

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Proyecto Técnico:

“ANÁLISIS COMPUTACIONAL-EXPERIMENTAL DEL
COMPORTAMIENTO TÉRMICO AL INTERIOR DE UN HORNO DE
UNA COCINA DE INDUCCIÓN DE 24 PULGADAS”

Autores:

Xavier Marcelo Asitimbay Déleg.

Juan Virgilio Plaza Tepan.

Tutor:

Ing. Paúl Bolívar Torres Jara. M.Sc.

Cuenca-Ecuador

2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

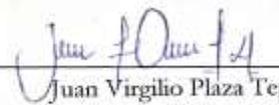
Nosotros: Xavier Marcelo Asitimbay Déleg con C.I.: 0105748396 y Juan Virgilio Plaza Tepan con C.I.: 0105678338, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: ***“Análisis computacional-experimental del comportamiento térmico al interior de un horno de una cocina de inducción de 24 pulgadas”***, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecánico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre del 2018



Xavier Marcelo Asitimbay Déleg
C.I. 0105748396

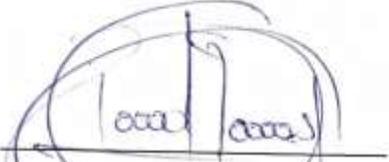


Juan Virgilio Plaza Tepan
C.I. 0105678338

CERTIFICACIÓN

Yo, Paul Bolívar Torres Jara, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación ***“Análisis computacional-experimental del comportamiento térmico al interior de un horno de una cocina de inducción de 24 pulgadas”***, realizado por los estudiantes Xavier Marcelo Asitimbay Déleg y Juan Virgilio Plaza Tepan, obteniendo el *Proyecto Técnico* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, noviembre del 2018.



Ing. Paul Bolívar Torres Jara. M.Sc.
C.I. 0102776036

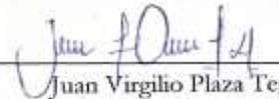
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros: Xavier Marcelo Asitimbay Déleg con C.I.: 0105748396 y Juan Virgilio Plaza Tepan con C.I.: 0105678338, autores del trabajo de titulación: ***“Análisis computacional-experimental del comportamiento térmico al interior de un horno de una cocina de inducción de 24 pulgadas”***, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, noviembre del 2018.



Xavier Marcelo Asitimbay Déleg
C.I. 0105748396



Juan Virgilio Plaza Tepan
C.I. 0105678338

DEDICATORIA

A mi padre Marcelo por su apoyo incondicional durante todos mis años de formación académica y humana.

A mi madre Narcisa por todo su amor, consejos y cuidados que me ha brindado durante todos mis años de vida.

A mi hermano David por su compañía en todo momento.

A mi tía Bertha, mis primos: Marco, Janneth, Freddy gracias por sus consejos.

Se lo dedico a mi familia y amigos de la universidad que siempre me apoyaron.

A Dios por su bendición y fuerzas para seguir adelante en la vida.

Xavier.

AGRADECIMIENTO

A mi padre, sin ti no sería lo que hoy en día soy, gracias por nunca dudar de mis capacidades y siempre apoyarme.

A mi madre, gracias por brindarme tu amor, compañía, cuidados, estoy agradecido con la vida de tenerte como mi mamá.

A mi familia por siempre estar pendientes de mí, sus consejos y apoyo me han servido de mucho para llegar a donde estoy.

A nuestro director de tesis el Ing. Paúl Torres, gracias por su apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto.

A la Universidad Politécnica Salesiana y a sus docentes por su dedicación y esfuerzo para formar profesionales de bien.

A mis amigos, gracias por su compañía.

Y al más importante de todos DIOS.

Xavier.

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado de manera especial a mi hijo Christopher por ser mi más grande fuente de motivación e inspiración para superarme día a día.

A mis hermanos Wilmer y Manuel por su confianza y apoyo desinteresado permitieron que llegue a cumplir esta meta.

A mis queridos padres por haberme forjado como la persona que soy, por sus palabras de aliento y motivación en los momentos más difíciles.

A mi esposa por su cariño, comprensión y apoyo incondicional durante todo este proceso

Por último y no menos importante a Claudio, Luis, Angelita, Rosario, Santiago y Ana por todos sus buenos deseos y por estar ahí cuando más los necesite.

Juan

AGRADECIMIENTO

A Dios por guiarme a lo largo de mi existencia quien con su bendición llena mi vida y por darme una familia que siempre me brindó su apoyo incondicional lo cual me ayudo alcanzar esta meta, a la Universidad Politécnica Salesiana, a sus docentes y de manera especial mis agradecimientos al Ing. Paul Torres Jara por su apoyo, consejos, conocimientos y críticas constructivas durante todo el proceso.

Juan

RESUMEN

El presente proyecto técnico tiene como propósito analizar el comportamiento térmico en el interior de un horno eléctrico integrado en una cocina de inducción de 24 pulgadas. Se plantea una metodología que permita analizar la distribución de calor en cuatro puntos ubicados en la zona central del horno, lugar, donde la distribución de temperatura debe ser homogénea para garantizar una cocción uniforme en los alimentos. Se analiza este comportamiento mediante la adquisición de datos experimentalmente y a través de un estudio computacional desarrollado en el módulo CFX de ANSYS, donde se modela el interior del horno y la resistencia eléctrica cuyo calentamiento se representa mediante una ecuación polinómica de tercer grado. Para calcular el flujo de aire en el interior del horno se optó por un modelo de flujo laminar, además se incluyó la radiación como mecanismo de transferencia de calor a través del modelo Surface to Surface (S2S).

Analizando comparativamente los datos adquiridos, el modelado computacional representa la distribución de calor del sistema real, obteniendo errores promedio máximo de 10.64°C validando así la metodología propuesta.

Palabras clave: Horno eléctrico, cocina de inducción, comportamiento térmico, dinámica de fluidos computacional.

ABSTRACT

The present technical project has as purpose analyze the thermal behavior in the inside an electric oven integrated in 24 inch a induction kitchen.

A methodology is established to analyze the heat distribution in four points located in the central zone of the oven, where the heat distribution must be homogeneous to ensure a uniform cooking in the food. This behaviour is analyzed through the experimental data acquisition and through of a computational study developed in the module CFX of ANSYS, where is modeled the inside of a oven and the electric resistance whose warming is represent through by a equation third degree polynomial. To calculate the air flow inside the oven, a laminar flow model was chosen, and radiation was included as a heat transfer mechanism through the Surface to Surface model (S2S).

Analyzing comparatively the data acquired, the computacional modeled represent the heat distribution of the real system, obtaining maximum error average of 10.64°C validating the methodology proposed.

Keywords: *Electric oven, induction cooker, thermal behavior, computational fluid dynamics.*

ÍNDICE

1. Introducción	1
2. Problema	1
2.1. Antecedentes.....	1
2.2. Importancia y alcance.....	2
2.3. Delimitación.....	2
3. Objetivos	3
3.1. Objetivo general.....	3
3.2. Objetivos específicos.....	3
4. Marco teórico referencial	3
4.1. Hornos de cocina.....	3
4.2. Tipos de hornos domésticos.....	3
4.2.1. Horno clásico.....	3
4.2.2. Hornos de bóveda.....	4
4.2.3. Hornos de convección.....	4
4.2.4. Cocinas con hornos incorporados.....	4
4.3. Partes principales de los hornos domésticos.....	5
4.3.1. Cámara de calentamiento.....	5
4.3.2. Revestimiento aislante.....	5
4.3.3. Resistencias eléctricas.....	6
4.3.4. Termopares.....	6
4.4. Elaboración de partes y piezas para el sector de línea blanca en el Ecuador.....	7
4.4.1. Requisitos para artefactos de uso doméstico en el Ecuador.....	7
4.5. Mecanismos de transferencia de calor.....	7
4.5.1. Transferencia de calor por conducción.....	8
4.5.2. Transferencia de calor por convección.....	9
4.5.3. Transferencia de calor por radiación.....	11
4.5.4. Concepto de resistencia térmica para una pared plana.....	12
4.5.5. Concepto de resistencia térmica para una pared compuesta.....	13
4.6. Números adimensionales.....	13
4.6.1. Número de Reynolds.....	14
4.6.2. Número de Nusselt.....	14
4.6.3. Número de Prandtl.....	14

4.7.	Fundamentos teóricos de dinámica de fluidos computacional.....	15
4.7.1.	Estructura de CFD	15
4.7.1.1.	Pre-Proceso	15
4.7.1.2.	Resolución	16
4.7.1.3.	Post-proceso.....	16
4.7.2.	Ecuaciones de la dinámica de fluidos, transferencia de calor y masa.....	16
4.7.3.	Ecuación de conservación de masa.....	16
4.7.4.	Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento	17
4.7.5.	Ecuación de energía.....	17
5.	Marco metodológico	17
5.1.	Proceso de la investigación	18
5.2.	Descripción del horno doméstico analizado.....	19
5.2.1.	Materiales de construcción	21
5.3.	Análisis experimental.....	22
5.3.1.	Selección de instrumentos de medición.....	22
5.3.1.1.	Cámara termográfica Testo 875	22
5.3.1.2.	Termocupla Tipo K PT100	22
5.3.1.3.	Transmisor MAX6675.....	23
5.3.1.4.	Arduino Uno.....	23
5.3.2.	Configuración del hardware	25
5.3.2.1.	Interfaz PLX-DAQ.....	25
5.3.3.	Selección de puntos de medición	25
5.3.4.	Condiciones para la adquisición de datos.....	27
5.3.5.	Datos obtenidos	27
5.4.	Análisis Matemático.....	32
5.4.1.	Determinación de la velocidad del flujo de aire	32
5.4.2.	Cálculo del coeficiente convectivo externo.....	32
5.4.3.	Cálculo del coeficiente convectivo interno	34
5.4.4.	Calculo del coeficiente de transferencia de calor por radiación interna.....	35
5.4.5.	Cálculo de resistencias térmicas en paredes compuestas	35
5.4.5.1.	Cálculo de resistencia térmica en las paredes laterales.....	37
5.4.6.	Cálculo de transferencia de calor total	39
5.4.6.1.	Transferencia de calor en paredes laterales	40
5.5.	Análisis computacional.....	40
5.5.1.	Creación de la geometría a simular.....	40
5.5.2.	Definición del dominio computacional.....	41

5.5.3.	Mallado	42
5.5.3.1.	Oblicuidad (<i>Skewness</i>)	43
5.5.3.2.	Calidad Ortogonal (<i>Orthogonal Quality</i>)	43
5.5.4.	Configuración tipo de análisis (<i>Set Up</i>)	44
5.5.5.	Configuración del dominio (<i>Default Domain</i>).....	44
5.5.6.	Configuración de condiciones de contorno.....	45
5.5.7.	Ingreso de la función matemática.....	46
5.5.8.	Solucionador (<i>Solver</i>)	48
5.5.9.	Resultados de la simulación.....	48
6.	Resultados	51
6.1.	Validación del comportamiento del sistema.....	51
7.	Conclusiones	56
8.	Recomendaciones	56
9.	Trabajos futuros	56
10.	Referencias Bibliográficas	57
11.	Anexos	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Horno de sobremesa eléctrico	3
Figura 2. Horno de leña con esquinas redondeadas.....	4
Figura 3. Horno industrial de convección forzada.....	4
Figura 4. Elementos que constituyen un horno eléctrico doméstico. Adaptado de.....	5
Figura 5. Resistencia eléctrica tubular utilizada en hornos domésticos.....	6
Figura 6. Termopar coaxial	6
Figura 7. Conducción de calor a través de una pared plana de espesor (Δx) y área (A).....	8
Figura 8. Desarrollo de la capa límite en la transferencia de calor por convección.	9
Figura 9. Procesos de transferencia de calor por convección (a) Convección Forzada. (b) Convección Natural	10
Figura 10. Transferencia de calor por radiación entre una superficie y las superficies que la circulan.....	11
Figura 11. Red de resistencia térmica para la transferencia de calor en una pared plana de dos capas.....	13
Figura 12. Disciplinas que involucran CFD.	15
Figura 13. Flujograma del proceso de investigación..	19
Figura 14. Cocina de inducción utilizada para el estudio.....	19
Figura 15. Dimensiones de la niquelina.....	20
Figura 16. Interior del horno en estudio.	20
Figura 17. Cámara termográfica TESTO 875	22
Figura 18. Termocupla K tipo tornillo.	23
Figura 19. Transmisor MAX6675.	23
Figura 20. Esquema de la conexión entre un transmisor – Arduino- Termocupla.	24
Figura 21. Circuito electrónico utilizado para la recolección de datos.	24
Figura 22. Interfaz PLX-DAQ.....	25
Figura 23. Ubicación de los puntos de medición (a) Experimental, (b) Computacional.....	26
Figura 24. Distribución de temperaturas en diferentes zonas al interior del horno, medición 1..	28
Figura 25. Distribución de temperaturas en diferentes zonas al interior del horno, medición	29
Figura 26. Distribución de temperaturas en diferentes zonas al interior del horno, medición 3..	30
Figura 27. Distribución de temperaturas promedio en diferentes zonas al interior del horno.	31
Figura 28. Distribución de temperaturas a diferentes velocidades.	32
Figura 29. Esquema para las resistencias a la convección y radiación en una superficie.....	36
Figura 30. Estructura de las paredes laterales.....	37
Figura 31. Geometría del espacio interior del horno y la resistencia eléctrica.....	41
Figura 32. Dominio computacional de la geometría del horno.....	41
Figura 33. Mallado del dominio computacional del espacio interior del horno.	43
Figura 34. Calidad oblicua del mallado: (a) Rango de trabajo, (b) Calidad de mallado obtenido..	43
Figura 35. Calidad ortogonal del mallado (a) Rango de trabajo, (b) Calidad obtenida..	44

Figura 36. Análisis termográfico de la niquelina.....	47
Figura 37. Curva de comportamiento de la temperatura de la niquelina con ajuste polinomial.	48
Figura 38. Plano colocado para el análisis en la zona central del horno..	49
Figura 39. Contornos de la distribución de temperaturas en el dominio del tiempo.....	49
Figura 40. Contorno de la distribución del flujo de aire (vectores de velocidad).	50
Figura 41. Resultados numéricos vs. Datos experimentales de la distribución de temperatura (zona central)..	52
Figura 42. Resultados numéricos vs. Datos experimentales de la distribución de temperatura (Pared Lateral Izquierda).....	53
Figura 43. Resultados numéricos vs. Datos experimentales de la distribución de temperatura (Pared Lateral Derecha)..	54
Figura 44. Resultados numéricos vs. Datos experimentales de la distribución de temperatura (Pared Posterior)..	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Participación de marcas en el mercado ecuatoriano.....	7
Tabla 2. Conductividad térmica de los materiales que conforman el horno.	9
Tabla 3. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección	10
Tabla 4. Emisividades de materiales utilizados en el horno.	12
Tabla 5. Dimensiones internas del horno.	20
Tabla 6. Características de los materiales de construcción.....	21
Tabla 7. Materiales que conforman las paredes del horno.....	21
Tabla 8. Posiciones de los puntos seleccionados para la medición.....	26
Tabla 9. Condiciones de funcionamiento del horno para la adquisición de datos..	27
Tabla 10. Temperaturas registradas en diferentes zonas al interior del horno, medición 1.....	28
Tabla 11. Temperaturas registradas en diferentes zonas al interior del horno, medición 2.....	29
Tabla 12. Temperaturas registradas en diferentes zonas al interior del horno, medición 3.....	30
Tabla 13. Temperaturas promedio en diferentes zonas al interior del horno.....	31
Tabla 14. Propiedades del aire analizado al exterior del horno.....	32
Tabla 15. Propiedades del aire analizado en el interior del horno.....	34
Tabla 16. Condiciones para el análisis por radiación en el interior del horno..	35
Tabla 17. Conductividad térmica de los materiales de las paredes del horno.....	37
Tabla 18. Conductividad térmica de los materiales de las paredes del horno.....	39
Tabla 19. Resistencias térmicas de cada pared del horno..	39
Tabla 20. Transferencia de calor producido en cada pared.....	40
Tabla 21. Condiciones iniciales para el tipo de análisis..	44
Tabla 22. Propiedades del fluido de entrada.....	45
Tabla 23. Configuración del fluido de entrada.....	45
Tabla 24. Configuración condiciones de contorno..	45
Tabla 25. Datos de temperatura medidos en tres puntos.....	47
Tabla 26. Expresión de entrada.....	48
Tabla 27. Características del ordenador..	48
Tabla 28. Errores absolutos y relativos registrados en la zona central..	52
Tabla 29. Errores absolutos y relativos registrados en la pared lateral izquierda.....	53
Tabla 30. Errores absolutos y relativos registrados en la pared lateral derecha..	54
Tabla 31. Errores absolutos y relativos registrados en la pared posterior.....	55

1. Introducción

Los hornos eléctricos normalmente se utilizan a niveles domésticos e industriales con la finalidad de secar o cocinar alimentos panificados o cárnicos, mismos que son de consumo masivo. Mediante el uso de los hornos los productos toman características organolépticas formándose una capa superficial deshidratada así como la agudización de sabores y aromas obtenidas únicamente con esta técnica de cocción. La energía calorífica necesaria para el funcionamiento del horno puede obtenerse a través de la combustión (leña, gas u otro combustible), energía eléctrica (resistencias) [1], [2].

La energía gastada durante el proceso de horneado se distribuye en energía transferida a los alimentos y pérdidas al ambiente, la primera de estas se utiliza para el calentamiento de productos cárnicos con la finalidad de alcanzar una temperatura de seguridad microbiológica o alcanzar una temperatura de gelatinización de almidón en el caso de los productos panificados. En estos tipos de alimentos se presenta una pérdida de peso debido a la evaporación de agua lo que significa un elevado consumo energético, llegando a ser el calor latente mayor que el calor sensible intercambiado. Por otra parte existe pérdida de la energía calorífica utilizada en el equipo hacia el exterior a través de sus paredes y durante la abertura/cierre de la puerta [2], [3].

Desde el año 2014 el Estado ecuatoriano busca implementar cocinas de inducción en los hogares, con la finalidad de promover el uso de la electricidad, este proyecto busca reemplazar las cocinas que utilizan gas licuado de petróleo (GLP), que representan un alto gasto económico en el subsidio para el Estado [4]. Por tal motivo se ha incentivado la fabricación de cocinas de inducción por parte de la industria nacional, ofreciendo así diversos modelos entre los cuales tenemos hornillas simples y cocinas con hornos incorporados, los cuales pueden ser eléctricos o de inducción.

Debido a la implementación de este tipo de cocinas es importante el desarrollo de estudios que se enfoquen en analizar el fluido en el interior del horno, su distribución, velocidad, etc.

El movimiento de los fluidos generalmente dificulta un análisis a través de las ecuaciones que lo gobiernan, las mismas que no son lineales y muy complejas para una solución analítica por tal razón se emplean métodos numéricos o aproximados para encontrar una solución, uno de estos métodos se lo conoce como dinámica de fluidos computacional (CFD por siglas en inglés) el cual utiliza un método por elementos finitos con el objetivo de reducir las ecuaciones [5].

En este proyecto se plantea un análisis computacional-experimental de la distribución de calor en el interior de un horno eléctrico doméstico, mediante el modelado computacional a través del módulo CFX del software ANSYS y la adquisición de temperaturas utilizando termocuplas tipo K, todo esto con la finalidad de validar el modelo computacional desarrollado.

2. Problema

A continuación, se plantean los antecedentes donde se precisan investigaciones sobre la distribución de calor en hornos domésticos. Se formula la importancia y se delimita el alcance que tendrá este proyecto.

2.1. Antecedentes

La distribución de calor en el interior de un horno afecta directamente en la calidad de alimentos cocinados. Por tal motivo se han realizado estudios experimentales para conocer el comportamiento térmico en el interior del horno los cuales han dado como resultado que las zonas donde existen mayor

concentración de calor son las más cercanas a la resistencia eléctrica (piso y laterales) mientras que la zona donde mayor pérdida de calor existe está en la puerta, otro factor que influye en una deficiente distribución de la temperatura es la ubicación del sensor mismo que influye en el encendido o apagado de la resistencia eléctrica [3].

Para complementar los estudios experimental, en los últimos años las investigaciones incluyen estudios computacionales CFD (*Computational Fluid Dynamics*), esto gracias al aumento de la capacidad de cálculo en las computadoras sumado al surgimiento de programas para resolver las ecuaciones de movimiento. El modelado CFD de un horno eléctrico implica un campo de flujo convectivo, inestable y natural junto con la transferencia de calor radiactivo. A lo largo de investigaciones se han desarrollado modelos en hornos industriales, mediante los cuales se han realizado cambios en su geometría, configuraciones de los componentes, capacidad de flujo, etc. con el objetivo de estudiar cómo homogeneizar la distribución de calor en el interior [6], [7].

