
- Envejecer

Además, son ideales para tareas de esterilización, secado y almacenamiento térmico que no requieren altas tasas de secado o parámetros de tiempo especiales. Por otro lado, tenemos a los hornos por convección forzada, los cuales son ayudados principalmente por un ventilador. Estos sistemas de convección se han convertido en el diseño de elección en la mayoría de los hornos de convección a escala industrial.

2.1.1. HORNOS POR CONVECCIÓN FORZADA DE USO INDUSTRIAL

Los hornos de "convección" se construyen en zonas, cada zona tiene un solo quemador y un ventilador de circulación. El ventilador sopla el aire alrededor del tubo del quemador o a través del intercambiador de calor, donde se calienta y luego a través de conductos a lo largo de la zona. Estos conductos, ubicados arriba y debajo de la banda de cocción, tienen ranuras o boquillas a través de las cuales se inyectan chorros de aire caliente sobre los productos y la banda del horno. El aire caliente de la cámara de cocción se devuelve al ventilador para que se recircule a través del sistema. Cada zona tiene un ventilador de extracción y salida de humos para eliminar la humedad de la cámara de cocción y este sistema también extraerá algo del aire caliente del sistema de calefacción. El control de la temperatura se realiza mediante termopares que detectan la temperatura del aire de convección.

Los termopares están conectados a los controladores de temperatura en cada zona que ajustarán automáticamente los quemadores para aumentar / disminuir la entrada de calor.

Según lo mencionado, los hornos de convección natural pueden ser clasificados en: hornos de convección directa, indirecta y re-circulatorios (RE-CIRC).

2.1.1.1. CONVECCIÓN DIRECTA

Baking y Transfer [14], definen que los hornos por convección directa los gases calientes del quemador se combinan con el aire recirculado de la cámara de cocción y se soplan a través de los conductos en la cámara de cocción y directamente sobre los productos. Debido a que los productos de la combustión son sopladados directamente sobre los productos, los combustibles de diésel no son adecuados para la cocción por convección directa (Figura 2.1).

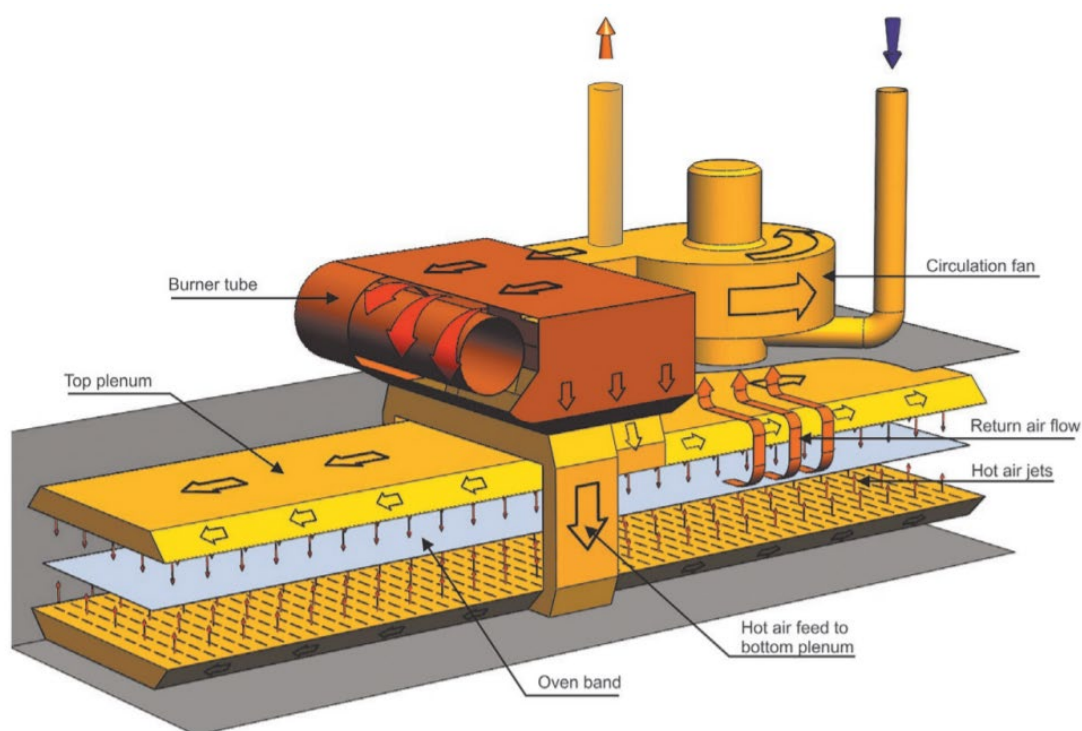


Figura 2.1. Horno por convección directa [14].

2.1.1.2. CONVECCIÓN INDIRECTA

En el caso de hornos por convección indirecta el quemador se enciende en un tubo conectado a un intercambiador de calor de varias etapas. Los productos de combustión se distribuyen dentro del intercambiador de calor y no ingresan en la cámara de cocción. El aire se extrae de la cámara de cocción a través del ventilador

de circulación y luego pasa a través del intercambiador de calor, donde recoge el calor, antes de soplar a través de los conductos en la cámara de cocción y sobre los productos. Este sistema puede utilizar combustibles de gas o gasóleo (Figura 2.2), Baking y Transfer [14].

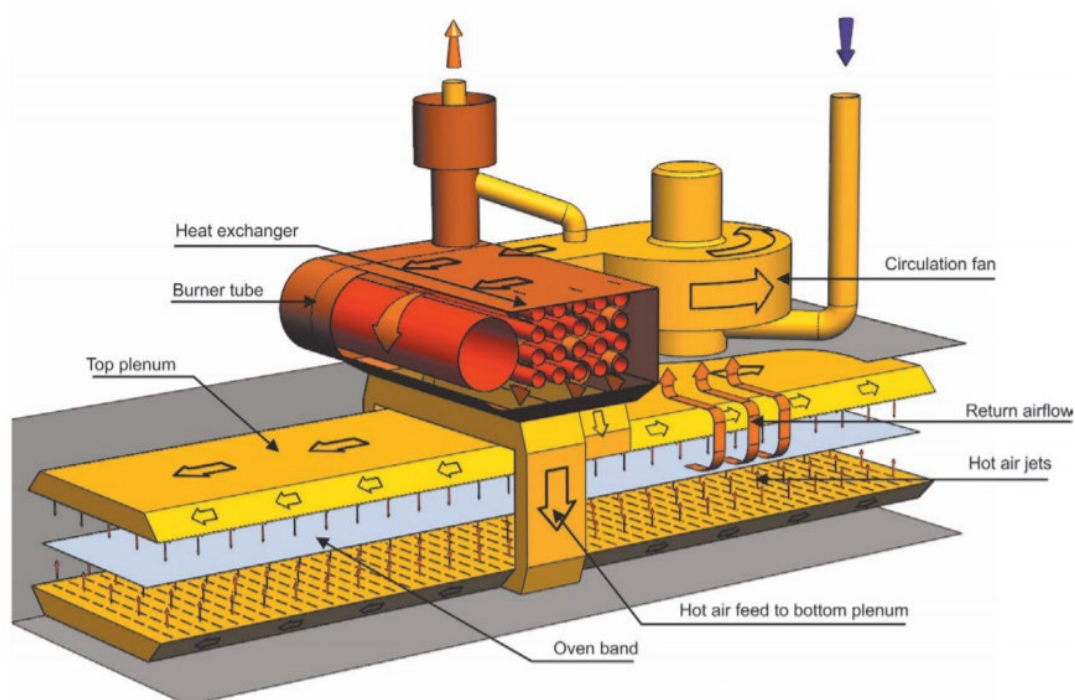


Figura 2.2. Horno por convección indirecta [14].

2.1.1.3. RE-CIRC

Baking y Transfer [14], comenta que estos hornos fueron desarrollados en los Estados Unidos como un horno versátil para galletas. El sistema es básicamente un horno de convección directa, pero se puede ajustar el volumen de gases calientes que soplan directamente sobre los productos. Cuando esto se reduce, los gases calientes circulan a través de los conductos en la parte superior e inferior del horno y regresan al tubo del quemador, con menos aire caliente soplando en los productos.

Por lo tanto, el sistema puede equilibrar la transferencia de calor por aire convectivo o por radiación de los conductos.

Además, los hornos de recirculación se pueden usar para productos que requieren menos calor. Para las primeras zonas, el horno se opera en un modo principalmente radiante para evitar "despellejar" la pieza de masa. Sin embargo, la transferencia de calor en este modo es baja y la estructura de la galleta tiene una formación relativamente lenta. En el modo convectivo, la transferencia de calor aumenta y el sistema funciona como un horno de convección directa (Figura 2.3).

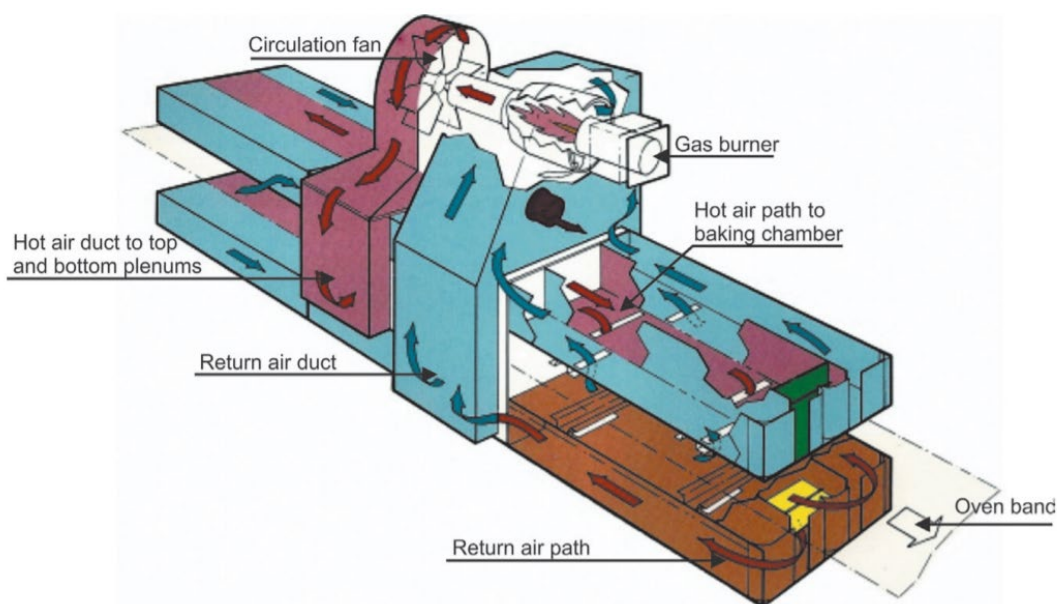


Figura 2.3 Horno por convección RE-CIRC [14].

2.1.2. HORNOS POR CONVECCIÓN FORZADA

Desde los años 80, estos hornos ya ganaban gran interés, Sato et al. [15], lográndose actualmente simulaciones en 3D de estos hornos para estudiar el comportamiento convectivo forzado, Kokolj et al. [16]. Según Kerry [12], la optimización de estos hornos de convección se ha centrado principalmente en el flujo de los fluidos (circulación) alrededor de los productos alimenticios y la optimización de la

transferencia de calor dentro de la corriente de los fluidos simplemente al variar la posición de los calentadores. Asimismo, se han desarrollado de manera similar las configuraciones de ventiladores dinámicos y sistemas de intercambio de calor para estos hornos, los cuales fuerzan al aire, ver Figura 2.4, eliminando la aleatoriedad de la distribución/circulación de aire, impactando significativamente en las tasas de transferencia de calor de los productos finales (Skjöldebrand [17]).

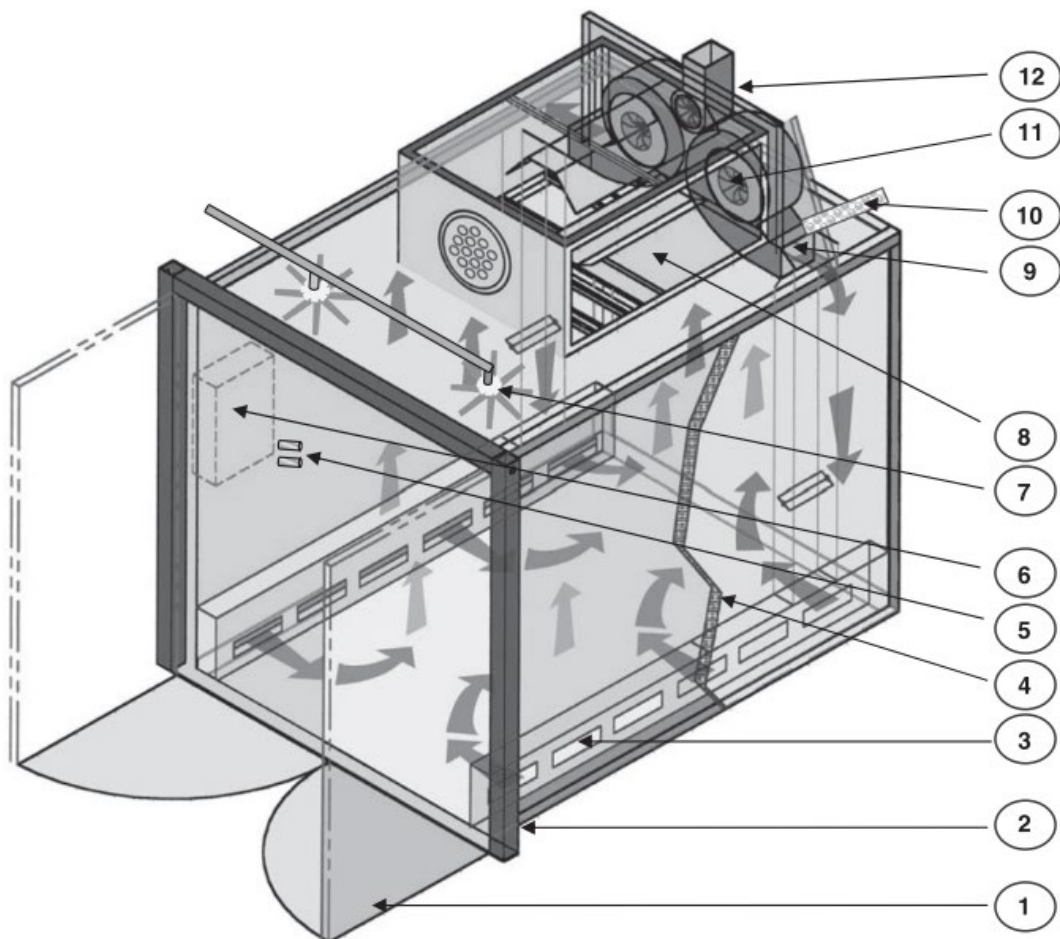


Figura 2.4 Horno por convección forzada con sistemas controlados [12].

