



# Modelado CFD de un horno de cocción continua de arepas de Maíz

Diego Alejandro Zambrano Páez

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería Mecánica y Mecatrónica  
Bogotá D.C, Colombia  
Año 2024

# Modelado CFD de un horno de cocción continua de arepas de Maíz

Diego Alejandro Zambrano Páez

Tesis o trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar por el título de:  
**Magíster en ingeniería Mecánica - Modalidad profundización**

Director(a):

Ing. Carlos A. Duque Daza, Ph.D M.Sc. Mech.eng

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de ingeniería, Departamento de ingeniería Mecánica y Mecatrónica

Bogotá D.C, Colombia

Año 2024



# Declaración

Me permito afirmar que he realizado ésta tesis de manera autónoma y con la única ayuda de los medios permitidos y no diferentes a los mencionados el presente texto. Todos los pasajes que se han tomado de manera textual o figurativa de textos publicados y no publicados, los he reconocido en el presente trabajo. Ninguna parte del presente trabajo se ha empleado en ningún otro tipo de tesis.

Bogotá D.C., 30 de enero de 2024

---

Diego Alejandro Zambrano Páez

# Dedicatoria

A Dios por esta oportunidad

A mi esposa, a mis padres y a mis hermanos

A mi director de trabajo Carlos Duque

## Resumen

# Modelado CFD de un horno de cocción continua de arepas de Maíz

Para la industria de las Arepas en Colombia el desarrollo tecnológico viene dado por conocimiento empírico, familias por décadas realizando el mismo proceso con las mismas herramientas, proceso muy natural en el país, es por lo cual que surge la necesidad de lograr dar inicio a la caracterización de los procesos, esto mediante el entendimiento de cada dispositivo por separado. El presente trabajo se enfatizó en los hornos, cuya función en el proceso de fabricación de arepas es la eliminación de carga microbiana, función indispensable en este sector. Mediante un modelo CFD en el software de código abierto OpenFoam se realizó la caracterización del proceso de horneado, definiendo en primera medida las condiciones de cocción y geometrías generales, posteriormente se genera un modelo geométrico y mediante los solucionadores del software se resolvieron las ecuaciones de Navier-Stokes . Los resultados obtenidos permitieron evidenciar una fuerte presencia de vórtices en las zonas entre los quemadores y una rata de crecimiento de la temperatura en pocos pasos de tiempo elevada, con esto se logra comprender las posibles zonas de acumulación de calor ineficientes. A partir de estos hallazgos el presente trabajo intenta incentivar en la investigación de este tipo de hornos, como variantes se podría sugerir para trabajos futuros revisar una posible re-circulación de aire limpio en el interior del horno, incorporación de un modelo de transferencia de masa al producto, entre otros.

**Horno de arepas, horno continuo, vorticidad, curvas de velocidad, curvas de temperatura, CFD, caracterización de procesos de alimentos** Use palabras clave que estén en Theasaurus

## Abstract

# CFD modeling of a continuous cooking oven for corn arepas

For the Arepas industry in Colombia, technological development is given by empirical knowledge, families for decades performing the same process with the same tools, a very natural process in the country, which is why the need arises to achieve the beginning of the characterization of the processes, this by understanding each device separately. The present work was emphasized in the ovens, whose function in the arepas manufacturing process is the elimination of microbial load, an indispensable function in this sector. By means of a CFD model in the open source software OpenFoam, the characterization of the baking process was carried out, first defining the baking conditions and general geometries, then a geometric model was generated and the Navier-Stokes equations were solved by means of the software solvers. The results obtained showed a strong presence of vortices in the zones between the burners and a high temperature growth rate in a few time steps, thus understanding the possible inefficient heat accumulation zones. From these findings, the present work tries to encourage the research of this type of furnaces, as variants it could be suggested for future works to review a possible re-circulation of clean air inside the furnace, incorporation of a model of mass transfer to the product, among others.

**Arepas oven, continuous oven, vorticity, velocity curves, temperature curves, CFD, food process characterization** Use keywords available in Theasaurus

## Lista de figuras

1-1. Especificación de condiciones de contorno [13] . . . . .	2
1-2. Perfiles de temperatura [13] . . . . .	2
1-3. Temperatura de saggar en el proceso de enfriamiento [5] . . . . .	3
1-4. Temperatura de saggar a lo largo del horno [5] . . . . .	4
1-5. Mallado horno y ventilador . . . . .	6
1-6. (a) Incidencia del tamaño del mallado en la precisión de los resultados, (b) Validación malla optima de 5M para Horno y producto [10] . . . . .	6
1-7. Esquema general de Horno continuo de pan.[19] . . . . .	7
1-8. (a) Temperatura en la parte inferior modelo 2D [20], (b) Temperatura en la parte inferior modelo 3D [19]. . . . .	8
1-9. Recipientes de Horneado proceso continuo [20] . . . . .	9
1-10. Horno continuo de pan libanés [12] . . . . .	9
1-11. (a) Líneas de corriente, (b) Perfil de velocidad en el plano medio . . . . .	10
2-1. Horno continuo de arepas Arepas Memo FA SAS . . . . .	12
2-3. Detalle de quemadores radiantes infrarrojos . . . . .	13
2-2. Horno continuo de Arepas tren de inyección de gas . . . . .	13
2-4. Ubicación de quemadores radiantes infrarrojos en el horno . . . . .	14
2-5. Dimensiones de quemadores radiantes infrarrojos . . . . .	14
2-6. Quemadora radiante infrarrojo detalle zona caliente y entrada de gas natural . . . . .	15
2-7. Trayectoria de gas en el interior del quemador . . . . .	15
2-8. Trayectoria de gas en el interior del quemador . . . . .	16
2-9. Soportes de quemadores . . . . .	16
2-10. Tipo de malla utilizada en la banda . . . . .	17
2-11. Trayectoria de la banda a lo largo del horno . . . . .	18
2-12. Recamara de cocción . . . . .	18

<b>2-13.</b> Dimensiones generales de recamara . . . . .	19
<b>2-14.</b> Dimensiones del producto . . . . .	19
<b>2-15.</b> Ingreso del producto al horno . . . . .	20
<b>3-1.</b> Dimensiones internas Horno de arepas de maíz . . . . .	21
<b>3-2.</b> Modelo CAD simplificado de horno . . . . .	22
<b>3-3.</b> Forma de banda por cada trayecto (cotas m) . . . . .	22
<b>3-4.</b> Posición de bandas en el interior del horno . . . . .	23
<b>3-5.</b> Ubicación de las bandas en forma de listones (cota mm) . . . . .	23
<b>3-6.</b> Fogones con losas cerámicas . . . . .	23
<b>3-7.</b> Nombre de fronteras para el dominio computacional . . . . .	24
<b>3-8.</b> Subdivisión del dominio blockMesh . . . . .	27
<b>3-9.</b> Mallado básico horno con blockMesh . . . . .	27
<b>3-10(a)</b> Modelo CAD de banda, (b) Modelo CAD de los fogones . . . . .	28
<b>3-11.</b> Mallado de Horno pared 4.8M de celdas . . . . .	28
<b>3-12.</b> Mallado de Horno pared 4.8M de celdas . . . . .	28
<b>3-13.</b> Detalle mallado bandas . . . . .	29
<b>3-14(a)</b> Detalle de refinamiento fogones, (b) Detalle de refinamiento bandas vista superior	29
<b>3-15.a)</b> Temperatura en el centro, (b) Temperatura a 4cm del centro, (c) Temperatura a 6.5cm del centro [16] . . . . .	34
<b>4-1.</b> Posición de sensores, sensor 1 entrada al horno, sensor 3 salida del horno plano Y-Z	37
<b>4-2.</b> Posición de los sensores en el planos X-Z . . . . .	37
<b>4-3.</b> Líneas de corriente para 100s para la componente de la velocidad en Z . . . . .	38
<b>4-4.</b> Perfil de la magnitud velocidad para 50s . . . . .	39
<b>4-5.</b> Perfil de la magnitud velocidad para 100s . . . . .	39
<b>4-6.</b> Perfil de la magnitud velocidad para 150s . . . . .	39
<b>4-7.</b> Magnitud de la velocidad media para el tiempo 165s . . . . .	40
<b>4-8.</b> Comparativo U(165s) y U Media paralela eje Z . . . . .	40
<b>4-9.</b> Comparativo velocidad(165s) y velocidad media paralela eje Y . . . . .	41
<b>4-10.</b> Plano de corte XZ a 1cm de la banda superior (100s) . . . . .	41
<b>4-11.</b> Plano de corte XZ a 15cm sobre la banda superior cerca a los fogones . . . . .	42
<b>4-12.</b> Velocidad de la componente z en función del tiempo para los sensores 1, 2, 3, 4 y 5	42
<b>4-13.</b> Componente de la velocidad en z en función del tiempo para los sensores 6 y 7 ubicados sobre las bandas . . . . .	43

## Modelado CFD de un horno de cocción continua de arepas de Maíz

---

4-14.Vórtices . . . . .	43
4-15.Vorticidad plano xz 168s . . . . .	44
4-16.Distance de cada elemento vorticidad plano xz 168s . . . . .	44
4-17.Criterio Q a 168s . . . . .	45
4-18.Edad del aire interior del horno a 168s . . . . .	45
4-19.Edad del aire a 168s sobre la superficie de la banda superior . . . . .	46
4-20.Edad del aire para una línea sobre la banda superior desde la entrada a la salida . . . . .	46
4-21.Magnitud de la velocidad en T=48s en el plano YZ central . . . . .	48
4-22.Magnitud de la velocidad en T=48s detalle alrededor de los fogones iniciales . . . . .	48
4-23.Componente de la velocidad media en Z en función del tiempo . . . . .	49
4-24.Componente de la velocidad media en Y en función del tiempo . . . . .	49
4-25.Temperatura para T=8s . . . . .	50
4-26.Temperatura para T=48s . . . . .	50
4-27.Temperatura media en T=48s . . . . .	51
4-28.Temperatura media para los sensores 1, 2 y 3 . . . . .	52
4-29.Temperatura media sensor A . . . . .	52
4-30.Temperatura para el sensor 4 . . . . .	53
4-31.Temperatura para el sensor 5 . . . . .	53
4-32.Magnitud de la vorticidad en T=48s . . . . .	54
4-33.Magnitud de la vorticidad en T=48s . . . . .	54
4-34.criterio Q (altura banda N1) en T=48s . . . . .	55
4-35.criterio Q (altura fogones) en T=48s . . . . .	55
4-36.Edad del aire T=48s . . . . .	56
4-37.Grafica Edad del aire en fusnción de la distancia . . . . .	57

# Lista de tablas

1-1. Condiciones de contorno Horno Panela [13] . . . . .	2
2-1. Parámetros de funcionamiento quemador de gas . . . . .	15
2-2. Parámetros de banda . . . . .	17
2-3. Tabla T . . . . .	19
3-1. Condiciones de frontera para cada parámetro . . . . .	26
3-2. Condiciones de frontera para cada parámetro en openFoam . . . . .	26
3-3. Tamaño de celdas por cada eje . . . . .	27
4-1. Posición de sensores . . . . .	38

# Contenido

Dedicatoria	ii
Resumen	iii
Abstract	iv
Lista de figuras	vii
Lista de tablas	viii
Contenido	x
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Análisis CFD de hornos industriales . . . . .	1
1.2. Hornos para horneado de pan . . . . .	4
1.3. Horneado continuo de pan . . . . .	7
<b>2. Condiciones de cocción y características del horno</b>	<b>12</b>
2.1. Descripción general del horno . . . . .	12
2.2. Descripción de componentes . . . . .	13
2.2.1. Fuente de energía térmica (Quemadores radiantes infrarrojos) . . . . .	13
2.3. Malla de transporte de producto . . . . .	17
2.4. Recamara de cocción . . . . .	18
2.5. Producto . . . . .	19
<b>3. Marco teórico</b>	<b>21</b>
3.1. Modelo geométrico . . . . .	21
3.2. Condiciones de contorno . . . . .	24
3.3. Generación de malla . . . . .	27

3.4. Ecuaciones de gobierno . . . . .	29
3.4.1. Ecuación de Conservación de masa . . . . .	30
3.4.2. Ecuación de conservación de momento . . . . .	31
3.4.3. Ecuación de conservación de energía . . . . .	31
3.4.4. Expresiones adicionales para el sistema de ecuaciones . . . . .	32
3.4.5. Cocción de producto y secado . . . . .	32
<b>4. Resultados</b>	<b>37</b>
4.1. Simulación sin variación de temperatura . . . . .	38
4.1.1. Perfiles de velocidad . . . . .	38
4.1.2. Vórtices . . . . .	43
4.1.3. Edad del aire . . . . .	45
4.2. Simulación con variación de temperatura . . . . .	47
4.2.1. Perfiles de velocidad . . . . .	47
4.2.2. Análisis de temperatura . . . . .	50
4.2.3. Vorticidad . . . . .	54
4.2.4. Edad del Aire . . . . .	56
<b>5. Conclusiones</b>	<b>58</b>
<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>60</b>

# 1 Introducción

El mercado de arepas en Colombia es uno de los sectores en la industria de alimentos con mayor crecimiento generando ventas anuales de más de 3,9 billones de pesos, en la revista portafolio con su artículo publicado el 17 de marzo 2009 llamado “Mercado de arepas pre cocidas alcanzó en Colombia \$ 3,9 billones, con un crecimiento de 3 % en 2008” hace alusión a una de las empresas más grandes productoras de arepas pre cocidas de maíz llamada Don Maíz mencionando lo siguiente: “En 2005 las ventas de Don Maíz fueron 11.343 millones de pesos, en 2006 de 13.041 millones y en 2007 de 15.660 millones de pesos. El año pasado colocó producto por 20.000 millones y para esta espera un aumento del 25 por ciento, es decir; 25.000 millones de pesos”, sin embargo, refleja la punta del iceberg dado que las empresas informales que le venden a pequeñas superficies representan el 80 % del mercado, por ende, este sector requiere atención tecnológica y el desarrollo de nuevos procesos.

Por mencionar otro exponente de esta industria, Arepas Memo FA SAS ha venido desde los últimos 5 años con un crecimiento del más del 50 % por año, destacando en la actualidad por el procesamiento de más de 12.000 Kg por día, todo esto es posible gracias a la incorporación de análisis mecánico y térmico a su maquinaria. Esta empresa como muchas otras, ha desarrollado este tipo de tecnología incorporando partes y metodologías de otros procesos de fabricación de otros alimentos similares. La constante necesidad de generar una máquina acoplada al producto a llevado a la industria al mejoramiento continuo he incorporación ingeniería al diseño y fabricación de componentes.

## 1.1 Análisis CFD de hornos industriales

Varios sectores, así como el de la industria de la arepa, están tomando gran relevancia dado sus altos volúmenes de producción, como lo es la industria de la panela, al tener altas tasas de crecimiento en producción por lo cual se crea la necesidad de iniciar con el análisis de los elementos que interfieren en su fabricación y como se pueden mejorar. Unos de los procesos de mayor relevancia energética en la fabricación de panela son los hornos, estos han sido objeto de estudio (Edxon S. Meneses-Chacón

y Julián E. Jaramillo-Ibarra)[13] analizando el comportamiento térmico de los gases de la chimenea del horno mediante herramienta CFD, OPENFOAM inician con el planteamiento de las condiciones de frontera y son incorporadas en diferentes zonas, Estos datos son tomados de la operación como temperatura inicial, velocidad de entrada entre otros, a continuación se muestra el modelo CAD y las condiciones de contorno para esta simulación.

Patch	Velocity [m/s]	Temperature [°C]	Pressure(P/p)[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
inlet	$u_x : 0, u_y : 0, u_x : 6$	T:970	$\delta P / \delta x_i = 0$
output	$\delta \bar{u}_i / \delta x_i = 0$	$\delta T / \delta x_i = 0$	P=0
heater	$\bar{u}_i = 0$	T:100	$\delta P / \delta x_i = 0$
upperWalls	$\bar{u}_i = 0$	Global heat transfer coefficient (U)	$\delta P / \delta x_i = 0$
ground	$\bar{u}_i = 0$	Linear profile	$\delta P / \delta x_i = 0$
walls	$\bar{u}_i = 0$	Linear profile	$\delta P / \delta x_i = 0$

Tabla 1-1: Condiciones de contorno Horno Panela [13]

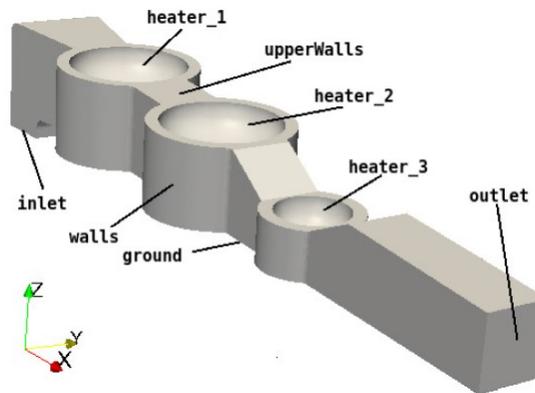


Figura 1-1: Especificación de condiciones de contorno [13]

Para esta simulación se desarrollo una malla con los elementos de un tamaño máximo de 0.025m en el programa SALOME generando una malla de 200.000 elementos. En refinamiento de elementos se obtuvo una malla de 1.400.000, utilizando el algoritmo para flujo incompresible se logra obtener las curvas de temperatura mostradas a continuación:

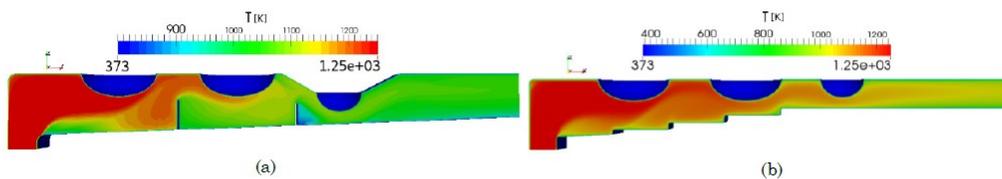


Figura 1-2: Perfiles de temperatura [13]

A partir de los resultados obtenidos en las dos propuestas de diseño se logra concluir que la transferencia de calor por convección es mayor en la propuesta (b) por su perfil de temperatura con mayor presencia de valores superiores a  $1000^{\circ}\text{C}$  con lo cual mantienen una mejor temperatura en los 3 recipientes. Este proceso logra mejorar la eficiencia térmica de todo el horno y propone diferentes geometrías para construcciones futuras, aumentando la productividad de la industria.

De la misma manera que la industria de alimentos desarrolla modelos y simulaciones numéricas para sus hornos de cocción, otros sectores no se quedan atrás, es así como la industria de la fabricación de polvos metálicos realiza simulaciones CFD para sus hornos continuos. (Dilon Paul)[5] Mediante recipientes cerámicos realizan el transporte del material a través de un horno continuo llevando una cantidad determinada de polvo metálico, mediante la transferencia de calor convectiva los polvos son calentados y se enfrían con respecto al perfil de temperaturas para su tratamiento térmico para su posterior procesamiento. Para el desarrollo de este trabajo se planteo un sistema de simulación por dos etapas, la primera es una simulación transitoria entre el aire en el interior del horno y el saggar (recipiente cerámico), posterior a esto partiendo de las curvas de temperatura del saggar se realiza una segunda simulación contemplando los polvos y el recipiente cerámico en la etapa de enfriamiento.