Prueba de esto es el análisis del comportamiento del fluido en un horno por convección forzada al cual se le modificó la ubicación del ventilador para que redirija de una mejor manera el flujo en interior dando como resultado una mejor uniformidad térmica a comparación que el análisis realizado con el ventilador en la posición original [8].

En la actualidad la identificación, etiquetado, y clasificación de equipos en función de su consumo energético no se destina a toda la serie de cocinas disponibles, solo la gama más alta posee una clasificación energética. Considerando esto se observa una gran oportunidad y necesidad de realizar estudios de eficiencia energética en cocinas debido a que el uso de cocinas con hornos eléctricos va en aumento, debido a que el gas natural o el gas licuado son combustibles no renovables por lo cual se planifica disminuir su uso [2]. Una prueba de esto es que en el país desde el año 2014, cuando inició el programa de eficiencia energética para cocción por inducción, hasta el año 2017 se vendieron un total de 750 mil unidades entre cocinas y encimeras de inducción [9].

Es por esto que es importante garantizar una distribución homogénea de calor en el interior del horno con la finalidad de garantizar una eficiencia energética, la cual consiste en “realizar un aprovechamiento óptimo de la energía, y ello no implica renunciar a la calidad de vida sino obtener los mismos bienes, servicios y realizar las mismas actividades sin desperdiciarla” [10].

2.2. Importancia y alcance

La distribución de calor dentro de un horno tiene un impacto significativo en la calidad de los alimentos cocinados, al existir una deficiente distribución el rendimiento del horno no será el óptimo, por tal motivo se busca realizar un estudio del comportamiento térmico en el interior del horno en zonas o puntos donde comúnmente son colocados alimentos cárnicos o panificados, esto, mediante el uso computacional de herramientas CFD así como de pruebas experimentales realizadas a través de sensores. Todo esto con la finalidad de establecer un estudio térmico para que en futuras investigaciones se pueda realizar cambios como su geometría, potencia de la resistencia, configuración de sus componentes, etc. en hornos con dimensiones y formas similares al presentado en este proyecto.

2.3. Delimitación

El presente trabajo de titulación se enfoca en el análisis experimental-computacional del comportamiento térmico en el interior de un horno eléctrico de una cocina de inducción de 24 pulgadas adquirida por los autores, además el financiamiento de todo el proyecto será cubierto por los mismos.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Analizar el comportamiento térmico en el interior de un horno de una cocina de inducción de 24 pulgadas.

3.2. Objetivos específicos

- Establecer las condiciones iniciales de funcionamiento del horno eléctrico.
- Adquirir datos experimentales en diferentes zonas en el interior del horno.
- Analizar la distribución de temperatura del sistema en sus diferentes zonas mediante el uso del software Ansys Workbench.
- Validar la simulación del comportamiento del sistema.

4. Marco teórico referencial

En este apartado se detallan conceptos sobre los hornos domésticos, partes, funcionamiento, materiales de construcción, etc. Además se explica los mecanismos de transferencia de calor presentes en este sistema.

4.1. Hornos de cocina

El horno es un espacio cerrado conformado por láminas de acero, usado para asar, cocinar o dorar alimentos en su interior [11]. Hoy en día existe una gran variedad de hornos, los cuales se diferencian por sus características y prestaciones, a continuación se va a analizar las características de los hornos clásicos y los de convección.

4.2. Tipos de hornos domésticos

4.2.1. Horno clásico

En estos hornos el calor se transmite de forma desordenada en su interior, requiere de una vigilancia continua de los productos colocados en este, además requiere de calentamiento previo. Estos pueden ser de gas o eléctricos [12].



Figura 1. Horno de sobremesa eléctrico. [13]

4.2.2. Hornos de bóveda

Estos hornos se asemejan a los construidos con adobe, ladrillo refractario, piedra, etc. Debido a que están construidos por un material con bajo coeficiente de conductividad térmica, su tiempo de calentamiento es lento y a su vez uniforme.

En la Figura 2 podemos observar un horno de bóveda en funcionamiento [12].



Figura 2. Horno de leña con esquinas redondeadas. [12].

4.2.3. Hornos de convección

Este tipo de hornos posee uno o varios ventiladores de tal manera que circula el aire caliente de forma forzada obteniendo una cocción uniforme del alimento, a más de expeler en gran parte la humedad de los mismos. La cocción puede llegar a ser un 30% más rápida que una cocción obtenida por un horno clásico obteniendo una reducción en el gasto energético. Están equipados con guías para placas y recipientes lo que proporciona un aumento en la capacidad de producción, en la Figura 3 tenemos un horno eléctrico con dos ventiladores y la capacidad para siete bandejas diseñado para cocinar todo tipo de productos [12] [13].



Figura 3. Horno industrial de convección forzada. [13]

4.2.4. Cocinas con hornos incorporados

Normalmente las cocinas sea de gas, eléctricas o inducción vienen incorporadas con hornos, el principio de funcionamiento de estos son los mismos que los hornos clásicos o de convección

explicados anteriormente. Este proyecto se basará en esta clase de hornos y para profundizar el tema se detallan algunas de sus partes y componentes en el siguiente apartado.

4.3. Partes principales de los hornos domésticos

En este apartado se detallan las partes de un horno eléctrico incorporado en una cocina de inducción por ser el sistema analizado en esta investigación. Dentro de las partes principales tenemos: A) Cámara de calentamiento, B) Revestimiento aislante, C) Resistencias eléctricas, D) Termopar.

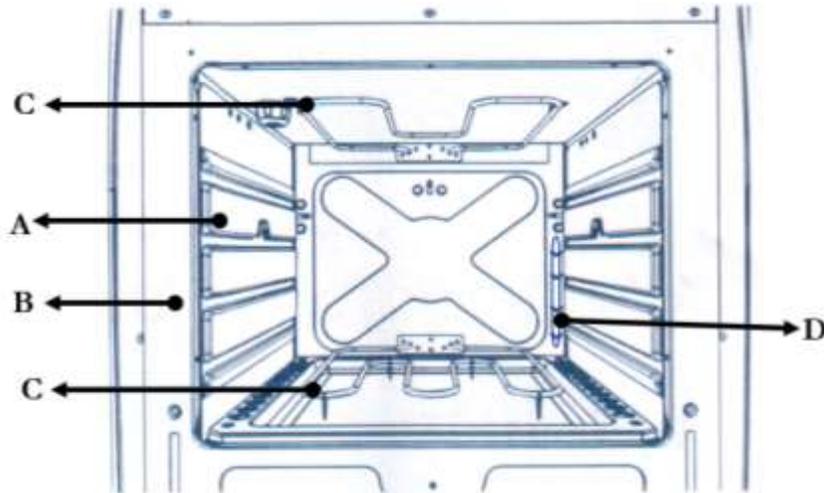


Figura 4. Elementos que constituyen un horno eléctrico doméstico. Adaptado de [14].

4.3.1. Cámara de calentamiento

Es el espacio físico donde se realiza el proceso de cocción o asado de los alimentos, dentro de este espacio existen correderas formadas en las paredes laterales las cuales sirven para colocar accesorios tales como bandejas, parrillas y utensilios necesarios para hornear.

Los materiales utilizados para la construcción de la cámara del horno y para la industria alimenticia en general son aceros inoxidable austeníticos de las series 2XX y 3XX siendo los más recomendados los aceros inoxidable 301, 302, 302B o 304, otro tipo de material utilizado son los aceros EK2 a los cuales se les realiza un procesos de esmaltado requisito muy importante en lo que respecta a higiene y resistencia bacteriológica, este proceso de esmaltación se realiza por pistola o por deposición electrostática todo este proceso se lo realiza basado en los requisitos de la norma BS EN 10209:2013 (Productos de acero de bajo carbono laminados en frío para esmaltado vítreo). La principal característica que presentan estos aceros es que sus propiedades mecánicas se mantienen a elevadas temperaturas (700-1100°C), con esto se evita la contaminación de los alimentos durante la cocción [15] [16].

4.3.2. Revestimiento aislante

El revestimiento térmico integrado en el horno busca disminuir las pérdidas del calor generado en el interior hacia el medio ambiente por otra parte también es utilizado como un sistema de protección para los usuarios los mismos que están en contacto con los alrededores del horno [17].

Según la norma NTE INEN 2 259:2000 (Artefactos de uso doméstico para cocinar, que utilizan combustibles gaseosos. Requisitos e inspección., 2000), “La temperatura exterior de la cara frontal (incluido el vidrio de la puerta del horno) y los costados del artefacto no debe sobrepasar la temperatura

ambiente en más de 100°C, excepto que se permiten puntos que tengan una superficie igual o menor que 1 cm², siempre que no sean agujeros” [11].

4.3.3. Resistencias eléctricas

La generación de calor en el interior de los hornos principalmente de los eléctricos o inducción se obtiene a través de resistencias eléctricas también llamadas niquelinas, usualmente están formadas por hilos de aleaciones de níquel y cromo, pueden alcanzar temperaturas hasta los 1300°C. El principio de funcionamiento consiste en transformar la energía eléctrica en energía calorífica, en el instante que circula corriente eléctrica a través de la niquelina esta encuentra una oposición a su paso, para vencer esta oposición se genera un trabajo el mismo que produce una elevación de temperatura. Existen diferentes formas geométricas para las resistencias que van desde tubulares (Figura 5), cartucho, tira, banda, cada una de estas diseñadas para aplicarse en hornos, secadores, inyectoras, etc. [18].

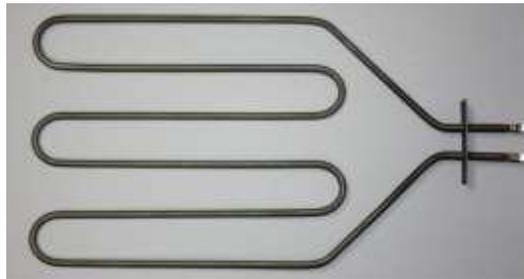


Figura 5. Resistencia eléctrica tubular utilizada en hornos domésticos. [19]

4.3.4. Termopares

El principio de funcionamiento de un termopar se basa en la circulación de corriente sobre un circuito formado por dos metales distintos cuyas uniones se mantienen a diferentes temperaturas en esas condiciones existe en sus extremos una diferencia potencial llamada fuerza electromotriz termoeléctrica conocida como el efecto Seebeck. Esta fuerza presenta en forma de tensión eléctrica muy baja que posterior se introduce en un controlador el cual se encarga en amplificar la señal para posterior convertirla en grados centígrados o Fahrenheit [20]. Los termopares son utilizados en los hornos con la finalidad de censar la temperatura del aire circundante en su interior, normalmente estos termopares se encuentran colocados en la parte posterior de la cámara de calentamiento apoyado verticalmente sobre el vértice superior.



Figura 6. Termopar coaxial. [21]

4.4. Elaboración de partes y piezas para el sector de línea blanca en el Ecuador

En Ecuador, de acuerdo a la Asociación de industriales de línea blanca: “La industria nacional de línea blanca se abastece en alrededor del 50% con partes y piezas que se fabrican en el país. El resto se importa, sin embargo, el sector considera que un 30% de lo que se compra en el exterior se podría sustituir con la producción local” [22]. Dentro de la industria de línea blanca encontramos la elaboración de lavadoras, hornos, congeladores, cocinas, etc. Cinco empresas lideran el ensamblaje de artículos de línea blanca entre cocinas y refrigeradoras estos son: DUREX, INDURAMA, ECASA, MABE y GE [22], la participación de las mismas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Participación de marcas en el mercado ecuatoriano. [22]

Marca	Participación
DUREX	37%
INDURAMA	32%
ECASA	15%
MABE	14%
GE	2%

4.4.1. Requisitos para artefactos de uso doméstico en el Ecuador

En el país se aplica la norma NTE INEN 259:2000 la cual establece requisitos que deben de cumplir artefactos de uso doméstico para cocinar, entre estos requisitos tenemos condiciones de funcionamiento, tipo de instalaciones, tipo materiales, entre otros. Enfocándonos en requisitos como el tipo de material, condiciones de funcionamiento, tenemos los siguientes [11]:

- Los elementos del artefacto deben resistir a las acciones mecánicas, químicas y térmicas a la que se encuentren expuestos durante su funcionamiento.
- Para la fabricación de una cocina, no se utilizará materiales de asbesto o derivados del mismo.
- El espacio útil del horno debe ser igual o mayor a 18dm^3 para cocinas con dos quemadores en la cubierta e igual o superior a 30dm^3 para cocinas con cuatro quemadores en la cubierta.
- El tiempo aproximado para llegar al 85% de la temperatura máxima del horno en el centro es de 20 min.
- Las temperaturas seleccionadas a través del termostato deben oscilar entre $\pm 5\%$ del valor indicado.

4.5. Mecanismos de transferencia de calor

Para comenzar con el estudio de los mecanismos de transferencia de calor partamos por conocer la diferencia entre temperatura y calor. El calor se define como energía en tránsito, es decir fluye desde una región de mayor hacia una de menor temperatura, siempre y cuando el volumen de la zona se mantenga constante. Por otra parte la temperatura es una magnitud física la cual se refiere a la sensación de frío o caliente que emita una sustancia. La materia está formada por átomos o moléculas que se encuentran en constante movimiento los cuales producen choques entre sus átomos transformando la

energía cinética en calor, modificando así la temperatura del cuerpo. Cuando dos cuerpos que tienen distintas temperaturas se ponen en contacto entre sí, se produce una transferencia de calor desde el cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura. La transferencia de calor se puede realizar por tres mecanismos físicos: conducción, convección y radiación [23].

4.5.1. Transferencia de calor por conducción

La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia debido a las interacciones entre las mismas. Las temperaturas más elevadas se relacionan con las energías moleculares altas y cuando las moléculas cercanas chocan, existe una transferencia de energía de las moléculas más energéticas a las menos energéticas. En presencia de un gradiente de temperatura la transferencia de energía por conducción debe suceder en dirección de la temperatura decreciente. La razón de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta área, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa [24], [25], esto se representa en la ecuación 1.

$$\dot{Q}_{cond} = k \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W) \quad (1)$$

Donde:

k: Constante de conductividad térmica ($W/m \cdot K$).

A: Área (m^2).

T₁: Temperatura en la superficie externa ($^{\circ}C$).

T₂: Temperatura en la superficie interna ($^{\circ}C$).

Δ_x: Espesor (m).

El calor es conducido en sentido de la temperatura decreciente, el signo negativo de la ecuación 1 asegura que la transferencia de calor en el sentido X positiva sea un valor positivo (Figura 7).

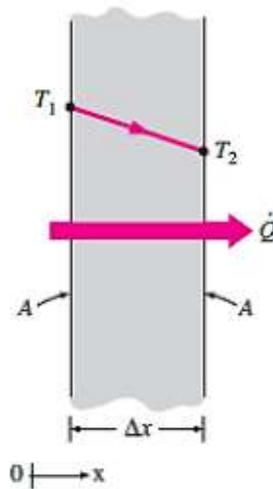


Figura 7. Conducción de calor a través de una pared plana de espesor (Δx) y área (A) [23].

La conductividad térmica es la facultad que tienen los materiales para conducir calor, un valor elevado indica que el material es un buen conductor y viceversa en la Tabla 2, se observa valores de conductividad térmica para algunos materiales a temperatura ambiente.

Tabla 2. Conductividad térmica de los materiales que conforman el horno. [23]

Material	$k, W/m \cdot ^\circ C$
Aluminio	237
Lámina galvanizada	16.7
Vidrio	0.78
Fibra de vidrio	0.043
Aire	0.026
Acero Inoxidable	15.6

4.5.2. Transferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección está conformada por la transferencia de energía por el movimiento molecular aleatorio y por la energía transferida mediante el movimiento global de un fluido.

La convección ocurre entre un fluido en movimiento y una superficie limitante cuando estos tienen diferentes temperaturas. Como observamos en la Figura 8 la interacción del fluido-superficie es el desarrollo de una región en el fluido en la que la velocidad cambia de cero en la superficie a un valor finito, esta región del fluido se conoce como capa límite hidrodinámica [24].

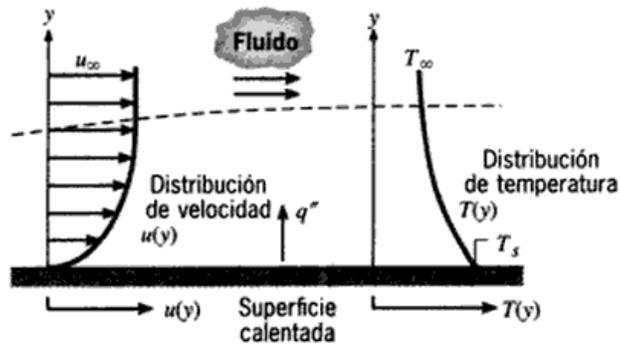


Figura 8. Desarrollo de la capa límite en la transferencia de calor por convección. [24]

Para expresar el efecto total de la convección, utilizamos la ley de enfriamiento de Newton que se expresa en la ecuación 2:

$$\dot{Q}_{conv} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) \quad (W) \quad (2)$$

Donde:

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

A_s : Área superficial (m^2).

T_s : Temperatura en la superficie ($^\circ C$).

T_∞ : Temperatura del fluido alejado de la superficie ($^\circ C$).

La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo a la naturaleza del flujo, tenemos una convección forzada cuando el flujo es ocasionado por medios externos como puede ser un ventilador, una bomba, etc. Un ejemplo de esto es un ventilador utilizado para enfriar componentes eléctricos calientes sobre un arreglo de tarjetas de circuitos impresos (Figura 9a) [24].

En la convección natural el flujo es inducido por fuerzas de empuje que se forman por la diferencias de densidad causado por la por la variación de temperaturas del fluido, un ejemplo de esto ocurre en los componentes calientes de tarjetas de circuitos en aire inmóvil (Figura 9b), donde el aire que hace contacto con este cuerpo experimenta un aumento de temperatura disminuyendo su densidad, al ser más ligero que el aire de sus alrededores la fuerzas de empuje inducen un movimiento vertical por lo que el aire caliente que asciende de las tarjetas es reemplazado por un flujo de entrada de aire ambiente más frío [24].

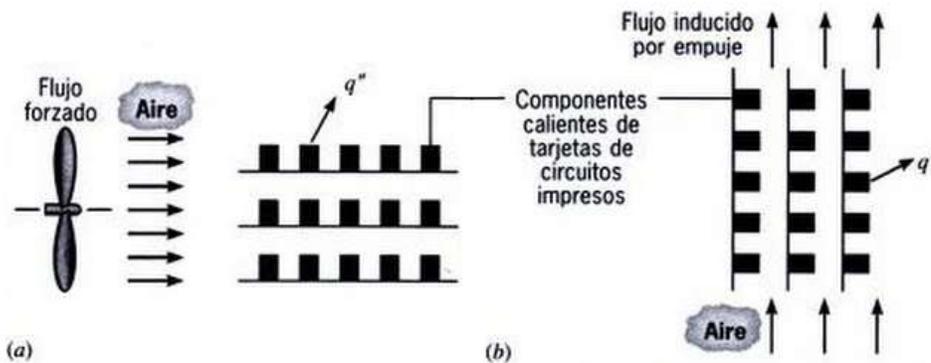


Figura 9. Procesos de transferencia de calor por convección (a)Convección Forzada. (b)Convección Natural. [24]

El coeficiente de transferencia de calor por convección h no es una propiedad del fluido, es un parámetro que se determina en forma matemática y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad del mismo. En la Tabla 3 se encuentran valores típicos de coeficientes de convección.

Tabla 3. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección [23].

Tipo de convección	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
Convección libre de gases	2 – 5
Convección libre de líquidos	10-1000
Convección forzada de gases	25-250
Convección forzada de líquidos	50-20000
Ebullición y condensación	2500-100000

Un factor importante en la transferencia de calor por convección es la viscosidad del fluido puesto que influye en el perfil de velocidad y esta a su vez en la rapidez de transferencia de energía calorífica a una región cercana de la pared [25].

4.5.3. Transferencia de calor por radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. Todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados, en el caso de los sólidos la radiación se da a través de su superficie entre estos están metales, madera, etc. [23].

La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_S en (K o R) es expresada por la ley de Stefan-Boltzmann (ecuación 3):

$$\dot{Q}_{emitida,max} = \sigma \cdot A_s \cdot T_S^4 \quad (W) \quad (3)$$

Donde:

σ : Constante de Stefan – Boltzmann = 5.67×10^{-8} ($W/m^2 \cdot K^4$).