Además, estos hornos de convección de aire forzado están equipados con sistemas generadores de vapor y/o generadores de ahumado de madera. En algunos casos,

la circulación de aire se puede controlar y optimizar mediante el uso de amortiguadores automáticos (Figura 2.5).

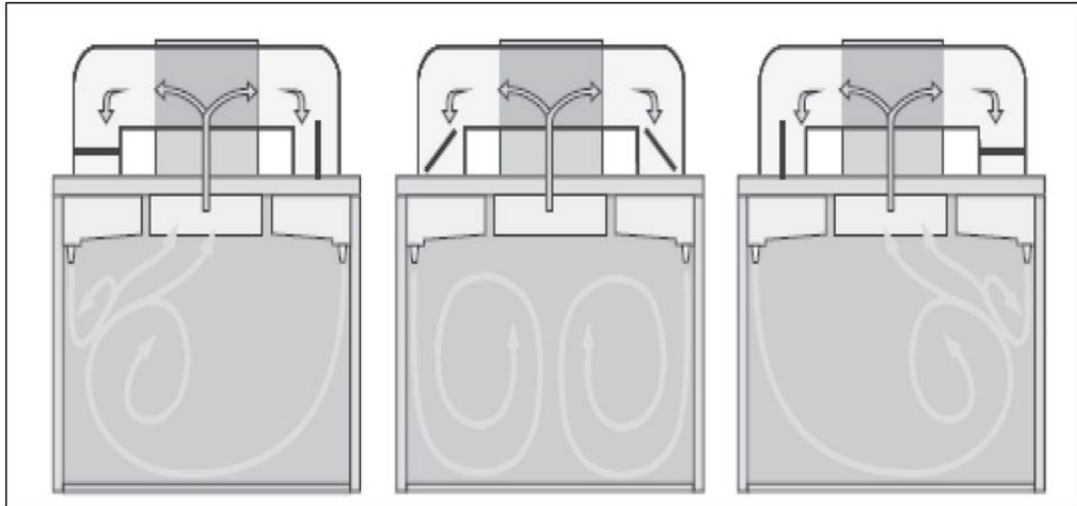


Figura 2.5 Hornos por convección forzada utilizando amortiguadores automáticos [12].

Los sistemas de horno de convección forzada generalmente se diseñan como lotes (sistemas de carro de encendido/apagado) con productos cárnicos pasteurizados en formatos de lotes o lotes continuos, o como sistemas de tipo riel continuo. Es bastante difícil lograr una distribución óptima del calor dentro de estos sistemas debido a su configuración y al hecho de que las velocidades del aire se reducen significativamente a medida que el aire pasa a través de los niveles del trole. Esto reduce las eficiencias de transferencia de calor y la calidad de las operaciones de asado/horneado. Sin embargo, los sistemas de convección forzada son bastante efectivos en la cocción de productos de geometría más grandes donde se emplea la cocción al vapor.

Como regla general, la geometría del producto (>150 mm en altura) y/o pesos mayores de 1.5 Kg (asados de carne grandes, jamones enteros, etc.) son más

adecuados para los procesos de cocción por lotes en función de los tiempos de permanencia necesarios para la cocción de tales productos. En hornos de lotes típicos, las sondas de temperatura se insertan físicamente en productos alimenticios en el punto frío definido (o centro térmico).

En productos más grandes, donde las geometrías no son uniformes, generalmente se prueba y se coloca en el centro térmico de los hornos, por ejemplo, rejilla/bandeja central del carro central, etc.

2.2. TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL PROCESO DE COCCIÓN

Convencionalmente, un sistema transfiere calor por tres mecanismos fundamentales, por conducción, convección y radiación, cada uno de estos mecanismos son caracterizados debido al medio por el cual transfieren calor, por ejemplo, si el mecanismo de transferencia es por convección, la transferencia de calor es por medio de un fluido. En el caso de la cocción de alimentos las formas de transferir calor son por radiación y convección. A continuación, detallaremos los conceptos que envuelven los mecanismos de transferencia de calor en la cocción de alimentos de hornos comerciales.

2.2.1. CONVECCIÓN

En el proceso de convección los alimentos requieren un movimiento del fluido, observándose una convección natural y forzada. La convección natural, causada por la circulación del aire y vapor resulta de la diferencia de densidades. La convección forzada ya utiliza mecanismos para reorientar los gases intentando mantener un equilibrio de temperaturas en las cercanías de los alimentos.

2.2.1.1. CONVECCIÓN NATURAL

Walker [6], menciona que en el caso de la convección natural el flujo de los fluidos alrededor de los alimentos resulta de la circulación de los gases calientes y fríos. Los gases calientes se expanden, se vuelven menos densos y suben a la parte superior, mientras que los gases más fríos se depositan en la parte inferior donde se recalientan, lo que genera una circulación vertical dentro del horno. Los gases calientes transfieren la energía a través de una capa límite por conducción. La capa límite es la capa relativamente fría, húmeda y densa que rodea la pieza de masa, ver (Figura 2.6).

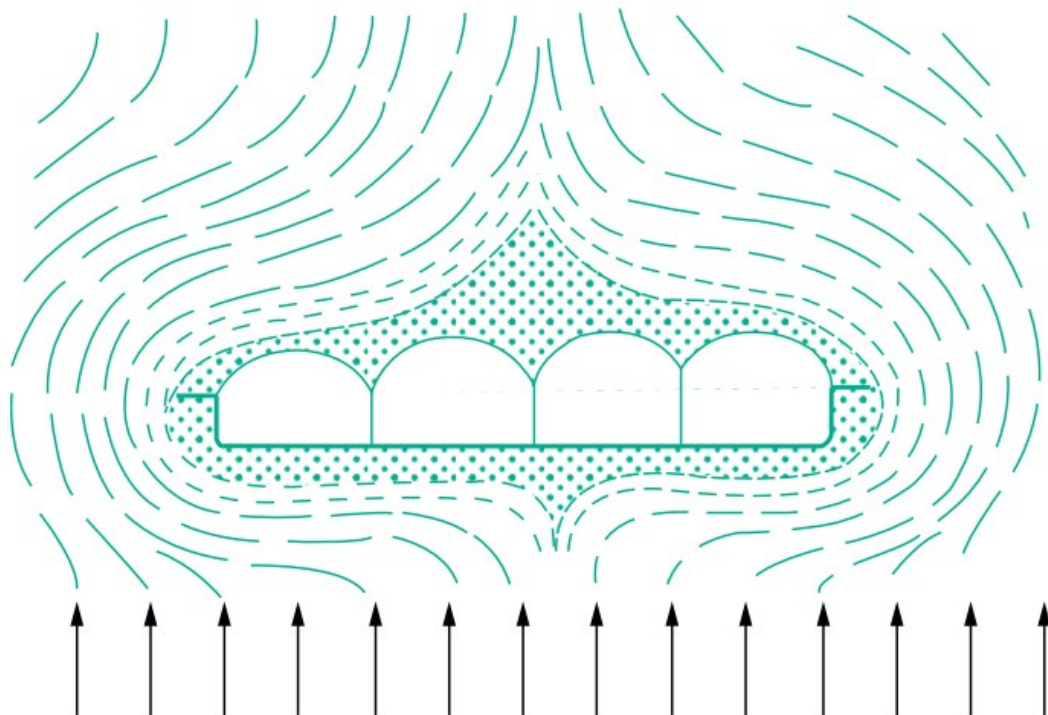


Figura 2.6. Convección natural para un horno comercial que hornea panes [6]

2.2.1.2 CONVECCIÓN FORZADA

Esta convección utiliza un mecanismo para direccionar el fluido, por ejemplo, un ventilador que opera de manera más eficiente haciendo circular los gases calientes más rápidamente y no se limitan a un movimiento vertical. Una forma especial de

convección forzada para pizzas es comentada en el trabajo de Walker [6], donde el aire circulante es forzado a través de muchas boquillas pequeñas a altas velocidades. Al impactar los chorros de aire perpendicularmente en la superficie, estos hornos barren la densa y viscosa capa límite y acercan el calor a las pizzas para hornear. Con los chorros arriba y abajo, las pizzas ahora pasan de totalmente crudas a totalmente cocidas en 5–8 minutos en comparación con las 20–30 minutos, que convencionalmente demoran para cocinar, ver Figura 2.7.

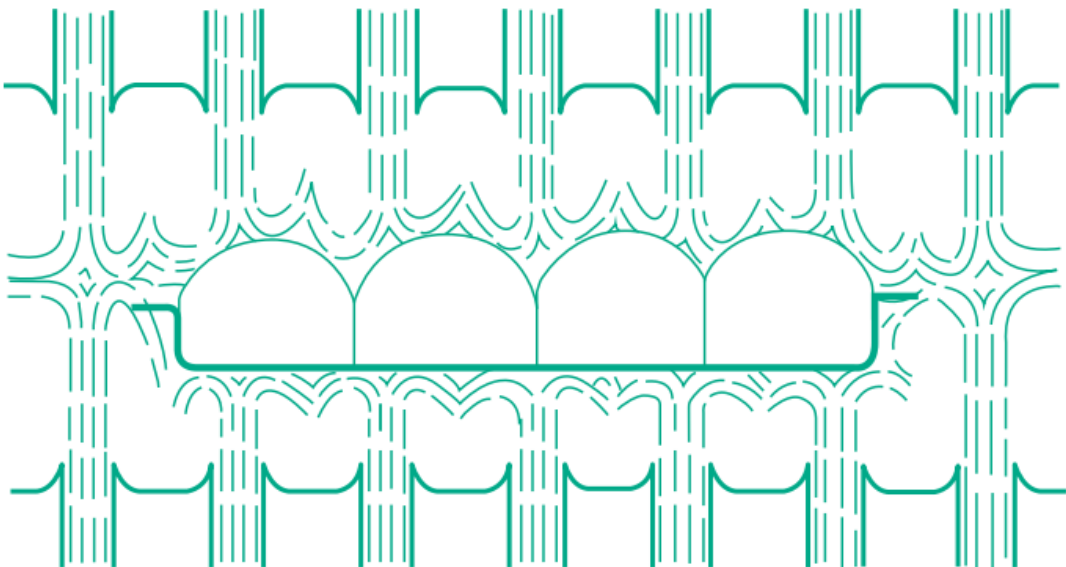


Figura 2.7. Convección forzada por chorros de aire para un horno [6].

2.3. CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

Convencionalmente los modelos numéricos desarrollados mediante CFD, siguen un diagrama de flujo (Figura 2.8) que relaciona las etapas de “*Pre-processing*”, donde es importada la geometría que será adecuada para el dominio del fluido, elaborando la malla de elementos tipo celdas, “*Solver*”, son incorporadas todas las condiciones de contorno, las propiedades del fluido y parámetros computacionales y “*Post-*

processing”, son presentados los resultados más característicos según sea necesario para interpretar los fenómenos físicos.

La Figura 2.8, muestra las etapas más relevantes para elaborar las simulaciones de CFD. Dogan et al. [18], detalla paso a paso la simulación numérica por CFD para un fluido que pasa a través de una tubería, el cual es desarrollado en el software Ansys-Fluent.

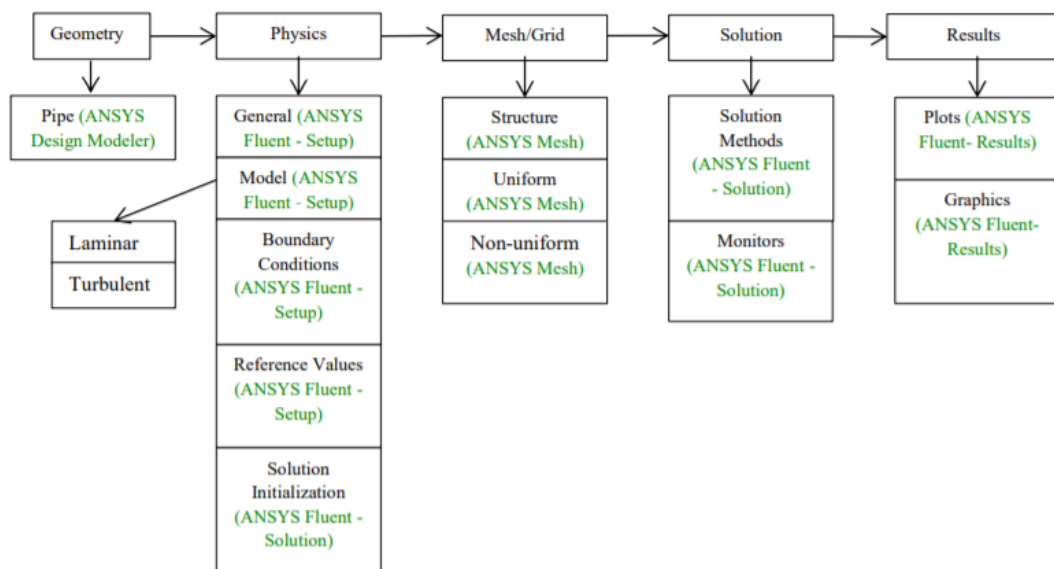


Figura 2.8. Diagrama de flujo para un proceso de CFD [18].

2.3.1. DOMINIO DEL FLUIDO

Un punto principal en las simulaciones numéricas es la designación de las condiciones de contorno del dominio del fluido, determinándose a continuación según la guía de usuario del Ansys-Fluent, Launder B. E. y B. [19] y Alonzo-García et al. [20], las siguientes condiciones de contorno:

- Entrada (*Velocity inlet-inlet*).
- Salida (*Pressure inlet-outlet*).
- Simetría, identifica el plano de simetría del modelo.

- Pared, cuerpos rígidos no deformables y condiciones adiabáticas.
- Interior, es seleccionado el dominio del fluido.

La Figura 2.9, muestra las condiciones de contorno utilizadas para una tubería, identificando cada condición mencionada anteriormente. Además, esta figura considera los tipos de malla estructurada e no estructurada.