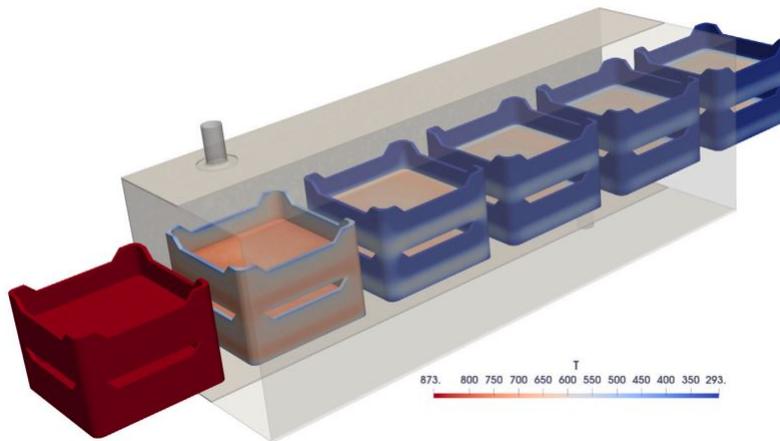


Figura 1-3: Temperatura de saggar en el proceso de enfriamiento [5]

Esta simulación fue efectuada en el programa CFD openFoam partiendo de las definiciones de las ecuaciones de continuidad, momento y energía para fluidos, modelos de turbulencia  $k-e$ , la ecuación de transferencia de calor radiante (RTE) [8] y las condiciones de contorno como temperaturas iniciales de aire y de producto. Para el desarrollo de la simulación se tomó un trayecto de 1.6m generando un mallado de 3.400.000 de celdas para el horno, 720.000 celdas para los recipientes cerámicos (saggar) y 72.000 para los polvos cerámicos, pudiendo obtener una curva de temperatura de los polvos metálicos.

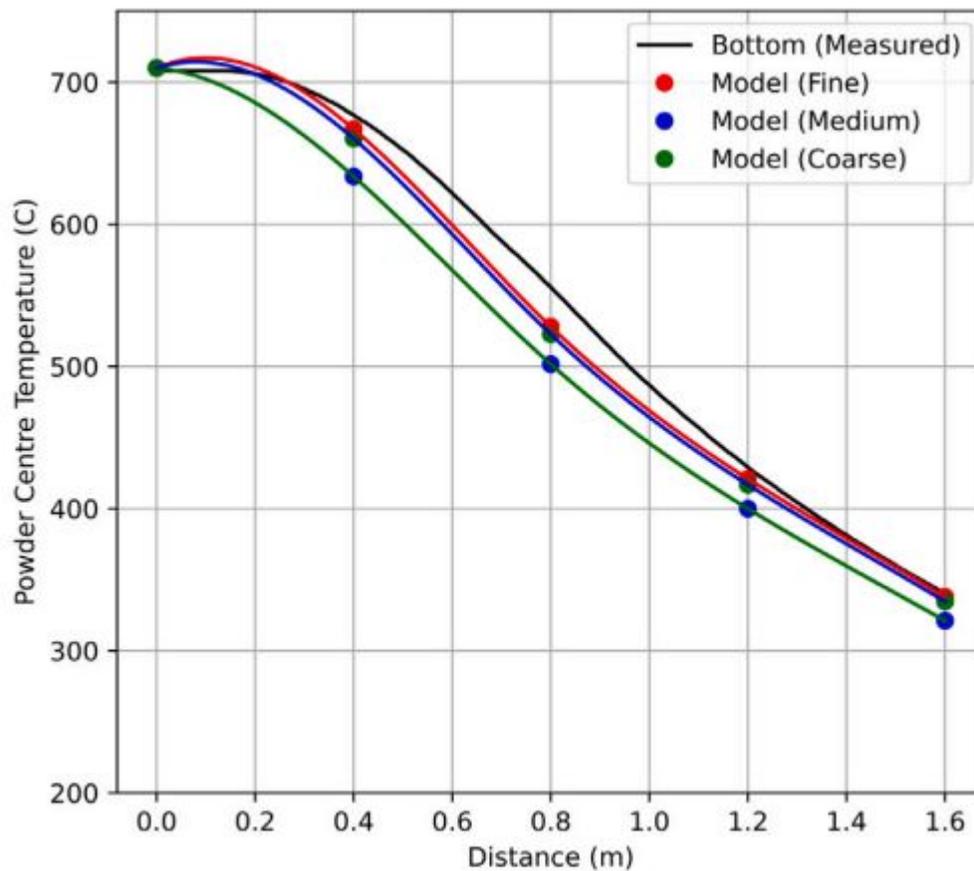


Figura 1-4: Temperatura de saggar a lo largo del horno [5]

Es importante mencionar la metodología de análisis de estos trabajos, las cuales parten de unas mediciones iniciales como lo son temperatura de ingreso de producto y temperatura de ingreso del fluido mecanismo para la cual se efectúa la transferencia de calor, modelamiento CAD de cuerpo del Horno y mallado del mismo, aplicación de un solucionador en un software CFD como lo fue openFoam lograron obtener curvas de temperatura necesarias para la el mejoramiento de los procesos. A continuación, podremos evidenciar este proceso de análisis para hornos de pan, el cual tiene características muy similares en composición y producción.

## 1.2 Hornos para horneado de pan

Desde los antepasados, los europeos adoptaron el maíz como un alimento similar al pan que pudiera ser molido para su consumo, dándole así tamaño y forma al producto. En Colombia, por ejemplo,

los indígenas se dedicaron a cultivar maíz blanco y amarillo para poder subsistir iniciando en áreas del Valle del Alto Magdalena dejando así un legado para la población campesina. Actualmente en Colombia se registra un sembrado de maíz aproximadamente de 313.820 hectáreas generando que la industria de producción de arepas de maíz obtenga un crecimiento positivo convirtiéndose como un producto base en la canasta familiar (4); no obstante, las arepas requieren pasar por un proceso de fabricación equivalentemente con el proceso de elaboración del pan.

Para describir el proceso de similitud entre el pan y las arepas, es necesario remontar al siglo XIX donde se desarrolla una industria que busca la producción exacta de levadura que contribuya a la fabricación del pan y detalle su proceso dado que en tiempos remotos se elaboraba la masa a través de granos de maíz que eran triturados y formados manualmente. Así mismo, en Colombia se evidencia que en el año 1542 se prepara pan en la ciudad de Bogotá a través de hornos importados abriendo las puertas para la continuidad de este producto y la innovación de nuevos productos como las arepas que para el estado colombiano están consideradas en la industria de panadería.

Con lo anterior, productos como el pan y las arepas de maíz requieren de un proceso de cocción a través de hornos. En el caso del pan se da uso de diferentes hornos como hornos continuos, hornos discontinuos, hornos de solera y hornos de piso entre otros con un manejo de temperatura de 150°C a 260°[15] para un tiempo de 1 hora, en el caso de las arepas de maíz se da uso a hornos continuos y planchas con un manejo de temperaturas de 300°C a 400° con un menor tiempo de cocción (30s), dado que el maíz ya cuenta anteriormente con un proceso de precocido a diferencia del pan. Lo que lleva a observar que siendo las arepas un producto con el mismo impacto del pan se hace preciso abordar la cocción y producción de arepas de maíz con el mismo enfoque científico de optimización del proceso de horneado de pan.

La industria de las arepas ha tomado tecnología de varios productos como lo son las tortillas y el pan. Para la industria panadera ha sido decisivo el estudio de los hornos de cocción (Michele Pinelli , Alessio Suman)[15], realizando estudios CFD de los modelos turbulentos, validándolos con un proceso experimental. A diferencia de los casos anteriores realizan una rigurosa toma de datos en un horno experimental ubicando termocupla y manómetros en la entrada de aire y en diferentes sectores, con el fin de generar curvas características, para posteriormente validar los datos obtenidos en la simulacion, logrando definir los factores decisivos para mejoramiento del horneado. Este tipo de estudios permiten comprender el desempeño del horno y partir del modelo CFD para mejorar la eficiencia del horno siendo este de naturaleza rotativa. A continuación, en la Figura 1-5 el autor presenta el mallado de su modelo geométrico [15].

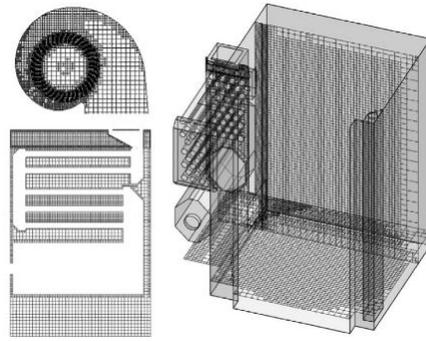


Figura 1-5: Mallado horno y ventilador

En ocasiones los estudios son realizados sobre tecnología ya inmersa en el mercado como lo son los hornos rotativos, con el fin de realizar optimizaciones en los dispositivos mejorando geometrías, velocidad o materiales dependiendo el caso. Por otro lado, están los dispositivos desarrollados paralelamente con sustento térmico desarrollado por simulaciones CFD para el horneado de galletas [10] realizan una validación mediante una toma de datos sobre el Horno experimental para poder tener una correlación entre los datos obtenidos en la simulación y los datos reales. En este caso especial los autores realizan una medición sobre las galletas logrando definir que la pérdida de agua por evaporación en el producto durante la cocción es constante con una tasa de  $0.11\text{g/s}$ . Al tener datos experimentales de temperatura en el interior del horno y las galletas se logra tener una validación de los datos arrojados por la simulación para mallas de 2, 4 y 6 millones de celdas en la figura 1-6 (a), logrando caracterizar gráficamente el comportamiento térmico durante el secado, el cual tiene al inicio un comportamiento exponencial y luego lineal realizando esta transición a  $100^\circ\text{C}$  en la figura 1-6 (b).

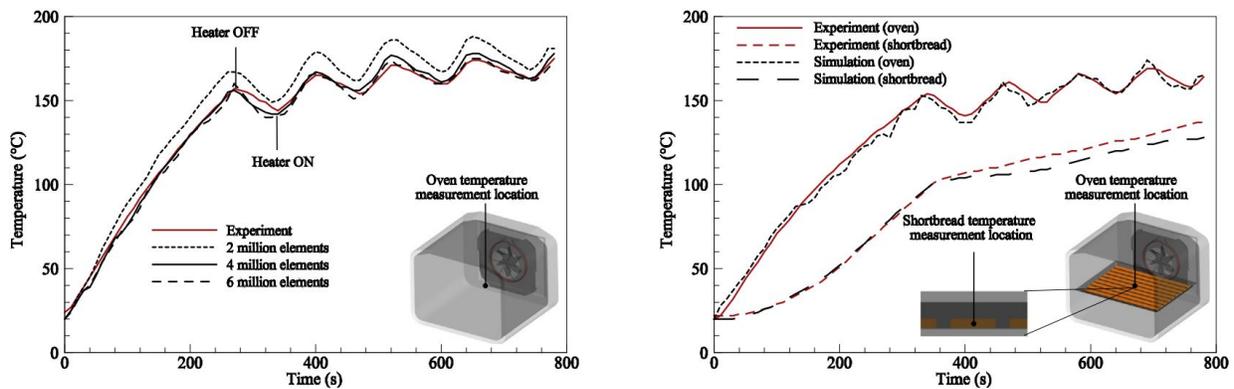


Figura 1-6: (a) Incidencia del tamaño del mallado en la precisión de los resultados, (b) Validación malla óptima de 5M para Horno y producto [10]

## 1.3 Horneado continuo de pan

Para poder acercarnos al modelo de horno que se maneja en el proceso de cocción de las arepas haremos una breve mención de los hornos continuos para pan que se han venido desarrollando en las últimas décadas por su mejoramiento en un proceso continuo al poderse incorporar en una línea de producción con mayor eficacia. Iniciamos con Therdthai [19] quienes plantean el análisis de un horno continuo como se muestra en la figura 3-8 la cual muestra la configuración del horno y su método de transferencia de calor, la cual se efectúa mediante radiación y convección. Este proceso de horneado se realiza con recipientes los cuales son transportados por una banda generando, dichos recipientes proporcionan un medio de transporte a lo largo del horno y una fuente de calor generando una transferencia de calor con conducción del envase al pan.

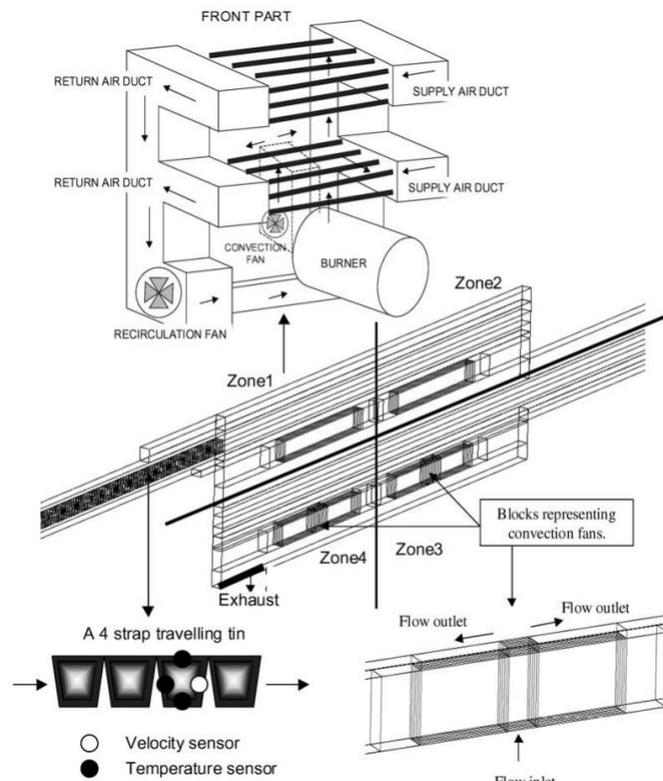


Figura 1-7: Esquema general de Horno continuo de pan.[19]

Las ecuaciones definidas por el autor para la transferencia de calor por convección y radiación están definidas de la siguiente manera:

$$q_a = h_a(T_{duct} - T_{air,inside,oven}) \quad h_a \text{ Calculado en función del estado del flujo en el interior del horno.}$$

$$q_b = \delta\varepsilon [(T_A + 273,15)^4 - (T_B + 273,15)^4]$$

Donde:

- TA: Temperatura de la fuente de calor en °C
- TB: Temperatura del dissipador de calor la cual para las condiciones iniciales fue  $T_{B0} = 40^\circ\text{C}$

Al obtener los resultados de la simulación observaron que la velocidad media en las 4 secciones del horno tenía una variación en promedio de 37.31 % con respecto a la velocidad media real al igual que Hoang[14] logrando obtener variaciones de la velocidad media del 28.5 %. El mejoramiento continuo de los modelos CFD pueden efectuarse al simplificar los modelos CAD disminuyendo las dimensiones pasando de un modelo 3D a 2D con un mejor refinamiento en las capas limites o aumentando la densidad de malla en general, Wong[20] continua con el trabajo realizado por Therdtthai [19] analizando el horno de una manera desplegada en dos dimensiones y aumentado el refinamiento en varias secciones de interés logrando obtener una mejora en el comportamiento de los datos a lo largo de la curva temperatura en función del tiempo presentes en la figura 3-9 (a) y (b).

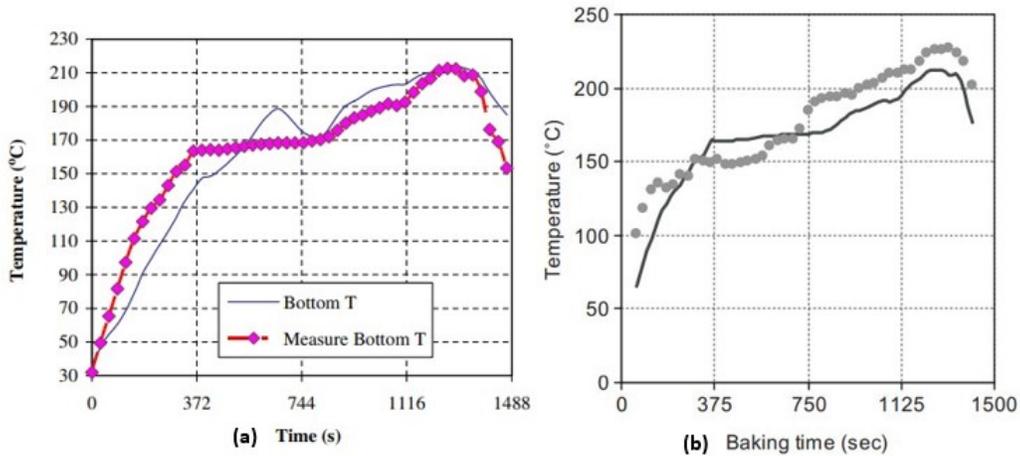


Figura 1-8: (a) Temperatura en la parte inferior modelo 2D [20], (b) Temperatura en la parte inferior modelo 3D [19].

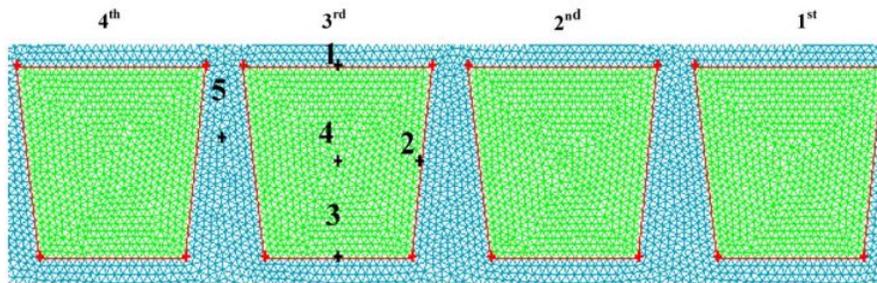


Figura 1-9: Recipientes de Horneado proceso continuo [20]

Existen diferentes tipos de pan los cuales son procesados y horneados de diferentes maneras, en el caso anterior el pan era horneado mediante unos recipientes como se puede ver en la figura 3-10, los cuales al igual que Dillon[5] realizan un análisis a los recipientes tomando varios puntos en el interior y exterior de las bandejas. Ahora bien, para Mansour [12] los mecanismos de horneado cambian al realizar un modelo CAD a partir de un horno continuo de horneado de pan libanés (Ver figura 3-11), el cual no requiere de recipientes, tan solo una banda de placas de acero transportando el pan a lo largo del horno, mientras en la parte superior un quemador a gas incorpora un flujo de calor como se observa en la figura 3-12.