A_s : Área superficial (m^2).

T_S : Temperatura superficial ($^{\circ}K$).

Cuando una superficie está encerrada y separada por un gas, que no interrumpe con la radiación (Figura 10), la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre estas dos superficies se da por la ecuación 4.

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (T_S^4 + T_{alred}^4) \quad (W) \quad (4)$$

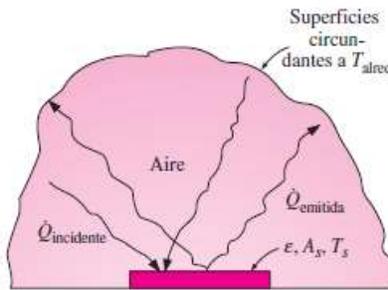


Figura 10. Transferencia de calor por radiación entre una superficie y las superficies que la circulan. [23]

La transferencia de calor por radiación hacia una superficie, o desde esta, rodeada por un gas como el aire, ocurre paralela a la conducción (o convección, si se tiene un movimiento masivo del gas) entre esa superficie y el gas. La radiación suele ser significativa con relación a la conducción o a la convección natural, pero en el caso de convección forzada es despreciable en especial cuando intervienen superficies de emisividades bajas [23]. Por lo tanto la transferencia de calor combinada por estos dos mecanismos, se determina mediante la ecuación 5.

$$h_{combinado} = h_{conv} + \varepsilon \sigma (T_S + T_{alred}) (T_S^2 + T_{alred}^2) \quad (W/m^2 \cdot K) \quad (5)$$

El coeficiente de transferencia de calor por radiación se expresa en la ecuación 6.

$$h_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_S^2 + T_{alred}^2) \cdot (T_S + T_{alred}) \quad (W/m^2 \cdot K) \quad (6)$$

ε : Emisividad.

σ : Constante de Stefan – Boltzmann = 5.67×10^{-8} ($W/m^2 \cdot K^4$).

T_{alr} : Temperatura de los alrededores interna ($^{\circ}K$).

T_s : Temperatura superficial ($^{\circ}K$).

La emisividad que presenta las superficies es la razón entre la radiación emitida por esta a ciertas temperaturas, los valores pueden variar entre $0 \leq \varepsilon \leq 1$ este valor depende de la temperatura a la que se encuentre el cuerpo y el tipo de material o acabado de su superficie, en la Tabla 4 se presentan las emisividades de los materiales que conforman el horno a una temperatura de 300K.

Tabla 4. Emisividades de materiales utilizados en el horno. [23]

Material	Emisividad
Vidrio	0.94
Lámina galvanizada	0.60
Vitrocerámica	0.94
Pintura negra	0.98
Pintura blanca	0.90
Lacado negro	0.91

4.5.4. Concepto de resistencia térmica para una pared plana

Para la conducción unidimensional en una pared plana, la temperatura es una función sólo de la coordenada x , y el calor se transfiere exclusivamente en esta dirección, la ecuación 1 se puede reacomodar para tener:

$$\dot{Q}_{cond,pared} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{pared}} \quad (W) \quad (7)$$

Donde:

$$R_{cond} = \frac{L}{k \cdot A_s} \quad (^{\circ}C/W) \quad (8)$$

L : espesor de pared (m).

k : Conductividad térmica ($W/m \cdot ^{\circ}C$).

A_s : Área analizada (m^2).

Ahora considerando la transferencia de calor por convección de una superficie sólida A_s y una temperatura T_s hacia un fluido cuya temperatura en un punto suficientemente lejos de la superficie T_{∞} , con un coeficiente de transferencia de calor h , representada en la ecuación 2, se puede reacomodar para obtener:

$$\dot{Q}_{conv} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{conv}} \quad (W) \quad (9)$$

Donde:

$$R_{conv} = \frac{L}{h \cdot A_s} \quad (^{\circ}C/W) \quad (10)$$

R_{rad} : Resistencia por convección ($^{\circ}C/W$).

h_{rad} : Coeficiente de conductividad ($W/m \cdot ^{\circ}C$).

A_s : Área superficial (m^2).

4.5.5. Concepto de resistencia térmica para una pared compuesta

Estas paredes incluyen un número de resistencias térmicas en serie y en paralelo debido a las capas de diferentes materiales. Se puede usar el concepto de resistencia térmica con el fin de determinar la razón de la transferencia de calor estacionaria a través de paredes compuestas. La resistencia a la conducción de cada pared es L/kA conectada en serie y aplicando la analogía eléctrica. Es decir, al dividir la diferencia de temperatura que existe entre las dos superficies a las temperaturas conocidas entre la resistencia térmica total que presentan ambas, como se representa en la ecuación 11.

$$\dot{Q}_{cond,pared} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{pared}} \quad (W) \quad (11)$$

En la Figura 11, se observa una red de resistencias térmica en serie, por lo tanto la resistencia térmica total es simplemente la suma aritmética de cada una de las resistencias que se encuentran en la trayectoria de la transferencia de calor [23].

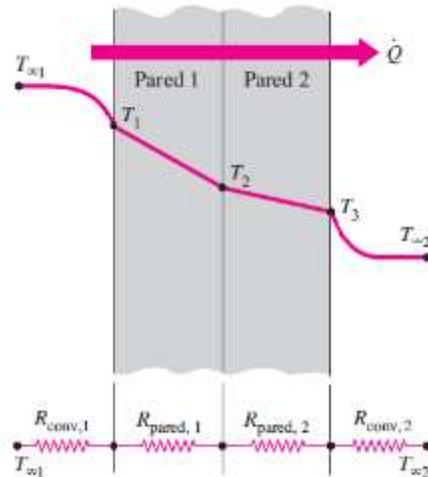


Figura 11. Red de resistencia térmica para la transferencia de calor en una pared plana de dos capas. [23]

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (12)$$

Las paredes compuestas también se caracterizan por configuraciones que comprenden capas en paralelo o configuraciones combinadas serie-paralelo. Se puede usar el concepto de resistencia analógica eléctrica para resolver problemas de transferencia de calor, aun cuando ese tipo de problemas con frecuencia son bidimensionales, se puede considerar aproximaciones suponiendo la transferencia de calor unidimensional de calor y utilizando la red de resistencias térmicas obtenemos la ecuación 13 .

$$R_{total} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (^\circ C/W) \quad (13)$$

4.6. Números adimensionales

La transferencia de calor por convección depende con intensidad de las propiedades: viscosidad dinámica μ , conductividad térmica k , densidad ρ y calor específico Cp del fluido, así como de la velocidad del fluido V . También depende de la configuración de la superficie sólida, además del tipo de

flujo del fluido (laminar o turbulento). Por lo tanto, se espera que las relaciones de la transferencia de calor por convección sean un tanto complejas debido a su dependencia de variables [23].

4.6.1. Número de Reynolds

La transición de flujo laminar a turbulento depende de la configuración geométrica de la superficie, de la aspereza superficial, de la velocidad de flujo, de la temperatura de la superficie y del tipo de fluido, entre otras cosas. Reynolds descubrió que el régimen de flujo depende principalmente de la razón de las fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas en el fluido [23], el número de Reynolds es adimensional y se expresa para el flujo externo como:

$$R_e = \frac{\rho U_\infty L_c}{\mu} = \frac{U_\infty \cdot L_c}{\nu} \quad (14)$$

Donde:

U_∞ : Velocidad de corriente superior (m/s).

L_c : Longitud característica (m).

$\nu = \mu/\rho$: Viscosidad cinemática del fluido (m^2/s).

El flujo es intrínsecamente estable y las capas de fluido adyacentes se deslizan una sobre otras de forma ordenada, esto ocurre para valores inferiores a un número de Reynolds denominado crítico ($R_e < 2000$), a este régimen se lo denomina laminar. Por otra parte si el flujo tiene un valor del número de Reynolds mayor al crítico ($R_e > 4000$), el flujo presenta perturbaciones y se convierte en intrínsecamente no estacionario, incluso con condiciones de contorno constantes, a este régimen se lo denomina turbulento [26].

4.6.2. Número de Nusselt

En los estudios sobre convección, es práctica común quitar las dimensiones a las ecuaciones que rigen y combinar las variables, las cuales se agrupan en números adimensionales, con el fin de reducir el número de variables totales. También es práctica común quitar las dimensiones del coeficiente de transferencia de calor h con el número Nusselt [23], que se define como lo indica la ecuación (15).

$$N_{um} = \frac{h \cdot L_c}{k} \quad (15)$$

Donde:

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección en ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

L_c : Longitud característica (m).

k : Conductividad térmica del fluido ($W/m \cdot k$).

El número de Nusselt sobre la placa plana completa se determina mediante:

$$\text{Laminar:} \quad Nu = 0.664 \cdot R_e^{0.5} \cdot P_r^{1/3} \quad (16)$$

$$\text{Turbulento:} \quad Nu = 0.037 \cdot R_e^{0.5} \cdot P_r^{1/3} \quad (17)$$

4.6.3. Número de Prandtl

Proporciona una medida de la efectividad relativa del transporte de momento y energía por difusión en las capas límites hidrodinámicas y térmicas, el número de Prandtl de los gases es cercano a la unidad en cuyo caso la transferencia de energía y momento por difusión son comparables [24].

4.7. Fundamentos teóricos de dinámica de fluidos computacional

La mecánica de fluidos está conformada por un conjunto de leyes de conservación los cuales explican el comportamiento general de los fluidos, con la característica que solamente se pueden resolver problemas o sistemas idealizados por no encontrarse una solución analítica a las ecuaciones, por tal motivo se han implementado otro tipo de soluciones por ejemplo la solución experimental en la cual se construyen prototipos a gran o pequeña escala y mediante este se analizan campos de presión, velocidad, temperatura etc., la principal desventaja que presenta esta solución es su alto costo económico y los errores que presentan los instrumentos de medición. Otra solución es mediante la técnica de modelación matemática (métodos numéricos), presentando mayor eficiencia y disminuyendo los costos en comparación con la solución experimental llegando a resolver problemas complejos, entre los métodos numéricos encontramos el Método de Diferencias Finita (MDF), Volumen Finito (MVF) y Elemento Finito (MEF), todo estos para resolver ecuaciones de conservación de masa, momento, energía y especies químicas.

La dinámica computacional de fluidos integra tres disciplinas: la mecánica de fluidos, matemáticas y ciencias computacionales (Figura 12), la mecánica de fluidos representa el estudio de fluidos en reposo o movimiento (dinámica de fluidos) esta última se describe mediante ecuaciones matemáticas comúnmente llamadas ecuaciones gobernantes. Por lo tanto la aplicación CFD se puede extender a análisis que involucren procesos como calor y masa [27].

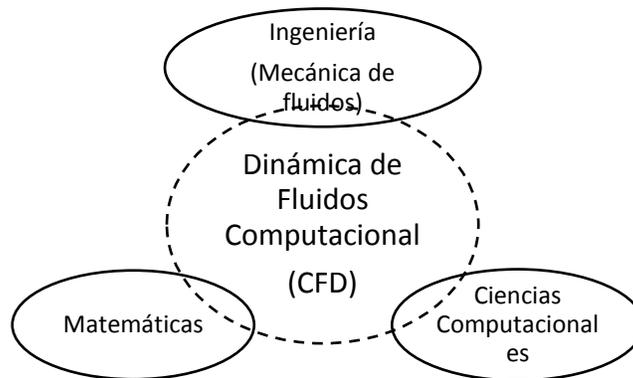


Figura 12. Disciplinas que involucran CFD. [27]

4.7.1. Estructura de CFD

Generalmente para la solución de un problema, la secuencia y estructura para un usuario CFD consta de tres partes fundamentales: pre-proceso, resolución y post-proceso [27].

4.7.1.1. Pre-Proceso

Esta etapa consiste en preparar los datos de entrada para su posterior resolución, entre estos tenemos [27]:

- Definir una geometría o dominio computacional

- Generar una malla numérica
- Especificar los modelos que se pretenden estudiar
- Especificar las propiedades físicas del medio
- Establecer las condiciones iniciales y de frontera

4.7.1.2. Resolución

Compone la parte principal del software pues esta etapa se encarga de solucionar el sistema analizado, resolviendo el modelo matemático (establecido en la etapa anterior), solución que se obtiene a través del análisis numérico, desarrollo de algoritmos, etc.

Previo al desarrollo de esta etapa intervienen procesos tales como el control de la solución, solución de monitoreo, cálculo CFD y la verificación de convergencia, para una elaboración correcta de esta y las demás etapas el usuario CFD necesita obtener conocimientos relacionados con el funcionamiento de estos procesos, conocimiento de modelos matemáticos, etc. [27], [28].

4.7.1.3. Post-proceso

Aquí se presenta un elemento visualizador el cual permite acumular una amplia cantidad de datos de resultados mediante gráficos, aquí se puede representar: la malla numérica, mapas de contornos de iso-líneas, campo de velocidad, etc. Los códigos CFD comerciales como ANSYS CFX, ANSYS FLUENT y STAR-CD continuamente incorporan herramientas de visualización fáciles de usar para que los usuarios puedan observar gráficamente los resultados de un cálculo de CFD al final de una simulación, además existen aplicaciones autónomas de paquetes de software de gráficos independientes que el usuario puede optar por utilizar para sus aplicaciones [27], [28].

4.7.2. Ecuaciones de la dinámica de fluidos, transferencia de calor y masa

Para representar el sistema físico en estudio se necesita de un modelo matemático el mismo que puede ser simple o complejo esto depende del sistema en estudio, generalmente para representar la dinámica de fluidos, transferencia de calor y especies químicas se usan las ecuaciones de continuidad, momento, energía y transporte de masa. Las ecuaciones de conservación de flujo de fluidos, transferencia de calor y masa definidas a continuación se basan en la formulación Euleriana, la cual asume que el medio es continuo y se aplica los principios de conservación de las ecuaciones anteriormente dichas [27] [28].

Estas ecuaciones representan los principios matemáticos de las leyes de conservación de la física, las cuales son:

- La masa de un fluido se conserva (ley de conservación de masa).
- La razón de cambio de momento corresponde a la suma de las fuerzas sobre una partícula del fluido (segunda ley de Newton).
- La razón de cambio de energía es igual a la suma de la razón de calor adicional y la razón de trabajo realizado sobre una partícula del fluido (primera ley de la termodinámica).

4.7.3. Ecuación de conservación de masa

Se deriva de la ley de conservación de masa, la misma que manifiesta que el flujo neto másico de salida del volumen de control debe ser igual al incremento temporal de la masa interior. La ecuación resultante también se la conoce como conservación de masa o continuidad [27].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (18)$$

ρ : densidad (kg/m^3).

t : tiempo (s).

\vec{v} : vector de velocidad del fluido en un punto (x, y, z) (m/s).

4.7.4. Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

Es la representación matemática de la segunda ley de Newton, la misma que manifiesta que el desplazamiento de un pequeño volumen con el fluido es acelerado a causa de las fuerzas que actúan en este. Es decir que la masa por la aceleración es igual a la suma de fuerzas, para el caso de un flujo de fluidos compresibles entre placas paralelas en dos dimensiones incluyendo la relación de tensiones tenemos [28]:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}}_{\text{Aceleración}} + \underbrace{\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y}}_{\text{Convección}} = - \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x}}_{\text{Presión}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial u}{\partial y} \right)}_{\text{Difusión}}$$

$$+ \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left(u \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(u \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right]}_{\text{Carga extra}} + \underbrace{\Sigma F_x}_{\text{Fuerzas del cuerpo}} \quad (19)$$

4.7.5. Ecuación de energía

La ecuación de energía es derivada de la primera ley de la termodinámica, la misma que manifiesta que la cantidad de cambio de energía de una partícula es igual a la cantidad de calor adicionado al elemento más la cantidad de trabajo realizado sobre la partícula. Para flujo compresible en dos dimensiones la ecuación para la conservación de energía es [28]:

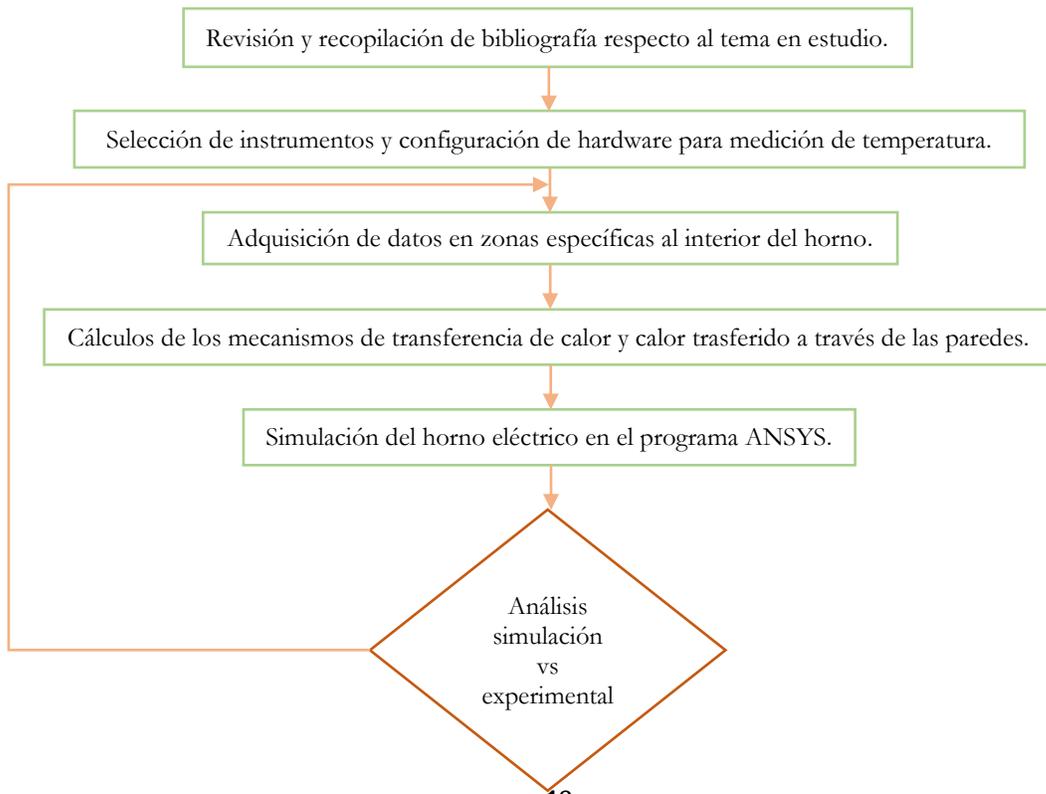
$$\underbrace{\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}}_{\substack{\text{Aceleración} \\ \text{local}}} + \underbrace{\frac{\partial(\rho uh)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vh)}{\partial y}}_{\text{Convección}} = \underbrace{\frac{\partial p}{\partial t}}_{\substack{\text{Presión} \\ \text{local}}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right]}_{\text{Difusión}} + \phi \quad (20)$$

5. Marco metodológico

En este apartado se da inicio al desarrollo del proyecto con la adquisición de temperaturas en el interior del horno, siguiendo con los cálculos de los mecanismos de transferencia de calor presentes en el sistema, luego con la modelación computacional (análisis CFD) y finalmente con el análisis del comportamiento térmico experimental-computacional y la similitud entre estos, en las posteriores etapas se detallan los tipos de investigación utilizados para el desarrollo de este estudio.

- **Exploratorio:** Tiene como finalidad de identificar conceptos, establecer prioridades para investigaciones futuras, o sugerir afirmaciones y postulados. Esta clase de estudios se realiza comúnmente en situaciones donde existe poca información [29].
Aplicación: Se analiza el funcionamiento y el uso de los instrumentos de medición y software que comúnmente se utilizan para el análisis de hornos domésticos o similares, con el objetivo de garantizar una correcta medición disminuyendo los errores presentes en los instrumentos.
- **Descriptivo:** Busca establecer propiedades, características, etc., de fenómenos que se sometan a un análisis, es decir solamente pretende recopilar información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o variables del entorno analizado [29].
Aplicación: Se especifica las propiedades y características acerca de los materiales de construcción del horno. Además, se determina los mecanismos de transferencia de calor existentes en el sistema.
- **Cuasi-experimental:** Manipulan premeditadamente mínimo una variable independiente para observar su efecto y relación con una o más variables dependientes [29].
Aplicación: Se mide la distribución de temperatura en el interior del horno a través de termocuplas colocadas en puntos o zonas que mayormente sean usadas para la cocción de alimentos.
- **Correlacional:** Tiene como finalidad conocer la relación que puede existir entre dos o más conceptos, evalúan el grado de asociación entre dos o más variables para posteriormente cuantificar y analizar esta vinculación [29].
Aplicación: Se establece una relación entre el análisis computacional y experimental del comportamiento térmico (en puntos o zonas específicas) mediante el cálculo del error absoluto para concluir si el sistema analizado computacionalmente representa o no al sistema real analizado.