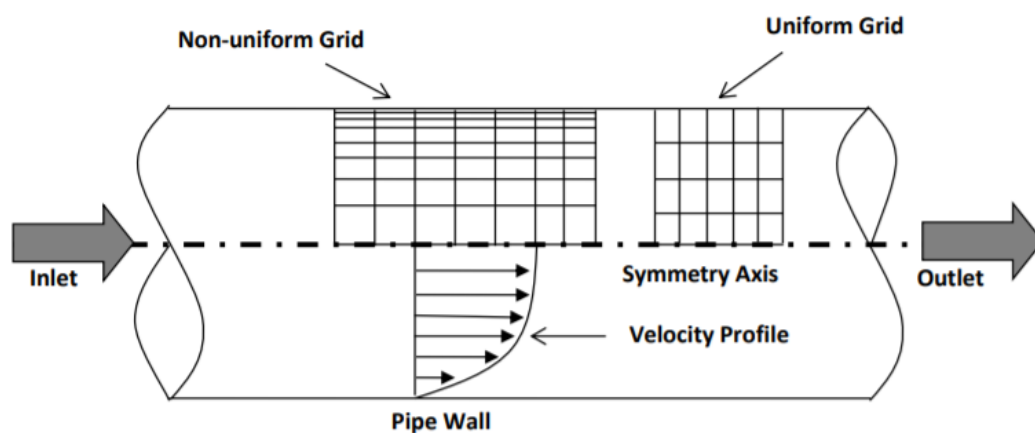


Figura 2.9. Condiciones de contorno establecidas en una simulación de CFD [18].

2.3.2. FLUJO LAMINAR

Pijush K. Kundu et al. [21] define que los fluidos viscosos se clasifican en laminar y turbulento, aunque el límite entre ellos es imperfectamente definido. La diferencia básica para el flujo laminar es que fenomenológicamente las líneas de corriente a bajas velocidades siguen caminos de líneas bien definidas, indicando que el fluido se mueve en capas paralelas. La Figura 2.10, muestra la simulación numérica de un fluido laminar a través de una tubería en forma de "S", observándose este comportamiento ordenado.

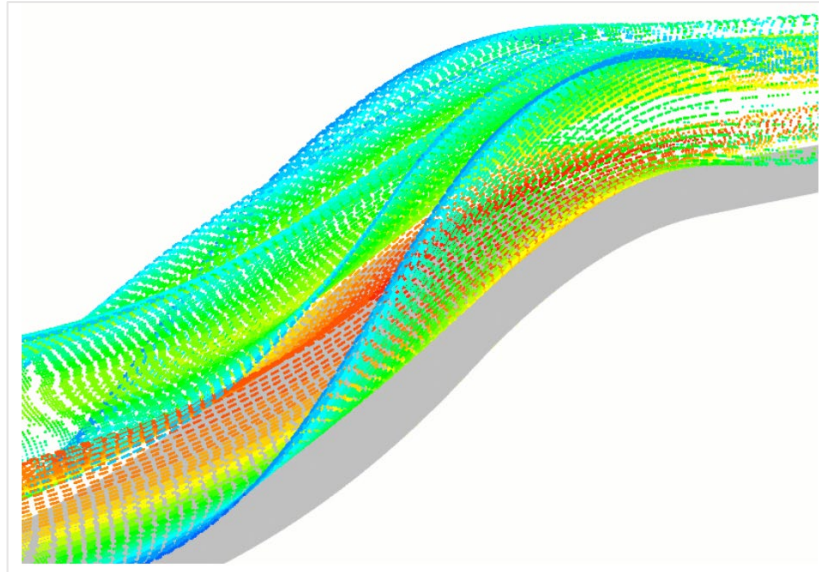


Figura 2.10. Líneas de corriente para un flujo laminar en una tubería en forma de “S” [22].

2.3.3. FLUJO TURBULENTO

En el caso del flujo turbulento, es observado una forma inestable del flujo, evidenciándose un movimiento mixto macroscópico caótico, [21]. Numéricamente este comportamiento es representado a través de dos modelos: K-epsilon y K-omega.

2.3.3.1. K-EPSILON

Modelo de turbulencia usado con frecuencia en aplicaciones industriales por su robustez y por su bajo costo computacional. A pesar de que no ser muy preciso en el caso de fuertes gradientes de presión, resuelve las ecuaciones de transporte de energía cinética turbulenta “K” (determina la energía en la turbulencia) y la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta “epsilon” (determina la escala de la turbulencia). El modelo permite considerar efectos en la historia del flujo como convección y difusión de la energía turbulenta, utilizándose para flujos de alto número

de Reynolds, sea en régimen incompresible o compresible. Algunas aplicaciones pueden ser en estudios estacionarios o dependientes del tiempo [23].

2.3.3.1. K-OMEGA

Modelo de bajo número de Reynolds, combinado con funciones de pared. Este modelo no-lineal es más complejo que el K-epsilon., siendo sensible al valor inicial, por lo cual es menos robusto. Una de las características principales del K-omega, es su aplicación para problemas que conllevan recirculación de flujos (cerca de las paredes rígidas), flujos internos, flujos con mucha curvatura, separación de flujos y chorros de fluidos, [23].

Además, este modelo de turbulencia combinado con el K-epsilon, generan el modelo denominado SST, *Shear Stress Transport*, el cual incorpora robustez y exactitud para el estudio mediante simulaciones numéricas para una amplia gama de flujos. El SST, emplea el K-epsilon, en las zonas de corriente libre y K-omega, en las regiones cercanas a las paredes, pero su formulación elimina algunas debilidades de estos dos modelos. Sin embargo, el modelo depende de la distancia a la pared más cercana, por lo tanto, se incluye una ecuación para la distancia hacia la pared, Richmond [23].

CAPÍTULO III:

DESARROLLO EXPERIMENTAL DE UN HORNO CON/SIN DEFLECTORES DE FLUJO

El desarrollo experimental es parte de un proyecto de investigación de un diseño de horno a gas mejorado, con sistema de auto limpieza, ahorro de energía y humidificación, el cual fue financiado por Innóvate Perú. Este proyecto evaluó la eficiencia térmica a base del cálculo inicial de pérdidas de calor por conducción, convección y radiación de un horno convencional, como los que se fabrican para el consumo nacional y exportación. En este capítulo detallaremos este desarrollo experimental que fue implementado por el autor de esta tesis, en el cual son analizados dos prototipos, un horno convencional y otro horno considerando dos deflectores de flujo, siendo ubicados en lugares estratégicos en el interior del horno.

3.1. PLANTAMIENTO DE LA HIPÓTESIS EXPERIMENTAL

El enfoque experimental es establecido en el marco energético de un horno que presenta bajas eficiencias térmicas, por lo cual se propone aprovechar el calor desde la convección y radiación mediante la disminución de las temperaturas de salida por la chimenea del horno. A continuación, detallamos nuestras variables que fundamentan el diseño de experimentos para un horno comercial.

Variable independiente. – Temperatura de los gases de combustión en la salida de la chimenea del horno.

Variables dependientes. – Mejora de la eficiencia térmica, y el aprovechamiento interno del calor de los gases de combustión para la cocción y rostizado de alimentos.

Después de presentar nuestras variables del diseño de experimentos, es identificado lugares estratégicos en el interior del horno para ubicar deflectores de flujo, este estudio del diseño de los deflectores y ubicación no corresponde a la presente tesis, pero es detallado íntegramente en el proyecto presentado a Innóvate Perú.

3.2. DISPOSICIÓN EXPERIMENTAL

La disposición del presente experimento considera un conjunto de etapas, cada etapa hace una descripción que se realizó para un horno comercial, que presenta los componentes de: el quemador y la estructura del horno en forma de caja, ver Figura 3.1. La Tabla 3.1, muestra estas etapas con una breve descripción.

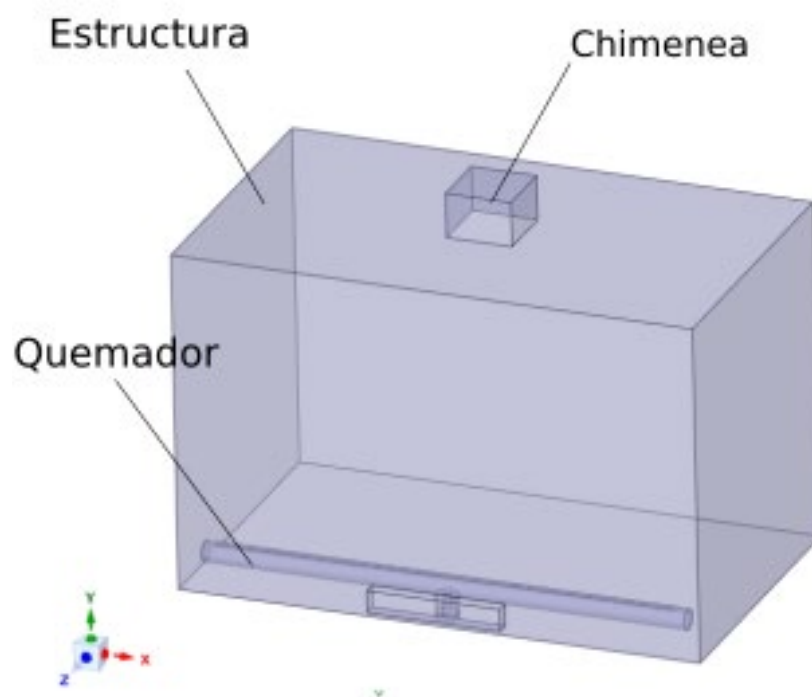


Figura 3.1. Horno convencional, identificando los componentes principales sin los deflectores de flujo.

Tabla 3.1. Etapas del desarrollo experimental.

Etapa	Descripción
Equipamiento	Diseño del equipo experimental
Instrumentación	Ubicación de sensores de temperatura en el interior del horno
Hermetización	Comprobación de la sospecha de la fuga de calor
Pruebas de medición	Medición con el equipo experimental y ubicación de los deflectores
Estudios de casos	Cinco mediciones de temperatura con el equipo experimental colocando desviadores de flujo en diferentes condiciones

3.2.1. EQUIPAMIENTO

El experimento considera la lectura de temperaturas en el interior del horno, siendo considerado en esta etapa la selección del equipamiento de prueba para ambos casos de estudio, esto es, con/sin deflectores. El equipamiento consta de termocuplas y registradores digitales.

Para las termocuplas, son utilizados 20 unidades del tipo “K Alumel Cromel” con una capacidad de medición desde -200 °C hasta 1250 °C con un error de 1.1 °C o 0.4%.

Para los registradores, 20 unidades digitales instalados en un tablero eléctrico de dimensiones de 700 x 400 x 200 mm conectados a una diferencia de tensión de 220 voltios.

La Figura 3.2, muestra el tablero eléctrico con los registradores, los cuales muestran los valores obtenidos a través de una pantalla digital.



Figura 3.2. Tablero eléctrico conteniendo 20 termocuplas.

3.2.2. INSTRUMENTACIÓN

En el caso de la instrumentación, las termocuplas fueron instaladas distributivamente en el interior del horno con/sin deflectores, ver Figura 3.3 y Figura 3.4. El mapeo de las temperaturas, el cual corresponde principalmente a la ubicación de las termocuplas, es comentado a continuación.

- Cuatro en el interior del techo con la numeración 1, 2, 3, 4 para una superficie de 1160.4 x 674.20 mm.

- Cuatro en la pared vertical del fondo con la numeración 5, 6, 7, 8 para una superficie de 1160.4 x 754.0 mm.
- Dos en el interior del piso con la numeración 9, 10 para una superficie de 1160 x 674.20 mm.
- Dos en la pared lateral derecha con la numeración 11, 12 para una superficie de 754 x 674.20 mm.
- Dos en la pared lateral izquierda con la numeración 13, 14 para una superficie de 754 x 674.20 mm.
- Seis en la puerta y ventana, en la parte frontal del horno con la numeración 15, 16, 17, 18, 19, 20 para una superficie de 1160.4 x 674.20 mm.

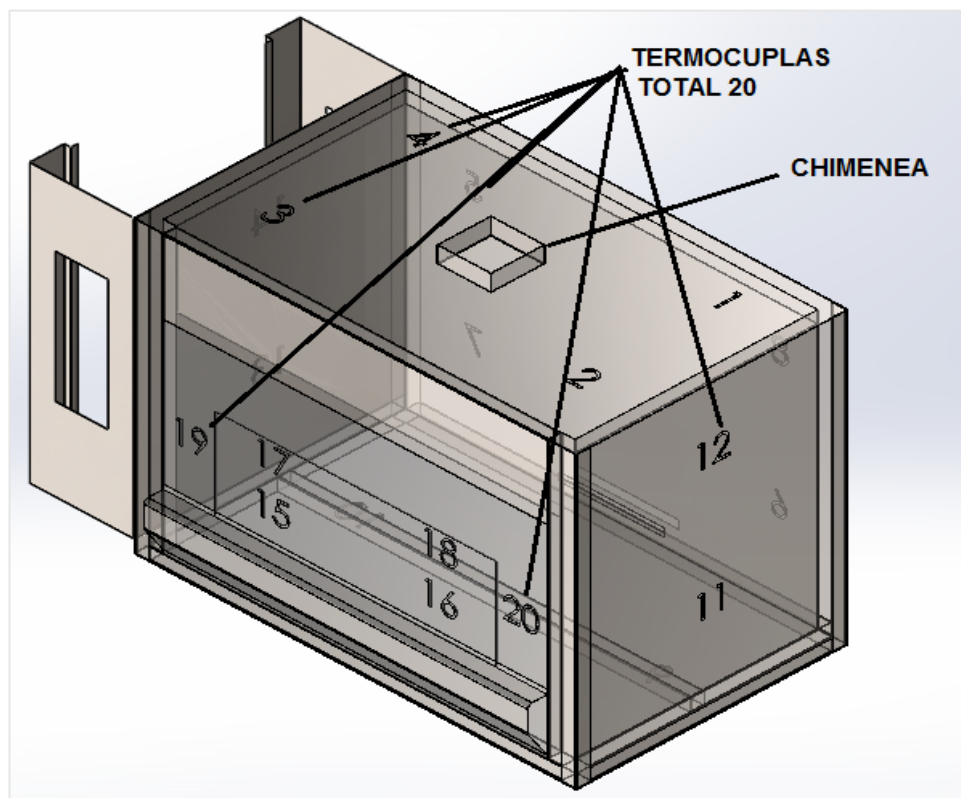


Figura 3.3. Posicionamiento de las termocuplas en el horno sin deflectores.