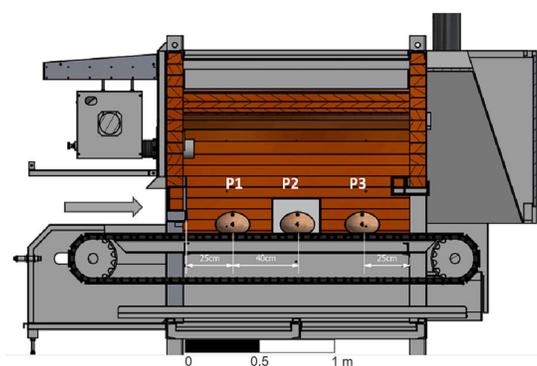


Figura 1-10: Horno continuo de pan libanés [12]

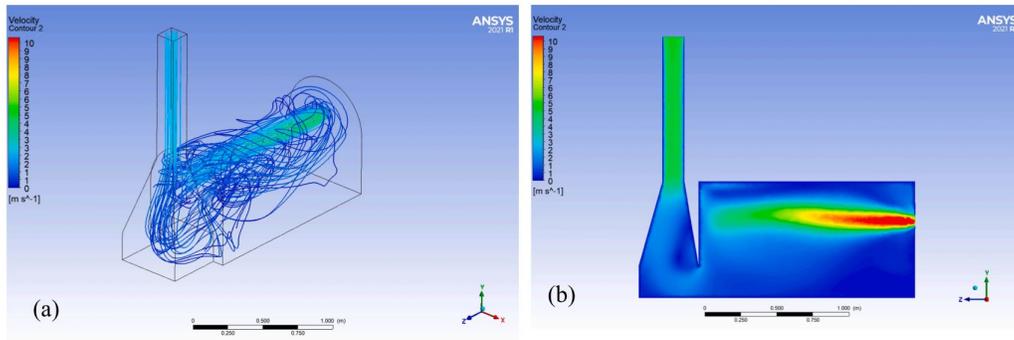


Figura 1-11: (a) Líneas de corriente, (b) Perfil de velocidad en el plano medio

Durante esta simulación se definieron las condiciones de contorno mediante mediciones experimentales al horno ya construido, generando parámetros establecidos como velocidad en la entrada del quemador, temperatura, presión en las entradas y salida, entre otros. Es clara la necesidad de la validación experimental de los comportamientos térmicos de estos dispositivos de hornos al no tener un marco de referencia es complejo poder concluir, razón por la cual es necesario iniciar con un análisis térmico mediante una simulación CFD de un horno de Arepas con el fin de identificar los posibles focos de alta temperatura para en un futuro lograr posicionar de manera más lógica termocuplas y manómetros que permitan realizar un adecuado feedback de la simulación e iniciar este proceso.

Como pudimos evidenciar, diferentes industrias han desarrollado sus propias tecnologías para el mejoramiento continuo de sus procesos por medio de la caracterización los hornos de cocción industrias de la panela y hornos de pan, así mismo se realizó una revisión por los diferentes Hornos de pan, como hornos continuos, y de bandejas, está similitud parte de la equivalencia de ambos alimentos en cuanto a su composición física y forma de fabricación, dado que ambos productos comparten una cantidad de mas del 90% a base de maíz y harinas de maíz. Para tener mayor claridad de los procesos de fabricación las arepas de maíz, se tiene en cuenta que dentro el proceso de fabricación de este producto es sometido a una cocción donde adquiere en un 70% de agua, luego de esto pasa dos procesos: molienda y troquelado, generando así el producto listo para el ingreso del horno. Durante el proceso de horneado la temperatura del producto es elevada a valores por encima de  $60^{\circ}\text{C}$  con el fin de eliminar carga microbiana y mejorar su textura para así proceder con su respectivo empaque. Esta labor se realiza mediante un horno continuo en una malla en hierro colado, donde el producto es movido a través de unos quemadores radiantes infrarrojos que elevan la temperatura del mismo, cabe mencionar que este incremento de temperatura debe generar una pérdida entre el 15% y el 25% del peso del producto por evaporación.

No obstante, en esta información se evidencia la precariedad frente a los datos que se necesitan en la producción de arepas reluciendo un desconocimiento en factores de potencia de quemadores, combustión completa o incompleta, curvas de temperatura en el horneado, curvas de velocidad y posibles zonas de vorticidad, pérdidas por calor en paredes y la transferencia de energía calorífica efectiva al producto lo que impide una modificación apropiada del proceso y una mejora continua del horno. Por tal motivo, y partiendo del análisis de datos, es claro que existe la necesidad de ampliar la base de conocimiento de la literatura existente de hornos continuos, quemadores radiantes infrarrojos y de la producción de alimentos a base de maíz.

El principal objetivo de cualquier proyecto encaminado a suplir esta necesidad sería la de suministrar datos para una mejor aplicación del proceso de horneado continuo para productos alimenticios dado que, este sector requiere que se aplique un enfoque científico para desarrollar nuevas tecnologías enfocadas a la características termicas del horno que posteriormente lograremos definir las características térmicas de la masa de maíz inmersas en un proceso de transferencia de calor por radiación contemplado un horneado continuo, con el único objetivo de poder ser competitivos con un producto de origen nacional. Además, un conjunto de posibles beneficios adicionales de un mayor nivel de conocimiento de este tipo de procesos incluiría: mejoramiento de quemadores de gas y recirculación de gases para ciclos regenerativos en alimentos; mejoramiento de niveles de eficiencia energética; reducción de niveles de consumo de gas, con posibles aumentos de productividad y competitividad; mejora de propiedades organolépticas del producto; y la posibilidad de extrapolar los hallazgos a campos de secado de cerámica, secado de frutas y maderas, entre otras potenciales aplicaciones.

Razón por la cual este trabajo de grado busca caracterizar el comportamiento térmico de un horno continuo mediante un modelo CFD del horno de cocción de Arepas de maíz. Para lograrlo es preciso generar las especificaciones técnicas del horno continuo e identificar el modelo matemático mas apropiado con el fin de generar curvas de velocidad y temperatura que nos permitan ampliar el conocimiento frente a los hornos continuos llegando esquemas geométricos óptimos, menores pérdidas de calor y mayor eficiencia en el proceso.

## 2 Condiciones de cocción y características del horno

### 2.1 Descripción general del horno

A partir del año 2016 Arepas Memo FA SAS comenzó el desarrollo de su propia maquinaria para el mejoramiento de los procesos de cocción y molienda, dado que la industrialización de la producción de las Arepas se ha venido desarrollando de manera empírica. Por tal razón, se inicia con el desarrollo de moldeadoras (troqueladoras) para el aumento del moldeo de arepas de maíz blanco, este proceso inicia con el levantamiento de planos de los dispositivos en la actualidad utilizados, posteriormente se modela en el software CAD inventor de Autodesk, se procede a realizar las mejoras pertinentes en el modelo CAD y su fabricación. En el 2020 para el desarrollo del presente trabajo de grado se procede a realizar la misma operación para el horno de cocción de arepas de maíz Blanco desarrollando un modelo CAD, planos y fabricación, en el cual, solamente se desarrolla de manera empírica la ubicación de fogones y bandas para su funcionamiento. En el trabajo actual estudiaremos el funcionamiento térmico logrando evidenciar las zonas de acumulación de calor y los perfiles de temperatura.



Figura 2-1: Horno continuo de arepas Arepas Memo FA SAS

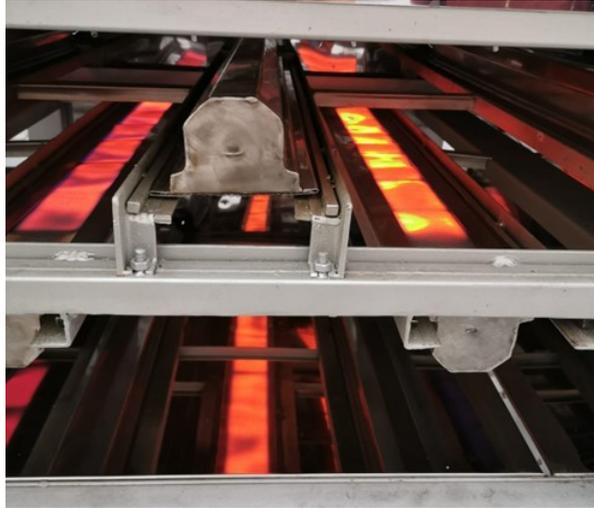


Figura 2-3: Detalle de quemadores radiantes infrarrojos



Figura 2-2: Horno continuo de Arepas tren de inyección de gas

## 2.2 Descripción de componentes

### 2.2.1 Fuente de energía térmica (Quemadores radiantes infrarrojos)

En la figura 4-4 encontraremos el lado izquierdo del horno donde se ubica el tren de inyección de gas (el cual no será analizado en este trabajo) donde se muestra la posición de cada quemador infrarrojo (círculo rojo) y la numeración que se manejará para ubicación de los sensores en la simulación. El

ingreso del producto se realiza de derecha a izquierda por lo cual el quemador N°1 es el primero en aumentar la temperatura del producto. En la figura 4-5 se presentan el modelo CAD de los quemadores radiantes infrarrojos.

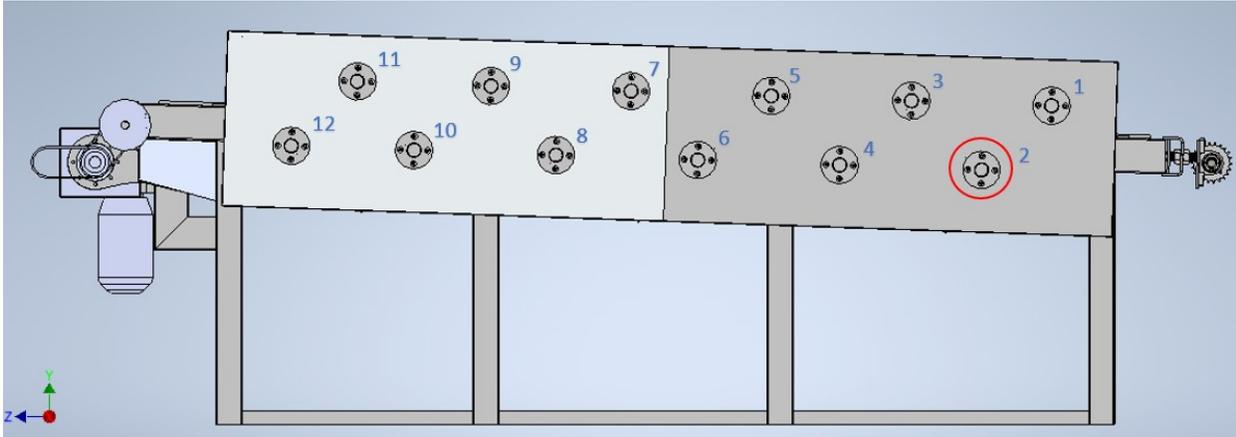


Figura 2-4: Ubicación de quemadores radiantes infrarrojos en el horno

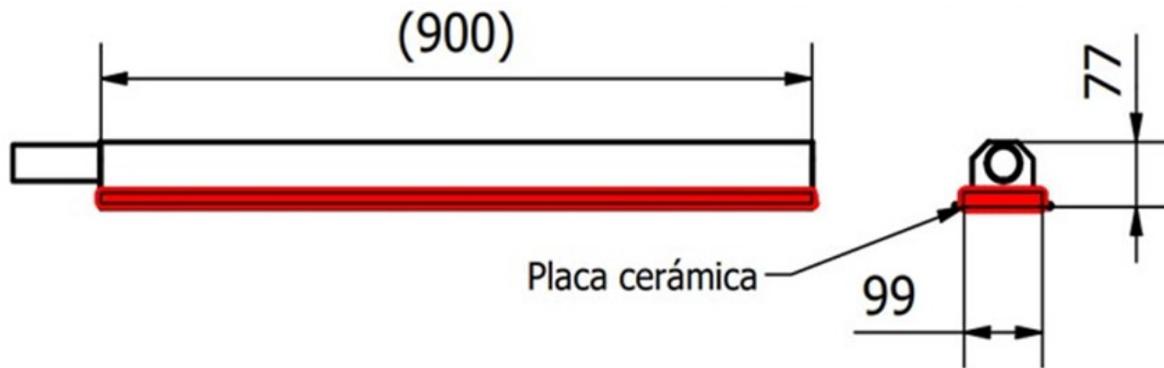


Figura 2-5: Dimensiones de quemadores radiantes infrarrojos

En la figura 4-6 se muestra el área en el cual se posicionan las losas cerámicas las cuales manejan una temperatura alrededor de 400°C. De la misma manera para efectos de la caracterización se hallaron los valores de funcionamiento del quemador como flujo de gas, presión de gas y temperatura de la superficie de las losas cerámicas.

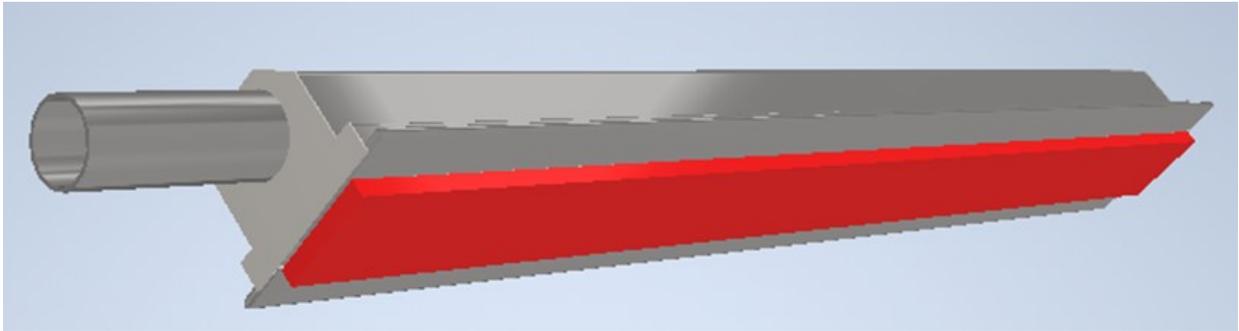


Figura 2-6: Quemadora radiante infrarrojo detalle zona caliente y entrada de gas natural

Parámetro [símbolo]	Valor [Unidad]
Flujo de gas natural del quemador [ $\alpha$ ]	0,162 $\frac{dm^3}{s}$
Presión de gas del sistema [ $P_g$ ]	32Kpa
Temperatura superficial de losa cerámica [ $T_L$ ]	300°C

Tabla 2-1: Parámetros de funcionamiento quemador de gas

Para mejorar el entendimiento de la trayectoria de gas hasta su combustión, se ilustra en la figura 4-7 se muestra la entrada de gas hasta la zona roja donde se ubican las losas cerámicas las cuales están a la temperatura anteriormente mencionada.

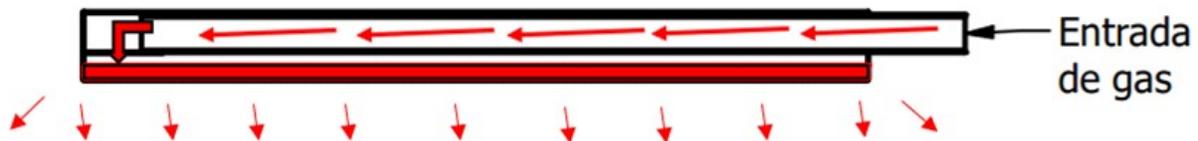


Figura 2-7: Trayectoria de gas en el interior del quemador

La configuración en el interior de horno para los quemadores se muestra en la figura 4-8 donde se puede evidenciar la posición y orientación de las losas a lo largo de la coordenada Z, para los efectos del modelo evitaremos la inclinación presente en el horno y todos los soportes de cada quemador.

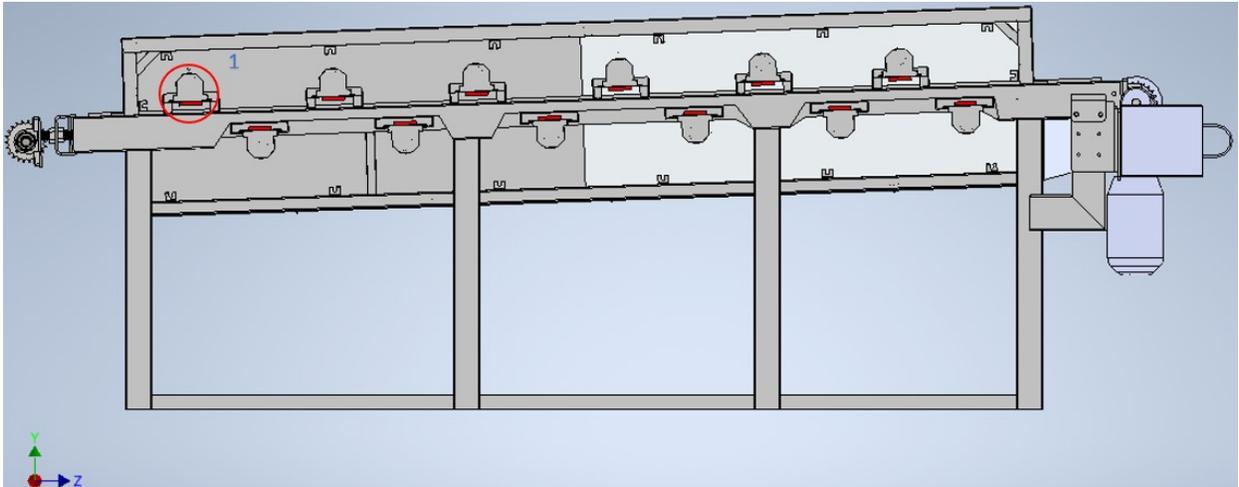


Figura 2-8: Trayectoria de gas en el interior del quemador

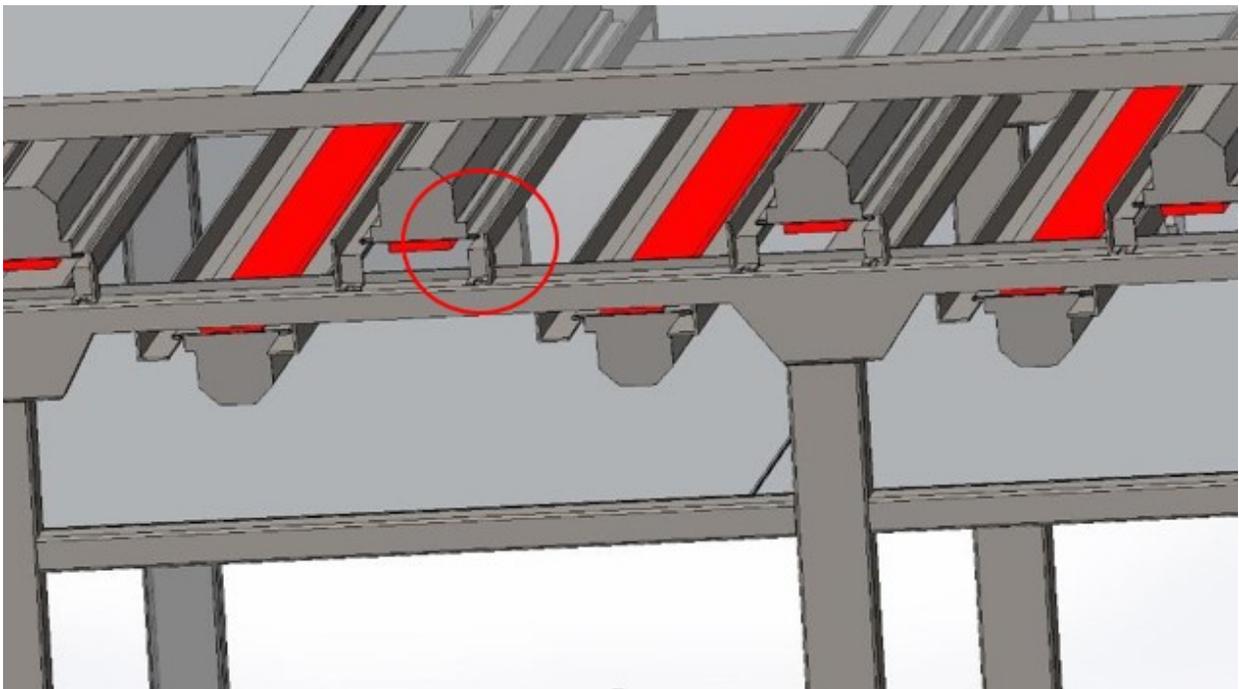


Figura 2-9: Soportes de quemadores

## 2.3 Malla de transporte de producto

La malla continua de transporte es la encargada de mover el producto desde la entrada a la salida pasando entre los quemadores pares e impares calentando el producto a lo largo de su trayectoria, para tener los parámetros definidos para esta simulación la malla tiene las siguientes características críticas:

Parámetro [símbolo]	Valor [Unidad]
Velocidad lineal de banda [ $V_B$ ]	0,075 $\frac{m}{s}$
Área efectiva banda por trayecto [ $A_E$ ]	1,230,000mm <sup>2</sup>
Temperatura superficial de banda promedio [ $T_L$ ]	250°C
Altura de banda [ $H_B$ ]	0,01m

Tabla 2-2: Parámetros de banda



Figura 2-10: Tipo de malla utilizada en la banda

El tipo de malla fabricada en acero HR permite la transferencia de calor de los quemadores hacia las arepas, en la siguiente figura podemos ver la trayectoria que sigue la banda ingresando

por la parte superior derecha y saliendo por la parte superior izquierda, de la misma manera la banda vuelve a ingresar al horno por la parte inferior izquierda con una velocidad negativa con respecto a la banda superior para poder completar el ciclo.