5.1. Proceso de la investigación



Validación del sistema simulado.

Figura 13. Flujograma del proceso de investigación. Fuente: Autores.

5.2. Descripción del horno doméstico analizado

El horno eléctrico escogido para el análisis forma parte de una cocina de inducción de 24 pulgadas (Figura 14), la cual cuenta con cuatro inductores y cuyo voltaje de trabajo es de 220 Vca, a una frecuencia de 60Hz.



Figura 14. Cocina de inducción utilizada para el estudio. Fuente: Autores.

El horno de la cocina es accionado mediante un termostato que permite seleccionar un rango de temperaturas que van desde los 100°C a 285°C, para la generación de este calor se cuenta con una resistencia eléctrica tubular (ver Figura 15) de 1400W, la cual se encuentra apoyada sobre una bandeja en la parte inferior. En esta bandeja encontramos agujeros distribuidos lateralmente en toda su geometría los cuales sirven como ingreso de aire al interior del horno.

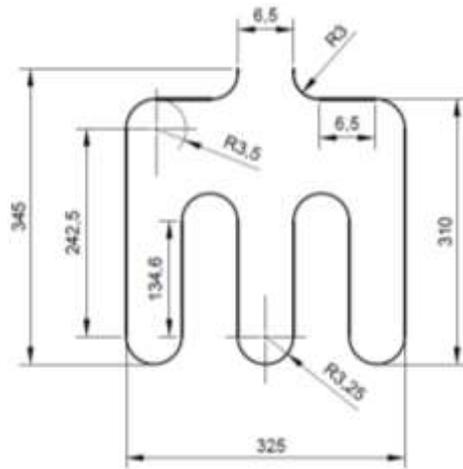


Figura 15. Dimensiones de la niquelina. Fuente: Autores.

A continuación se presenta el horno utilizado para el análisis y sus dimensiones internas se detallan en la Tabla 5.



Figura 16. Interior del horno en estudio. Fuente: Autores.

Tabla 5. Dimensiones internas del horno. Fuente: Autores

Especificación	Valor (mm)
Altura	355
Ancho	450
Profundidad	430

Como característica adicional este horno posee una resistencia eléctrica colocada en la parte superior (grill) de 1200W de potencia cuyo propósito es gratinar alimentos tales como pastas, carnes, pescado etc. Se debe tener en cuenta que tanto el grill como el horno no pueden ser utilizados al mismo tiempo ya que al momento de accionar el grill este se conecta a una temperatura fija y automáticamente se desconecta la resistencia del horno.

5.2.1. Materiales de construcción

El horno se encuentra delimitado por seis paredes las mismas que están compuestas por diferentes capas o láminas entre material aislante y constructivo. El material de las paredes interiores y exteriores son de acero inoxidable de grado alimenticio, esta última tiene una capa de pintura color blanco. En medio de estas paredes se encuentra material aislante como fibra de vidrio, láminas de papel aluminio y espacios de aire, esto con la finalidad de garantizar la menor pérdida de calor posible hacia el exterior. Las características de los materiales constructivos como aislantes se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6. Características de los materiales de construcción. Adaptado de [11], [15], [16].

Material	Características
Lámina de acero inoxidable AISI 304	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alta resistencia a la corrosión. ▪ Excelente soldabilidad. ▪ Buena ductilidad.
Lámina de acero EK2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aptos para embutición profunda. ▪ Alto nivel de pureza interna. ▪ Compatible con el proceso de esmaltado.
Lámina de acero galvanizado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Protección electroquímica. ▪ Mayor vida útil. ▪ Autocurado ante raspaduras superficiales.
Fibra de vidrio	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Resistencia a la erosión química y del ambiente. ▪ Aislante térmico (bajo coeficiente de expansión térmica). ▪ Peso ligero.
Lámina de aluminio	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Metal no ferromagnético. ▪ Resistente a la corrosión. ▪ Baja densidad.
Vidrio templado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Resistencia al choque térmico. ▪ Resistencia a la flexión. ▪ Resiste de 4 a 5 veces más que un vidrio normal.

Cada pared compuesta del horno tiene una configuración diferente de la otra, repitiéndose únicamente las paredes laterales, cada material y espesor de las mismas se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7. Materiales que conforman las paredes del horno. Fuente: Autores.

Tipo de pared	Material	Espesor (mm)
Paredes laterales	Acero EK2	1
	Fibra de vidrio	17
	Aire	50
	Acero inoxidable AISI 304	0.6
Pared frontal (Puerta)	Vidrio templado	5
	Aire	20
Pared Posterior	Acero EK2	1
	Fibra de vidrio	17
	Aire	22
	Lámina galvanizada	0.5
	Acero EK2	1
	Fibra de vidrio	17

Pared superior (Cielo)	Papel aluminio	0.025
	Aire	130
	Vitrocerámica	38
Pared inferior (Piso)	Acero inoxidable EK2	1
	Aire	28
	Lámina galvanizada	0.5

5.3. Análisis experimental

Con el propósito de demostrar si el sistema simulado computacionalmente representa o no al sistema real (horno eléctrico), se procede a realizar la obtención de datos experimentales con la finalidad de realizar una comparación entre estas dos formas utilizadas para el análisis. El desarrollo de las etapas necesarias para la obtención de los datos experimentales se detalla a continuación:

5.3.1. Selección de instrumentos de medición

5.3.1.1. Cámara termográfica Testo 875

La cámara termográfica permite determinar temperaturas en superficies de materiales sin la necesidad de contacto, transforma el factor de energía en una imagen que posterior puede ser analizada a través del software TESTO IRSOFT. Posee una sensibilidad térmica de 0.05°C, además incluye valores de emisividades de distintos materiales como el aluminio, acero, vidrio, etc. Comúnmente se utiliza para la comprobación de posibles desgastes de motores, cojinetes, ejes, etc., a través del aumento de temperatura, por otro lado se utiliza en edificaciones con la finalidad de determinar posibles defectos en la construcción [30]. Se utilizó la cámara termográfica para determinar las temperaturas interiores y exteriores en las paredes del horno y para analizar el calentamiento de la resistencia eléctrica.



Figura 17. Cámara termográfica TESTO 875. [30]

5.3.1.2. Termocupla Tipo K PT100

La termocupla es un sensor cuya finalidad es medir la temperatura ambiente de un espacio confinado, está formado por dos conductores metálicos de diferentes materiales unidos en un extremo. Al emplear una temperatura sobre este extremo genera un voltaje eléctrico en el orden de los milivoltios (mV), el

mismo que se incrementa con la temperatura. El rango en el que trabaja es de 0°C a 750°C con un error de 2.2°C, proporcionando una resolución de 0.25°C [31].



Figura 18. Termocupla K tipo tornillo. [31]

5.3.1.3. Transmisor MAX6675

Convierte la señal analógica en digital de las termocuplas tipo K, este transmisor amplifica, compensa y convierte el voltaje generado con una resolución de 0.25°C. Otras características se detallan a continuación [32]:

- Voltaje de operación: 5 Vcc
- Corriente de trabajo: 50mA
- Modo de salida: SPI
- Consumo máximo: 1.5mA
- Tiempo de conversión: 0.7s a 0.22s



Figura 19. Transmisor MAX6675. [32]

5.3.1.4. Arduino Uno

Es una placa de microcontrolador programable, compuesta por una unidad central de proceso, memorias, líneas de entrada y salida, básicamente contiene bloques similares que una computadora lo cual permite manejarlo como un dispositivo de computo. Comúnmente se utiliza para el manejo de sensores, calculadoras, motores, secuenciadores de luces, etc. El lenguaje de programación que utiliza está fundamentado en C++ el mismo que trabaja con símbolos como caracteres, números, signos de puntuación, etc. [33].

Entre las características más sobresalientes están:

- 14 Pines de entrada/salida digital
- 6 entradas analógicas
- Conexión USB
- Voltaje de operación: 5V
- Voltaje de entrada: 7-12V

La recolección de datos se realizó mediante la termocupla tipo K conectada al transmisor MAX6675 y está a su vez conectada al microcontrolador Arduino Uno como se observa en la Figura 20.

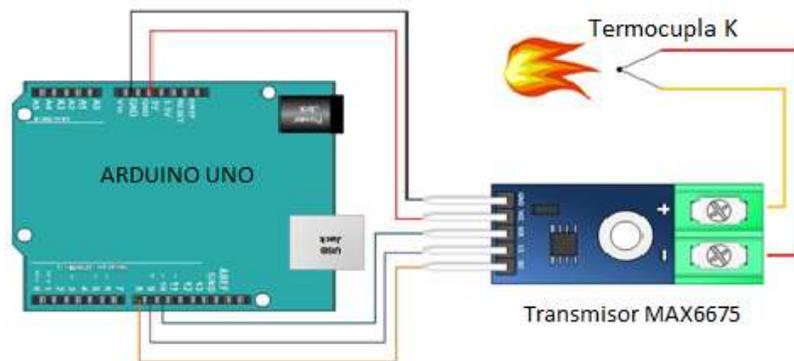


Figura 20. Esquema de la conexión entre un transmisor – Arduino- Termocupla. [34]

Se utilizó un total de cuatro termocuplas cada una con una longitud de un metro, cuatro transmisores MAX6675 cuya alimentación se obtiene de una fuente externa de 5VCC y cada una de sus terminales fue conectada a las 12 entradas digitales que presenta el Arduino, el circuito utilizado para la recolección de datos observamos en la Figura 21.

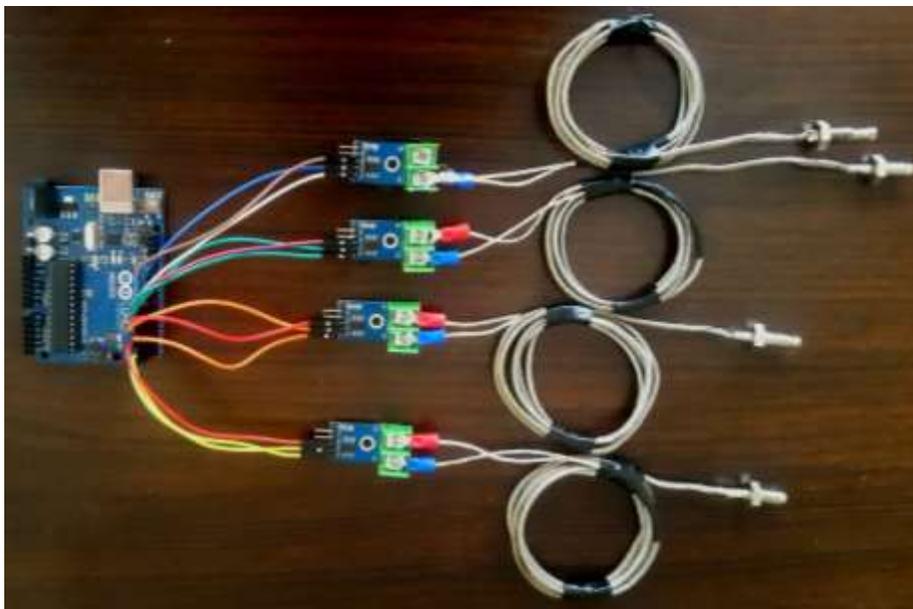


Figura 21. Circuito electrónico utilizado para la recolección de datos. Fuente: Autores.

5.3.2. Configuración del hardware

Para interpretar las señales digitales provenientes del transmisor Max6675, que a su vez recibe señales analógicas de las termocuplas, es necesario utilizar un microprocesador. En este caso se usó el Arduino Uno en el cual es necesario ingresar la librería “max6675.h” que permite realizar la lectura de las termocuplas. La programación realizada en Arduino para los cuatro sensores utilizados se detalla en el anexo A1.

5.3.2.1. Interfaz PLX-DAQ

Debido a que el microcontrolador Arduino UNO no contiene los componentes necesarios para el ajuste y para el análisis de datos, se usó como complemento la herramienta Parallax Data Acquisition (PLX-DAQ) la misma que realiza la adquisición de datos en tiempo real a través de Microsoft Excel mediante los puertos USB de una PC [35], otras características que presenta esta herramienta son:

- Graba hasta 26 columnas de datos.
- Permite graficar los datos en tiempo real.
- Permite leer/escribir en cualquier celda en una hoja de trabajo (Excel).
- Marca datos en tiempo real (hh/mm/ss).

A la programación del software Arduino configurado anteriormente se le añadió líneas de programación que permite la visualización de la temperatura en las celdas de Excel (Anexo 1). En la Figura 22 se puede observar el interfaz del PLX-DAQ que se utilizó en este proyecto, el puerto USB configurado es el COM3 además la velocidad de comunicación con el ordenador se fijó en 9600 baudios, cabe recalcar que este software es libre y se encuentra en la página oficial del microcontrolador [35].

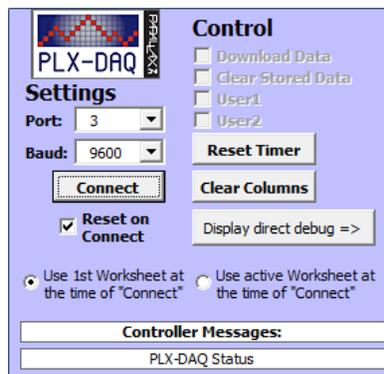


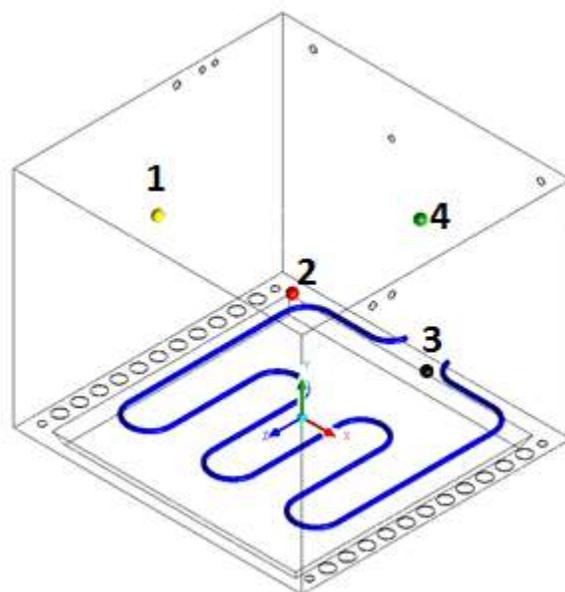
Figura 22. Interfaz PLX-DAQ. [35]

5.3.3. Selección de puntos de medición

Los hornos cuentan con dos o más niveles (guías) donde se colocan las parrillas o bandejas, normalmente los niveles superiores se utilizan para el gratinado de la capa externa de los alimentos en cambio los niveles inferiores son utilizados con el fin de aprovechar la fuente de calor directamente durante la cocción, finalmente si se requiere obtener una cocción más equilibrada se recomienda el uso de niveles medios [36]. Por esta razón se analiza el comportamiento térmico en el nivel medio del horno distribuido en cuatro zonas como son lateral izquierda, central, lateral derecha y posterior, en la Figura 23 y la Tabla 8 se detallan la ubicación de las zonas como sus coordenadas.



(a)



(b)

Figura 23. Ubicación de los puntos de medición (a) Experimental, (b) Computacional. Fuente: Autores

Tabla 8. Posiciones de los puntos seleccionados para la medición. Fuente: Autores

Ítem	Puntos	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	Pared Lateral Izquierda	-21	19	0
2	Centro	0	19	0
3	Pared Lateral Derecha	21	19	0
4	Pared Posterior	0	19	-20

5.3.4. Condiciones para la adquisición de datos

Una vez determinados los puntos o zonas a analizar y la instrumentación necesaria para la medición, establecemos las condiciones para el funcionamiento del horno donde se seleccionó una temperatura de trabajo de 235°C y la recolección de los datos se realizará durante 18 min., este es el periodo en el que permanece encendida la niquelina sin recibir interrupciones en su energización por parte del control ON/OFF integrado por la cocina. Otros parámetros considerados para la adquisición de los datos se detallan a continuación.

Tabla 9. Condiciones de funcionamiento del horno para la adquisición de datos. Fuente: Autores.

Condiciones de funcionamiento	
Temperatura establecida (Termostato)	235°C
Tiempo de funcionamiento niquelina	18 minutos
Estado foco	Apagado
Estado niquelina (horno)	Encendida
Estado niquelina (grill)	Apagada
Temperatura ambiente	21°C

5.3.5. Datos obtenidos

Como resultado de la toma de datos tenemos tres mediciones realizadas, las mismas fueron adquiridas en diferentes días a una temperatura ambiente similar (21°C). Estos resultados se representan en las Figuras 24, 25, 26 y las en las Tablas 10, 11, 12.

- **Representación de las temperaturas obtenidas, primera medición.**

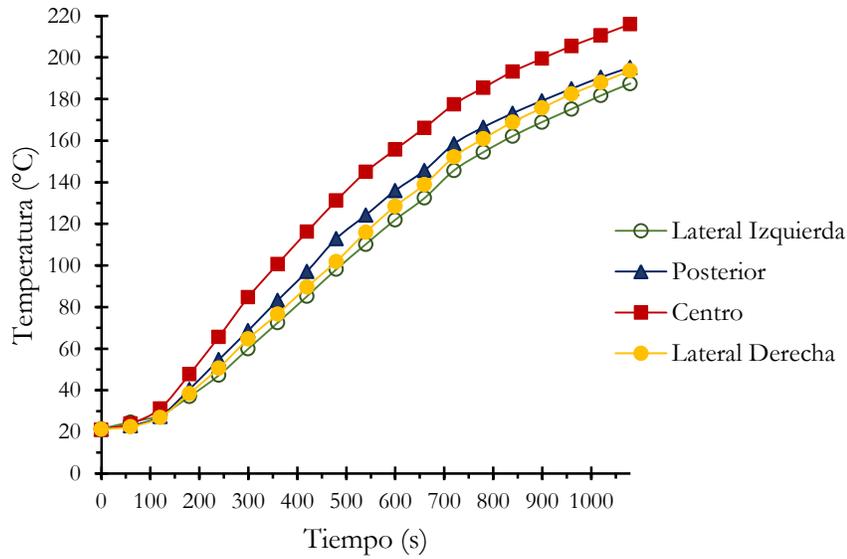


Figura 24. Distribución de temperaturas en diferentes zonas al interior del horno, medición 1. Fuente: Autores.

Tabla 10. Temperaturas registradas en diferentes zonas al interior del horno, medición 1. Fuente: Autores.

Tiempo (s)	Pared Lateral Izquierda (°C)	Pared Posterior (°C)	Centro (°C)	Pared Lateral Derecha (°C)
0	21	21	21	21
60	24.75	23	24	22.5
120	28	27.5	31.25	27
180	37	40.5	47.75	38.5
240	47.25	54.75	65.75	50.75
300	60	68.75	84.75	64.75
360	72.5	83.25	100.75	76.75
420	85.25	97.25	116.25	89.75
480	98.25	113	131.25	102
540	110.25	124.25	145	116
600	122	136	155.75	128.5
660	132.5	145.75	166.25	139
720	145.75	158.5	177.5	152.25
780	154.5	166.5	185.5	161
840	162.25	173.25	193.25	169
900	169	179.25	199.5	175.75
960	175.25	185	205.5	182.5
1020	181.75	190.5	210.75	188
1080	187.5	195.25	216	193.75

- Representación de las temperaturas obtenidas, segunda medición.

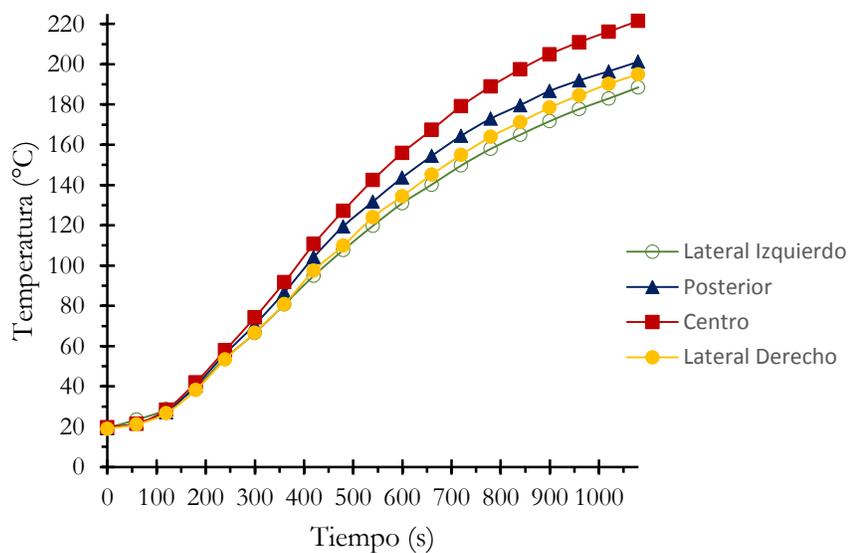


Figura 25. Distribución de temperaturas en diferentes zonas al interior del horno, medición 2. Fuente: Autores.