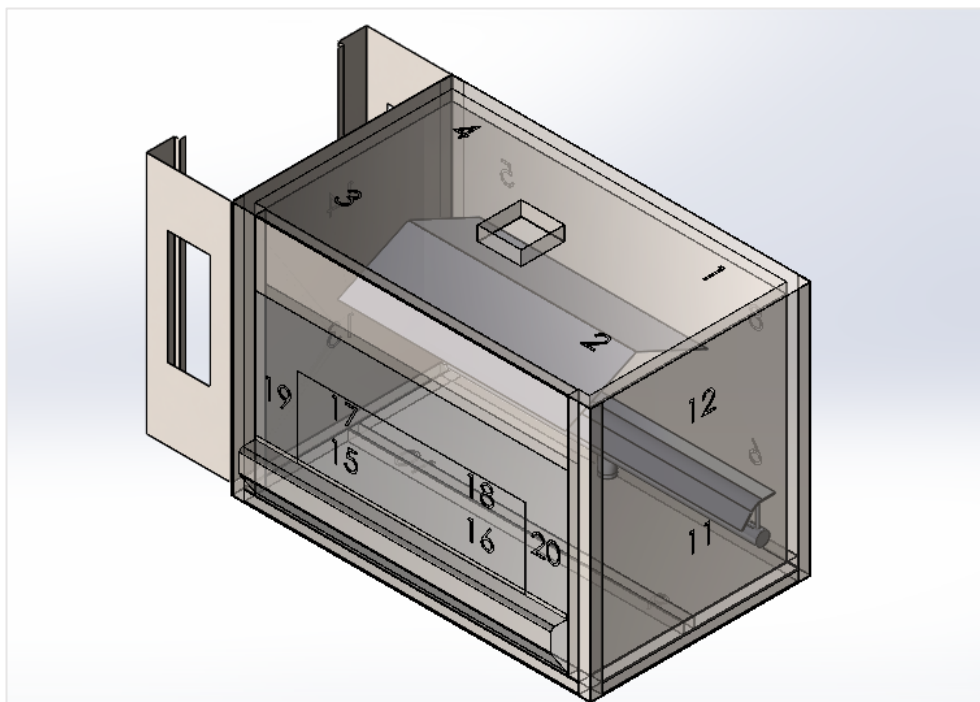


Figura 3.4. Posicionamiento de las termocupas en el horno con deflectores.

3.2.3. HERMETIZACIÓN

Esta etapa verifica la comprobación de la sospecha de la fuga de calor a través de la medición de la temperatura y compuestos de gases de combustión en la salida de humos por la chimenea del horno, garantizando de este modo una adecuada lectura de los datos procedentes de las termocupas.

3.2.4. PRUEBAS DE MEDICIÓN

Antes de realizar el estudio de casos, se realizó pruebas de todo el equipamiento, verificando su correcto funcionamiento. En el caso del horno con deflectores se realizaron diferentes pruebas de ubicación, llegando se a utilizar dos deflectores. El primer deflector de forma curva se fabricados con planchas de acero inoxidable de 2 mm de espesor y se ubicó a 10 cm del quemador. De esta manera los gases de combustión fueron desviadas, porque inicialmente para el horno comercial, esto

gases arremetían con la pared del horno sin transferir calor al producto. El segundo deflector se ubicó en el techo del horno con la finalidad de retrasar el flujo y hacer que los gases den la vuelta por el deflector y retrasan su salida. La fabricación de este deflector es similar al primero, solo que el diseño es en forma de "V". Además, este deflector transmite radiación a los alimentos favoreciendo, en el caso de pollos a la brasa, en su cocción y rostizado.

3.2.5. ESTUDIO DE CASOS

Este estudio abarca la realización de las pruebas experimentales del horno con/sin deflectores. En el caso del horno convencional, el desarrollo experimental se realizó de forma convencional, considerando la configuración de las termocuplas establecidas en la Figura 3.3.

Para el horno con deflectores fueron realizados cinco mediciones de temperatura con el equipo experimental colocando diferentes posiciones de los desviadores de flujo, los cuales son mencionados a seguir:

- Medición de temperaturas con un desviador de gases con una geometría semicircular o curva en la parte superior de quemador a 10 cm de distancia de la boquilla del quemador (punta de las llamas de combustión).
- Medición de temperaturas con un desviador de gases con una geometría combinada recta, semi-circular y recta inclinada a 15 cm de distancia de la punta de llamas de combustión.
- Medición de temperaturas con un desviador de gases de techo inclinado a dos aguas, en forma de "V", con una medida de 400 x 250 mm con ángulo entre ellos de 135 grados a 80 mm de la cumbre del desviador de flujo, al techo en el eje de la chimenea

- Medición de temperaturas con un desviador de gases de techo inclinado a dos aguas, en forma de “V”, con una medida de 600 x 350 mm con un ángulo de 135 grados a 50 mm de la cumbre del desviador de flujo, al techo en el eje de la chimenea.

La Figura 3.5, muestra una de las pruebas mencionados, donde son observados el tablero eléctrico, el horno convencional, entre otros dispositivos de medición.



Figura 3.5. Desarrollo de pruebas con el horno con/sin deflectores.

En la Figura 3.6, es presentado el horno convencional con un pollo siendo rostizado, este experimento forma parte de las pruebas desarrolladas para diferentes tipos de alimentos, donde se buscó coleccionar los datos de temperatura en el interior de estos hornos.

La Tabla 3.2, muestra los datos coleccionados de las temperaturas en las zonas de la barra de espiedo (soporte para alimentos), en la salida del horno (chimenea) y desde las termocuplas (promedio de temperaturas), las cuales fueron obtenidas durante un periodo de tiempo de 50 minutos.



Figura 3.6. Vista interior del horno, mostrando un pollo siendo rostizado por el quemador.

Tabla 3.2. Lectura de temperaturas desde la prueba experimental para el horno convencional.

ENSAYO DE HORNO COMERCIAL			
TIEMPO DE PRUEBA MINUTOS	BARRA ESPIEDO T °C	PROMEDIO HORNO T °C	CHIMENEA T °C
0	20	206	204
5	27	207	314
10	39	256	325
15	45	277	337
20	52	283	312
25	57	269	300
30	60	272	304
35	64	275	306
40	69	273	303
45	73	270	302
50	79	272	305

A partir de los datos obtenidos de la Tabla 3.2, son obtenidos las curvas de tiempo versus temperatura para cada una de las zonas mencionadas, ver Figura 3.7. En el caso de la chimenea y la temperatura promedio del horno se observa una zona transitoria hasta aproximadamente 20 minutos del desarrollo experimental, después de ese tiempo la temperatura comienza a estabilizarse. Para la barra de espiedo la temperatura es creciente en forma lineal en todo el tiempo del ensayo.

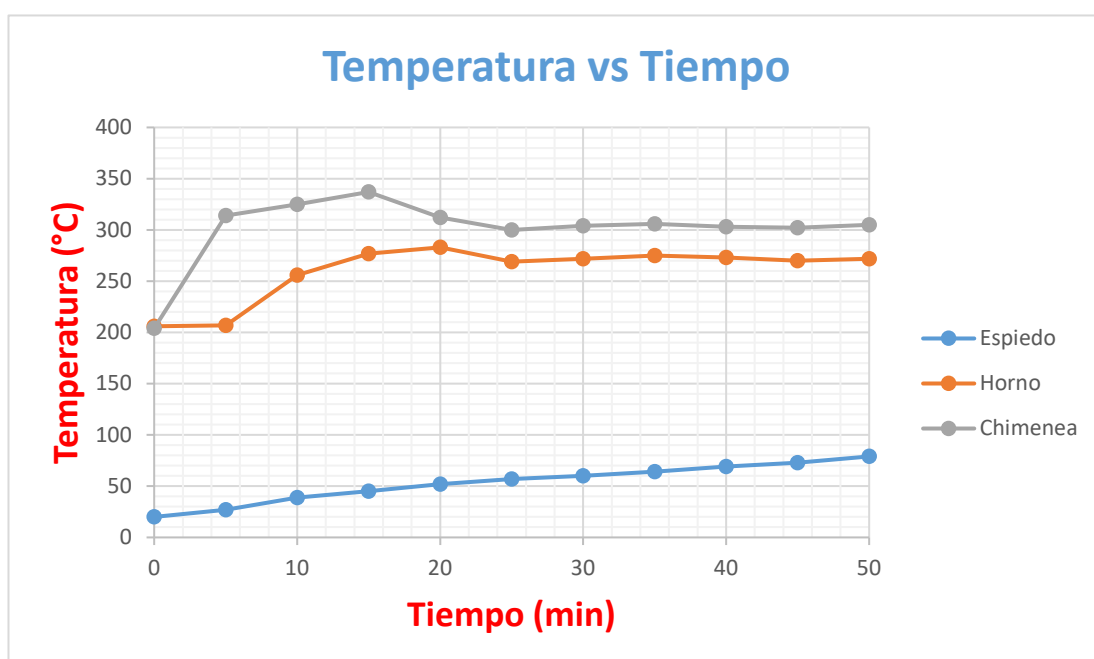


Figura 3.7. Curva tiempo vs temperatura, para el horno convencional

La Figura 3.8, muestra el interior del horno que contiene los deflectores en forma curva y en "V", presentando la posición final de los deflectores luego de varias pruebas realizadas. También, es observado en esta figura un pollo rostizado, cumpliendo la finalidad del horno, y mejorando la eficiencia térmica.

La Tabla 3.3, colecta los resultados obtenidos para el horno con los deflectores comentado en la Figura 3.8, los datos temperaturas son obtenidos en un periodo de tiempo de 50 minutos.



Figura 3.8. Vista interior del horno con deflectores, mostrando un pollo siendo rostizado por el quemador.

Tabla 3.3. Lectura de temperaturas desde la prueba experimental para el horno con deflectores de flujo.

ENSAYO DE HORNO COMERCIAL			
TIEMPO DE PRUEBA MINUTOS	BARRA ESPIEDO T °C	PROMEDIO HORNO T °C	CHIMENEA T °C
0	20	243	223
5	26	253	242
10	29	279	264
15	31	276	270
20	33	266	282
25	44	252	284
30	50	251	283
35	63	250	282
40	65	251	280
45	67	250	282
50	75	244	272

Los datos de la Tabla 3.3, son transferidos a través de curvas de tiempo versus temperatura para las zonas de la chimenea, temperatura promedio del horno y la barra de espiedo, ver Figura 3.9. Estas curvas muestran una estabilización a partir de 25 minutos de iniciado el experimento.

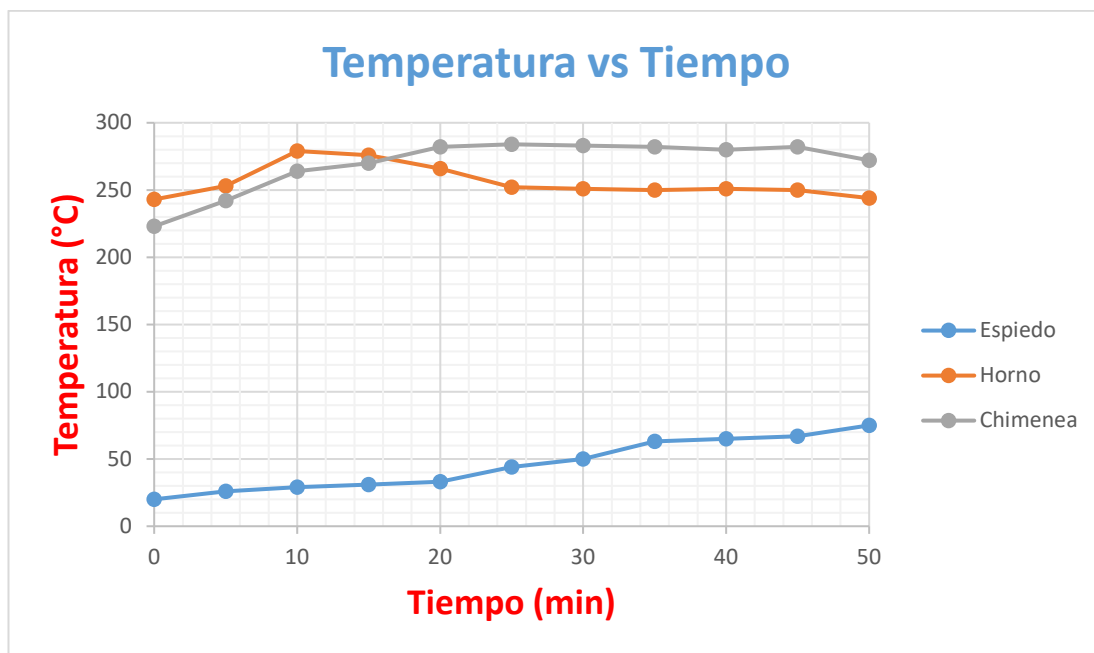


Figura 3.9. Curva tiempo vs temperatura promedio, para el horno y la chimenea

3.3. ANÁLISIS DEL EXPERIMENTO

A partir del desarrollo experimental descrito para el horno con/sin deflectores son detallados algunos resultados importantes, los cuales son comentados a continuación:

- De la Tabla 3.2 se infiere que las temperaturas son colectadas cada 5 minutos, obteniéndose un valor mínimo de temperatura de 204 °C y un valor máximo de temperatura de 337 °C. Este último valor es próximo a 346 °C, el cual se observó en el diagnóstico preliminar del presente estudio de investigación. Además, el valor promedio de temperatura de todo el proceso

experimental de calentamiento por la combustión del gas combustible y el aire es de 301 °C.

- La verificación de la desviación estándar, obtenido desde los valores experimentales del horno convencional es de 34.10, ver Tabla 3.4, en el caso del horno con los deflectores de flujo el valor es menor e igual a 19.82, ver Tabla 3.5. Estos resultados muestran una mejor distribución de las temperaturas para el horno con deflectores, por ende, el aprovechamiento por cocción y dorado de los alimentos cárnicos es superior.
- Otro dato importante observado en el desarrollo del experimento es el aporte de transferencia de calor por radiación, el cual no fue abordado en este experimento.