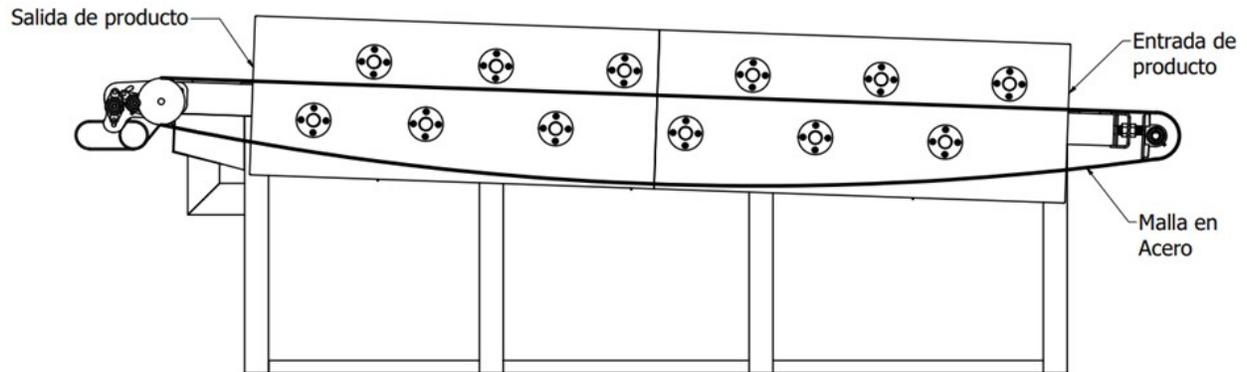


Figura 2-11: Trayectoria de la banda a lo largo del horno

## 2.4 Recamara de cocción

Otro componente requerido para el proceso de horneado es la recámara de cocción, la cual, consta de paredes aisladas térmicamente mediante una fibra cerámica permitiendo la concentración de altas temperaturas en un espacio reducido, en la figura 4-12 (espacio Achurado en rojo) podemos visualizar dicha recamara de cocción y en la figura FG las dimensiones generales.

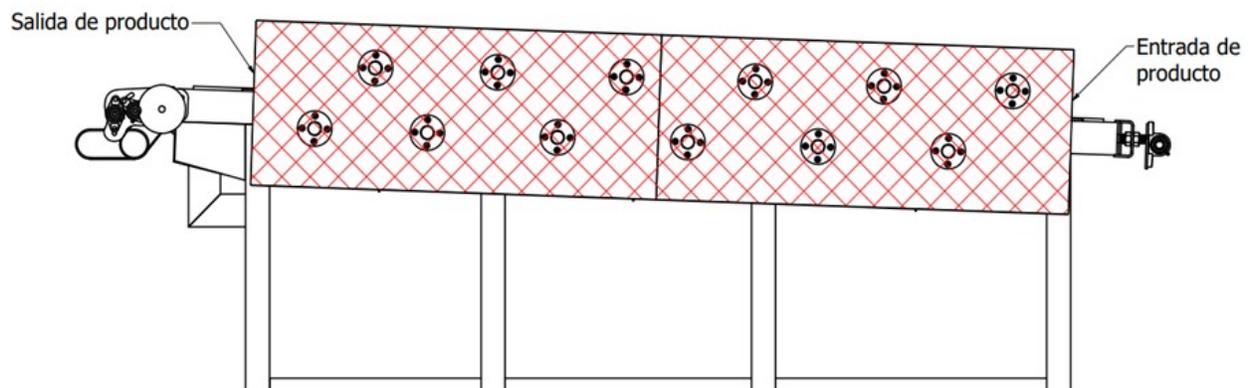


Figura 2-12: Recamara de cocción

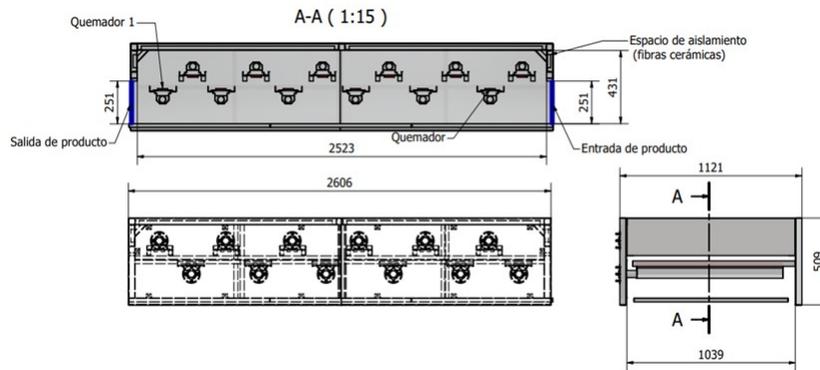


Figura 2-13: Dimensiones generales de recámara

Para poder definir las condiciones de contorno en términos térmicos expresamos los valores medidos en la tabla T:

Parámetro [símbolo]	Valor [Unidad]
Temperatura externa [ $T_{o0}$ ]	25°C
Temperatura interna promedio [ $T_{In}$ ]	390°C
Humedad relativa exterior [ $Hr_{o0}$ ]	62 %

Tabla 2-3: Tabla T

## 2.5 Producto

Para efectos prácticos la arepa se considera un disco de altura y diámetro contante. A continuación, se presentan las dimensiones del producto y las características físicas y térmicas ingreso y salida.

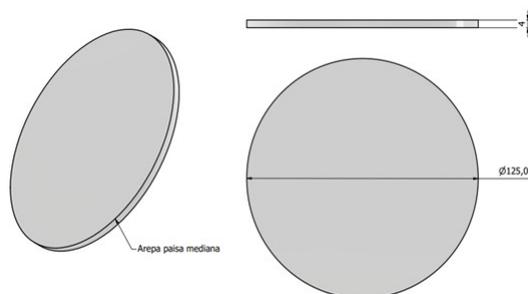


Figura 2-14: Dimensiones del producto



Figura 2-15: Ingreso del producto al horno

El producto ingresa al horno con las siguientes condiciones:

- $T_{oa} = 50^{\circ}\text{C}$   $T_{oa}$  Temperatura inicial del producto.
- $M_{a0} = 59\text{g}$   $M_{a0}$  Masa del producto al ingresar.

Y al salir el producto tiene las siguientes condiciones:

- $T_{1a} = 90^{\circ}\text{C}$   $T_{1a}$  Temperatura inicial del producto.
- $M_{a1} = 55\text{g}$   $M_{a1}$  Masa del producto al ingresar.

El volumen no cambia durante el proceso de cocción, pero si cambia su masa por la deshidratación de la matriz porosa [C]. Por lo cual la tasa de pérdida de masa está alrededor del 7% para un tiempo de permanencia de 34s en el interior del horno a una temperatura de  $390^{\circ}\text{C}$ .

### 3 Marco teórico

Con base a lo desarrollado por otros autores frente a la conceptualización del conocimiento frente a los caracterización de sus proceso de horneado, es pertinente la construcción de nuestro modelo geométrico y la definición de nuestras ecuaciones de flujo y temperatura para la obtención de resultados propicios para en un próximo estudio obtener balances multifase en el interior del horno continuo y caracterización del producto mediante curvas de secado.

#### 3.1 Modelo geométrico

Con base en las metodologías de trabajo para el desarrollo del modelo computacional para los hornos de pan relacionadas en el marco teórico, realizaremos un proceso similar para el horno continuo de arepas de maíz. Partiremos de la definición de la geometría adaptada para un proceso CFD, estas dimensiones en los dispositivos presentes en la industria varían dependiendo el fabricante y su diseño adaptado dimensiones de la planta de producción. En la Figura 5-1 podemos observar las dimensiones generales del horno que para efectos del volumen de control solamente se considerando las dimensiones internas. Por otro lado, el volumen de control fue adaptado con unas zonas extras con el fin de lograr un mejor perfil de velocidad en la entrada y salida con una longitud equivalente a la altura del horno (Ver figura 5-2).

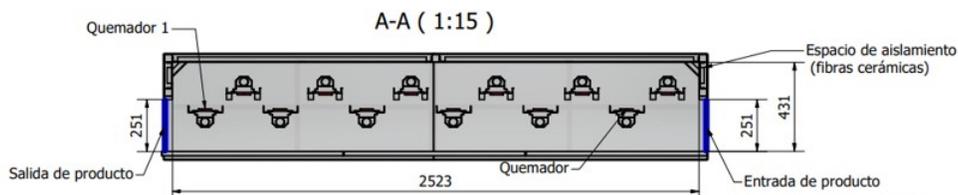
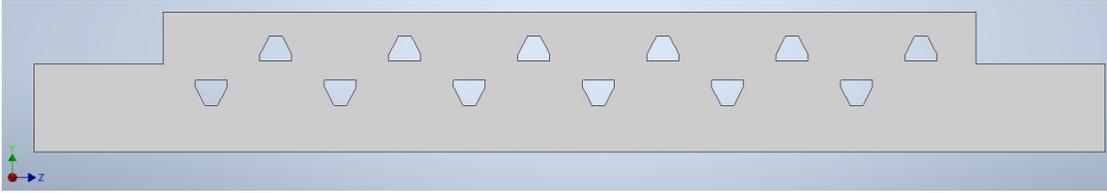
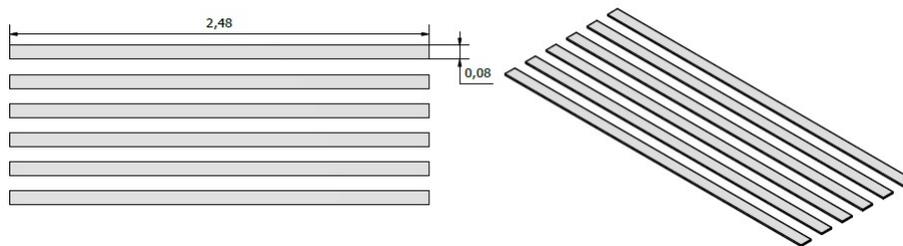


Figura 3-1: Dimensiones internas Horno de arepas de maíz



**Figura 3-2:** Modelo CAD simplificado de horno

Para efectos de mejoramiento del perfil de velocidad se generó una simplificación del perfil de los fogones reduciendo las aristas. Así mismo, para la banda era necesario una simplificación de la forma de la banda para mantener el área efectiva sin generar un modelo muy complejo, razón por la cual se efectúa un rediseño equivalente tomando el área efectiva de la banda, generando un modelo que permite transferencia de masa a través de la banda y movilidad del fluido a lo largo del horno. Cabe mencionar que el movimiento del aire en el interior del horno solo es efectuado por el arrastre de la banda al interior del horno, posteriormente definiremos las condiciones de frontera donde se reflejara los causales del movimiento del fluido, en la figura 5-3 se puede observar la forma de la banda planteada.



**Figura 3-3:** Forma de banda por cada trayecto (cotas m)

El área efectiva de la banda por trayecto es de  $1,23m^2$  lo cual es necesario incorporar 6 listones cada uno con un área  $0,204m^2$  con el fin de obtener la misma área, de esta manera la posición de los listones a lo largo del horno queda ilustrado en la figura 5-4. Estos listones son áreas vacías adiabáticas que generan un movimiento a lo largo del eje Z. En la Figura 5-5 podemos observar la posición de las bandas a lo largo del horno, estas bandas fueron dispuestas conforme a las medidas reales en el horno, por ende, podemos evidenciar la cercanía de los fogones al producto muy común en los hornos continuos de arepas de maíz.

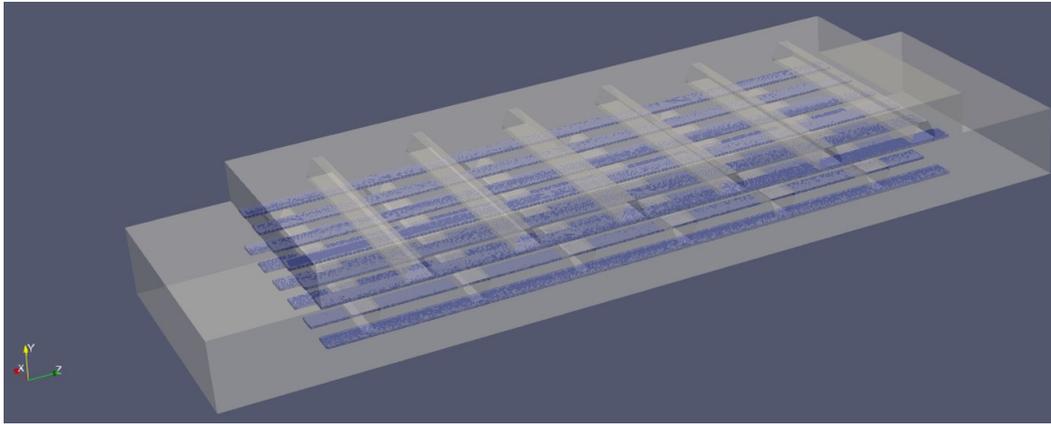


Figura 3-4: Posición de bandas en el interior del horno

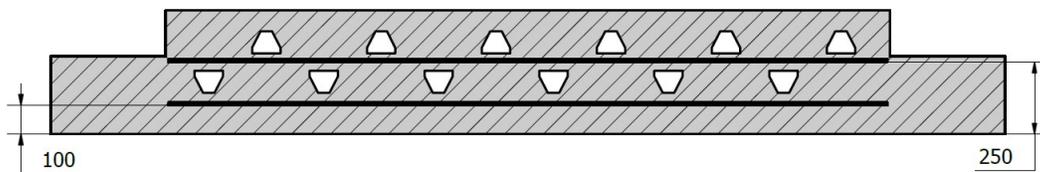


Figura 3-5: Ubicación de las bandas en forma de listones (cota mm)

Para la definición de los fogones se procedió a dividir los fogones en dos secciones específicas las cuales constan de unas Losas (matriz cerámica porosa) y una Carcasa del fogón. En la figura 5-6 podemos observar las zonas rojas las cuales representan las zonas de mayor temperatura (losas) y las zonas grises (carcasa).

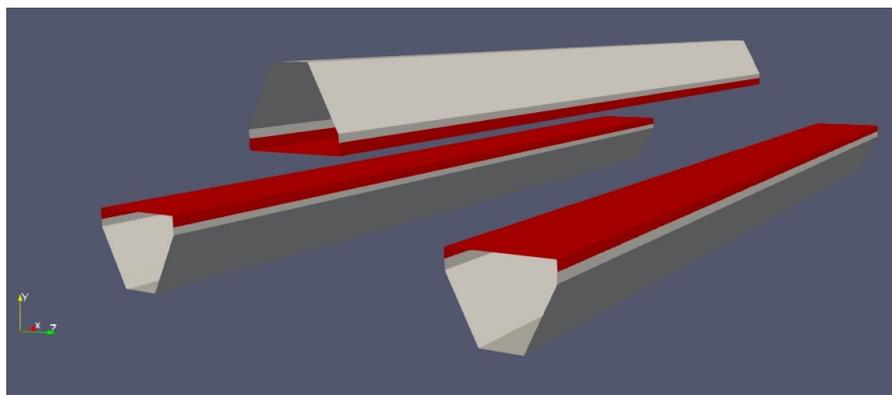


Figura 3-6: Fogones con losas cerámicas

## 3.2 Condiciones de contorno

Partiremos del modelo CAD para poder definir los patches aplicados para cada sección con el fin de delimitar todo el dominio computacional representados en la figura 5-7.

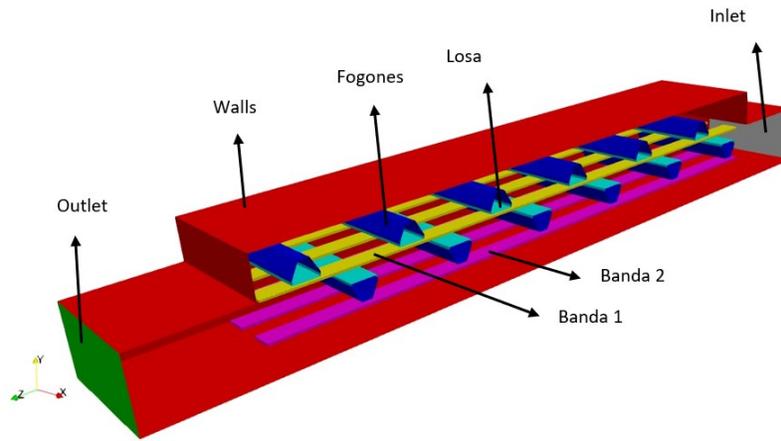


Figura 3-7: Nombre de fronteras para el dominio computacional

El funcionamiento del horno como se expuso en el capítulo anterior, se compone de unos quemadores radiantes infrarrojos dispuestos a 2cm de la banda de transporte de producto, dichos fogones son colocados equidistantes uno de otro a lo largo del eje z. Las paredes del horno son paneles de acero con el interior en fibra cerámica generando un aislamiento térmico. En la figura 5-7 podemos observar la configuración de las fronteras del dominio computacional definidos para esta simulación. Iniciamos con los parámetros de entrada y salida con colores gris y verde respectivamente, las cuales son las fronteras del horno donde físicamente ingresa y sale el producto. Particularmente la entrada fue definida por una frontera de tipo Newman nulo  $\frac{\delta P}{\delta n} = 0$  para la presión, de tipo Newman nulo  $\frac{\delta T}{\delta n} = 0$  para la temperatura al no presentarse transferencia de calor y de tipo Dirichlet con un flujo volumétrico fijo muy bajo con el fin de facilitar el movimiento de del aire en el interior del horno, como se puede observar en la tabla 1 el valor es bajo en comparación al área y velocidad de la banda; como se mencionó anteriormente el movimiento del aire en el interior del horno solo se efectuar por el arrastre de la banda superior (banda 1) y la banda inferior (banda 2). Por otro lado, la salida se definió con una frontera de tipo Newman nulo  $\frac{\delta u}{\delta n} = 0$ ,  $\frac{\delta T}{\delta n} = 0$ , para la velocidad y temperatura respectivamente, en el caso particular de la presión se genera una condición de frontera de tipo Dirichlet  $P=0$  permitiendo un flujo de salida libre.