Tabla 11. Temperaturas registradas en diferentes zonas al interior del horno, medición 2.

Tiempo (s)	Pared Lateral Izquierda (°C)	Pared Posterior (°C)	Centro (°C)	Pared Lateral Derecha (°C)
0	21	21	21	21
60	23.5	23.25	24.25	23.75
120	28.75	27.25	28.5	26.75
180	39.5	40.5	42	38.25
240	54	56.25	58	53.5
300	66.5	70.75	74.25	66.75
360	80.75	86.75	91.75	81
420	95	104.25	110.75	97.5
480	107.75	119.5	127.25	110
540	119.75	131.75	142.5	124
600	131	143.75	156	134.5
660	140.25	154.5	167.5	145.25
720	149.75	164.5	179.25	155
780	158	173	189	164
840	165	179.75	197.5	171.25
900	171.75	186.75	205	178.5
960	177.75	192	211	184.5
1020	183	196.5	216.25	190.25
1080	188.5	201.25	221.5	195

- Representación de las temperaturas obtenidas, tercera medición.

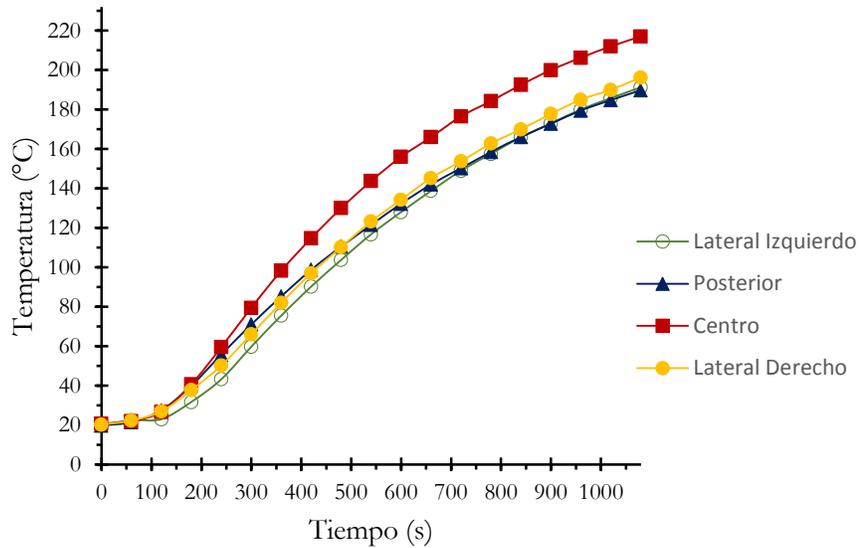


Figura 26. Distribución de temperaturas en diferentes zonas al interior del horno, medición 3. Fuente: Autores.

Tabla 12. Temperaturas registradas en diferentes zonas al interior del horno, medición 3. Fuente: Autores.

Tiempo (s)	Pared Lateral Izquierda (°C)	Pared Posterior (°C)	Centro (°C)	Pared Lateral Derecha (°C)
0	21	21	21	21
60	22.5	22.75	22	22.25
120	23	27.5	26.75	27
180	31.75	40	40.75	37.75
240	43.25	55.75	59.5	50.25
300	59.75	71	79.5	66
360	75.5	85.25	98.25	82
420	90.25	98.75	114.75	97
480	103.75	110.5	130	110.25
540	116.75	121.5	143.75	123.25
600	128	132.25	156	134.25
660	138.75	142	166	145.25
720	149	150.25	176.5	153.75
780	157.5	158.5	184.25	162.75
840	166	166	192.5	170
900	173	172.75	200	177.75
960	180	179.5	206.25	185
1020	185.75	184.75	212	190
1080	191.25	189.75	217	196.25

Realizando una comparación de las tres mediciones realizadas se observa una variación de temperatura en cada una de sus zonas, una de las razones es que las termocuplas utilizadas presentan un error de medición de $\pm 2^{\circ}\text{C}$, las mediciones que menor variación presentan son la 1 y 3 por tal motivo se realiza

el cálculo de una temperatura media entre estas, dándonos como resultado los datos experimentales con los que se realizará la comparación en el análisis computacional. En la Figura 27 y Tabla 13 se presenta los valores obtenidos del cálculo de la temperatura promedio.

▪ **Representación de la distribución de temperaturas promedio**

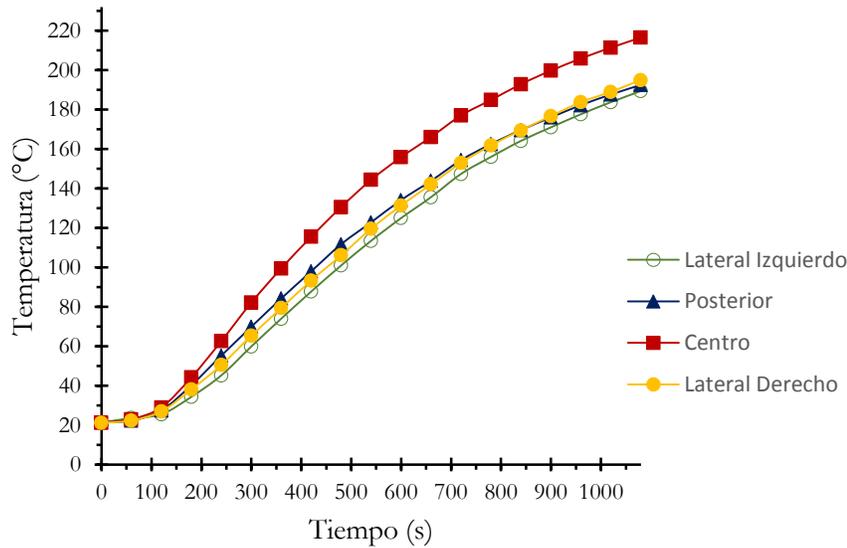


Figura 27. Distribución de temperaturas promedio en diferentes zonas al interior del horno. Fuente: Autores.

Tabla 13. Temperaturas promedio en diferentes zonas al interior del horno. Fuente: Autores

Tiempo (s)	Pared Lateral Izquierda (°C)	Pared Posterior (°C)	Centro (°C)	Pared Lateral Derecho (°C)
0	21	21	21	21
60	23.625	22.25	23	22.375
120	25.5	27.5	29	27
180	34.375	40.25	44.25	38.125
240	45.25	55.25	62.625	50.5
300	59.875	69.875	82.125	65.375
360	74	84.25	99.5	79.375
420	87.75	98	115.5	93.375
480	101	111.75	130.625	106.125
540	113.5	122.875	144.375	119.625
600	125	134.125	155.875	131.375
660	135.625	143.875	166.125	142.125
720	147.375	154.375	177	153
780	156	162.5	184.875	161.875
840	164.125	169.625	192.875	169.5
900	171	176	199.75	176.75
960	177.625	182.25	205.875	183.75
1020	183.75	187.625	211.375	189
1080	189.375	192.5	216.5	195

5.4. Análisis Matemático

El objetivo de realizar un análisis matemático es determinar ciertos parámetros (condiciones de frontera) necesarios para realizar el estudio computacional mediante el software ANSYS como es la conductividad térmica, a más de esto se busca estudiar si existe o no pérdidas significativas de calor a través de las paredes compuestas que conforman el horno.

5.4.1. Determinación de la velocidad del flujo de aire

Uno de los factores que se debe tener en cuenta tanto en el análisis matemático como en el computacional es la velocidad del aire circundante en el exterior e interior del horno, el cual en el desarrollo de este proyecto fue imperceptible a la medición a través de un anemómetro Lutron LM-8000 cuya resolución mínima es de 0.1 m/s, esto nos indica que tanto la velocidad externa como interna se encuentran en un rango inferior a este valor. Para determinar estas velocidades nos respaldamos del análisis computacional, donde realizamos comparaciones de la distribución de temperatura a diferentes velocidades (0.01, 0.05 y 0.1 m/s) resultado la velocidad de 0.01 m/s la que de mejor representa la distribución de calor en comparación con la distribución obtenida experimentalmente en el punto central. La representación de la distribución de temperaturas a cada una de las velocidades se muestra en la Figura 28.

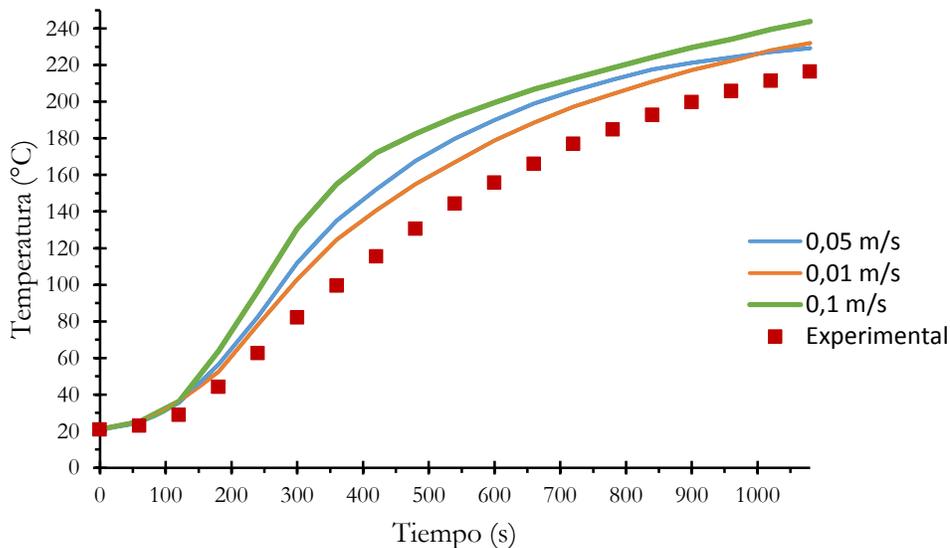


Figura 28. Distribución de temperaturas a diferentes velocidades. Fuente: Autores.

5.4.2. Cálculo del coeficiente convectivo externo (h_{ext})

El horno en estudio se encuentra dentro de un recinto cerrado en el cual la temperatura ambiente es de 21°C (aproximadamente), por lo tanto se procede a obtener las propiedades del aire a dicha temperatura mediante el uso de tablas (Anexo A.2) mismas que se detallan a continuación.

Tabla 14. Propiedades del aire analizado al exterior del horno. Fuente: Autores.

Propiedades	Valor
Velocidad del aire promedio, U_{∞}	0.01 m/s

Conductividad térmica, k	0.025214 $W/m \cdot K$
Viscosidad cinemática, ν	$1.5252 \cdot 10^{-5} m^2/s$
Número de Prandtl, Pr	0.73064

Antes de determinar el valor de la convección a la que se somete el horno por acción de los flujos de aire alrededor de la habitación, tenemos que analizar el comportamiento del fluido el cual puede ser de régimen laminar, transición o turbulento, para esto procedemos a calcular el número de Reynolds.

$$Re_{ext} = \frac{U_{\infty} \cdot L_c}{\nu}$$

$$Re_{ext} = \frac{0.01 \frac{m}{s} \cdot 0.355m}{1.5252 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}}$$

$$Re_{ext} = 232.76 \quad \text{Régimen laminar}$$

El número de valor del Reynolds calculado se encuentra por debajo del denominado crítico ($Re < 2000$), por lo tanto el flujo al exterior del horno se encuentra en un régimen laminar.

A continuación, se procede a calcular el número de Nusselt, factor necesario para encontrar el coeficiente de convección además de que nos indica el incremento de transmisión de calor desde la superficie.

$$Nu_{ext} = (0.664 \cdot Re_{ext}^{0.5}) \cdot Pr^{1/3}$$

$$Nu_{ext} = (0.664 \cdot 232.56^{0.5}) \cdot 0.73064^{1/3}$$

$$Nu_{ext} = 9.12$$

Finalmente, se procede a realizar el cálculo del coeficiente de convección en la parte externa del horno por la acción del viento circundante en la habitación, mediante la ecuación 15:

$$h_{ext} = \frac{Nu_{ext} \cdot k}{L_c}$$

$$h_{ext} = \frac{9.12 \cdot 0.025214 \frac{W}{m \cdot K}}{0.355m}$$

$$h_{ext} = 0.648 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

5.4.3. Cálculo del coeficiente convectivo interno (h_{int})

En el interior del horno existe una transferencia de calor compuesta por convección natural y radiación, primero calcularemos el coeficiente convectivo y posterior de radiación. Las propiedades del aire en esta ocasión se analizarán a una temperatura de 216.5°C con los datos proporcionados en el Anexo A2.

Tabla 15. Propiedades del aire analizado en el interior del horno. Fuente: Autores.

Propiedad	Valor
Velocidad del aire, U_{∞}	0.01 m/s
Conductividad térmica, k	0.038863 W/m · K
Viscosidad cinemática, ν	$3.66488 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Número de Prandtl, Pr	0.696476

El procedimiento para encontrar el coeficiente de convección interna es el mismo que el exterior, en este caso se determina el comportamiento del aire que circula en la parte interna del horno a causa de las entradas de flujo existentes en la bandeja inferior.

$$Re_{int} = \frac{U_{\infty} \cdot L_c}{\nu}$$

$$Re_{int} = \frac{0.01 \frac{m}{s} \cdot 0.355m}{3.66488 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}}$$

$$Re_{int} = 96.865 \quad \text{Régimen Laminar}$$

El flujo en el interior del horno se encuentra en un régimen laminar, esto debido a que el de aire en su interior circula a una velocidad baja y con una alta viscosidad (ver Tabla 15.)

Continuamos con el cálculo del número de Nusselt para flujo laminar:

$$Nu_{ext} = (0.664 \cdot Re_{int}^{0.5}) \cdot Pr^{1/3}$$

$$Nu_{int} = (0.664 \cdot 96.865^{0.5}) \cdot 0.696476^{1/3}$$

$$Nu_{int} = 5.79$$

Finalmente calculamos el coeficiente de convección interna:

$$h_{int} = \frac{Nu_{int} \cdot k}{L_c}$$

$$h_{int} = \frac{5.79 \cdot 0.038863 \frac{W}{m \cdot K}}{0.355m}$$

$$h_{int} = 0.634 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

5.4.4. Calculo del coeficiente de transferencia de calor por radiación interna (h_{rad})

La resistencia eléctrica en el interior del horno genera ondas electromagnéticas la cual junto con la convección son las encargadas de producir calor en el horno por tal motivo las superficies a su alrededor están expuestas a estos dos mecanismos de transferencia. La radiación es distinta en cuanto a los otros mecanismos de transferencia de calor (conducción y convección) ya que esta no necesita de la existencia de un material para realizar la transferencia de energía [23].

Tabla 16. Condiciones para el análisis por radiación en el interior del horno. Fuente: Autores.

Propiedades	Valor
Emisividad pintura café, ε	0.98
Constante de Stefan-Boltz man, σ	$5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$
Temperatura superficial (Cara lateral interna), T_s	110 °C
Temperatura alrededores (Centro del horno), T_{atr}	216.5 °C

$$h_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s + T_{atr}) \cdot (T_s^2 + T_{atr}^2)$$

$$h_{rad} = 0.98 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \cdot (383.15K + 489.65K) \cdot ((383.15K)^2 + (489.65K)^2)$$

$$h_{rad} = 18.74 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

5.4.5. Cálculo de resistencias térmicas en paredes compuestas

Se procede a calcular las resistencias conductivas que se producen en cada capa de material del que está conformado la estructura del horno, pero antes analizamos la resistencia combinada que se produce en el interior del horno por los mecanismos de radiación y convección.

La definición del coeficiente de transferencia de calor por radiación permite expresar la radiación de manera análoga a la convección, las resistencias a la convección y a la radiación de manera simultánea son paralelas entre sí, como observa en la Figura 29.

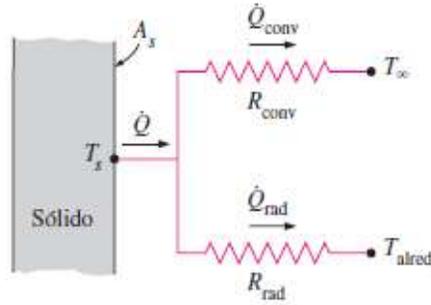


Figura 29. Esquema para las resistencias a la convección y radiación en una superficie. [23]

El cálculo de la resistencia térmica por radiación se obtiene mediante:

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} \cdot A}$$

$$R_{rad} = \frac{1}{18.74 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \cdot 0.153m^2}$$

$$R_{rad} = 0.348 \frac{^\circ C}{W}$$

De la misma manera encontramos la resistencia térmica para la convección interna, donde tenemos:

$$R_{conv_{int}} = \frac{1}{h_{int} \cdot A}$$

$$R_{conv_{int}} = \frac{1}{0.634 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 0.153m^2}$$

$$R_{conv_{int}} = 10.30 \frac{^\circ C}{W}$$

Finalmente procedemos a calcular la resistencia térmica combinada:

$$R_{comb} = \frac{R_{conv_{int}} \cdot R_{rad}}{R_{conv_{int}} + R_{rad}}$$

$$R_{comb} = \frac{10.30 \frac{^\circ C}{W} \cdot 0.348 \frac{^\circ C}{W}}{10.30 \frac{^\circ C}{W} + 0.348 \frac{^\circ C}{W}}$$

$$R_{comb} = 0.337 \frac{^\circ C}{W}$$

5.4.5.1. Cálculo de resistencia térmica en las paredes laterales

La estructura del horno está formada por seis superficies compuestas de distintos materiales entre vidrio, láminas de acero galvanizado, fibra de vidrio, etc. A continuación se procede con el cálculo de las paredes laterales, cuyas características térmicas se encuentran en la Tabla 17 y la disposición de cada capa de material se indica en la Figura 30.

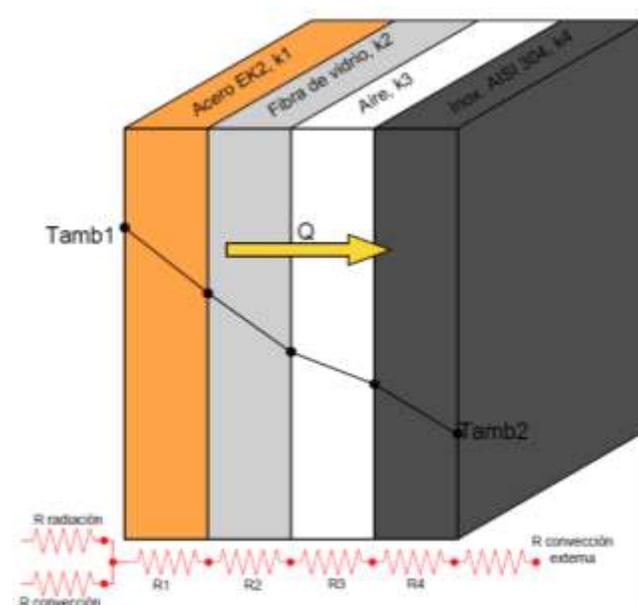


Figura 30. Estructura de las paredes laterales. Fuente: Autores.

Tabla 17. Conductividad térmica de los materiales de las paredes del horno. Fuente: Autores.