La Tabla 3.4, presenta un resumen de los datos estadísticos de temperatura promedio del interior del horno, del horno y la desviación estándar de los gases de chimenea obtenidos desde la Tabla 3.2.

Tabla 3.4. Resumen de datos estadísticos para el horno convencional.

DESCRIPCIÓN	VALOR (°C)
Temperatura promedio en el interior del horno	260
Temperatura promedio del horno	301
Desviación estándar de los gases de chimenea	34.10

La Tabla 3.5, presenta los resultados de la temperatura promedio del interior del horno, del horno y la desviación estándar de los gases de chimenea obtenidos desde para el horno con deflectores de flujo.

Tabla 3.5. Resumen de datos estadísticos para el horno convencional.

DESCRIPCIÓN	VALOR (°C)
Temperatura promedio en el interior del horno	255
Temperatura promedio del horno	269
Desviación estándar de los gases de chimenea	19.82

CAPÍTULO IV:
IMPLEMENTACIÓN NUMÉRICA DE CFD PARA UN HORNO CON/SIN
DEFLECTORES DE FLUJO

A partir del capítulo anterior es analizada la simulación numérica del horno con/sin deflectores. La simulación es desarrollada mediante CFD en el software Ansys-Fluent. La implementación del CFD, consta de un “*Pre-processing*”, “*Solver*” y “*Post-processing*”, ver Anexo B, estas partes incorporan, la geometría, enmallado, condiciones de contorno, modelo de turbulencia y visualización de resultados. El *Pre-processing*, utiliza el diseño de las geometrías del horno con/sin deflectores de flujo, utilizando un enmallado no estructurado y asignando las superficies del horno donde serán establecidas las condiciones de contorno. El *Solver*, es programado considerando las propiedades del flujo, el modelo de turbulencia, las condiciones de contorno y los parámetros computacionales. Al final, el *Post-processing*, muestra los resultados del campo de temperatura y velocidad de los gases calientes en el interior del horno en 2D y 3D.

4.1. PRE-PROCESSING

Esta etapa de la implementación utiliza el diseño de los hornos con/sin deflectores de flujo (Figura 4.1) desarrollados en la etapa experimental. El diseño de los hornos para el análisis numérico considera solo los componentes de la estructura en forma de caja del horno y el quemador para el horno convencional (sin deflectores), ver Figura 4.1a, y adicionalmente los dos deflectores de flujo para la nueva propuesta de

horno (con deflectores). Los deflectores conservan la ubicación desde el modelo experimental, un deflector en la parte superior y un deflector por encima del quemador, como es mostrado en la Figura 4.1b.

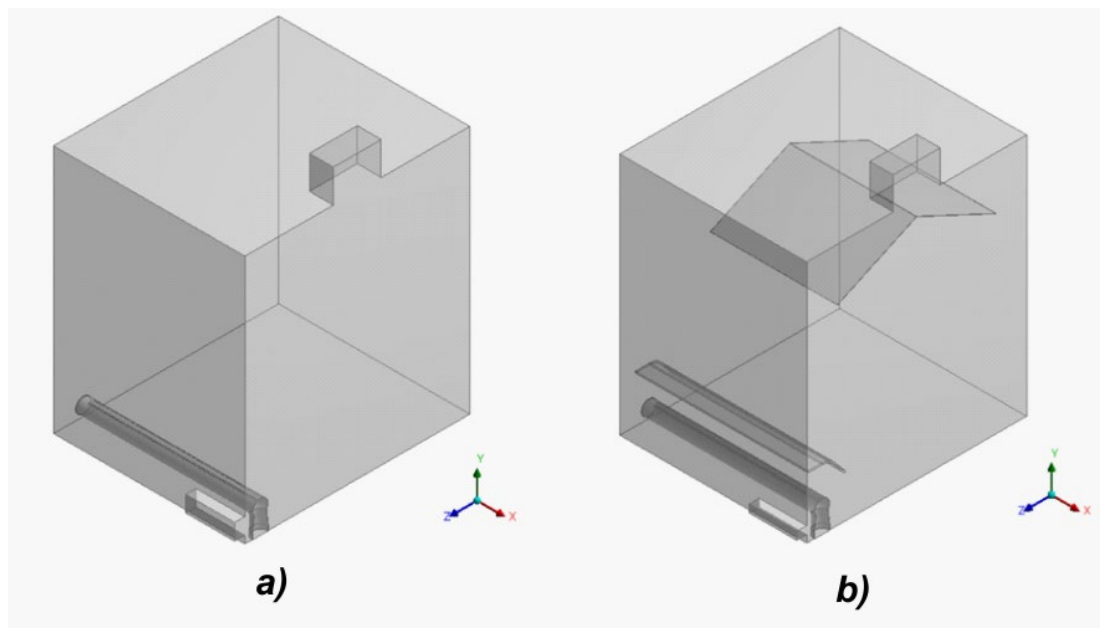


Figura 4.1. Modelo geométrico de horno sin deflectores. *a)* Sin deflectores de flujo.
b) Con deflectores de flujo.

4.1.1. CONDICIONES DE CONTORNO

Con el objetivo de representar el comportamiento de los gases calientes en el interior del horno es necesario establecer las condiciones de contorno. Convencionalmente, las condiciones de contorno son establecidos para el dominio del fluido, considerando una entrada, una salida, una simetría, entre otras designaciones que son dadas. A seguir, las Tablas 4.1 y 4.2 muestran las condiciones de contorno utilizadas para los hornos con/sin deflectores de flujo. Además, estas tablas, muestran una etiqueta definida para cada superficie considerada en el dominio del fluido.

Tabla 4.1. Condiciones de contorno para el horno sin deflectores.

Superficie seleccionada	Tipo de contorno	Etiqueta
Pared externa del horno	Pared	WALL
Entrada del quemador	Ingreso	INLET_1
Entrada del horno (ingreso de aire)	Ingreso	INLET_2
Salida del horno (chimenea)	Salida	OPENNING
Superficie media del dominio (plano Y-Z)	Simetría	SYMMETRY

Tabla 4.2. Condiciones de contorno para el horno con deflectores.

Superficie seleccionada	Tipo de contorno	Etiqueta
Pared externa del horno	Pared	WALL
Entrada del horno (ingreso de aire)	Ingreso	INLET_1
Entrada del quemador (ingreso de aire)	Ingreso	INLET_2
Salida del horno (chimenea)	Salida	OPENNING
Deflector inferior (cercano al quemador)	Pared	WALL
Deflector superior (cercana a la chimenea del horno)	Pared	WALL
Superficie media del dominio (plano Y-Z)	Simetría	SYMMETRY

La Figura 4.2, muestra las condiciones de contorno para el horno sin deflectores, resaltando las áreas seleccionadas de la Tabla 4.1. El SYMMETRY, Figura 4.2a y el WALL para el quemador (Figura 4.2b) y la pared externa del horno (Figura 4.2c).

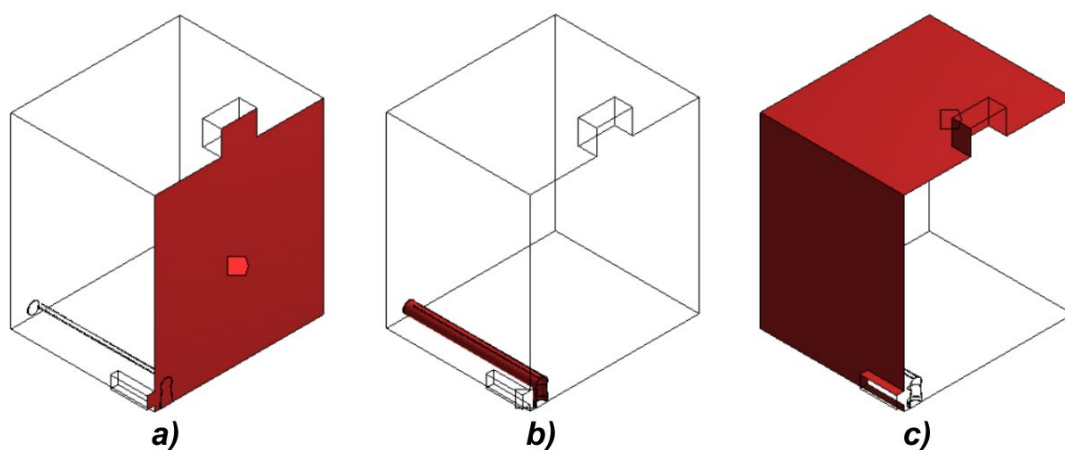


Figura 4.2. Condiciones de contorno. a) Simetría, SYMMETRY. b) De pared en el quemador, WALL. c) De pared externa del horno, WALL.

La Figura 4.3, muestra las condiciones de contorno para el horno con deflectores, Tabla 4.2. El SYMMETRY, Figura 4.3a y el WALL para el quemador y deflectores (Figura 4.3b) y la pared externa del horno (Figura 4.3c).

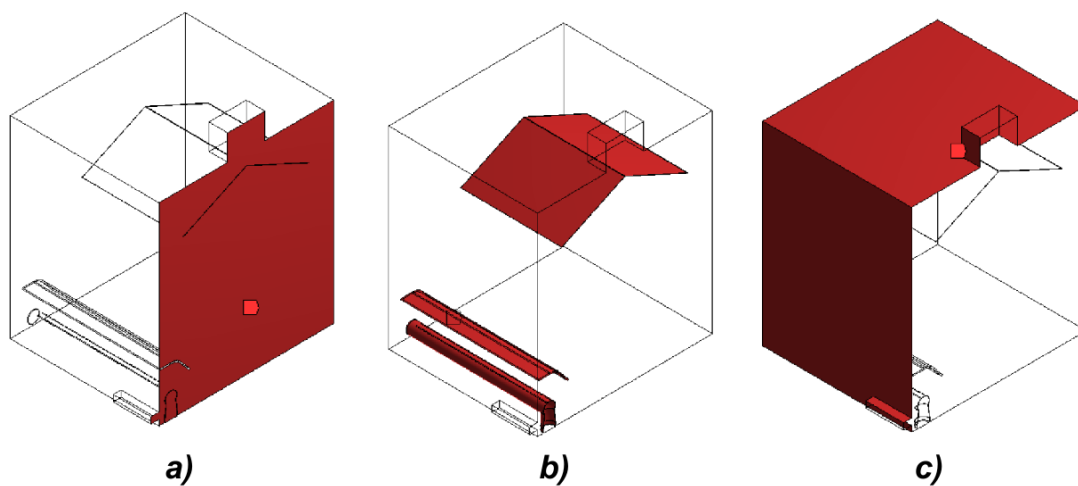


Figura 4.3. Condiciones de contorno. a) Simetría, SYMMETRY. b) De pared en el quemador y los deflectores de flujo, WALL. c) De pared externa del horno, WALL.

La Figura 4.4, muestra las condiciones de contorno para el horno con/sin deflectores, identificando las etiquetas mostradas en la Tabla 4.1 (Figura 4.4a) y 4.2 (Figura 4.4b). Adicionalmente, en esta figura se realiza un acercamiento al ingreso del quemador, el cual es similar en ambos hornos.

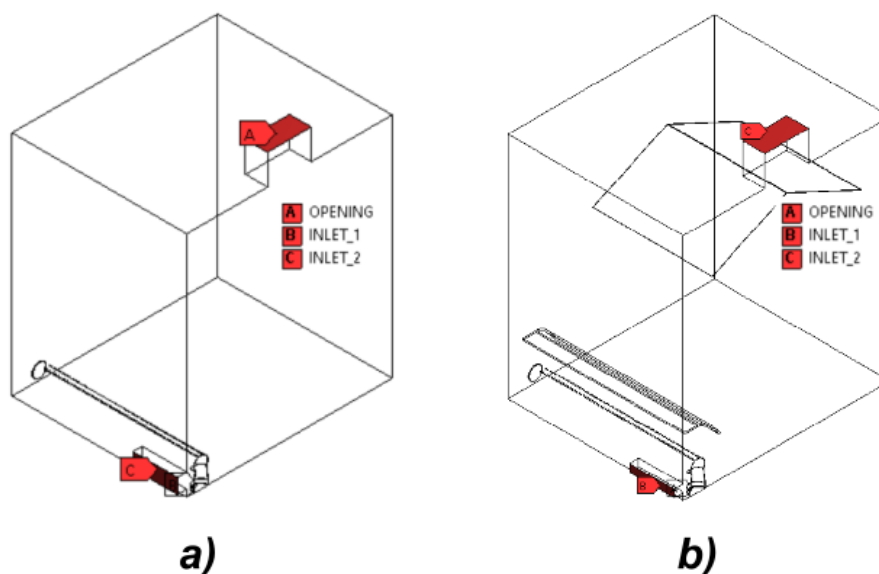


Figura 4.4. Condiciones de contorno de OPENNING e INLET. a) Horno sin deflectores de flujo. b) Horno con deflectores de flujo.

4.1.2. MALLA DE ELEMENTOS

La malla de elementos son denominadas celdas, las cuales pueden ser estructuradas o no estructuradas, presentando celdas triangulares o cuadriláteros para análisis en 2D y en el caso de 3D, celdas tetraédricas o hexaédricas. En el caso del horno con/sin deflectores se utilizaron elementos tetraédricos, realizando la malla de elementos para la mitad del horno con el objetivo de disminuir el tiempo computacional.

La Figura 4.5, presenta la malla de elementos no estructurado para el horno sin deflectores, contando con 877803 elementos. También, se realizó un refinamiento mayor en las boquillas del elemento, el cual es mostrado en la "VISTA A" de esta

figura, estableciendo un tamaño de 0.9 mm, siendo este valor el tamaño mínimo y observándose un valor de tamaño máximo de 30 mm para la malla utilizada en este horno.

La Figura 4.6, presenta un refinamiento mayor en la boquilla del quemador para el horno con deflectores, esto es mostrado en la “VISTA A”, en este caso la cantidad de elementos fue de 809111, considerando un tamaño de malla de 0.9 mm, valor mínimo, y 50 mm, valor máximo. Además, para los deflectores el tamaño fue establecido entre el valor mínimo y máximo. La “VISTA B”, verifica este tamaño para el refinamiento en el deflector en forma de “V”.