Un aspecto importante en el modelamiento de este horno fueron las bandas, dada su complejidad en diseño y su importancia en el proceso. Estas bandas como se menciono anterior mente se modelaron como listones los cuales permiten la transferencia de masa a través de la banda (como sucede en la realizad) y genera movimiento del aire a lo largo del horno; siendo estas el único mecanismo físico de movimiento del aire. Se procedió a dividir la banda en dos trayectos, el primero definido por la banda 1 es la encargada de ingresar el producto al horno con una velocidad positiva en el eje  $Z$ , por el contrario, el trayecto N2 esta definido por la banda 2 la cual pasa por el interior del horno con una velocidad negativa en el eje  $Z$ . Por diseño, este tipo de bandas al momento de realizar su recorrido de vuelta pasan nuevamente por el interior del horno para mantener una temperatura determinada evitando que el producto se quede adherido a la banda y no pueda pasar fácilmente al proceso de enfriado. Estas bandas fueron definidas como fronteras de tipo Dirichlet con unas velocidades definidas en la tabla 1, físicamente se comportan como muros los cuales se son asignadas como fronteras de tipo Newman nulo  $\frac{\delta P}{\delta n} = 0$ , y por último, para el parámetros de temperatura se definido como una frontera de tipo Dirichlet asignando el valor de temperatura interna como  $T_{int}$ . Continuando con la especificación de las fronteras de nuestro dominio computación abordamos la sección de los muros (walls) para ello se definió una frontera de tipo Dirichlet  $U=0$ , Newman nulo  $\frac{\delta P}{\delta n} = 0$  para la presión y Dirichlet asignando el valor de temperatura interna como  $T_{int}$ .

Los fogones en particular al igual de las bandas fueron un aspecto importante a tener en cuenta para la generación del dominio computacional, ya que fue necesario dividir la sesión en dos partes. Una se compone de la carcasa de los fogones encargada de sostener la losa y generar una cavidad donde se mezclan el combustible en este caso gas natural con aire, es por esto que esta carcasa maneja una frontera de tipo Dirichlet asignando un valor de temperatura medida en campo de aproximadamente  $T=400K$ , comportándose también como un muro los parámetros de velocidad y presión fueron los mismo. Las áreas definidas como losas son las partes calientes responsables de calentar nuestro producto con el fin de dar consistencia y eliminar toda carga microbiana del alimento adquirido durante su proceso de fabricación, estas losas fueron definidas al igual que los fogones como fronteras de Dirichlet asignando un valor de temperatura de alrededor de  $T=573K$ , para el parámetro de presión se le impuso una condición de frontera de tipo Newman nulo  $\frac{\delta P}{\delta n} = 0$  y velocidad con un valor de  $U=0$  de tipo Dirichlet.

<b>Frontera</b>	<b>U</b>	<b>P</b>	<b>T</b>
Walls	(0 0 0)	$\frac{\delta P}{\delta n} = 0$	$T_{int}$
Inlet	0,0025m <sup>3</sup> /s	$\frac{\delta P}{\delta n} = 0$	$\frac{\delta T}{\delta n} = 0$
Outlet	$\frac{\delta U}{\delta n} = 0$	P=0	$\frac{\delta T}{\delta n} = 0$
Fogones	(0 0 0)	$\frac{\delta P}{\delta n} = 0$	400k
Losas	(0 0 0)	$\frac{\delta P}{\delta n} = 0$	573k
Banda 1	0,075m/s(001)	$\frac{\delta P}{\delta n} = 0$	$T_{int}$
Banda 2	0,075m/s(00 - 1)	$\frac{\delta P}{\delta n} = 0$	$T_{int}$

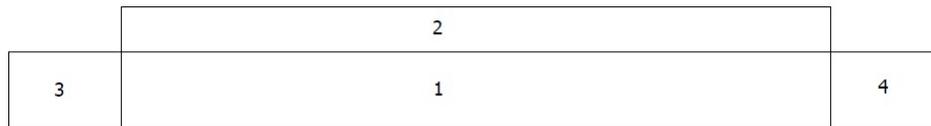
**Tabla 3-1:** Condiciones de frontera para cada parámetro

<b>Frontera</b>	<b>U</b>	<b>P</b>	<b>T</b>
Walls	fixedValue	zeroGradient	fixedValue-internalField
Inlet	flowRateInletVelocity	zeroGradient	zeroGradient
Outlet	zeroGradient	fixedValue	zeroGradient
Fogones	fixedValue	zeroGradient	fixedValue
Losas	fixedValue	zeroGradient	fixedValue
Banda 1	fixedValue	zeroGradient	fixedValue-internalField
Banda 2	fixedValue	fixedValue	fixedValue-internalField

**Tabla 3-2:** Condiciones de frontera para cada parámetro en openFoam

### 3.3 Generación de malla

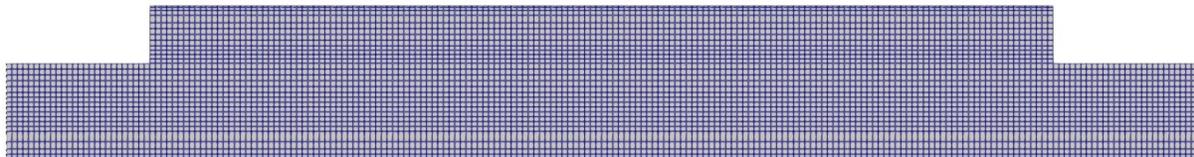
La generación de malla fue generada a partir del modelo CAD simplificado generado en la sección anterior adaptado al entorno de blockMesh de openFoam, el cual requiere de su construcción la agrupación de cubos con las dimensiones ya especificadas (ver figura 5-8). En la tabla 3 podremos observar la cantidad de elementos por cada eje para poder generar la malla, la cual genero 400.000 celdas en todo el dominio. La figura 5-9 ilustra el mallado luego de ejecutar el blockMesh.



**Figura 3-8:** Subdivisión del dominio blockMesh

Sección	X	dx[m]	Y	Dy[m]	Z	dz[m]
1	80	0.013	22	0.012	160	0.015
2	80	0.013	12	0.013	160	0.015
3	80	0.013	22	0.012	30	0.013
4	80	0.013	22	0.012	30	0.013

**Tabla 3-3:** Tamaño de celdas por cada eje



**Figura 3-9:** Mallado básico horno con blockMesh

Ahora bien, la generación de los fogones, losas y bandas fueron desarrolladas a partir de la herramienta snappyHexMesh de openfoam la cual básicamente realiza la extracción de sólidos en formato STL (Ver figura 5-10) generando capas de mallado con celdas más pequeñas de la malla original delimitando la geometría extraída.

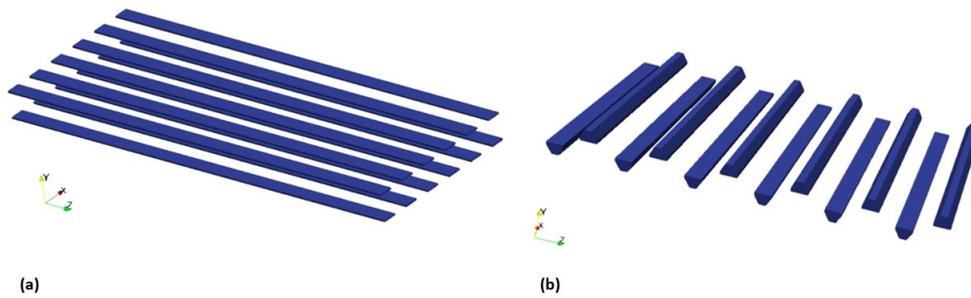


Figura 3-10: (a)Modelo CAD de banda, (b) Modelo CAD de los fogones

Partiendo de una malla genera de 400.000 celdas, se procedió a correr la herramienta SnappyHex-Mesh consiguiendo un resultando de una malla de 4.8 millones de celdas, con un nivel de refinamiento de 3 capas en los fogones y losas , esto debido a la sensibilidad de la simulación para el manejo de temperaturas altas y un nivel de refinamiento de 2 para las bandas superior e inferior. En las siguientes figuras podremos ver el nivel de refinamiento para los elementos anteriormente mencionado.

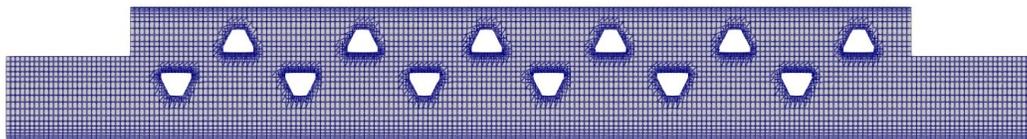


Figura 3-11: Mallado de Horno pared 4.8M de celdas

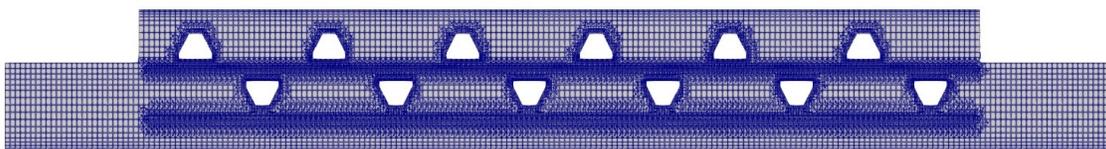


Figura 3-12: Mallado de Horno pared 4.8M de celdas

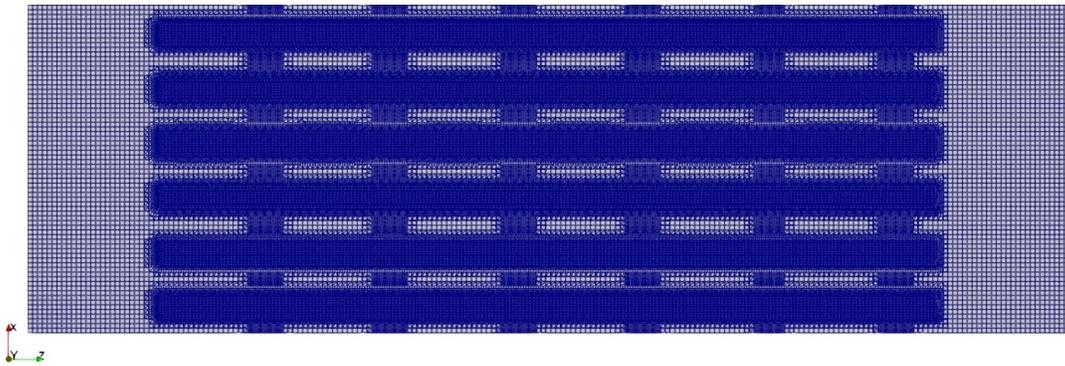


Figura 3-13: Detalle mallado bandas

En la figura 5-11 podemos observar el nivel de refinamiento para las secciones de los fogones (losas y carcasas) y las bandas superior e inferior. Dada la cantidad de celdas obtenidas en cada de refinamiento por cada listón de banda y cada fogón pasamos de tener una malla de 400 mil celdas a una malla de 4.8 millones de celtas. Este nivel de refinamiento fue necesario dado que la malla entraba en conflicto cuando se reducía la cantidad de celdas aumentando las caras no-ortogonales y el nivel máximo de asimetrías de caras, es posible que la cantidad de obstáculos y la cercanía de los elementos fuera la causante de estas desviaciones de los parámetros. En las siguientes figuras reflejaremos el nivel de refinamiento aplicado parta cada sección.

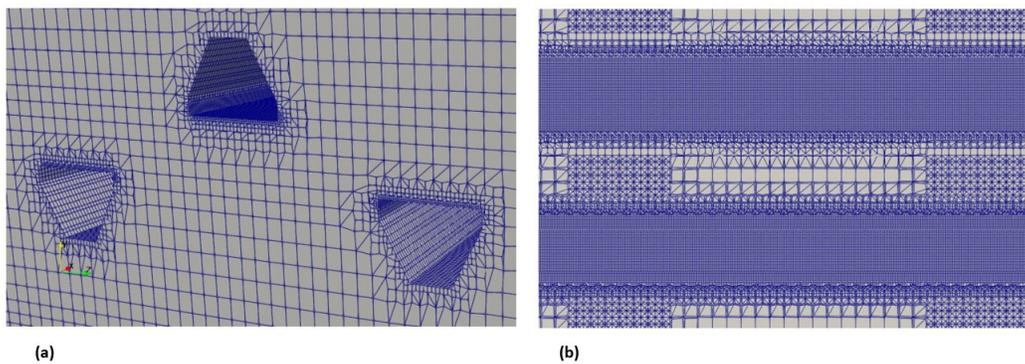


Figura 3-14: (a) Detalle de refinamiento fogones, (b) Detalle de refinamiento bandas vista superior

### 3.4 Ecuaciones de gobierno

En la aplicación de modelos CFD, las ecuaciones de gobierno permiten la resolución de problemas térmicos para dinámica de fluidos, basados en las ecuaciones de conservación de masa, conservación de momento y conservación de energía. Posteriormente utilizando esquemas temporales para la

discretización de las ecuaciones de gobierno, podemos a través de un software como openFoam solucionar dichas expresiones, cabe resaltar que estos programas ya incorporan estas ecuaciones aplicadas a modelos de resolución que para nuestro caso utilizaremos los solucionadores pimpleFoam y buoyantBoussinesqPimpleFoam, aplicado ambos para flujo incompresible, para desarrollo de flujo y transferencia de calor respectivamente.

Los solucionadores pimpleFoam y buoyantBoussinesqPimpleFoam fue seleccionado por su bajo costo computacional a comparación de un algoritmo PISO dado que este primer paso fue simulado en un equipo ordinario de tan solo 12 núcleos en su procesador. Estos solucionadores en cada paso de tiempo realizan las siguientes operaciones añadiendo la temperatura para el segundo solucionador en los instantes de cálculo de velocidad [1].

- Construcción de la matriz de momentos
- Construcción la matriz de presión a partir de la matriz de momento
- Cálculo de la presión para cada punto
- Corrección de las velocidades con el nuevo campo de presión hallado.
- Reconstrucción la matriz de momentos con respecto a las nuevas velocidades
- Construcción de la matriz de presiones partiendo de la matriz de momentos con las velocidades actualizadas
- Calcular nuevamente la presión
- Corrección de las velocidades con el nuevo campo de presión

### 3.4.1 Ecuación de Conservación de masa

Básicamente la ecuación de continuidad o ecuación conservación de masa refiere a la presencia de sumideros o fuentes de masa y la cantidad de materia que atraviesa las fronteras para un volumen determinado, esta conservará su masa a nivel local. Esta expresión está definida de la siguiente manera:

$$\frac{\delta p}{\delta t} + \nabla \cdot (pV) = 0$$

Donde:

- $p$ : Es la densidad del fluido en el volumen.
- $V$ : Es el campo de velocidades del fluido en el volumen.

Para un fluido incompresible la ecuación de continuidad puede expresarse de la siguiente forma:

$$\nabla \cdot U = 0$$

Dado que la densidad  $p$  no cambian en el tiempo, por lo cual sale de ambos factores.

### 3.4.2 Ecuación de conservación de momento

El principio de conservación de momento plantea que para un cuerpo a el cual se le aplique cualquier fuerza externa, este conservará su momento total; en otras palabras, el producto entre el vector velocidad y su masa, sus componentes en cualquier dirección se conservaran. Parte de este principio esta definido con base a la segunda ley de Newton, expresando que el momento de un volumen determinado solo puede varían cuando se le es aplicado una fuerza de superficie o de cuerpo sobre el. A continuación, expresamos la ecuación como:

$$\frac{\delta pU}{\delta t} + \nabla \cdot (pUU) = \nabla \cdot (\mu \nabla U) - \nabla p + pg$$

Donde:

- $P$ : Es la presión del fluido en el volumen.
- $\mu$  Es la viscosidad cinemática.

### 3.4.3 Ecuación de conservación de energía

Principalmente para definición de la ecuación de conservación de energía partiremos de la primera ley de la termodinámica la cual define que toda energía no se puede crear ni destruirse durante un

proceso específico, tan solo transformarse en otro tipo de energía cinética, mecánica, entre otras. A continuación, expresaremos la ecuación de conservación de energía.

$$\frac{\delta}{\delta t}(pc_p T) + \nabla \cdot [pc_p v T] = \nabla \cdot [k \nabla T] + Q^T$$

Para un flujo incompresible cada término en la suma está definido así: El primer factor de la ecuación es el término transitorio expresando la variación en el tiempo de la temperatura por unidad de volumen. El segundo factor de la ecuación es el término convectivo expresando el balance efectivo del flujo de la temperatura en el volumen de control, correlacionado con el campo de velocidades. Al lado derecho de la expresión encontramos el término de transporte difusivo representando el balance de flujo causados por los gradientes de temperatura. Por último, tenemos el término fuente  $Q^t$  expresando el cambio de la temperatura por unidad de volumen.

#### 3.4.4 Expresiones adicionales para el sistema de ecuaciones

Como se mencionó anteriormente el solucionador utilizado para este caso es el `buoyantBoussinesqPimpleFoam`, el cual consiste en un solucionador de estado transitorio para fluidos incompresibles, laminares o turbulentos. Para este solucionador a diferencia del `buoyantPimpleFoam` contempla un parámetro adicional llamado aproximación de Boussinesq, el cual, expresa la variación de la densidad debida a los gradientes de temperatura generados por el paso del fluido por superficies en contacto calientes y no a causa de las altas velocidades, expresión que mostraremos a continuación:

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_{ref})]$$

Donde:

- $\beta$  Es el coeficiente de expansión térmica.
- $T_{ref}$  Es la temperatura de referencia del sistema.