Material	Valor ($W/m \cdot K$)
Acero EK2, k_1	15.6
Fibra de vidrio, k_2	0.043
Aire, k_3	0.026
Acero Inoxidable 304, k_4	15.6

- **Acero EK2**

La conductividad térmica del acero EK2 se consideró el mismo que presenta el acero inoxidable AISI 304, los dos materiales son laminados en frío y comúnmente utilizados para la conformación de cocinas u hornos, por tal motivo se asumió este valor.

$$R_{cond1} = \frac{L_1}{k_1 \cdot A}$$

$$R_{cond1} = \frac{0.001m}{15.6 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \cdot 0.153m^2}$$

$$R_{cond1} = 418.97 \cdot 10^{-6} \frac{^\circ C}{W}$$

- Fibra de vidrio

$$R_{cond2} = \frac{L_2}{k_2 \cdot A}$$

$$R_{cond2} = \frac{0.017m}{0.043 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \cdot 0.153m^2}$$

$$R_{cond2} = 2.584 \frac{^\circ C}{W}$$

- Aire

$$R_{cond3} = \frac{L_3}{k_3 \cdot A}$$

$$R_{cond3} = \frac{0.05m}{0.026 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \cdot 0.153m^2}$$

$$R_{cond3} = 12.567 \frac{^\circ C}{W}$$

- Acero inoxidable AISI 304

$$R_{cond4} = \frac{L_4}{k_4 \cdot A}$$

$$R_{cond4} = \frac{0.0006m}{15.6 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \cdot 0.153m^2}$$

$$R_{cond4} = 251.383 \cdot 10^{-6} \frac{^\circ C}{W}$$

- Convección externa

$$R_{conv_{ext}} = \frac{1}{h_{ext} \cdot A}$$

$$R_{convext} = \frac{1}{0.648 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 0.153m^2}$$

$$R_{convext} = 10.08 \frac{^{\circ}C}{W}$$

▪ **Resistencia total**

Una vez calculado la resistencia en cada lámina o capa de material, se realiza una suma algebraica para encontrar la resistencia total de la pared lateral del horno.

$$R_{Total} = R_{comb} + R_{cond1} + R_{cond2} + R_{cond3} + R_{cond4} + R_{convext}$$

$$R_{Total} = 0.337 \frac{^{\circ}C}{W} + 418.97 \cdot 10^{-6} \frac{^{\circ}C}{W} + 2.584 \frac{^{\circ}C}{W} + 12.57 \frac{^{\circ}C}{W} + 251.383 \cdot 10^{-6} \frac{^{\circ}C}{W} + 10.08 \frac{^{\circ}C}{W}$$

$$R_{Total} = 25.57 \frac{^{\circ}C}{W}$$

El procedimiento para el cálculo de la resistencia térmica en las paredes que restan será el mismo que el presentado anteriormente. La conductividad térmica de los materiales que está formado las paredes del horno se presenta en la Tabla 18.

Tabla 18. Conductividad térmica de los materiales de las paredes del horno. Fuente: Autores.

Material	Cantidad	Unidad
Lámina galvanizada	16.7	$W/m \cdot K$
Papel aluminio	237	$W/m \cdot K$
Vitrocerámica	1.45	$W/m \cdot K$
Cristal templado	0.78	$W/m \cdot K$

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los calculos realizados para determinar la resistencia térmica en cada pared:

Tabla 19. Resistencias térmicas de cada pared del horno. Fuente: Autores.

Pared	Valor ($^{\circ}C/W$)
Posterior	18.53
Superior (cielo)	45.85
Frontal (puerta)	15.53
Inferior (piso)	80.81
Lateral Izquierdo	25.57
Lateral Derecho	25.57

5.4.6. Cálculo de transferencia de calor total

Para calcular la transferencia de calor desde el interior del horno hacia el exterior, se consideró la temperatura ambiente del recinto donde se encuentra la cocina y la temperatura en del centro del horno. Usamos la ecuación 11 y los valores de la resistencia térmica de cada pared Tabla 19.

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{Total}}$$

5.4.6.1. Transferencia de calor en paredes laterales

$$\dot{Q} = \frac{21^{\circ}C - 216.5^{\circ}C}{25.57 \frac{^{\circ}C}{W}}$$

$$\dot{Q} = -7.64 W$$

Realizamos en mismo procedimiento anterior para encontrar la transferencia de calor en cada pared del horno, en la Tabla 20 recopilamos los datos obtenidos.

Tabla 20. Transferencia de calor producido en cada pared

Pared	Valor (W)
Posterior	-10.54
Superior (cielo)	-4.26
Frontal (puerta)	-12.58
Inferior (piso)	-2.42
Lateral Izquierdo	-7.64
Lateral Derecho	-7.64

Analizando los resultados obtenidos la zona o pared donde existe una mayor transferencia de calor es la puerta del horno, que en comparación con la potencia de 1400W, requerida por la niquelina para generar calor en el interior del horno, representa el 0.89% del total de la energía necesaria para realizar la cocción de los alimentos, por otra parte el piso del horno es la zona donde menor transferencia de calor existe representando el 0.17%.

5.5. Análisis computacional

5.5.1. Creación de la geometría a simular

La geometría del interior del horno así como la niquelina se diseñó directamente en el software en la herramienta ANSYS *DesingModeler* del módulo CFX, las dimensiones utilizadas para el diseño son las indicadas en la Tabla 5 y la Figura 15.

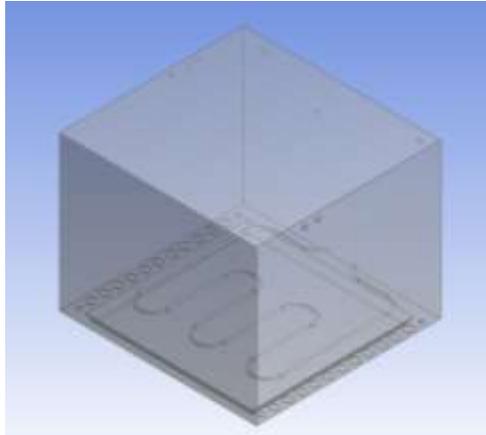
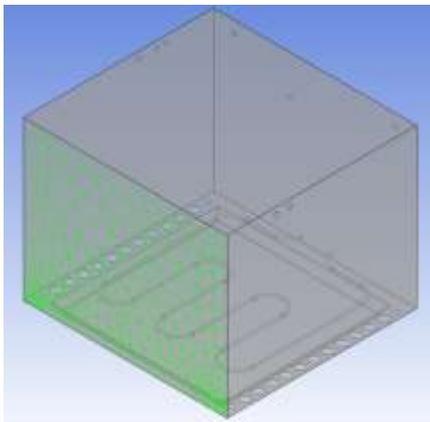


Figura 31. Geometría del espacio interior del horno y la resistencia eléctrica. Fuente: Autores.

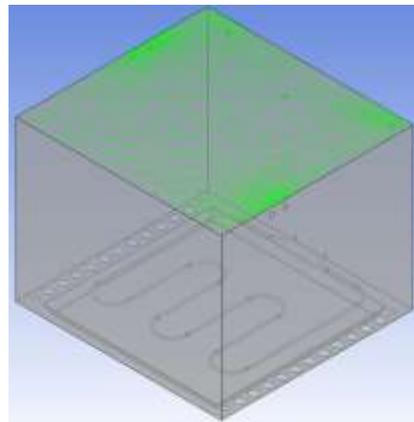
5.5.2. Definición del dominio computacional

En la Figura 32 se observa la definición de cada pared que conforma el horno, su niquelina así como las entradas y salidas de aire.

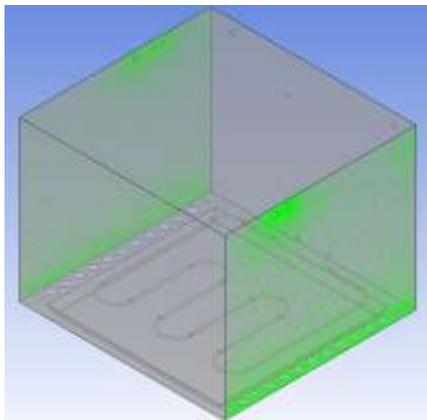
Figura 32. Dominio computacional de la geometría del horno. Fuente: Autores



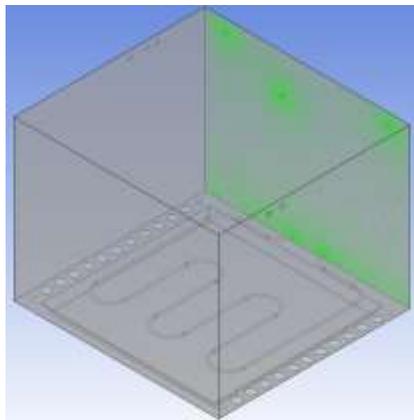
(a) Frontal



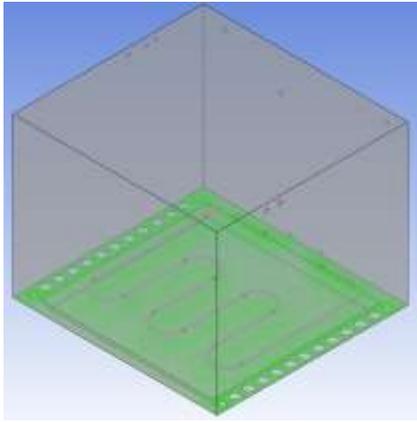
(b) Superior



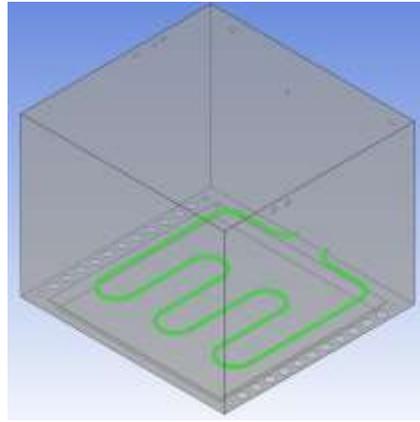
(c) Laterales



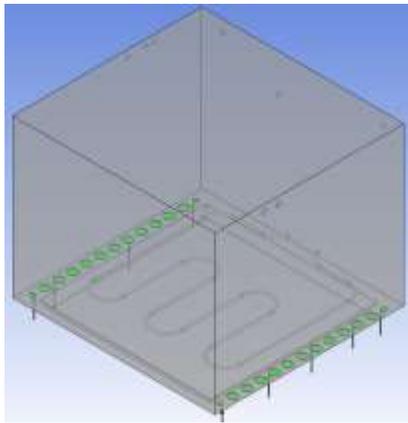
(d) Posterior



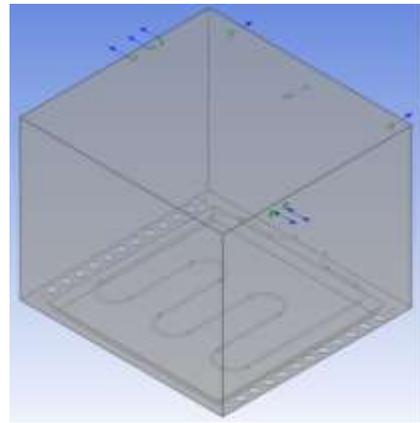
(e) Piso



(f) Niquelina



(g) Entrada



(d) Salidas

5.5.3. Mallado

El mallado utilizado para nuestro modelo de estudio es no estructurado con diferenciales tetraédricos, presentando un total de 1692363 elementos y 2341461 nodos, esta malla se encuentra dentro los parámetros de calidad *Skewness* y *Orthogonal Quality*.

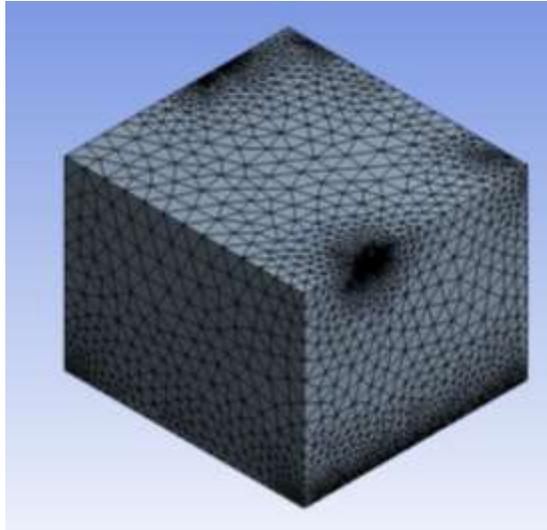


Figura 33. Mallado del dominio computacional del espacio interior del horno. Fuente: Autores

5.5.3.1. Oblicuidad (*Skewness*)

Este parámetro de calidad nos indica que tan cerca estamos de una cara ideal de un diferencial pudiendo ser equilátero y equiangular. El rango de trabajo para este parámetro se muestra en la Figura 34a y posteriormente la calidad obtenida luego del refinamiento del mallado, donde podemos observar que nos encontramos dentro del rango óptimo.

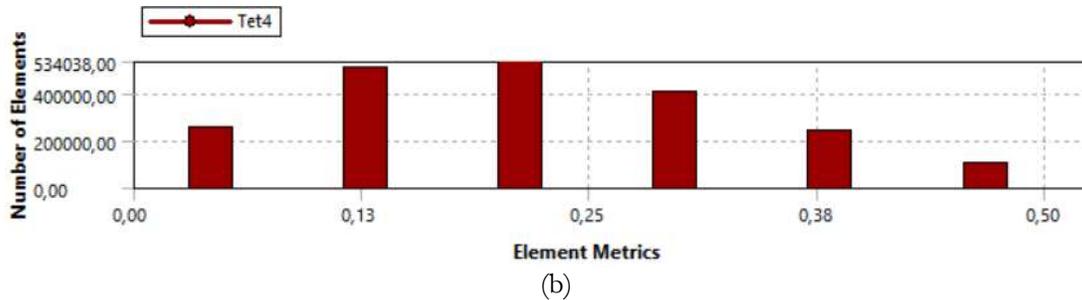
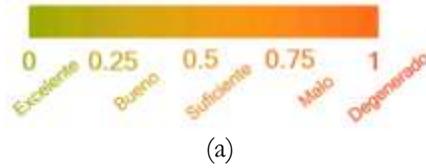


Figura 34. Calidad oblicua del mallado: (a) Rango de trabajo, (b) Calidad de mallado obtenido. Fuente: Autores.

5.5.3.2. Calidad Ortogonal (*Orthogonal Quality*)

Este parámetro de calidad nos indica que tan bien empatados están entre un diferencial con respecto a otro. El rango de trabajo aceptable es lo contrario al parámetro anterior como se muestra en la Figura 35. Luego del refinamiento del mallado se obtuvo que las uniones entre caras de los diferenciales se encontraban dentro del rango de trabajo.

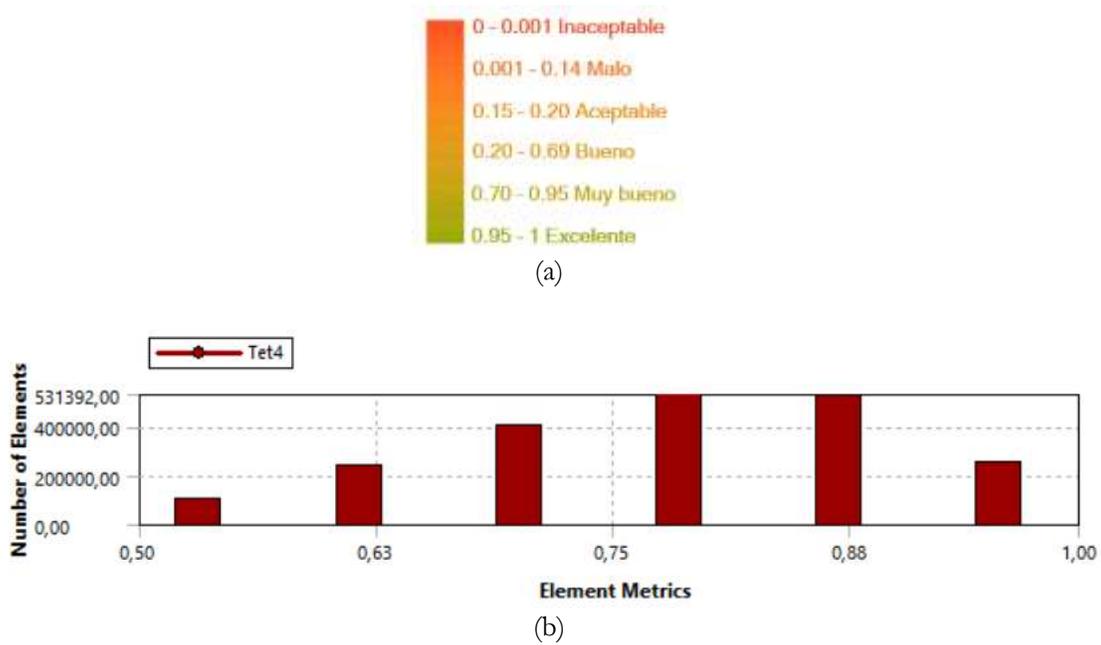


Figura 35. Calidad ortogonal del mallado (a) Rango de trabajo, (b) Calidad obtenida. Fuente: Autores.

5.5.4. Configuración tipo de análisis (*Set Up*)

Como tipo de análisis seleccionamos un régimen transitorio pues se busca obtener la distribución de temperatura en un tiempo determinado de 18 minutos, este el periodo que transcurre desde el encendido del horno hasta cuando la zona en donde se encuentra el termopar detecta la temperatura fijada por el termostato (235°C). Se toma intervalos de muestreo cada un minuto debido a que en este mismo intervalo se adquirió los datos experimentalmente y como método de ahorro computacional.

Tabla 21. Condiciones iniciales para el tipo de análisis. Fuente: Autores.

<i>Analysis Type</i>	
<i>Option</i>	<i>Transient</i>
<i>Total Time</i>	<i>18 [min]</i>
<i>Time steps</i>	<i>1 [min]</i>
<i>Initial Time</i>	
<i>Option</i>	<i>Automatic with value</i>
<i>Time Steps</i>	<i>0 [s]</i>

5.5.5. Configuración del dominio (*Default Domain*)

En este apartado configuramos el fluido con el que se va a trabajar en nuestro caso seleccionamos aire como gas ideal, existen propiedades tales como densidad, viscosidad, etc., cuyos valores vienen predeterminados por el software los cuales en nuestro caso no se modificaron.

Tabla 22. Propiedades del fluido de entrada. Fuente: Autores.

Basic Settings	
Material	<i>Air Ideal Gas</i>
Morphology	<i>Continous Fluid</i>
Reference Press	<i>1 (atm)</i>

Continuando con la configuración se utilizó el modelo de transferencia de calor *Thermal Energy*, este modelo es adecuado para flujos de baja velocidad donde los efectos cinéticos son insignificantes, se diferencia de otros modelos en que no se incluye los efectos de energía cinética [37]

Tabla 23. Configuración del fluido de entrada. Fuente: Autores.

Fluid Models	
Heat Transfer	
Option	<i>Thermal Energy</i>
Turbulence	
Option	<i>None (Laminar)</i>
Thermal Radiation	
Option	<i>Discrete Transfer</i>
Transfer Mode	<i>Surface to Surface</i>

Para este estudio se considera el modelo de radiación *Discrete Transfer* y como modo transferencia la opción “S2S” cuya característica principal es que cualquier absorción, emisión o dispersión de radiación puede ignorarse y se considera únicamente la radiación de “superficie a superficie” [37].

5.5.6. Configuración de condiciones de contorno

El sistema consta de paredes, entradas y salidas de aire, aquí asignamos características a cada una de estas, en la Tabla 24 se observa las propiedades para cada uno de los componentes como temperaturas, coeficiente de transferencia de calor, emisividad, etc.

Tabla 24. Configuración condiciones de contorno. Fuente: Autores.