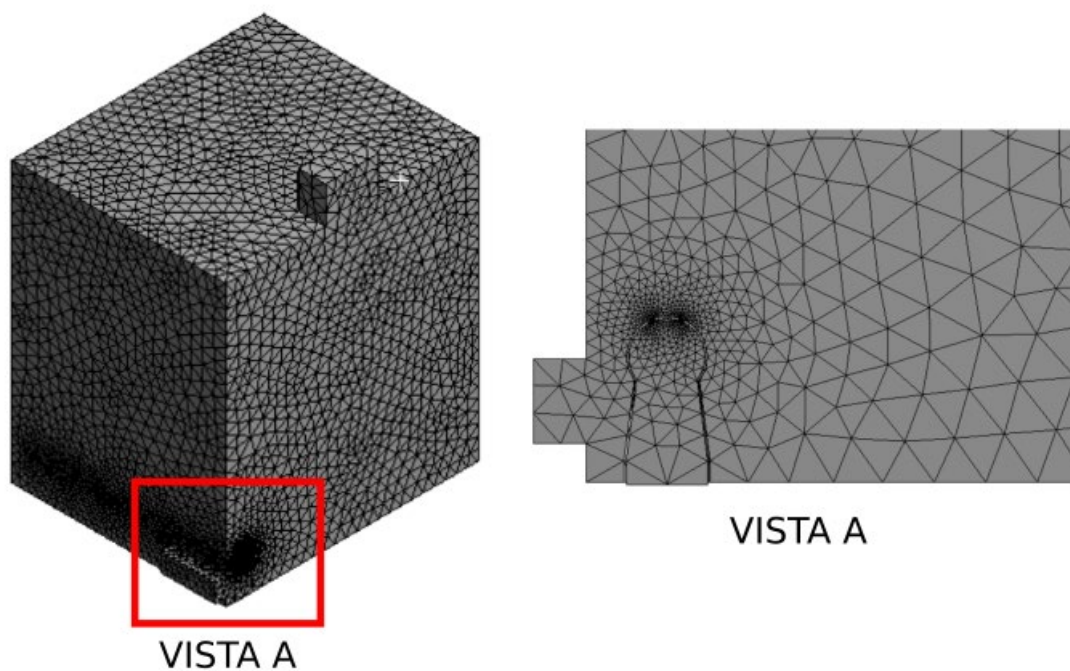


Figura 4.5. Malla no estructurada, con refinamiento en las boquillas del quemador para el horno sin deflectores.

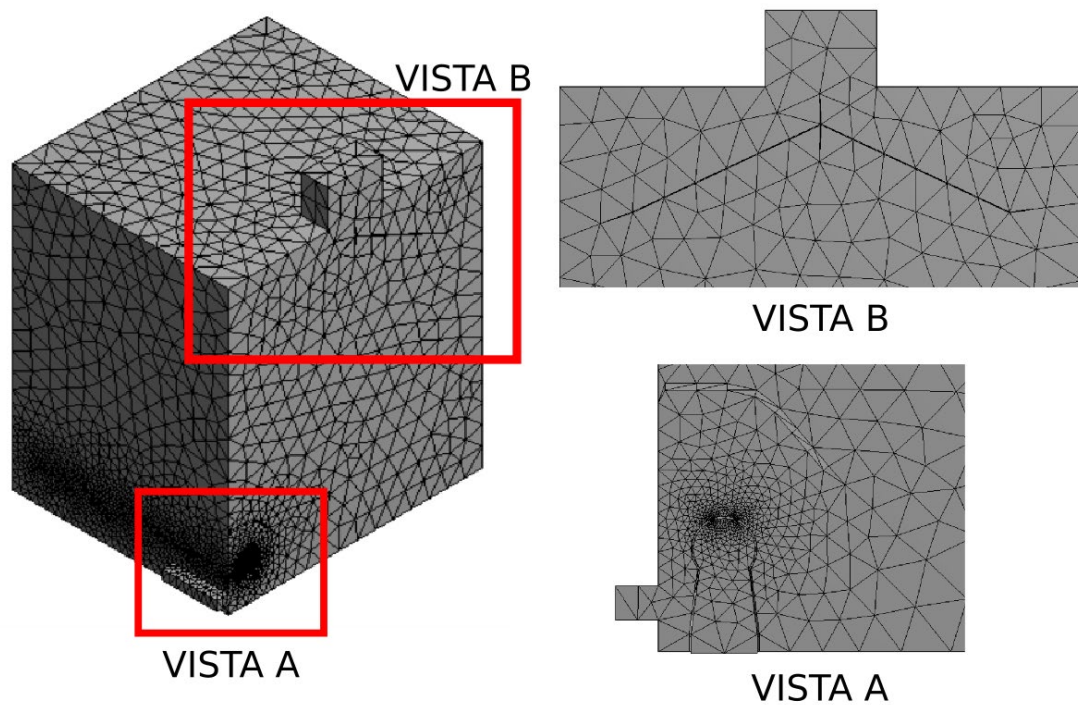


Figura 4.6. Malla no estructurada, indicando el refinamiento en el quemador y los deflectores de flujo.

4.2. SOLVER

Esta parte del diagrama de flujo establecida para las simulaciones numéricas desarrolladas en el Ansys-Fluent, para el CFD, son consideradas las propiedades para el flujo, las condiciones de contorno, y los parámetros computacionales para la simulación numérica.

El “*solver*” es basado en la presión, estableciendo un análisis permanente, en el cual es considerado el coeficiente de gravedad de 9.81 m/s^2 y la opción de “*energy*” es activado.

Para el flujo es considerado las propiedades del denominado “*air*” en el interior del horno con/sin deflectores para simular el comportamiento del flujo. Los valores de estas propiedades son mostrados en la Figura 4.7.

The image shows a 'Properties' panel with the following settings:

Property	Value
Density (kg/m ³)	constant 1.225
Cp (Specific Heat) (j/kg-k)	constant 1006.43
Thermal Conductivity (w/m-k)	constant 0.0242
Viscosity (kg/m-s)	constant 1.7894e-05

Figura 4.7. Propiedades del flujo en el interior del horno con/sin deflectores.

El modelo de turbulencia escogido es tipo realizable K-epsilon con condiciones de pared mejorado. Este modelo considera parámetros por defecto los cuales son establecidos en el software Ansys-Fluent. Los valores del modelo de turbulencia son mostrados en la Figura 4.8.

The image shows a 'Model Constants' panel with the following settings:

Parameter	Value
C2-Epsilon	1.9
TKE Prandtl Number	1
TDR Prandtl Number	1.2
Energy Prandtl Number	0.85
Wall Prandtl Number	0.85

Figura 4.8. Modelo de turbulencia K-epsilon.

También, en esta etapa son establecidas las condiciones de contorno que son mencionadas según la Tabla 4.1 y 4.2.

Por último, son calculados en base a la experiencia los parámetros computacionales, definiéndose la cantidad de iteraciones y el paso de iteración con el cual el sistema será estabilizado. Estos valores son presentados en la Figura 4.9.

The image shows a software dialog box titled "Run Calculation". At the top right is a help icon (question mark in a circle). Below the title bar are two buttons: "Check Case..." and "Update Dynamic Mesh...". The main area is divided into three sections:

- Parameters:** Contains three dropdown menus. "Number of Iterations" is set to 100, "Reporting Interval" is set to 1, and "Profile Update Interval" is set to 1.
- Solution Processing:** Contains a sub-section "Statistics" with an unchecked checkbox "Data Sampling for Steady Statistics" and a button "Data File Quantities...".
- Solution Advancement:** Contains a single button "Calculate".

Figura 4.9. Parámetros computacionales.

4.3. POST-PROCESSING

A continuación, son presentados los resultados desde las simulaciones numéricas obtenidas a partir de la implementación en el *Pre-processing* y *Solver*. Los resultados muestran el horno con/sin deflectores en una vista 2D y 3D, para apreciar el dominio del fluido en su máxima expresión, mostrando los campos de temperatura y las velocidades de los gases calientes.

4.3.1 HORNO CONVENCIONAL (SIN DEFLECTORES)

En este apartado son obtenidos los campos de temperatura en el dominio del fluido de los gases calientes a través de figuras. La Figura 4.10, muestra al horno en una vista 2D, observándose una temperatura aproximada de 873.257 K en el interior del quemador, y una temperatura promedio de 617 K en el interior del horno. En el caso

de la vista 3D, la Figura 4.11, presenta isométricamente el dominio del fluido de las iso-temperaturas, los cuales son escalados según un rango de colores, los cuales establecen un rango inferior y otro superior, ya mencionados. También, de esta última figura se observa como el campo de temperatura se va estableciendo desde la entrada del quemador, ubicada en la parte media del horno, hacia la pared del horno. Los valores de temperatura para este horno son coherentes a lo observado en el análisis experimental.

La Figura 4.12, presenta los resultados del campo de velocidades, denominado líneas de corriente, los cuales son calculados mediante la simulación numérica para los gases calientes en el interior del horno. También, en esta figura observamos como las líneas de corriente forman un solo vórtice, contorneando todo el interior del horno. Además, las mayores velocidades se encuentran en el interior del quemador y una velocidad promedio de 0.472 m/s en otras partes del horno.

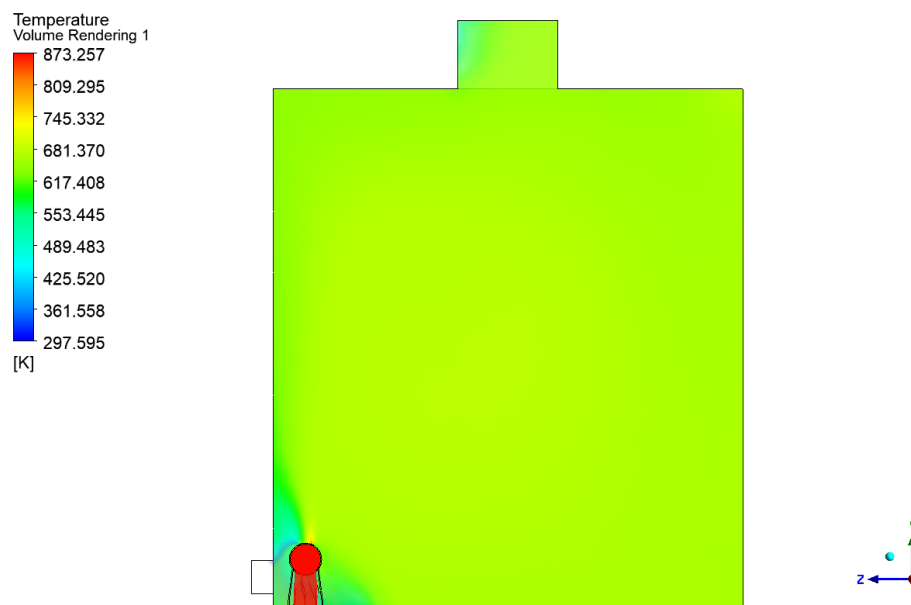


Figura 4.10. Iso-temperaturas del horno sin deflectores, vista 2D.

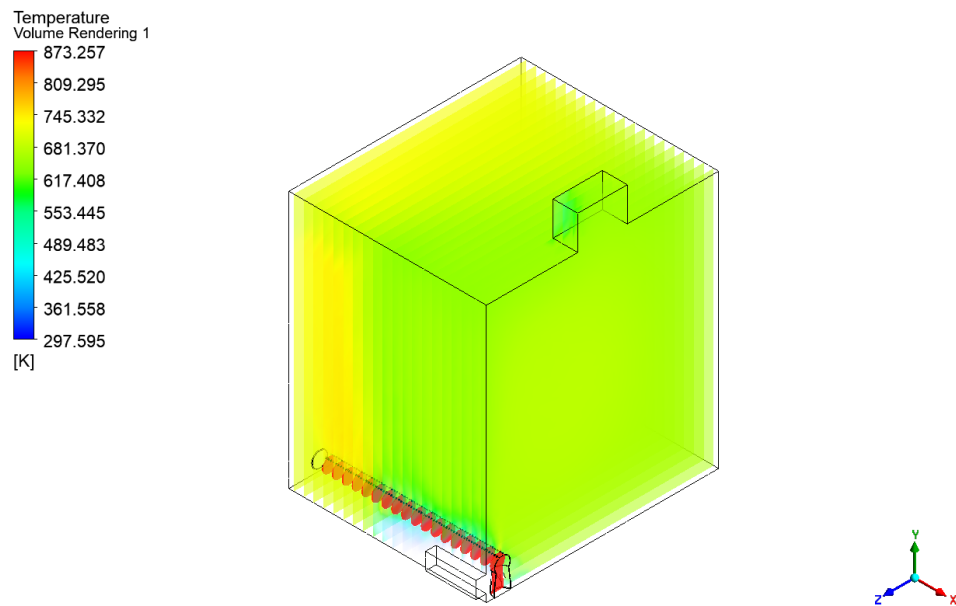


Figura 4.11. Iso-temperaturas del horno sin deflectores, vista 3D.

Para complementar el resultado del campo de velocidades, la Figura 4.13, muestra las líneas de corriente en 3D, evidenciándose una distribución de un solo vórtice en todo el dominio.

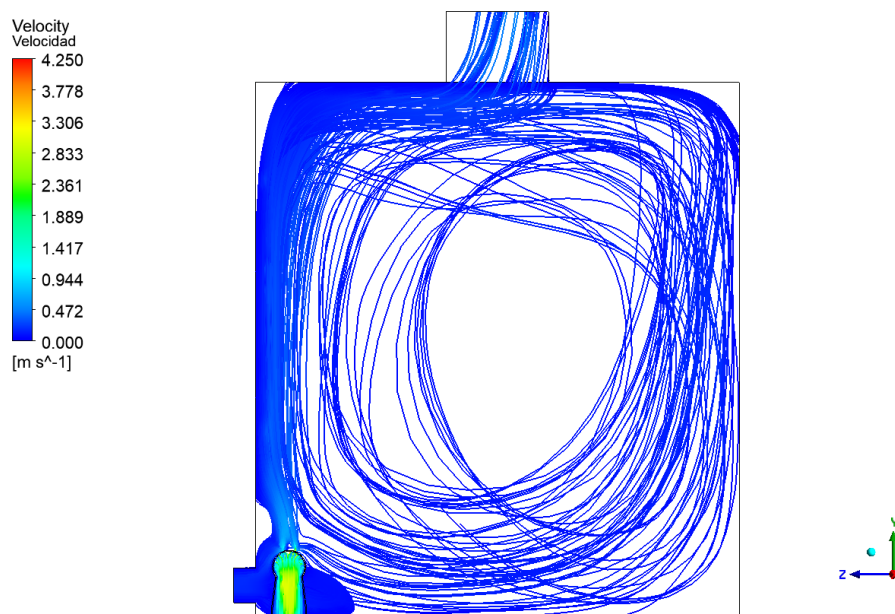


Figura 4.12. Línea de corrientes de los gases calientes para el horno sin deflectores, vista 2D.