#### 3.4.5 Cocción de producto y secado

Con el fin de presentar referencias para trabajos futuros posterior al desarrollo del presente trabajo, se planea procesos de cocción en los cuales durante el calentamiento del producto se produce un secado como lo realiza (Chhanwal, Indrani, Raghavarao, Anandharamakrishnan, 2011)[3] caracterizan el

comportamiento térmico de un horno de pan de dos bandejas y con resistencias como fuente de calor a una temperatura de  $200^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y lo validan con datos hallados experimentalmente. El objetivo era caracterizar las curvas de temperatura del producto definiendo las temperaturas máximas del producto para lograr un dorado en su superficie, a esto lo llaman indicio de pardeamiento el cual define el nivel de “dorado” del pan con el fin de no afectar propiedades organolépticas como sabor y textura, parámetro que la industria de las arepas no requiere. Al incorporar el pan como un parámetro dentro de la simulación fue necesario definir el calor específico del pan en función de la temperatura la cual tiene la siguiente expresión:

$$C_p = (0,013T^2 - 0,217T + 4179)X_w + (5T + 1390)(1 - X_w) + \lambda(T - T_f, \nabla T)$$

Donde:

- $X_w =$  Cantidad de agua en el pan  $\left[ \frac{K_g}{K_g} \right]$
- $\lambda =$  Calor latente de cambio de fase  $\left[ \frac{j}{m^3} \right]$

Teniendo presente las condiciones iniciales y finales esperadas como lo son:

- $T_f = 100^{\circ}\text{C}, X_w = 0,35, \nabla T = 0.5^{\circ}\text{C}$

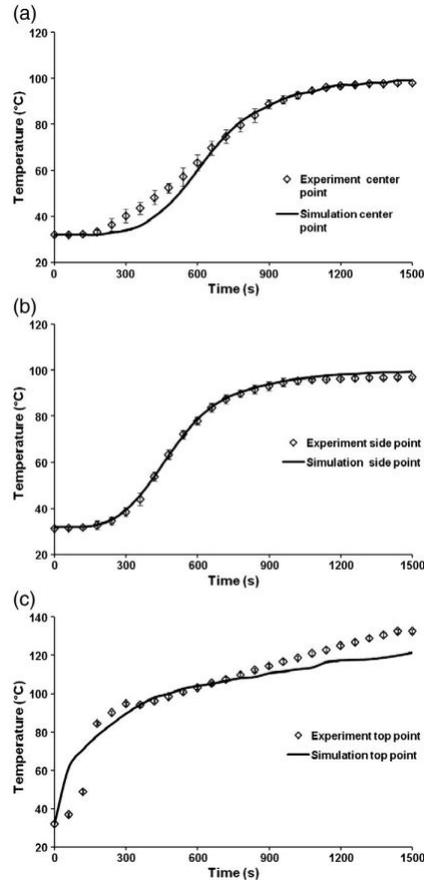
Este tipo de análisis luego de hallar las curvas de temperatura es posible definir esta posibilidad de enfoque al poder incorporar el producto como una especie de sumidero que, al generar el calentamiento y por ende un secado, el producto transfiere vapor de agua al medio lo que desencadena en la necesidad de un solucionador multifase. El autor plantea de la misma manera plantea una conductividad térmica dependiente de la temperatura por partes, siendo la temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$  el punto en el cual el agua en su interior comienza evaporarse y al mismo tiempo condensarse en la matriz porosa, mientras que en la corteza se produce una deshidratación generando el pardeamiento deseado para tal proceso[16].

$$K(T) = \frac{0,9}{1 + \exp(-0,1(T - 353,16))} + 0,2 \quad \text{if } T \leq 100^{\circ}\text{C}$$

$$K(T) = 0,2 \quad \text{if } T \geq 100^{\circ}\text{C}$$

A partir de estos parámetros se logran realizar la simulación a partir de una malla de 1.2 millones de elementos obteniendo curvas de temperatura para el pan en diferentes puntos con respecto a su

centro. Estas curvas mostradas en la figura 3-7 reflejan el comportamiento de un calentamiento de una matriz porosa con agua en su interior.



**Figura 3-15:** a) Temperatura en el centro, (b) Temperatura a 4cm del centro, (c) Temperatura a 6.5cm del centro [16]

A medida que pasa el tiempo las investigaciones sobre los comportamientos térmicos hornos y el producto en su interior, es así como aparecen modelos matemáticos que permiten definir la condensación- evaporación en el interior de un pan al momento de su cocción. Para El horneado de alimentos es pertinente mencionar que durante el proceso cocción en su interior hay presencia de agua en estado líquido y vapor de agua debido a la porosidad del mismo, al mismo tiempo que hay presencia de gases producto de la combustión (dependiendo el horno), durante las simulaciones donde hay presencia de mezcla se utiliza la siguiente expresión para hallar esta fracción volumétrica de cada elemento [12].

- Agua líquida

$$\frac{\delta(\alpha_l \rho_l)}{\delta t} + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l u_m) = - \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l u_{dr,l}) - \dot{m}_{lv}$$

- Vapor de agua

$$\delta\left(\frac{\alpha_v \rho_v}{\delta t}\right) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v u_m) = - \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v u_{dr,v}) + \dot{m}_{lv}$$

- Dióxido de carbono

$$\frac{\delta(\alpha_{CO_2} \rho_{CO_2})}{\delta t} + \nabla \cdot (\alpha_{CO_2} \rho_{CO_2} u_m) = - \nabla \cdot (\alpha_{CO_2} \rho_{CO_2} u_{dr,CO_2}) + R_{CO_2}$$

Donde:

- $\alpha$  : Fracción volumétrica
- $\rho$  : Densidad de cada fase
- $u_m$  : Velocidad de la mezcla
- $u_{dr,l}$  : Fracción de la velocidad de cada fase Ej:  $u_{dr,l} = u_l - u_m$

Donde  $\dot{m}_v$  es la tasa de evaporación-condensación del agua [12]

$$\begin{aligned} \dot{m}_{lv} &= c \alpha_l \rho_l \frac{T - T_{sat}}{T_{sat}} & T > T_{sat} \\ \dot{m}_{lv} &= c \alpha_v \rho_v \frac{T_{sat} - T}{T_{sat}} & T < T_{sat} \end{aligned}$$

Así como las simulaciones consideran la pérdida de agua evaporada debido al proceso de cocción, durante la cocción del pan la levadura realiza cambios volumétricos en el producto haciéndolo crecer, este proceso se ha logrado generar un modelo matemático para dicho comportamiento relacionando al pan como un cilindro el cual tiene una variación de su radio en función del tiempo, se define con la siguiente expresión: [21]

$$R(t) = \sqrt{\frac{V_0 \alpha(t)}{\pi}}$$

$$\begin{aligned} \alpha(t) = & -2 * 10^{-4} \left(\frac{t}{60}\right)^4 + 5 * 10^{-3} \left(\frac{t}{60}\right)^4 - 4,49 * 10^{-2} \left(\frac{t}{60}\right)^3 + 1,517 * 10^{-1} \left(\frac{t}{60}\right)^2 \\ & + 4,8 * 10^{-3} \left(\frac{t}{60}\right) + 0,9968 \end{aligned}$$

---

Para un rango definido por  $t \leq 360s$

$$\alpha(t) = 1,7132$$

Para un rango definido por  $t > 360s$  Como se pudo evidenciar anteriormente la simulación de hornos de cocción de pan han tenido avances importantes logrando caracterizar procesos tales como variación volumétrica por causas de la levadura, tasa de condensación- evaporación, temperatura inicial, durante y finalizando el proceso, todo esto partiendo de un modelo CAD adaptado para la simulación y su mallado (simplificación de geometrías), definición de condiciones de contorno para el producto y el dispositivo y al obtener resultados poder realizar su respectiva validación mediante mediciones experimentales. Todos estos procesos desarrollados en pro de caracterizar las condiciones de horneado y posteriormente generar optimizaciones, aún no se aplica a los hornos de producción de arepas los cuales comparten ciertas similitudes, pero con diferencias evidentes como lo son el tipo de horneado de forma continua, forma del producto, transferencia de calor por quemadores radiantes infrarrojos, entre otros.

## 4 Resultados

El objetivo de este trabajo se basa en la especificación del comportamiento térmico de un horno de cocción continuo de arepas de maíz. Mediante la caracterización de la velocidad y temperatura en su interior, esto con el fin de comprender cuáles son las zonas de acumulación de calor en el interior del horno, como las bandas inciden en el movimiento de aire en el interior del horno y como las condiciones de contorno en general son un factor clave para el funcionamiento de este. Partiendo de los resultados obtenidos, se espera en investigaciones futuras lograr generar modificaciones geométricas del horno, parámetros de cocción, entre otros. Abordaremos los resultados obtenidos para la simulación para flujo incompresible sin incidencia de la temperatura, partiendo de la ubicación de unos sensores sobre unas regiones definidas en las siguientes figuras y definidas las posiciones en la tabla 6-1.

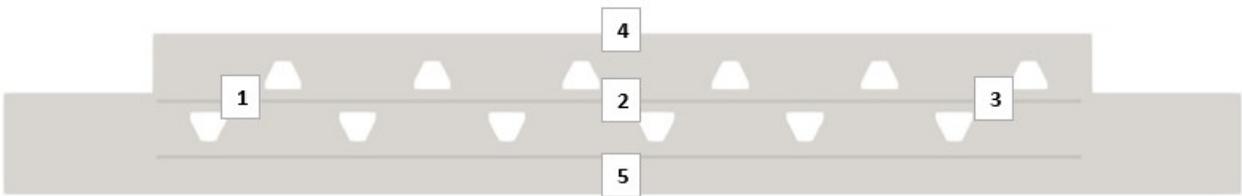


Figura 4-1: Posición de sensores, sensor 1 entrada al horno, sensor 3 salida del horno plano Y-Z

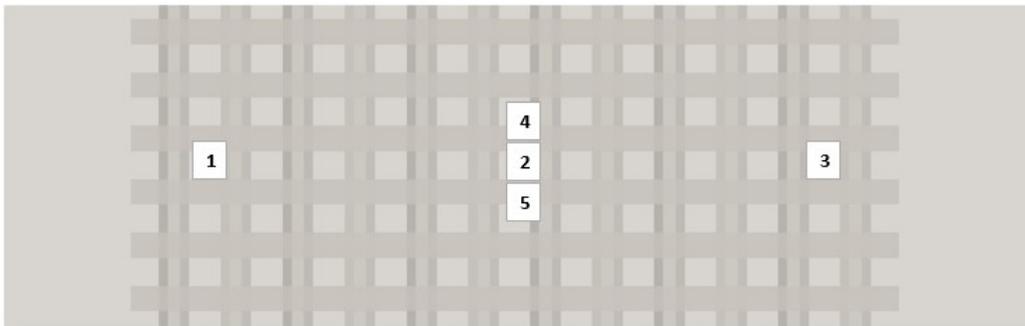


Figura 4-2: Posición de los sensores en el planos X-Z

Sensor	X	Y	Z
1	0.52	0.27	0.3
2	0.52	0.27	1.2
3	0.52	0.27	2.4
4	0.52	0.35	1.2
5	0.52	0.1	1.2

Tabla 4-1: Posición de sensores

La posición de los sensores está ubicada en el plano medio del horno, con el fin de visualizar el comportamiento del flujo a lo largo del horno sobre la banda de transporte del producto. Para poder caracterizar de la mejor manera el flujo definiremos los perfiles de velocidad media, vorticidad, factor Q y edad del aire.

## 4.1 Simulación sin variación de temperatura

### 4.1.1 Perfiles de velocidad

A continuación, podremos observar las líneas de flujo del plano mencionado las cuales reflejan la incidencia de las bandas obteniendo una velocidad negativa en la parte inferior debido a la banda N2. De la misma manera logramos obtener una velocidad positiva en la banda N1 (superior) facilitando la corriente a lo largo del horno. El movimiento del producto para la figura 4-3 se efectúa de izquierda a derecha.

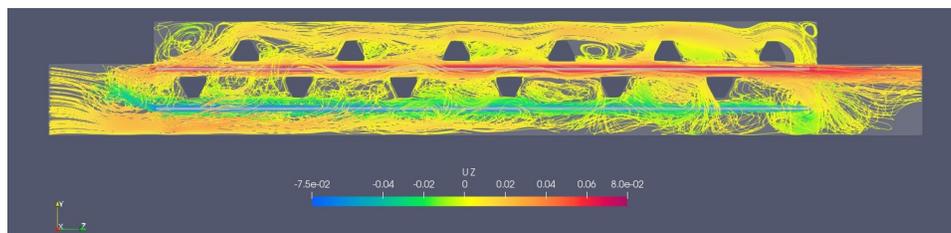


Figura 4-3: Líneas de corriente para 100s para la componente de la velocidad en Z

Para la simulación de la velocidad del fluido se procedió con el solucionador pimpleFoam para flujo incompresible, con un paso de tiempo de 0.01 y un tiempo final de 150s se lograron obtener los

siguientes perfiles de velocidad para 50s, 100s y 150s. Se puede evidenciar en los Figura 4-6 el valor de la velocidad promedio para el mismo plano lo cual refleja el comportamiento del flujo en concordancia con las magnitudes de la velocidad instantánea para 50, 100 y 150 segundos. Al ingreso del horno se aprecia un aparente choque del flujo entrante al horno junto con el volumen de aire arrastrado por la banda inferior generando una aparente turbulencia en ese sector, lo cual podremos detallar la sección de vorticidad. En contraparte, en la salida del horno a 100s se puede observar como el flujo de salida de la banda superior intenta seguir la trayectoria curva de la banda presente en el horno real.

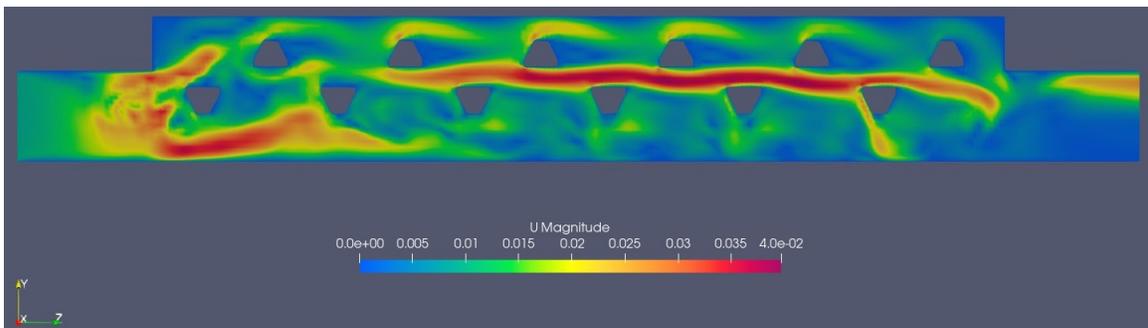


Figura 4-4: Perfil de la magnitud velocidad para 50s

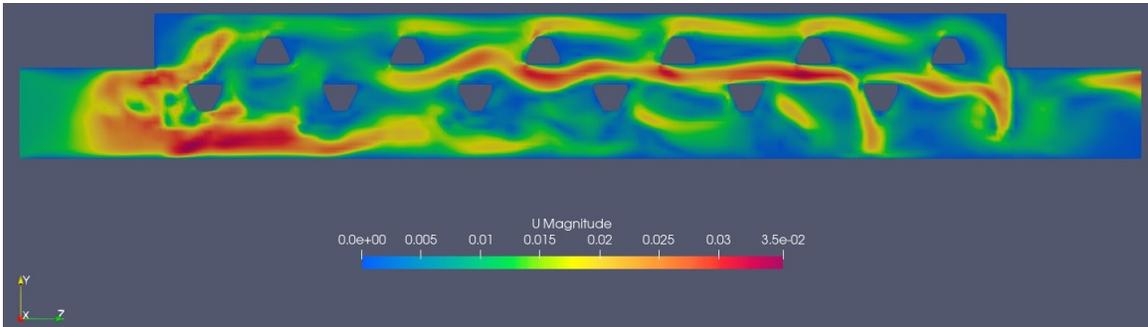


Figura 4-5: Perfil de la magnitud velocidad para 100s

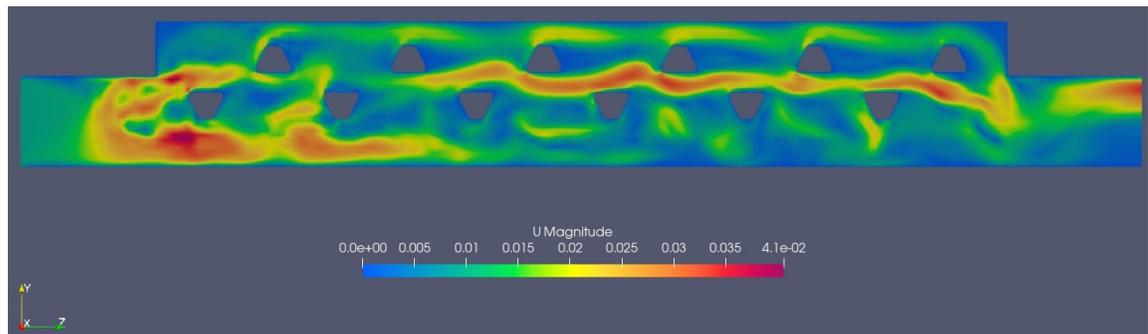


Figura 4-6: Perfil de la magnitud velocidad para 150s

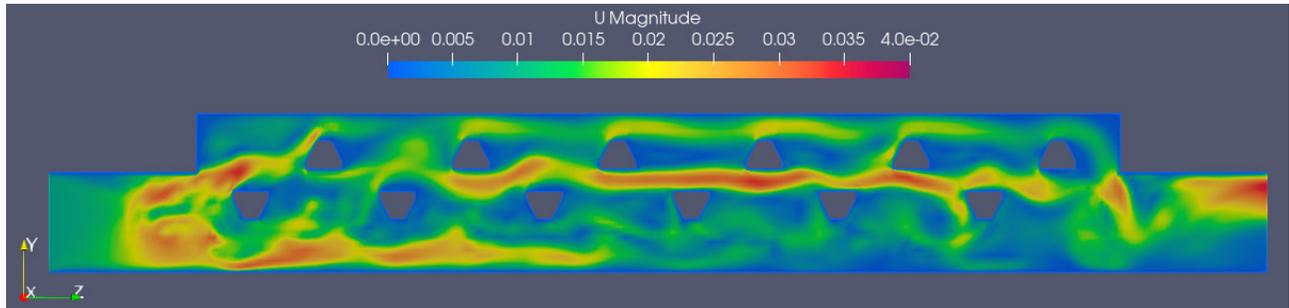


Figura 4-7: Magnitud de la velocidad media para el tiempo 165s

En la siguientes graficas podemos observar el comparativo de la velocidad y la velocidad media para el mismo instante tiempo para las zonas superior de la banda N1 uniendo los puntos 1 y 3, y el plano medio pasando por los puntos 2, 4 y 5.