Frontal		Superior	
Mass And Momentum		Mass And Momentum	
Option	<i>No Slip Wall</i>	Option	<i>No Slip Wall</i>
Heat Transfer		Heat Transfer	
Option	Heat Transfer Coefficient	Option	Heat Transfer Coefficient
Heat trans. Coeff.	<i>0.634 [W/m² K⁻¹]</i>	Heat trans. Coeff.	<i>0.634 [W/m² K⁻¹]</i>
Outside Temperature	<i>21 [°C]</i>	Outside Temperature	<i>21.1 [°C]</i>
Thermal Radiation		Thermal Radiation	
Option	<i>Opaque</i>	Option	<i>Opaque</i>
Emissivity	<i>0.94</i>	Emissivity	<i>0.98</i>

Laterales	
Mass And Momentum	
<i>Option</i>	<i>No Slip Wall</i>
Heat Transfer	
<i>Option</i>	<i>Heat Transfer Coefficient</i>
<i>Heat trans. Coeff.</i>	<i>0.634 [W/m⁻² K⁻¹]</i>
<i>Outside Temperature</i>	<i>21.25 [°C]</i>
Thermal Radiation	
<i>Option</i>	<i>Opaque</i>
<i>Emissivity</i>	<i>0.98</i>

Posterior	
Mass And Momentum	
<i>Option</i>	<i>No Slip Wall</i>
Heat Transfer	
<i>Option</i>	<i>Heat Transfer Coefficient</i>
<i>Heat trans. Coeff.</i>	<i>0.634 [W/m⁻² K⁻¹]</i>
<i>Outside Temperature</i>	<i>21.3 [°C]</i>
Thermal Radiation	
<i>Option</i>	<i>Opaque</i>
<i>Emissivity</i>	<i>0.98</i>

Piso	
Mass And Momentum	
<i>Option</i>	<i>No Slip Wall</i>
Heat Transfer	
<i>Option</i>	<i>Heat Transfer Coefficient</i>
<i>Heat trans. Coeff.</i>	<i>0.634 [W/m⁻² K⁻¹]</i>
<i>Outside Temperature</i>	<i>21.2 [°C]</i>
Thermal Radiation	
<i>Option</i>	<i>Opaque</i>
<i>Emissivity</i>	<i>0.98</i>

Niquelina	
Mass And Momentum	
<i>Option</i>	<i>No Slip Wall</i>
Heat Transfer	
<i>Option</i>	<i>Temperature</i>
<i>Fixed Temperature</i>	<i>Temp [C]</i>
Thermal Radiation	
<i>Option</i>	<i>Opaque</i>
<i>Emissivity</i>	<i>0.88</i>

Entrada	
Flow Regime	
<i>Option</i>	<i>Subsonic</i>
Mass and Momentum	
<i>Option</i>	<i>Normal Speed</i>
<i>Normal Speed</i>	<i>0.01 [m/s⁻¹]</i>
Heat Transfer	
<i>Option</i>	<i>Static temperature</i>
<i>Static temperatura</i>	<i>21 [°C]</i>
Thermal Radiation	
<i>Option</i>	<i>Local Temperature</i>

Salidas	
Flow Regime	
<i>Option</i>	<i>Subsonic</i>
Mass and Momentum	
<i>Option</i>	<i>Average Static Pressure</i>
<i>Relative Pressure</i>	<i>0 [Pa]</i>
<i>Pres. Profile Blend</i>	<i>0.05</i>
Pressure Averaging	
<i>Option</i>	<i>Average Over Whole Outlet</i>
Thermal Radiation	
<i>Option</i>	<i>Local Temperature</i>

5.5.7. Ingreso de la función matemática

El calor que se genera en el interior del horno es producido por la niquelina la cual al ser energizada aumenta la temperatura de su cuerpo durante el transcurso del tiempo, dado que su temperatura no es constante se debe determinar su ecuación en función del tiempo para ser ingresada en el software.

La niquelina utilizada en este estudio presenta una descompensación en el calentamiento en toda su geometría, como se observa en la Figura 36 las zonas donde mayor temperatura presentan son las

marcadas con las etiquetas M2 y M3 presentando temperaturas máximas de 294,75°C y 316.5°C respectivamente, mientras que la zona (M1) es donde se presenta la menor temperatura siendo esta de 255.75°C. Teniendo en cuenta estas variaciones se adquirió las temperaturas en cada uno de estos puntos para posteriormente calcular una temperatura promedio la cual represente el calentamiento de la niquelina en el transcurso del tiempo, estos datos recopilados se muestran en la Tabla 25.

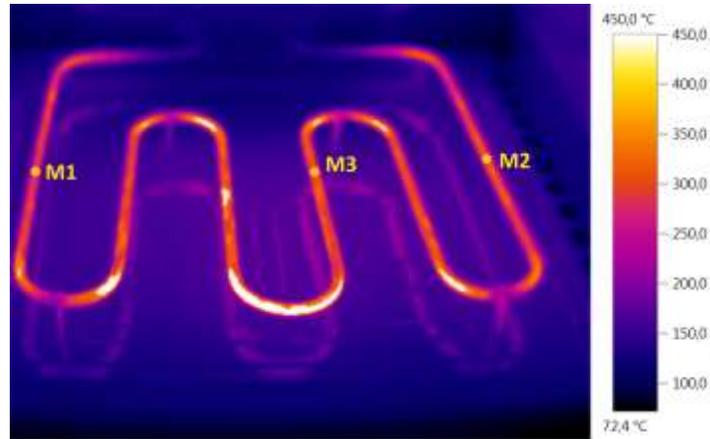


Figura 36. Análisis termográfico de la niquelina. Fuente: Autores.

Tabla 25. Datos de temperatura medidos en tres puntos. Fuente: Autores.

Tiempo (s)	Marca M1 (°C)	Marca M2 (°C)	Marca M3 (°C)	Tempera promedio (°C)
0	21	21.5	21.25	21.25
60	32.75	36	57.25	42.00
120	57	69.5	117.75	81.42
180	84.25	113	173.25	123.50
240	112.25	149.25	213.25	158.25
300	136.25	179	232	182.42
360	155.75	203	244.25	201.00
420	175	223.5	253.5	217.33
480	191.25	237.25	264	230.83
540	202.25	250	268.75	240.33
600	211	258.75	274.75	248.17
660	221	266.5	281	256.17
720	227.25	273.75	286.25	262.42
780	233	280.25	289.75	267.67
840	239.25	284.75	295.75	273.25
900	243.5	285.75	299.75	276.33
960	249	288.5	307.75	281.75
1020	253	292	313	286.00
1080	255.75	294.75	316.5	289.00

Este comportamiento que presenta la niquelina debe ser ingresado al software como una función de entrada de temperatura en función del tiempo, la cual es obtenida mediante un ajuste de curvas polinomial de tercer grado de la temperatura media adquirida de los datos experimentales. El residuo de la función matemática en comparación con los datos experimentales es de R-square: 0.9959.

$$T(t) = 3 \times 10^{-7} \cdot t^3 - 0.0007998 \cdot t^2 + 0.7735 \cdot t + 15.2 \quad (21)$$

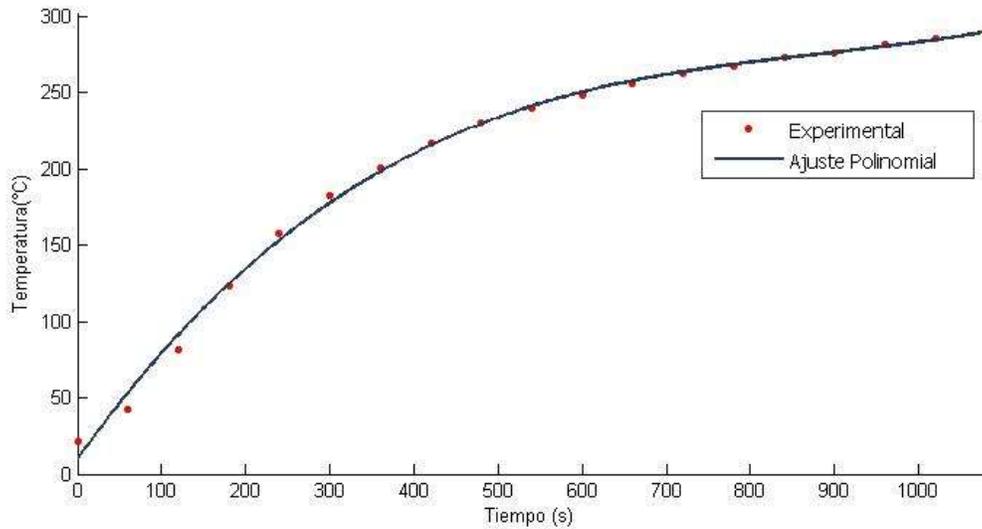


Figura 37. Curva de comportamiento de la temperatura de la niquelina con ajuste polinomial. Fuente: Autores.

Para definir esta expresión se hace el uso de variables como se observa en la Tabla 26, las mismas que almacenan el valor de los datos para posterior ser definida en las condiciones de contorno (Niquelina).

Tabla 26. Expresión de entrada. Fuente: Autores.

<i>Expressions</i>	
<i>Temp</i>	$a + b + c + d$
<i>a</i>	$0.0000003[s^{\wedge} - 3] * t^{\wedge}3$
<i>B</i>	$-0.0007998[s^{\wedge} - 2] * t^{\wedge}2$
<i>C</i>	$0.7735[s^{\wedge} - 1] * t$
<i>D</i>	15.2

5.5.8. Solucionador (*Solver*)

El ordenador utilizado para la simulación tiene las siguientes características:

Tabla 27. Características del ordenador. Fuente: Autores.

Marca	DELL
Procesador	Intel Core i5-5200U
Memoria RAM	8 GB
Tipo de sistema	Sistema operático de 64 bits

Para la configuración del *Solver* elegimos 4 núcleos del ordenador para realizar el proceso de simulación, los demás campos dejamos con los valores predeterminados por el programa.

5.5.9. Resultados de la simulación

Para analizar el cambio de temperatura el interior del horno se colocó un plano XY en el centro de la niquelina como se indica en la Figura 38, el análisis se lo realizó durante 18 minutos, tiempo en el que el control del termostato es activado. Para una mejor apreciación se colocó una gama de colores para el

plano XY como para la niquelina los cuales nos indican el cambio de temperatura en el transcurso del tiempo.

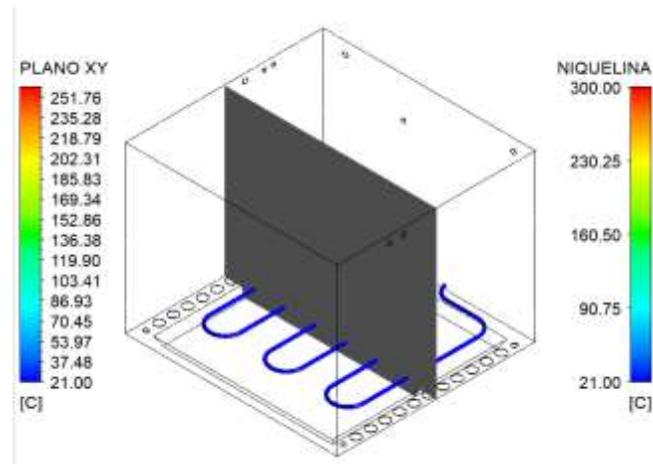
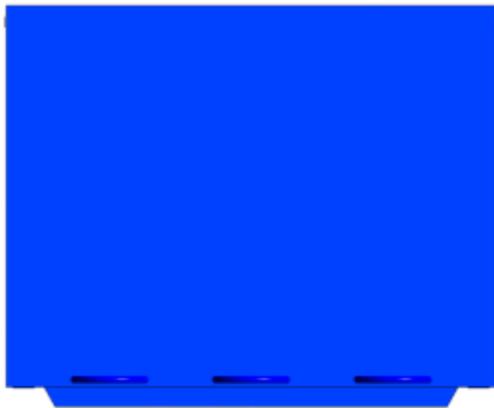


Figura 38. Plano colocado para el análisis en la zona central del horno. Fuente: Autores.

Figura 39. Contornos de la distribución de temperaturas en el dominio del tiempo. Fuente: Autores.

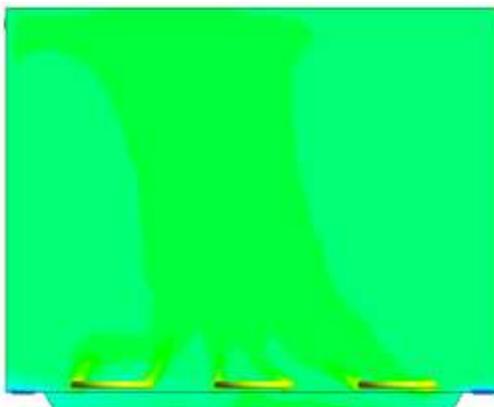
Tiempo: 0 min.



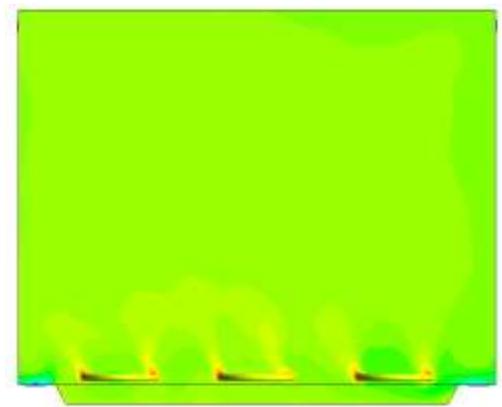
Tiempo: 3 min.



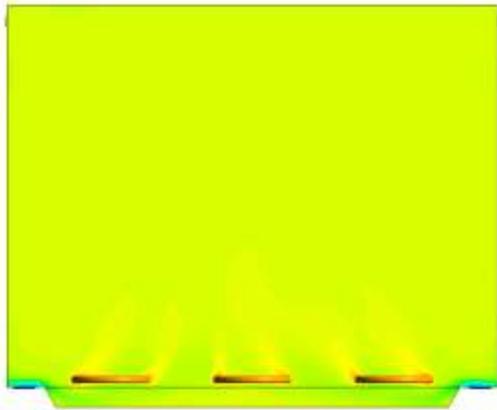
Tiempo: 6 min.



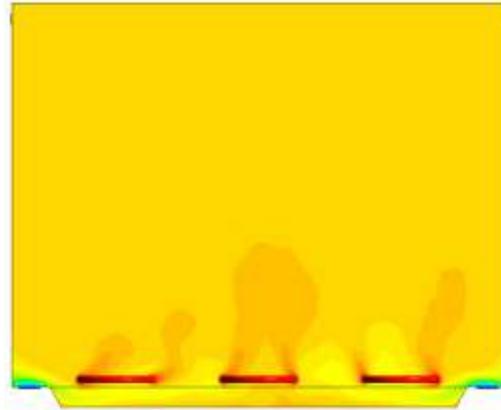
Tiempo: 9 min.



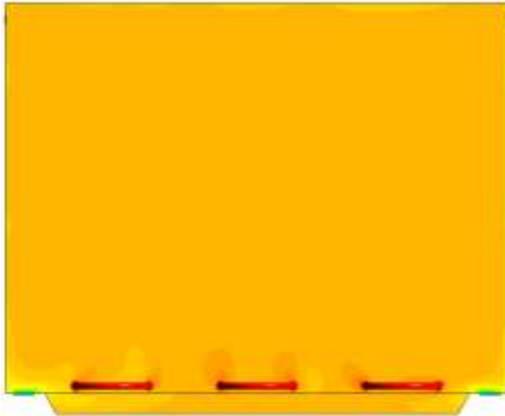
Tiempo 12 min.



Tiempo 15 min.



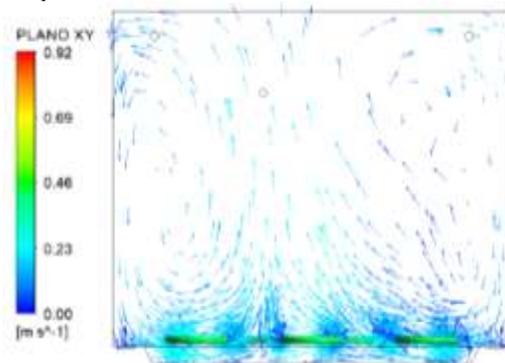
Tiempo: 18 min.



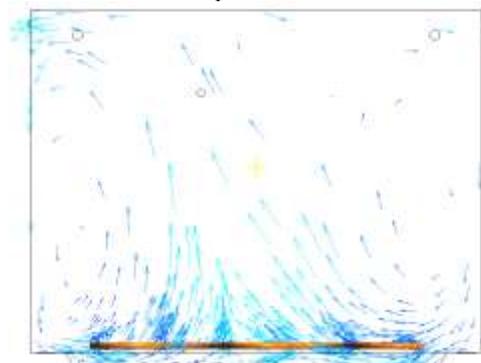
En la Figura 39, observamos la distribución de la temperatura que ocurre cada 3 min., el flujo de aire caliente se produce desde las zonas de mayor calentamiento de la niquelina, en este momento el aire se dilata, disminuye su densidad y asciende hacia la parte del cielo formándose una corriente de circulación donde las masas calientes suben y las frías descienden.

Figura 40. Contorno de la distribución del flujo de aire (vectores de velocidad). Fuente: Autores

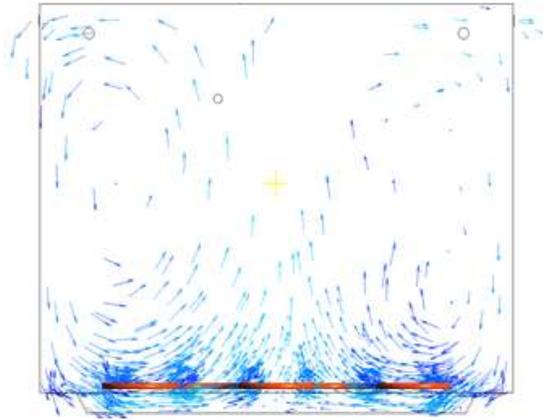
Tiempo: 6 min.



Tiempo: 12 min.



Tiempo: 18 min.



El comportamiento del flujo de aire en el plano XY se representa a través de vectores de velocidad (Figura 40), aquí se observa la recirculación del flujo en el interior del horno, donde se genera un aumento de velocidad conforme aumenta la temperatura, llegando a tener velocidades de aproximadamente 0.3 m/s, esto, debido al cambio de densidad que sufre el aire.

6. Resultados

En esta sección se presenta las comparaciones de los datos obtenidos experimental y numéricamente, mediante gráficas que nos ilustran la distribución de temperaturas en los cuatro puntos analizados. Además, se evalúa las variaciones de los resultados entre estos dos análisis mediante el cálculo del error absoluto.

6.1. Validación del comportamiento del sistema

Finalmente se determina si la solución obtenida computacionalmente representa o no al sistema real analizado, para esto utilizamos el error absoluto el cual cuantifica la variación existente en términos absolutos con respecto al valor verdadero que en este caso será el valor de la simulación y para resaltar la importancia relativa de esta variación calculamos el error relativo como la división entre el error absoluto y el valor verdadero (simulación) [38], las ecuaciones utilizadas para este cálculo se presentan a continuación:

$$E_{abs} = Medida_{experimental} - Medida_{simulada} \quad (22)$$

$$E_r = \frac{E_{abs}}{Medida_{simulada}} \cdot 100\% \quad (23)$$

Con el uso de las ecuaciones 22 y 23 se procede a realizar el cálculo de los errores absolutos y relativos entre los datos adquiridos experimentalmente y los obtenidos numéricamente. En las Tablas 28, 29, 30 se muestran los resultados de estos errores en cada zona analizada. Además, se realiza una comparación gráfica de la distribución de temperaturas las cuales se pueden apreciar en las Figuras 41, 42 y 43.

- Zona central al interior del horno

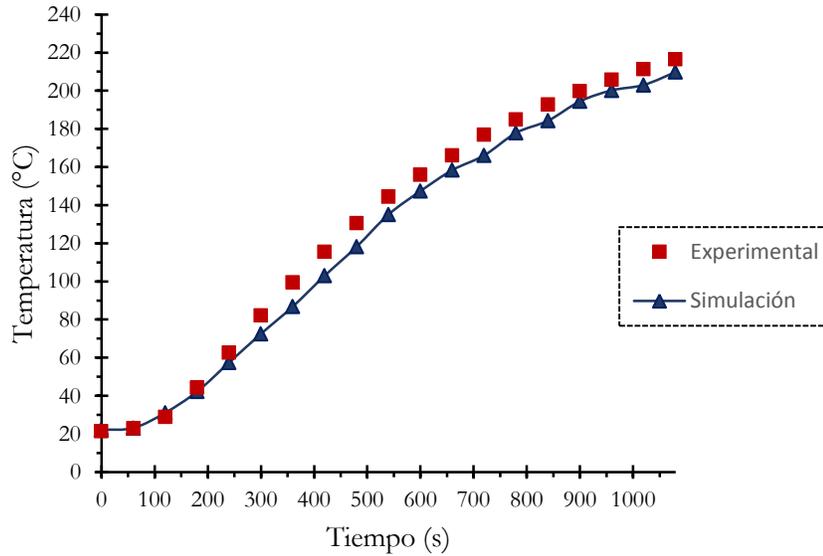


Figura 41. Resultados numéricos vs. Datos experimentales de la distribución de temperatura (zona central).
Fuente: Autores.

Tabla 28. Errores absolutos y relativos registrados en la zona central. Fuente: Autores.

Tiempo (s)	Error absoluto (°C)	Error relativo (%)
0	0.0	0.00
60	0.1	0.53
120	2.1	7.33
180	2.0	4.52
240	5.2	8.28
300	9.6	11.70
360	12.7	12.72
420	12.5	10.79
480	12.4	9.50
540	9.3	6.42
600	8.5	5.47
660	7.7	4.66
720	10.9	6.15
780	6.9	3.75
840	8.6	4.46
900	5.3	2.66
960	5.7	2.75
1020	8.4	3.95
1080	6.7	3.07
Promedio	7.1	5.72

En la zona central se obtienen temperaturas de 216.5°C (experimental) y 209.84°C (simulación), esta es la zona de todos los puntos analizados que mayor temperatura presentan, una de las razones es que la

mayor concentración de calor se da en la región central del cuerpo de la niquelina como se determinó en el análisis termográfico donde la temperatura de la superficie alcanza los 316.5 °C aproximadamente.