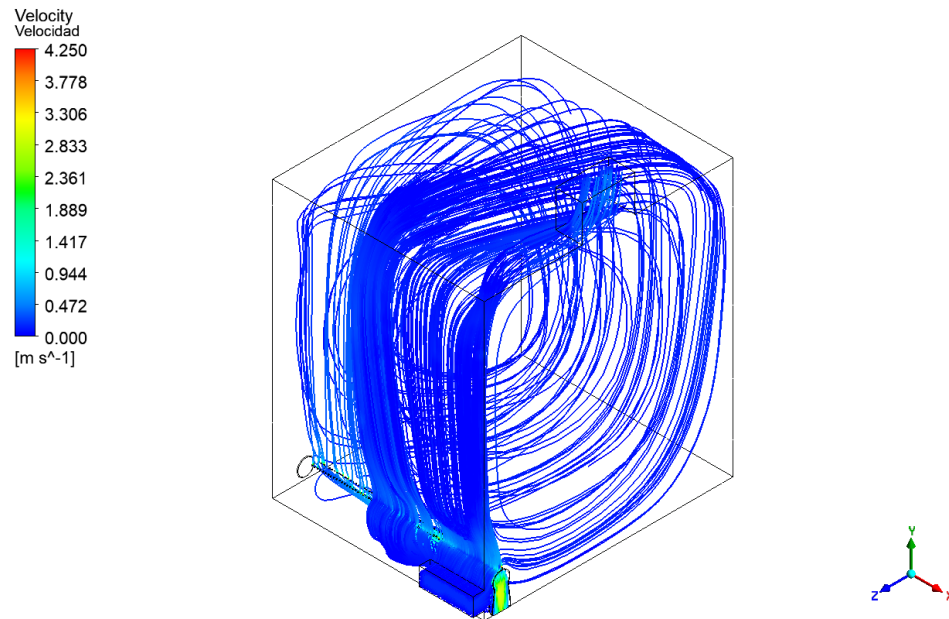


Figura 4.13. Línea de corrientes de los gases calientes para el horno sin deflectores, vista 3D.

4.3.2 HORNO CON DEFLECTORES DE FLUJO

Las figuras mostradas anteriormente muestran el análisis de un horno sin deflectores en 2D y 3D, a continuación, mostraremos las figuras del análisis numérico de un horno incorporando el deflector curvo en las cercanías del quemador y el deflector en forma de “V” cerca de la salida del horno, chimenea.

La Figura 4.14, presenta el campo de temperaturas en 2D, donde las mayores temperaturas se encuentran en el interior del quemador y alrededor del deflector de forma curva, alcanzándose rangos de temperatura entre 809.255 K a 873.154 K. Para el deflector en forma de “V” las temperaturas alcanzadas fueron de aproximadamente 745.355 K.

La Figura 4.15, el cual presenta el campo de temperaturas en 3D, observándose variaciones de temperatura en el orden de 777 K y temperaturas de 553 K en la parte inferior del horno, estas variaciones de temperatura que no son observadas en el

horno convencional tienen como consecuencia una reorientación de los gases calientes en el interior del horno con deflectores de flujo, lo cual es conveniente para mejorar la eficiencia térmica del mismo.

En el caso de las líneas de corriente la Figura 4.16 y 4.17 muestran los resultados obtenidos para el horno con deflectores en 2D y 3D, respectivamente.

La Figura 4.16, muestra las líneas de corriente que van generando tres vórtices, esto debido a una distribución irregular de la temperatura en el interior del horno. Además, se observa una agrupación de las líneas de corriente a la salida de quemador que impacta directamente en el deflector de forma curva, reorientándose desde el fondo del horno.

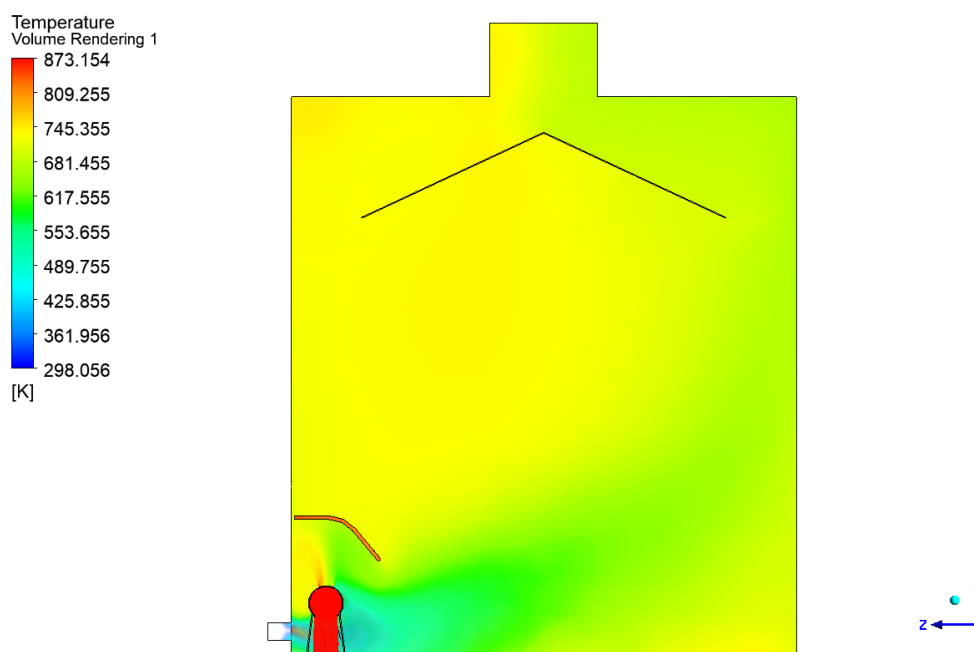


Figura 4.14. Iso-temperaturas del horno con deflectores, vista 2D.

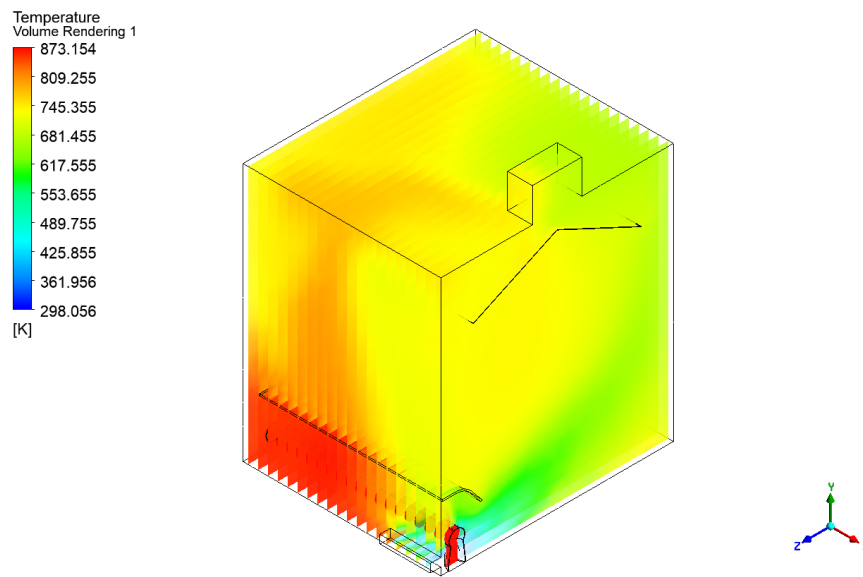


Figura 4.15. Iso-temperaturas del horno con deflectores, vista 3D.

La Figura 4.17, muestra las líneas de corriente en 3D, observándose una mayor distorsión de la dirección del flujo de gases calientes. Las mayores velocidades alcanzadas son dadas en el interior del quemador y velocidades de 0.604 m/s en el interior del horno.

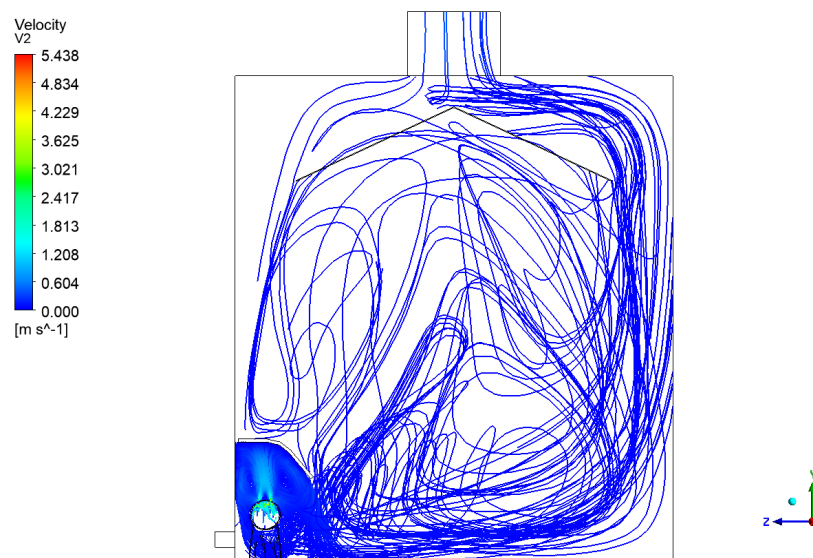


Figura 4.16. Línea de corrientes de los gases calientes para el horno con deflectores, vista 2D.

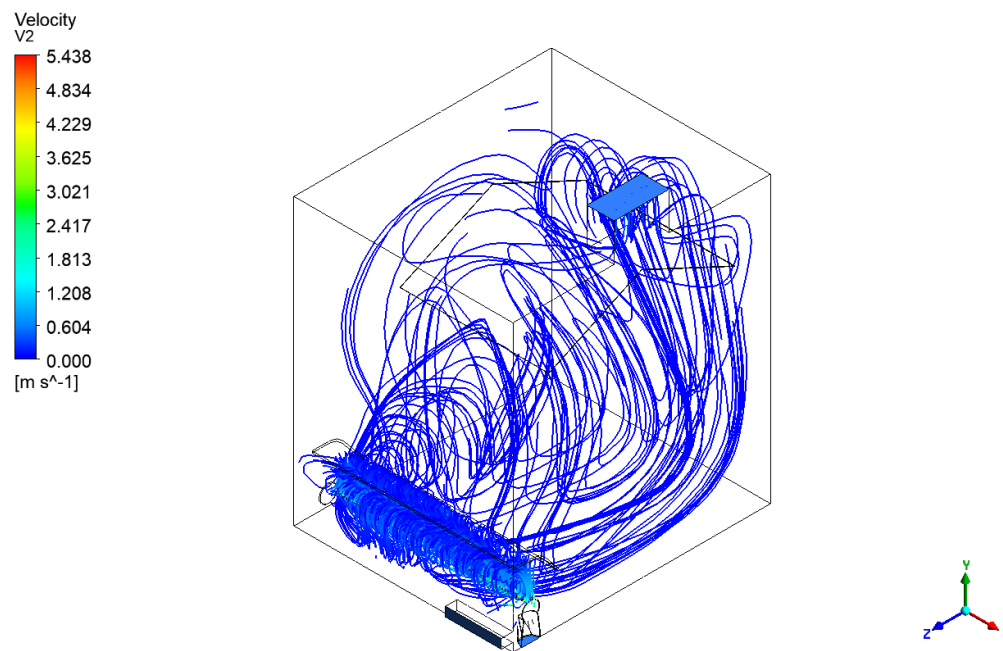


Figura 4.17. Línea de corrientes de los gases calientes para el horno con deflectores, vista 3D.

4.4. CORRELACIÓN EXPERIMENTAL

Los resultados observados desde la simulación numérica confirman los valores de temperatura obtenidos experimentalmente, observándose una buena correlación numérica.

Para el horno sin deflectores de flujo la temperatura promedio del horno es de aproximadamente 301 °C, ver Tabla 3.4, en el caso de la simulación numérica los resultados muestran un rango de temperaturas entre 553.445 K a 617.408 K, siendo el promedio entre ellos 585.427 K o 312.427 °C. Estos valores muestran una coherencia porque en las simulaciones no fueron considerados los alimentos cárnicos. Además, la simulación es destacada debido al vórtice formado para el horno convencional.

Para el horno con deflectores de flujo la temperatura promedio del horno es de aproximadamente 269 °C, ver Tabla 3.5, en el caso de la simulación numérica los resultados muestran una temperatura promedio de 553.655 K o 280.655 °C. Esta simulación verifica un hecho muy importante que experimentalmente no es posible observar y es la confirmación de tres vórtices, los cuales son los causantes de retardar a los gases calientes que ayudan justamente en la cocción y rostizado de los alimentos cárnicos. La última afirmación forma parte del aporte fundamental de esta tesis, que evidencia el aumento de eficiencia térmica a través de deflectores de flujo.

CONCLUSIONES

A partir del análisis numérico y experimental desarrollado en esta tesis, para evaluar la eficiencia térmica de un horno comercial que incorpora deflectores de flujo, son obtenidos resultados muy prometedores, lográndose alcanzar los objetivos propuestos comentados en el Capítulo 1, los cuales son comentados a seguir:

- En relación a la mejora de la eficiencia térmica del horno, se logró un aprovechamiento del calor generado por la combustión del gas natural con el aire, al retardar la salida de los gases de combustión mediante los deflectores de flujo, obteniéndose un 10% de ahorro entre la condición inicial y final.
- El uso de los deflectores de flujo por convección, instalados en el interior del horno disminuyeron la dispersión de la temperatura de los gases dentro y en la salida de la chimenea del horno. Obteniéndose, una desviación estándar de 19°C respecto a la temperatura media para el horno con deflectores de flujo, y una desviación de 31°C en el horno sin deflectores de flujo.
- A partir de los resultados de la simulación numérica obtenidos con el software Ansys-Fluent, se observó en la simulación del horno con los deflectores la existencia de hasta 3 vórtices en el flujo turbulento: En el caso del horno sin deflectores la simulación mostro la existencia de un vórtice. Esta evidencia

numérica verifica que el incremento de vórtices, los cuales generan una mayor turbulencia, incrementan la transferencia de calor por el mecanismo de convección natural.