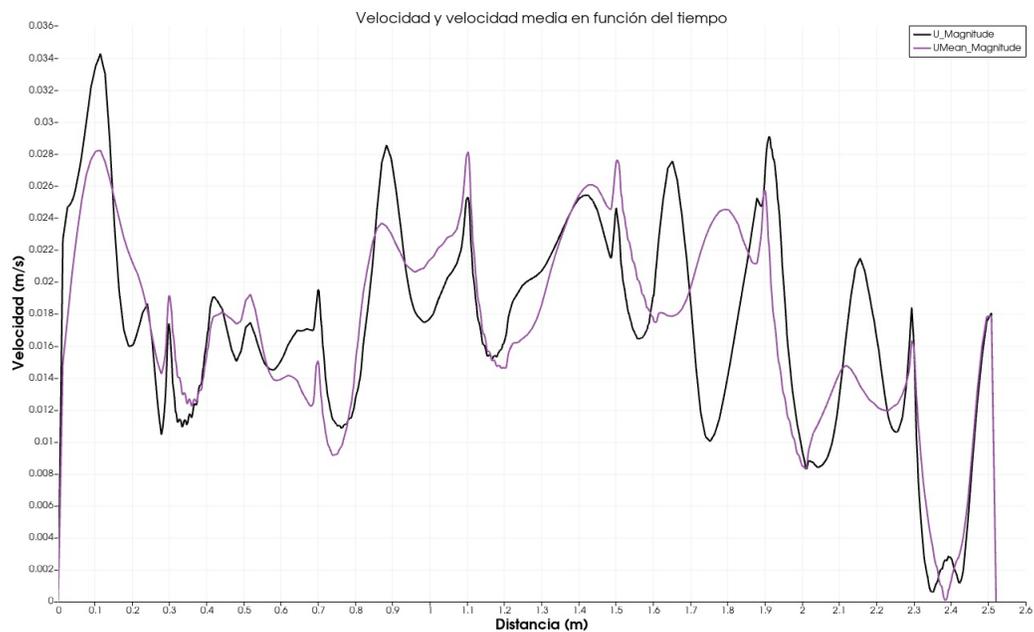


Figura 4-8: Comparativo  $U(165s)$  y  $U$  Media paralela eje Z

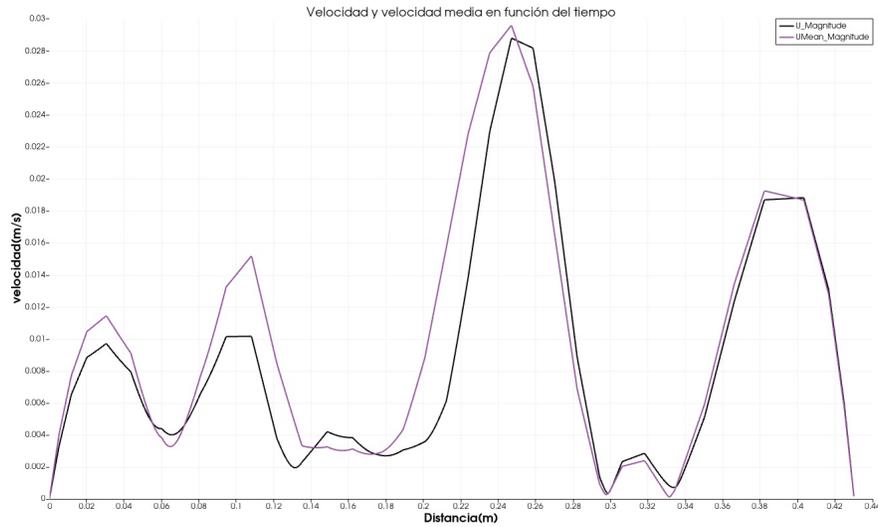


Figura 4-9: Comparativo velocidad(165s) y velocidad media paralela eje Y

En la figura 4-9 fue notable incidencia de las bandas para el flujo en el interior del horno, como se ha mencionado anteriormente, este es el único mecanismo de arrastre que permite la extracción de los gases producto de la combustión del gas natural en los quemadores radiantes infrarrojos. Por desconocimiento del comportamiento de las corrientes de flujo, zonas de aumento ineficientes de temperatura y generación vórtices no deseados, la industria de la fabricación de hornos para arepas de maíz no ha tenido sustento de la importancia de una apropiada recirculación de aire caliente como es el caso de los hornos de pan rotativos. En la Figura 4-10 y Figura 4-11 se presentan un corte sobre el plano XZ normal al eje Y, donde ratifica el movimiento del aire en el interior del horno causado por la banda superior.

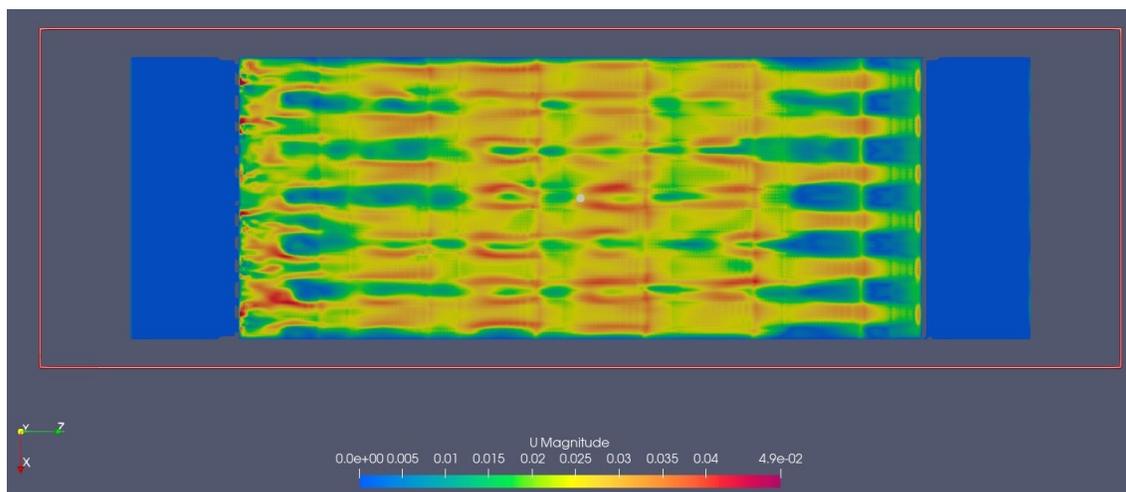


Figura 4-10: Plano de corte XZ a 1cm de la banda superior (100s)

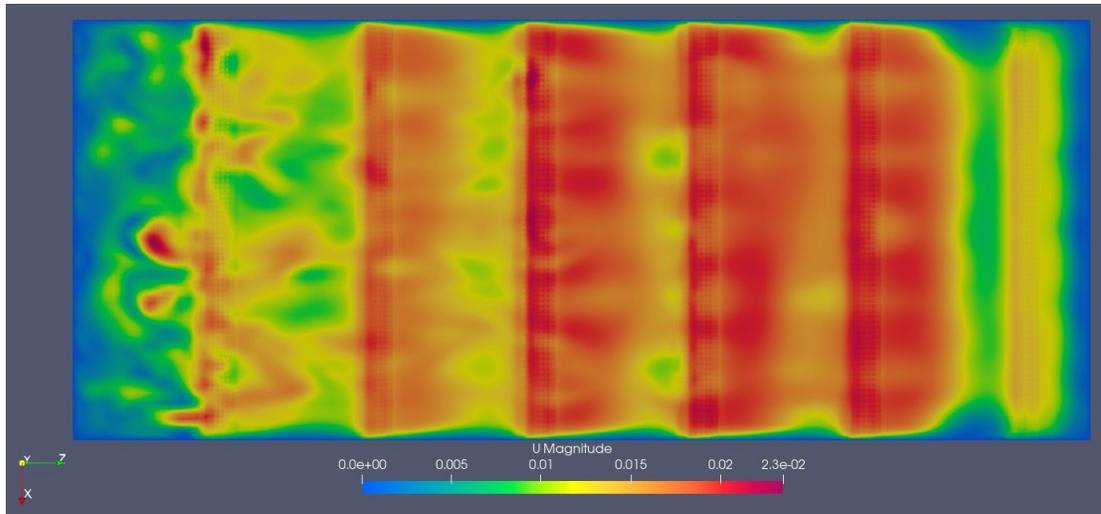


Figura 4-11: Plano de corte XZ a 15cm sobre la banda superior cerca a los fogones

A continuación, se presenta la gráfica de la velocidad en la componente z en función del tiempo para los puntos anteriormente relacionados en la figura 4-12, donde se refleja una velocidad al final negativa para el sensor N5 negativa dado su ubicación debajo de la banda inferior, la velocidad es positiva para los sensores 1 y 2 posiblemente debido a la ausencia de vórtices, por último, la velocidad cerca de 0 para los sensores 3 y 4 dada la ubicación cercana a los fogones donde se generan en algunos instantes de tiempo vórtices causados por la interferencia de los fogones al flujo del aire. Para la Figura 4-13 se muestra la velocidad en la componente z para los sensores 6 y 7 no especificados ubicados sobre los fragmentos de banda reflejando el desarrollo de la velocidad en aproximadamente 20s.

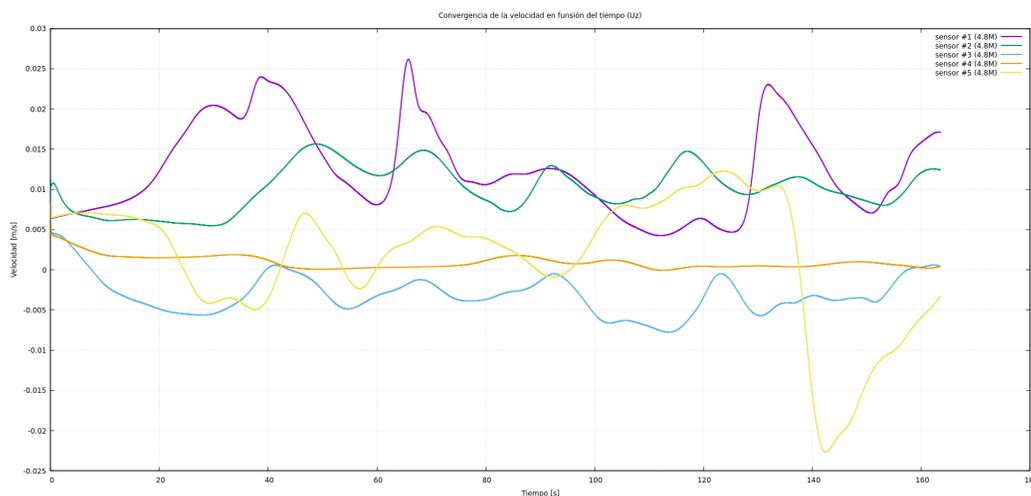
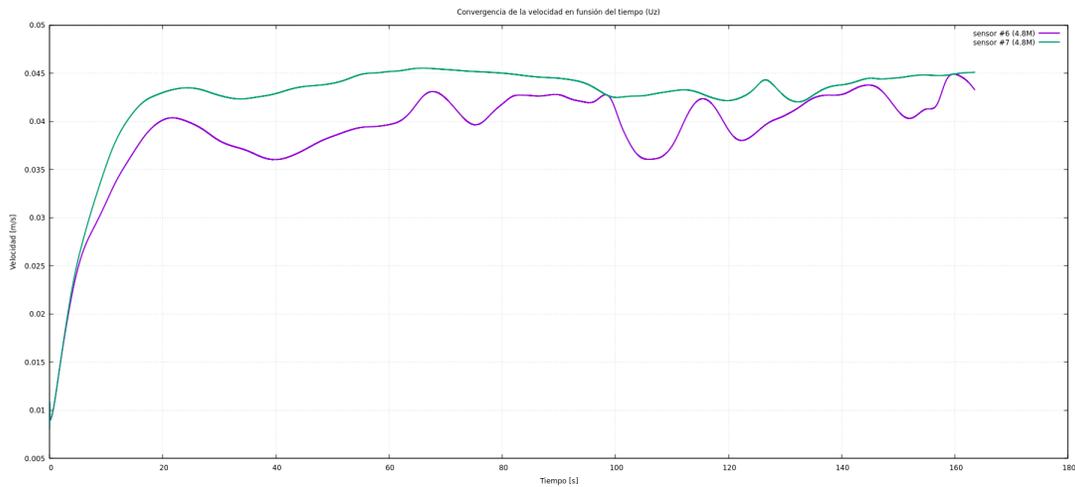


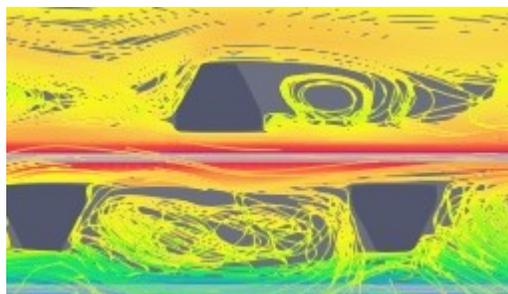
Figura 4-12: Velocidad de la componente z en función del tiempo para los sensores 1, 2, 3, 4 y 5



**Figura 4-13:** Componente de la velocidad en z en función del tiempo para los sensores 6 y 7 ubicados sobre las bandas

### 4.1.2 Vórtices

Sobre la imagen 4-14 se puede ver la presencia de vórtices entre cada espacio libre entre cada fogón de la misma línea, esto posiblemente dificulte la transferencia de calor al producto generando zonas de alta temperatura ineficaces. Para poder aclarar la ausencia o no de vorticidad en esas zonas se introdujo el parámetro vorticidad y factor  $Q$ . En la figura 4-15 podemos evidenciar la vorticidad para el plano xz el cual refleja lo fogones de manera vertical siendo un plano por encima de los quemadores. Al igual en la siguiente figura procedimos a ajustar el parámetro de escala y se realizó la medición de la distancia de dichos vórtices con respecto a los quemadores lo cual ratifica la presencia de vórtices a la altura de cada quemador o fogón



**Figura 4-14:** Vórtices

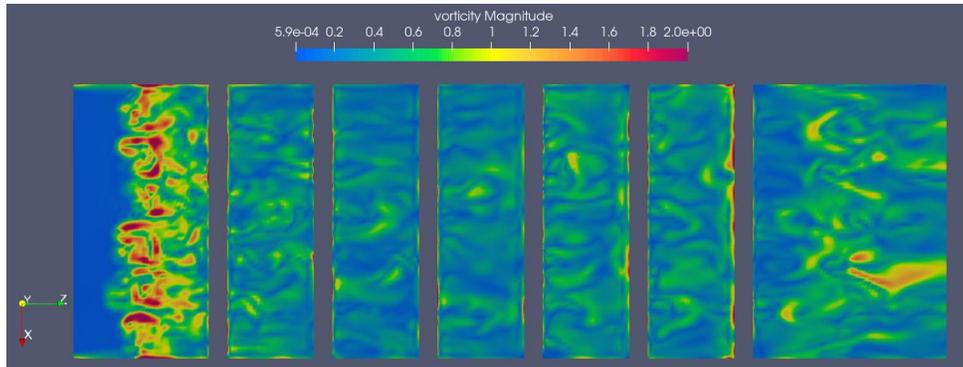


Figura 4-15: Vorticidad plano xz 168s

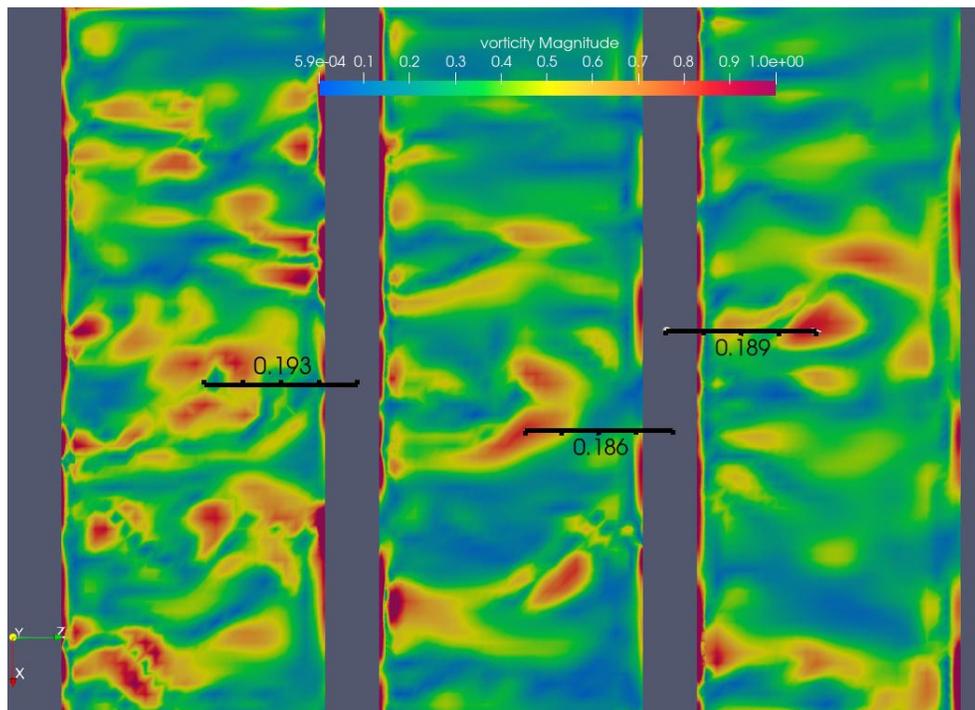


Figura 4-16: Distancia de cada elemento vorticidad plano xz 168s

Expresando en otros términos, los focos de vorticidad se pueden evidenciar con ayuda del criterio  $Q$ , el cual refleja las zonas donde se genera flujos turbulentos. Las zonas positivas reflejan una predominancia en el valor de vorticidad y las zonas con valores negativos representa un dominio de la tensión viscosa. Es notoria la presencia de vorticidad en el ingreso y la salida del horno, lo cual dificulta la entrada de aire limpio a los quemadores bajando la eficiencia de los mismos.

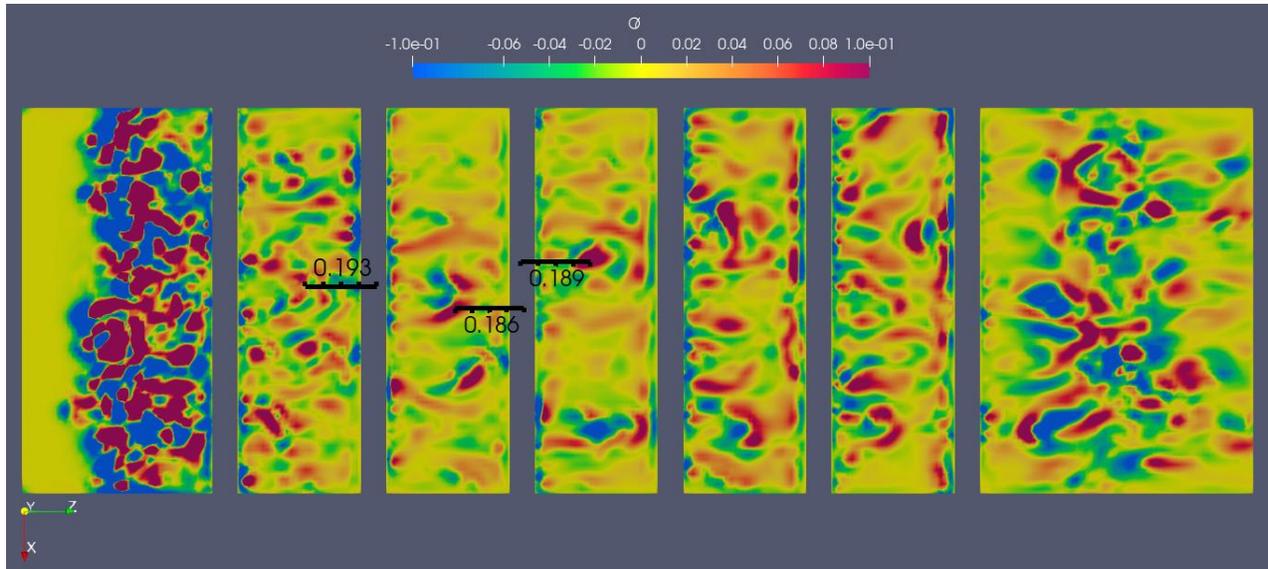


Figura 4-17: Criterio Q a 168s

### 4.1.3 Edad del aire

Con el fin de cuantificar la permanencia del aire en el interior y lograr definir con qué frecuencia el aire en su interior se regenera, incorporamos el parámetro escalar llamado age of air (age en openfoam) el cual define el tiempo que tarda una partícula de aire hipotética en una zona determinada, representando los valores en rojo como zonas de poca circulación, o dicho en otras palabras aire un valor alto de permanencia de aproximadamente 600s.