▪ **Pared Lateral Izquierda**

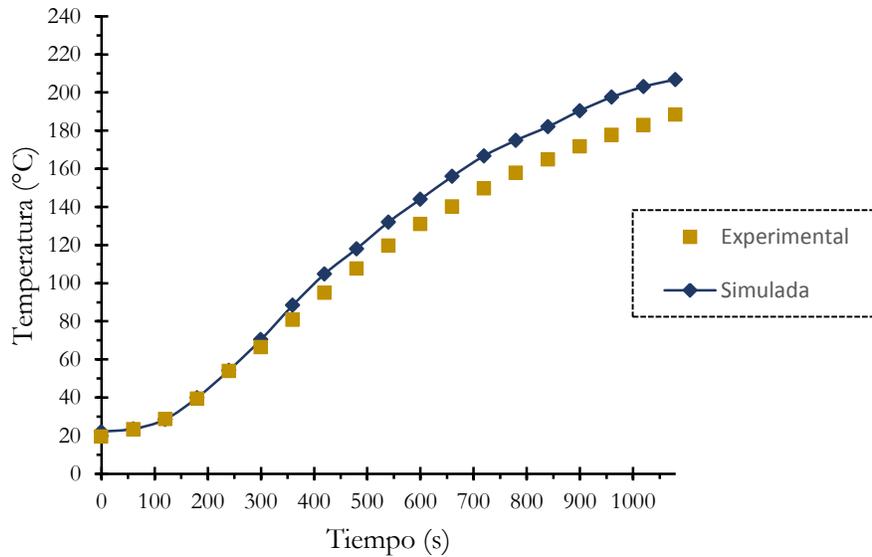


Figura 42. Resultados numéricos vs. Datos experimentales de la distribución de temperatura (Pared Lateral Izquierda). Fuente: Autores.

Tabla 29. Errores absolutos y relativos registrados en la pared lateral izquierda. Fuente: Autores.

Tiempo (s)	Error absoluto (°C)	Error relativo (%)
0	0	0
60	0.1	0.39
120	0.2	0.62
180	0.5	1.23
240	0.4	0.66
300	3.9	5.88
360	7.7	9.55
420	9.9	10.44
480	10.3	9.57
540	12.3	10.26
600	13.0	9.95
660	15.8	11.24
720	17.1	11.39
780	17.0	10.74
840	17.1	10.35
900	18.7	10.88
960	19.8	11.17
1020	20.1	10.97
1080	18.3	9.72
Promedio	10.64	7.63

En esta zona se presenta la mayor variación de temperaturas, obteniendo un error absoluto de 10.64°C. Este error se presenta debido a que en esta parte de la niquelina el calentamiento es mínimo en comparación con los otros puntos analizados, llegando a tener una temperatura máxima de 255.75°C.

▪ **Pared Lateral Derecha**

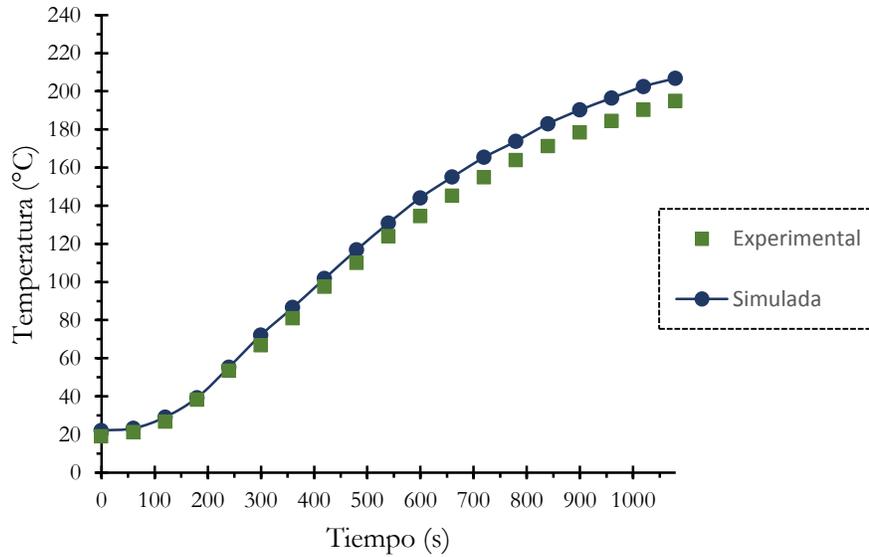


Figura 43. Resultados numéricos vs. Datos experimentales de la distribución de temperatura (Pared Lateral Derecha). Fuente: Autores.

Tabla 30. Errores absolutos y relativos registrados en la pared lateral derecha. Fuente: Autores.

Tiempo (s)	Error absoluto (°C)	Error relativo (%)
0	0	0
60	2.0	9.26
120	2.4	8.92
180	1.1	2.82
240	1.9	3.47
300	5.4	8.10
360	5.6	6.93
420	4.4	4.49
480	6.8	6.23
540	6.9	5.56
600	8.6	6.39
660	8.8	6.06
720	9.4	6.06
780	8.6	5.24
840	10.7	6.25
900	10.7	5.99
960	11.0	5.96
1020	11.3	5.94
1080	10.8	5.54
Promedio	6.65	5.75

▪ Pared Posterior

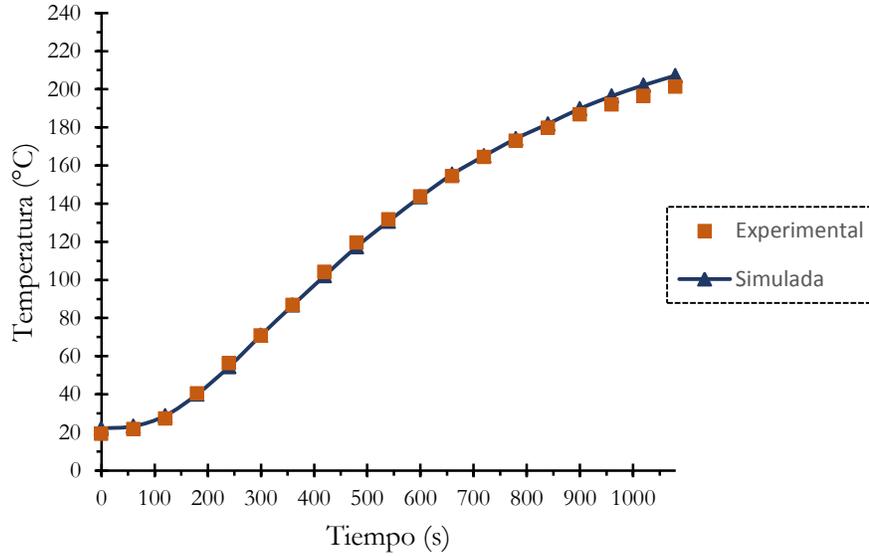


Figura 44. Resultados numéricos vs. Datos experimentales de la distribución de temperatura (Pared Posterior).
Fuente: Autores.

Tabla 31. Errores absolutos y relativos registrados en la pared posterior. Fuente: Autores.

Tiempo (s)	Error absoluto (°C)	Error relativo (%)
0	0	0
60	1.3	6.13
120	1.4	5.00
180	0.6	1.46
240	1.9	3.42
300	0.1	0.09
360	0.1	0.13
420	2.2	2.12
480	2.3	1.89
540	1.1	0.86
600	0.3	0.22
660	0.8	0.49
720	0.4	0.25
780	1.0	0.58
840	1.9	1.08
900	2.9	1.56
960	4.3	2.22
1020	5.5	2.79
1080	5.8	2.87
Promedio	1.78	1.75

Finalmente las paredes lateral derecha y posterior son las que menor error promedio presentan siendo estos 6.65°C y 1.78°C respectivamente, esto, debido a que debajo de estas zonas el cuerpo de la niquelina presenta un calentamiento más homogéneo que los tramos analizados en los casos anteriores, motivo por el cual aumenta o disminuye el error absoluto analizado.

7. Conclusiones

- Se analizó la distribución de temperaturas al interior del horno en la zona media, lugar donde comúnmente se colocan los alimentos para la cocción. A través de un análisis numérico utilizando el software ANSYS CFX y un análisis experimental con mediciones de temperaturas con la ayuda de termocuplas tipo K.
- Se determinó el tiempo de encendido continuo de la niquelina el mismo que rodea los 18 min. aproximadamente el cual a partir de este intervalo se interrumpe su energización por el funcionamiento del control ON/OFF, lo cual representa una oscilación en la temperatura de su superficie como en el ambiente del horno.
- Al realizar la adquisición de datos mediante termocuplas tipo K en los cuatro puntos de la zona central del horno, se detectó variaciones en la distribución de la temperatura. Durante los primeros 120 segundos la distribución en cada una de estas zonas es casi homogénea llegando a obtener una variación máxima de 3.5°C; con el transcurso del tiempo esta variación aumenta registrando un valor máximo de 27.12°C, esto transcurrido 1080 segundos, etapa de estabilización de la temperatura de seteo (235°C).
- Se estableció un análisis tridimensional mediante el uso del software ANSYS en el módulo CFX, el mismo que logró predecir la distribución de temperaturas en el interior del horno utilizando a la radiación como principal medio de transferencia de calor, representado a través del modelo de transferencia discreta (*Discrete Transfer*) de CFD adecuado para interpretar los rayos que emite la superficie de la niquelina.
- Se determinó la relación existente entre el análisis experimental y computacional por medio del cálculo del error absoluto promedio. Donde el mayor error se presenta en la pared lateral izquierda (10.64°C) y el de menor error se encuentra en la pared posterior (1.78°C), la mayor variación de temperatura se presenta debido al calentamiento no homogéneo de la niquelina, pues a largo de toda su geometría existen zonas más calientes que otras.

8. Recomendaciones

Se recomienda el uso de termocuplas tipo K de alta gama las cuales proporcionan un error de medición de $\pm 0.5^\circ\text{C}$, su precio es elevado en comparación a la estándar utilizada en este proyecto.

Para realizar la medición del aire circundante se recomienda el uso de un anemómetro de hilo caliente, el cual registra velocidades bajas que además posee un conector de sonda que acepta termopares tipo K o J.

9. Trabajos futuros

El siguiente desarrollo de esta investigación es analizar la distribución de temperatura incluyendo cargas térmicas en el interior del horno, por lo que se recomienda el uso de distintos alimentos cárnicos o

panificados que permita validar de manera eficiente el modelo CFD utilizado en el proceso de simulación.

10. Referencias Bibliográficas

- [1] T. A. Markus, *Domestic energy and affordable warmth*. Routledge, 2005.
- [2] S. M. Goñi y V. O. Salvadori, “Simulación de la convección natural en un horno eléctrico.”, *INNOTEC*, 2016.
- [3] B. Roa, “Análisis aerodinámico y distribución de temperatura en el interior de un horno de cocción rotatorio-generada por un ventilador de flujo radial”, Tesis, Colombia, 2018.
- [4] “Cocinas eléctricas son parte del cambio de la matriz energética”, *El Telégrafo*. [En línea]. Disponible en: <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/economia/4/cocinas-electricas-son-parte-del-cambio-de-la-matriz-energetica>. [Consultado: 03-jul-2018].
- [5] R. L. Mott, *Mecánica de fluidos*, 6a ed. Pearson Educación, 2006.
- [6] H. Mistry, S. Dey, P. Bishnoi, y J. L. Castillo, “Modeling of transient natural convection heat transfer in electric ovens”, *Applied thermal engineering*, vol. 26, núm. 17–18, pp. 2448–2456, 2006.
- [7] C. Sánchez, “Nuevas tecnologías reducen el consumo energético de hornos industriales”, *Energy News*. [En línea]. Disponible en: <https://www.energynews.es/nuevas-tecnologias-reducen-consumo-hornos-industriales/>. [Consultado: 10-jul-2018].
- [8] J. Smolka, A. J. Nowak, y D. Rybarz, “Improved 3-D temperature uniformity in a laboratory drying oven based on experimentally validated CFD computations”, *Journal of Food Engineering*, vol. 97, núm. 3, pp. 373–383, 2010.
- [9] “Cocinas de Inducción: una segunda oportunidad en el mercado ecuatoriano”, *ANDES*. [En línea]. Disponible en: <http://tinyurl.com/y92mafo5>. [Consultado: 06-jul-2018].
- [10] “Eficiencia energética en Ecuador”, *Ministerio de electricidad y energía renovable*. [En línea]. Disponible en: <http://www.energia.gob.ec/direccion-nacional-de-eficiencia-energetica/>. [Consultado: 07-mar-2018].
- [11] “Artefactos de uso doméstico para cocinar, que utilizan combustibles gaseosos. Requisitos e inspección”. [En línea]. Disponible en: http://www.normalizacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/11/pec_003.pdf. [Consultado: 10-abr-2018].

- [12] J. L. Armendariz, *Procesos de prelaboración y conservación en cocina*, 1a ed. Paraninfo, 2013.
- [13] “Hornos de Convección Profesionales y Domésticos”. [En línea]. Disponible en: <https://www.pepebar.com/horno-de-conveccion#hornos-conveccion>. [Consultado: 25-sep-2018].
- [14] “Requisitos de instalación para electrodomésticos”. [En línea]. Disponible en: https://www.indurama.com/docs/Folleto_requisitos_instalacion.pdf. [Consultado: 29-nov-2018].
- [15] S. H. Avner, *Introducción a la metalurgia física*, 2a ed. Castillo, 1981.
- [16] “Aceros laminados en frío para esmaltación convencional”. [En línea]. Disponible en: <https://industry.arcelormittal.com/catalogue/C10/ES>. [Consultado: 29-nov-2018].
- [17] J. A. Urquiza, *Hornos industriales de resistencias*. McGraw Hill, 1999.
- [18] A. M. Gracia, *Disminución de costes energéticos en la empresa: tecnologías y estrategias para el ahorro y la eficiencia energética*. FC Editorial, 2006.
- [19] “KINTEL”, *Resistencias Tipo Tubular*. [En línea]. Disponible en: <https://www.kintel.com.mx/resistencias-tipo-tubular/>. [Consultado: 28-sep-2018].
- [20] J. A. Sánchez, *Instrumentación y control avanzado de procesos*. Ediciones Díaz de Santos, 2013.
- [21] “Distribuidora Horse”, *Termocupla coaxial, catálogo de productos*. [En línea]. Disponible en: <https://distribuidorahorse.com.ar/termocupla-de-1200-mm-coaxial-soporte-segeer-bosch/>. [Consultado: 07-oct-2018].
- [22] M. Varela, “Elaboración de partes y piezas para el sector de línea blanca”, *Ministerio de industrias y productividad*. [En línea]. Disponible en: <https://www.flacso.edu.ec/portal/pnTemp/PageMaster/9p6suz41iwop5nwho5md09dzz7jkps.pdf>. [Consultado: 18-jul-2018].
- [23] Y. A. Cengel, *Transferencia de calor y masa*, 4a ed. McGraw Hill, 2011.
- [24] F. P. Incropera y D. P. DeWitt, *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educación, 1999.
- [25] J. P. Holman, *Transferencia de calor*, 8a ed. McGraw Hill, 1998.
- [26] F. M. White, *Mecánica de Fluidos*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2008.
- [27] J. Xamán, *Dinámica De Fluidos Computacional Para Ingenieros*. Palibrio, 2016.

- [28] J. Tu, G. H. Yeoh, y C. Liu, *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*, 3a ed. Butterworth-Heinemann, 2018.
- [29] R. H. Sampieri, C. F. Collado, y P. B. Lucio, *Metodología de la investigación*. MacGraw-Hill/Interamericana, 2006.
- [30] “Instrumentos Testo S.A.”, *Cámaras termográficas Testo*. [En línea]. Disponible en: <https://www.testo.com/es-ES/productos/camaras-termograficas-testo>. [Consultado: 29-sep-2018].
- [31] “OMEGA”, *Sondas Pt100*. [En línea]. Disponible en: <https://es.omega.com/pptst/t3probes.html>. [Consultado: 01-oct-2018].
- [32] “Naylamp Mechatronics”, *Transmisor para termocupla MAX6675*. [En línea]. Disponible en: <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/331-transmisor-para-termocupla-max6675.html>. [Consultado: 01-oct-2018].
- [33] “ARDUINO”, *Arduino Uno*. [En línea]. Disponible en: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. [Consultado: 01-oct-2018].
- [34] A. Domingues dos Santos, “Arduino-Termopar do tipo K e módulo Max6675, Protocolo de comunicação SPI”, *Física Experimental*. [En línea]. Disponible en: <https://docplayer.com.br/72573412-Fisica-experimental-vi.html>. [Consultado: 01-oct-2018].
- [35] “Parallax Inc”, *Parallax Data Acquisition tool*. [En línea]. Disponible en: <https://www.parallax.com/downloads/plx-daq>. [Consultado: 02-oct-2018].
- [36] H. Grüner, R. Metz, y A. G. Martínez, *Procesos de cocina*, 28a ed. Ediciones AKAL, 2005.
- [37] K. L. Lawrence, *ANSYS Workbench Tutorial Release 14*. SDC Publications, 2012.
- [38] A. Guerrero y M. Díaz, *Introducción de Errores en la Medición*. ITM, 2007.

11. Anexos

A.1 Programación Arduino

```
//Autores: XAVIER MARCELO ASITIMBAY DÉLEG, JUAN VIRGILIO PLAZA TEPAN
//UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
//PROGRAMACIÓN PARA LA LECTURA DE CUATRO TERMOCUPLAS TIPO K A TRAVÉS DE TRANSMISORES MAX6675

//1. INCLUIMOS LA LIBRERÍA DEL TRANSMISOR
#include "max6675.h"

//2. DEFINIMOS VARIABLES DONDE SE ALMACENARÁN LOS DATOS

//Sensor1
float temp1 = 0;
//Sensor2
float temp2 = 0;
//Sensor3
float temp3 = 0;
//Sensor4
float temp4 = 0;

//3. DEFINIMOS LOS PINES DONDE SE CONECTARÁN LAS SALIDAS DE LOS TRANSMISORES MAX6675

//Sensor1
int ktcS01 = 11;
int ktcCS1 = 12;
int ktcCLK1 = 13;
MAX6675 ktc1(ktcCLK1, ktcCS1, ktcS01);
//Sensor2
int ktcS02 = 10;
int ktcCS2 = 9;
```

```

int ktcCLK2 = 8;
MAX6675 ktc2(ktcCLK2, ktcCS2, ktcSO2);
//Sensor3
int ktcSO3 = 7;
int ktcCS3 = 6;
int ktcCLK3 = 5;
MAX6675 ktc3(ktcCLK3, ktcCS3, ktcSO3);
//Sensor4
int ktcSO4 = 2;
int ktcCS4 = 3;
int ktcCLK4 = 4;
MAX6675 ktc4(ktcCLK4, ktcCS4, ktcSO4);

//4. PROGRAMACIÓN PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Definimos la velocidad para la transmisión de datos
  //Configuración del boton del PLX-DATA para que elimine datos almacenados
  Serial.println("CLEARDATA");
  //Configuración de etiquetas para cada columna en Excel
  Serial.println("LABEL, Hora, tiempo, sensor1, sensor2, sensor3, sensor4");
  //Configuración del botón para reiniciar el tiempo de adquisición de datos.
  Serial.println("RESETTIMER");
}

//5. PROGRAMACIÓN QUE SE REPETIRÁ CILICAMENTE DURANTE LA TOMA DE DATOS
void loop(){

  //Lectura de las variables flotantes mediante el transmisor
  temp1=ktc1.readCelsius();
  temp2=ktc2.readCelsius();
  temp3=ktc3.readCelsius();
  temp4=ktc4.readCelsius();
  delay (5000); //Configuración del retardo para la toma del siguiente dato
  Serial.print("DATA,TIME,TIMER,");
  //Configuración para la lectura en las celdas de Excel de cada termocupla
  Serial.print(temp1);
  Serial.print(",");
  Serial.print(temp2);
  Serial.print(",");
  Serial.print(temp3);
  Serial.print(",");
  Serial.println(temp4);
}

```


A.2. Propiedades del aire a la presión de 1 atm. [23]

TABLA A-15							
Propiedades del aire a la presión de 1 atm							
Temp., T, °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k, W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-5}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-5}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-5}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478