- La simulación numérica por CFD ha demostrado ser una herramienta valiosa, que estima mediante simulaciones el comportamiento del flujo en el interior de un horno al utilizar modelos de turbulencia como K-epsilon, el cual puede mostrar los vórtices observados en el interior de hornos tipo convectivos.
- Este trabajo que se inició como un proceso de investigación, que contemplaba un análisis experimental de un horno convencional, ha logrado aprovechar el comportamiento térmico de los gases en el interior del horno al retardar el flujo mediante deflectores, siendo esta modificación de carácter innovador para los hornos comerciales fabricados no solamente en el Perú, por no considerar modificaciones tan complejas en relación a su diseño inicial.

Además, es contrastada las hipótesis mencionadas en Capítulo 1, tomadas desde la matriz de consistencia (Anexo A). En la cual se dio como iniciativa de mejora el aprovechamiento de calor y de retención de los gases de combustión dentro del horno colocando sucesivamente desviadores internos de prueba de diferentes geometrías y en diversas ubicaciones, concluyéndose la utilización de dos deflectores de flujo.

El primer deflector, ubicado encima del quemador, verificando la mejora de la eficiencia térmica a través su ubicación en la pared posterior y fabricado mediante la combinación de tres secciones transversales, una recta horizontal otra curva semicircular y finalmente otra recta inclinada 20 grados con la horizontal hacia el centro del horno.

El segundo deflector, considerado un deflector de gases en el techo con el objetivo de retardar la salida directa a la chimenea y obligar a los gases a dar una vuelta, aumentando de esta manera su transferencia de calor a los alimentos en su recorrido. Esta ubicación se realizó mediante varias pruebas, concluyéndose una ubicación y dimensión geométrica adecuada que ayudo a obtener un valor de temperatura promedio 269 °C.

Finalmente, se concluye que la diferencia de temperaturas promedios, obtenidos en los experimentos con/sin deflectores es de 32 °C que corresponde a un ahorro de 10.5% de consumo de energía calórica con el uso de gas natural. Otros tipos de combustibles como el gas natural y el GLP, carbón vegetal u otro combustible autorizado para la cocción de alimentos, en el cual la transferencia de calor sea por convección natural es directamente proporcional a la temperatura promedio, en el cual es considerado constante el calor específico de los gases.

RECOMENDACIONES

- 1) Evaluar mediante CFD el comportamiento del flujo de los gases calientes mediante un modelo de turbulencia K-omega.
- 2) Utilizar técnicas de fotometría para cuantificar las temperaturas en el interior del horno, con esto se podrá obtener una recolección de los datos en un área determinada y no de forma puntual.
- 3) Trabajar con una malla tipo celda estructurada, utilizando técnicas de inflación en las boquillas del quemador, para observar un ordenamiento en el interior del horno. Esta adecuación puede mejorar los resultados obtenidos desde la simulación numérica.
- 4) La tesis contempla un análisis de un horno convectivo, por cual sería interesante incorporar al análisis numérico el mecanismo de radiación, y observar sus efectos en la cocción y dorado de los alimentos.
- 5) A partir del análisis experimental, este trabajo recomienda el estudio teórico e numérico de quemadores a gas con pre-mezcla para hornos de rostizado de pollos.
- 6) Realizar un estudio de transferencia de calor y masa de la cocción y dorado de pollos, considerando el control de humedad interna de la carne.
- 7) Evaluar el aporte de calor por radiación que producen los deflectores de flujo y las superficies brillantes de las paredes del horno.

- 8) Realizar un estudio de la transferencia de calor aplicando pequeñas corrientes de gases de combustión hacia los alimentos cárnicos considerando convección forzada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. J. Blikra, D. Skipnes, and A. H. Feyissa, "Model for heat and mass transport during cooking of cod loin in a convection oven," *Food Control*, vol. 102, no. 4068, pp. 29–37, 2019, doi: 10.1016/j.foodcont.2019.03.001.
- [2] D. Landi, A. Consolini, M. Germani, and C. Favi, "Comparative life cycle assessment of electric and gas ovens in the Italian context: An environmental and technical evaluation," *J. Clean. Prod.*, vol. 221, pp. 189–201, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.196.
- [3] S. Shevade, M. Rahman, and R. Guldiken, "Optimization of turbulent air jet impingement for energy efficient commercial cooking," *Energy Procedia*, vol. 160, pp. 691–698, 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.02.191.
- [4] F. Burlon, E. Tiberi, D. Micheli, R. Furlanetto, and M. Simonato, "Transient model of a Professional Oven," *Energy Procedia*, vol. 126, pp. 2–9, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.045.
- [5] M. Pinelli and A. Suman, Thermal and fluid dynamic analysis of an air-forced convection rotary bread-baking oven by means of an experimental and numerical approach, vol. 117. 2017.
- [6] C. E. Walker, *Oven Technologies*, 2nd ed., vol. 3–4. Elsevier Ltd., 2015.

- [7] R. G. M. van der Sman, "Modeling cooking of chicken meat in industrial tunnel ovens with the Flory-Rehner theory," *Meat Sci.*, vol. 95, no. 4, pp. 940–957, 2013, doi: 10.1016/j.meatsci.2013.03.027.
- [8] P. J. Flory and J. Rehner, "Statistical Mechanics of CrossLinked Polymer Networks II . Swelling Statistical Mechanics of Cross-Linked Polymer Networks," vol. 521, 1943, doi: 10.1063/1.1723792.
- [9] H. Isleroglu, T. Kemerli, Ö. Özdestan, A. Üren, and F. Kaymak-ertekin, "PROCESSING , PRODUCTS , AND FOOD SAFETY Effect of oven cooking method on formation of heterocyclic amines and quality characteristics of chicken patties : Steam-assisted hybrid oven versus convection ovens," no. 2007, pp. 2296–2303, 2011.
- [10] M. Danowska-oziewicz, "PORK PATTIES," vol. 33, pp. 473–485, 2009, doi: 10.1111/j.1745-4549.2008.00269.x.
- [11] C. Bejerholm and M. D. Aaslyng, "The influence of cooking technique and core temperature on results of a sensory analysis of pork — depending on the raw meat quality," vol. 15, pp. 19–30, 2003, doi: 10.1016/S0950-3293(03)00018-1.
- [12] J. F. Kerry, *Effects of novel thermal processing technologies on the sensory quality of meat and meat products*. Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [13] H. Mistry, Ganapathi-subbu, S. Dey, P. Bishnoi, and J. L. Castillo, "Modeling of transient natural convection heat transfer in electric ovens," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 26, no. 17–18, pp. 2448–2456, 2006, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2006.02.007.
- [14] B. Baking and H. Transfer, "Baking Ovens 9.1," pp. 75–91, doi: 10.1016/B978-0-12-815579-0.00009-X.

- [15] H. Sato, T. Matsumura, and S. Shibukawa, "Apparent Heat Transfer in a Forced Convection Oven and Properties of Baked Food," *J. Food Sci.*, vol. 52, no. 1, pp. 185–188, 1987, doi: 10.1111/j.1365-2621.1987.tb14001.x.
- [16] U. Kokolj, L. Škerget, and J. Ravnik, "A numerical model of the shortbread baking process in a forced convection oven," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 111, pp. 1304–1311, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.031.
- [17] C. Skjöldebrand, "Convection Oven Frying: Heat and Mass Transfer Between Air and Product," *J. Food Sci.*, vol. 45, no. 5, pp. 1354–1358, 1980, doi: 10.1111/j.1365-2621.1980.tb06553.x.
- [18] T. Dogan, M. Conger, M. Mousaviraad, T. Xing, and F. Stern, "Verification of Laminar and Validation of Turbulent Pipe Flows," vol. 1, pp. 1–48, 2013.
- [19] Launder B. E. and S. D. B., "MAN - ANSYS Fluent User' s Guide Release 15.0," *Knowl. Creat. Diffus. Util.*, vol. 15317, no. November, pp. 724–746, 2013.
- [20] A. Alonzo-García, C. del C. Gutiérrez-Torres, and J. A. Jiménez-Bernal, "Computational Fluid Dynamics in Turbulent Flow Applications," *Numer. Simul. - From Brain Imaging to Turbul. Flows*, 2016, doi: 10.5772/63831
- [21] Pijush K. Kundu, I. M. Cohen, and David R Dowling, *Fluid Mechanics* (6th edition). 2016.
- [22] Ansys, "Ansys-Course." <https://courses.ansys.com/>.
- [23] G. Richmond, "Modelos de turbulencia introductorio," no. September, pp. 1–16, 2019, doi: 10.13140/RG.2.2.21060.17289.

ANEXO A:

MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍAS EMPLEADAS
Es posible mejorar la eficiencia térmica del funcionamiento de un horno rosticero de alimentos	Mejorar la eficiencia térmica dentro del horno, controlando los flujos de convección natural mediante dispositivos que direccionan el movimiento de los gases calientes	Es factible reducir las pérdidas de calor de los gases de salida de un horno, usando deflectores de flujo que desvían los gases de combustión hacia zonas internas estratégicas	V. INDEPENDIENTE Temperatura de los gases emitido por el ducto del horno. V. DEPENDIENTE Eficiencia térmica del horno.	Combustibles gaseosos GLP Gas natural	Consumo de combustible	M. Cualitativa. M. Cuantitativa. M. Casuística.
PROBLEMA ESPECÍFICOS	OBJETIVO ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICOS		Cantidad de consumo de gases y aprovechamiento de su capacidad calorífica.	Diferencia de temperaturas antes y después de modificaciones	
¿Es factible desarrollar un cambio de direccionamiento de los flujos convectivos utilizando deflectores de flujo en un horno rosticero?	Realizar una simulación mediante CFD del flujo convectivo de los gases calientes procedentes desde el quemador del horno.	Reducir la temperatura de los gases de combustión de salida, ayudará a disminuir las pérdidas de calor		Experimentación y simulación.	Las temperaturas medias	
¿Es posible modificar los flujos convectivos para aumentar el aprovechamiento del calor y bajar la temperatura de salida de los gases en un horno rosticero?	Evaluar mediante una simulación de CFD los cambios de temperatura interna del flujo convectivo.	Ubicar deflectores de flujo de forma estratégica ayudará en la cocción de alimentos colocados en un horno.		Energía térmica.	Desviación estándar de las temperaturas	
¿Es posible realizar un análisis de CFD para evaluar los cambios de dirección del flujo convectivo en un horno rosticero?	Realizar un experimento del horno con/sin deflectores de flujo para evaluar los cambios de temperatura en el interior de un horno.	Dificultar la salida de gases mejorará la transferencia de calor a los alimentos colocados en un horno.				
		Cambiar el flujo de laminar a turbulento mediante desviadores de flujo aumentará la transferencia de calor interna.				

ANEXO B:
DIAGRAMA DE FLUJO DE LA SIMULACIÓN DE CFD EN ANSYS

La implementación numérica es desarrollada en Ansys-Fluent, considerando los procedimientos de “Pre-processing”, “Solver” y “Post-processing”, un diagrama de flujo de esta implementación es mostrada en la Figura B.1.

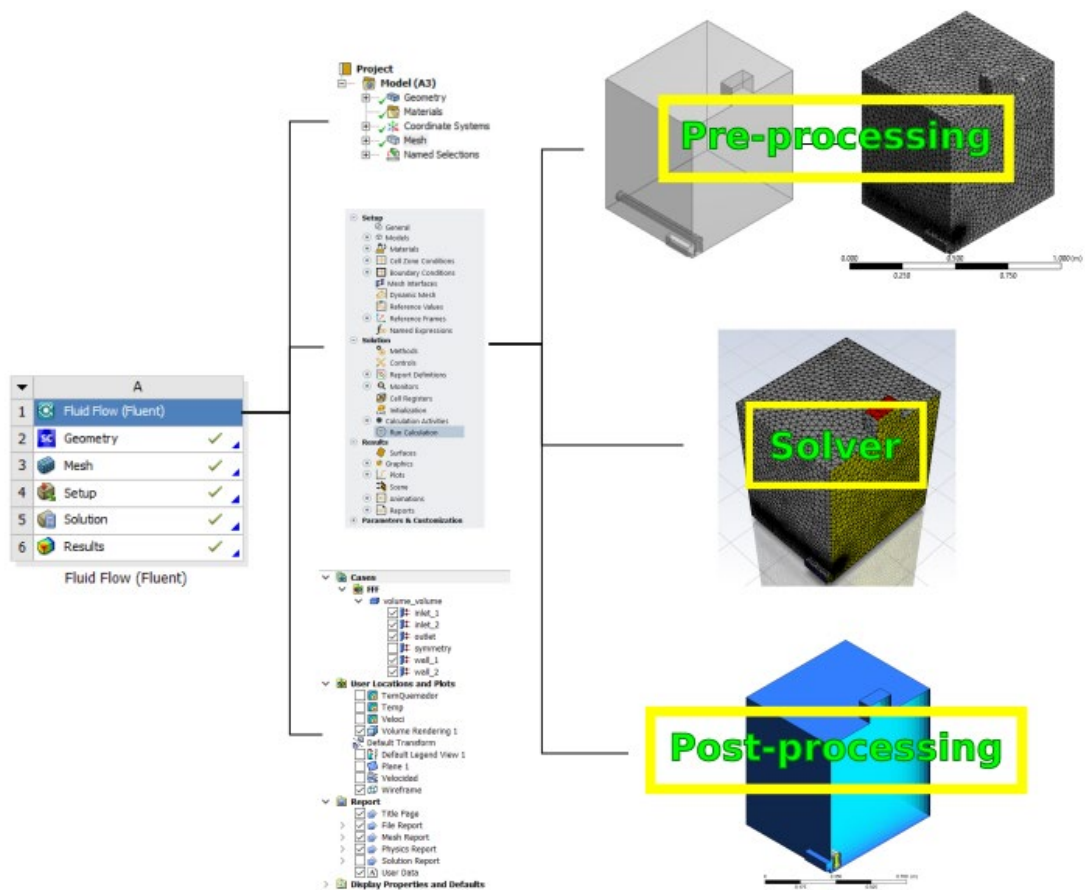


Figura B1. Etapa de las simulaciones numéricas del horno sin/con deflectores de flujo.