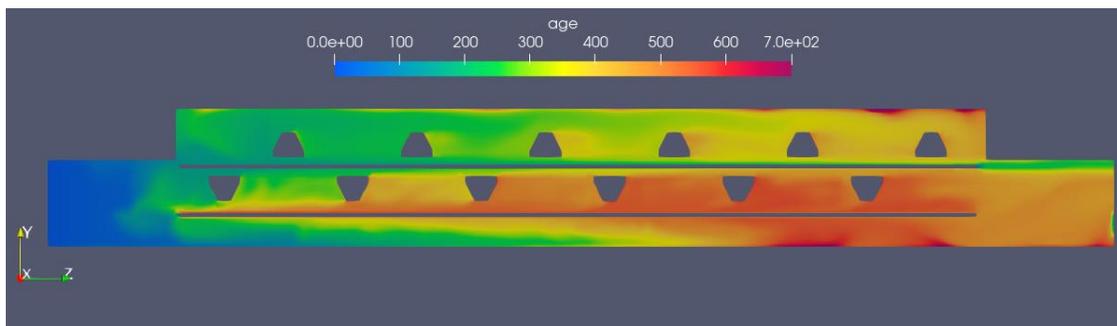


Figura 4-18: Edad del aire interior del horno a 168s

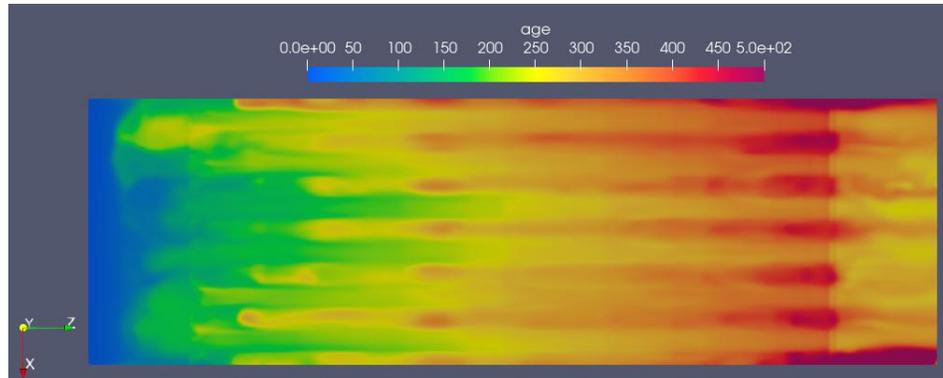


Figura 4-19: Edad del aire a 168s sobre la superficie de la banda superior

Como se puede evidenciar la permanencia del aire en las zonas próximas a la salida es mayor, lo cual refleja una baja renovación de aire limpio, lo que podría generar una carencia de aire secundario sobre los quemadores (22) generando una pérdida de eficiencia. El comportamiento del horno real los quemadores más próximos a la entrada son los que tienen mayor desgaste; ahora bien, esto puede ser debido a lo expuesto anteriormente dado que los quemadores finales están trabajando con baja presión gas y los quemadores del centro hacia la entrada están soportando toda la operación dado que no se tiene un regulador por válvula de cada quemador. En la siguiente gráfica podemos evidenciar la aparente retención de flujo al acercarse a la salida.

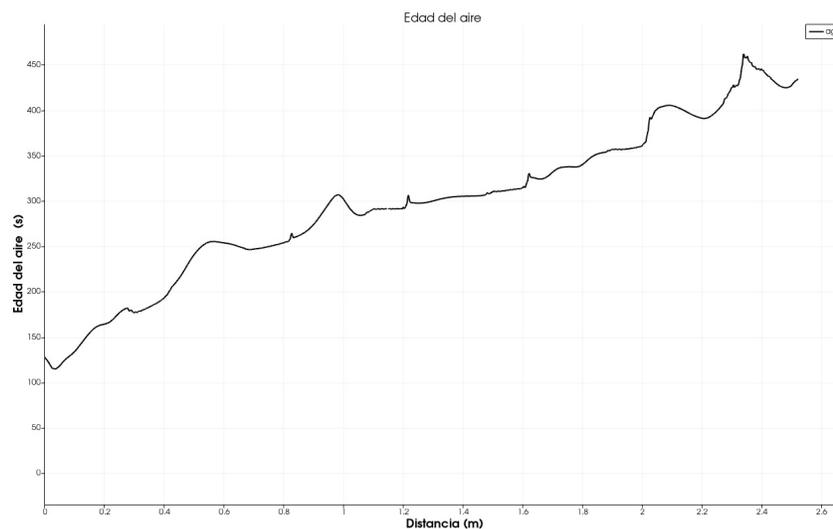


Figura 4-20: Edad del aire para una línea sobre la banda superior desde la entrada a la salida

## 4.2 Simulación con variación de temperatura

### 4.2.1 Perfiles de velocidad

Para transferencia de calor con flujo incompresible se presenta un análisis de los mismos factores anteriormente descritos como lo son velocidades en cada uno de los sensores, valores de vorticidad y edad de aire. Para lograr simular estos parámetros, partimos de un paso de tiempo de 0.0005 s logrando obtener tiempos característicos hasta el segundo 50 dado el tamaño de malla y el paso de tiempo tan reducido para lograr una convergencia en la simulación. A continuación, presentamos la velocidad en el instante  $T=48$  la cual refleja un aumento notorio de la magnitud de la velocidad con respecto a la simulación anterior, logrando valores de casi 10 veces (0.5m/s) en algunas superficies, esto debido a un aumento significativo de la temperatura en las superficies de los fogones. De hecho, Este aumento de velocidad repercute directamente en la generación de vórtices y en los valores de la edad del aire

En la simulación realizada sin tener en cuenta la variación de la temperatura generada por los quemadores, fue notoria la influencia de la banda en el movimiento del fluido a través del horno en los espacios vacíos entre placas(ver Figura 4-7), en este caso la velocidad máxima fue de 2.5 cm/s; ahora bien, durante la simulación considerando la variación de temperatura la superficie de los fogones a una temperatura promedio de 450K logró un aumento significativo en la componente obteniendo una velocidad máxima de hasta 11 cm/s especificados en el sensor 3 de la Figura 4-24. En la figura 4-21 presentamos un corte por el plano YZ medio, el cual no corta las secciones de banda colocadas en la simulación, con esto podemos detallar el flujo paralelo al eje Y sobre casi todos los fogones de la parte inferior. Por otro lado, la figura 4-22 presenta el corte en un plano paralelo al plano YZ pero cortando la sección transversal de una de la bandas, es por esto la diferencia de los perfiles y la predominancia del flujo paralelo al eje Z. Lo que se pretende demostrar en el modelo computacional es precisamente la indecencia de los fogones en la trayectoria de la arepa durante el paso por le horno, esto dicho de otra manera, cuando la banda esta llena de “arepas” fluido se comporta como en la figura 4-22 arrastrando aire caliente a través del horno; por ende se encuentre el producto sometido a una transferencia de calor radiante y otra transferencia de calor convectiva demostrable en una futura ampliación de este trabajo.

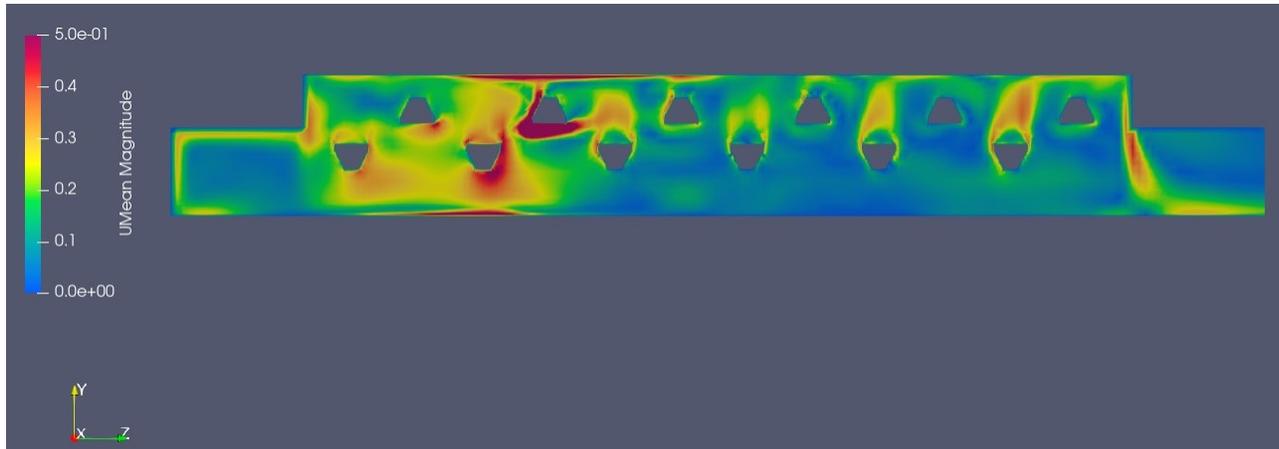


Figura 4-21: Magnitud de la velocidad en  $T=48s$  en el plano YZ central

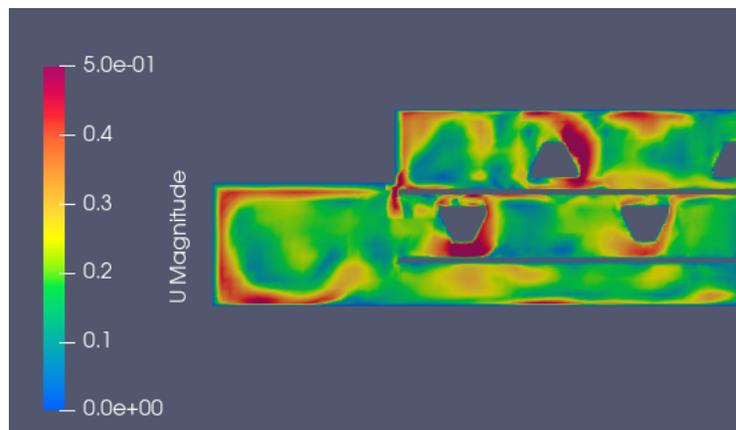


Figura 4-22: Magnitud de la velocidad en  $T=48s$  detalle alrededor de los fogones iniciales

Durante el proceso de ajuste de la simulación se había considerado una banda sin espacios con el fin de aumentar el flujo de aire en la banda, al momento de realizar la simulación se presentó inestabilidades, esto debido a la ausencia de espacios que impedían el flujo a través de banda generaba un aumento considerable de la velocidad hasta llegar a la divergencia. Por tal razón, se optó por genera una banda con ranuras las cuales permitieran el flujo como se puede evidenciar en la figura 4-21. Estas Ranuras modifican en gran medida el comportamiento de la velocidad como lo podremos ver en las figuras 4-23 y 4-24, las cuales en presencia de un quemador la componente Z de la velocidad tiene mayor predominancia sobre la componente Y de la velocidad, esto debido al movimiento de las bandas que para la simulación anterior los valores eran de no más de 4.5cm/s y para la incorporación de la temperatura la velocidad sobre los sensores 1, 2 y 3 llegan a valores de 25cm/s.

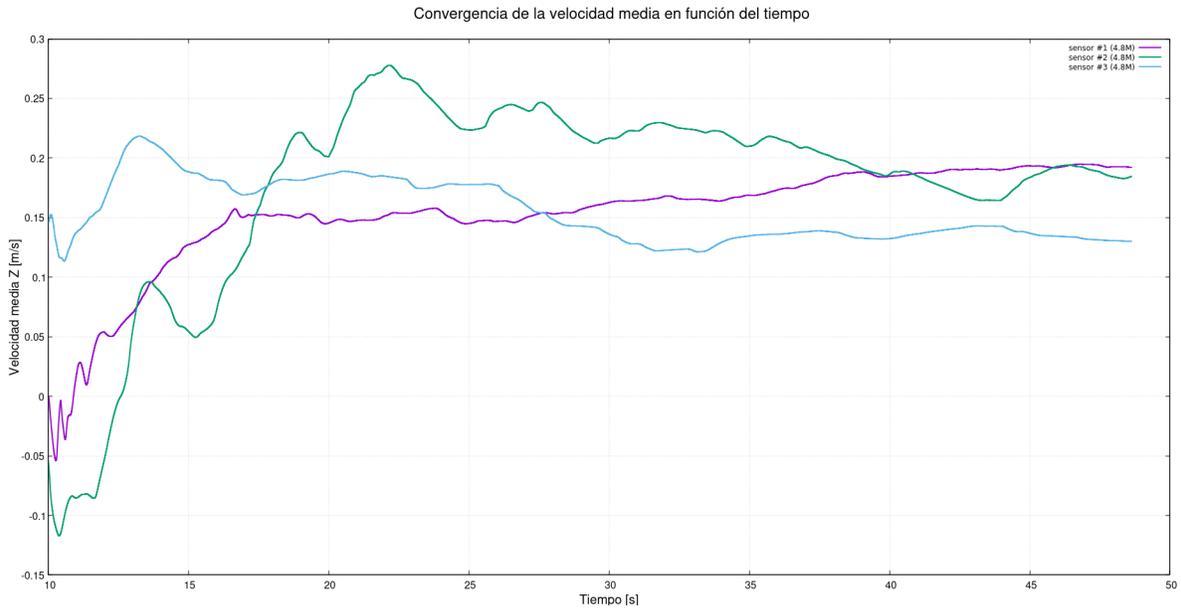


Figura 4-23: Componente de la velocidad media en Z en función del tiempo

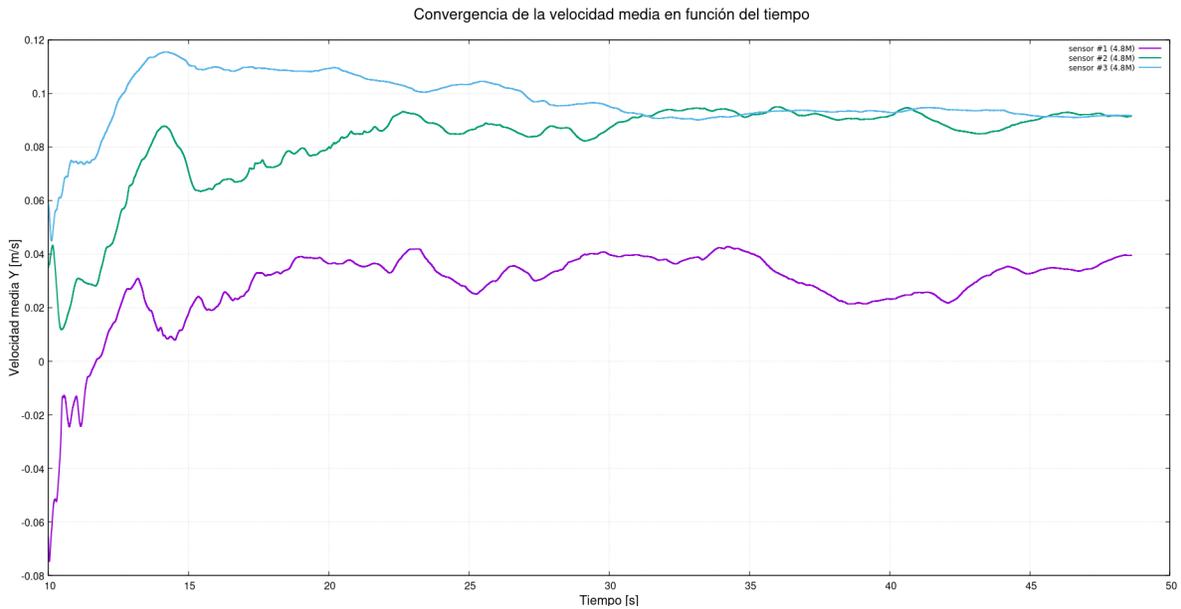


Figura 4-24: Componente de la velocidad media en Y en función del tiempo

Con el objetivo de evidenciar el aumento de la velocidad en la dirección Z se realizó la grafica de la figura 4-23, la cual muestra los 3 sensores posicionados sobre la banda superior, siendo los de mayor valor los sensores 1 y 2, donde alcanza una velocidad máxima de 27cm/s en el centro del horno en un tiempo de 22 s. Por otro lado, el sensor 3 mantiene una velocidad menor dada su cercanía a la pared final de horno, esto corrobora como se ha mencionado anteriormente la incidencia de

la temperatura en la aceleración del fluido logrando velocidades de hasta 10 veces la lograda sin variación de temperatura. En la figura 4-24 graficamos la componente Y de la velocidad media, la cual para los sensores 2 y 3 son mayores posiblemente por la ausencia de vórtices evidenciados en la figura 4-21; por el contrario, para el sensor 1 se observan mayor turbulencia lo que generaría en algunos instantes de tiempo velocidades más bajas o incluso velocidades negativas del fluido.

### 4.2.2 Análisis de temperatura

Para el análisis de temperatura partimos de una temperatura inicial de 300k al interior del horno, la única fuente de calor eran las placas de los fogones ilustrados en la figura 3-4 a una temperatura de 573K y para la carcasa del fogón una temperatura de 400k. Teniendo en cuenta esta diferencia de temperatura se lograron obtener patrones de temperatura mostrados a continuación:

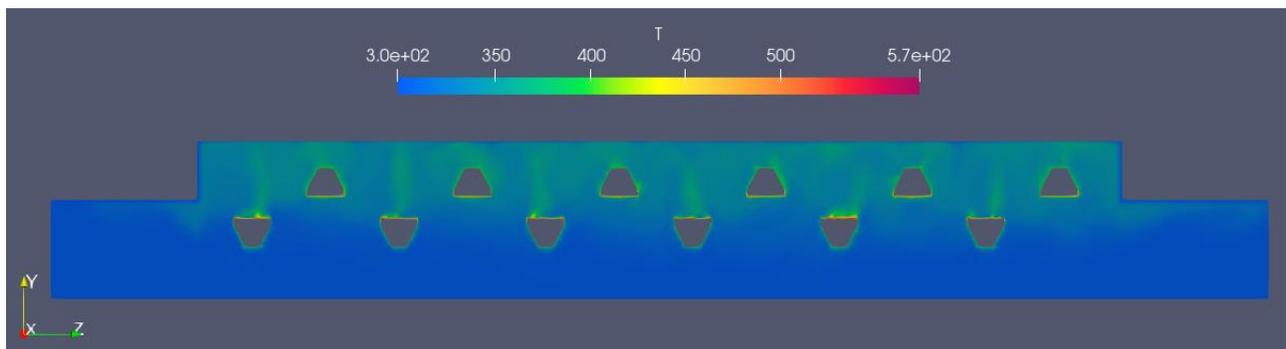


Figura 4-25: Temperatura para  $T=8s$

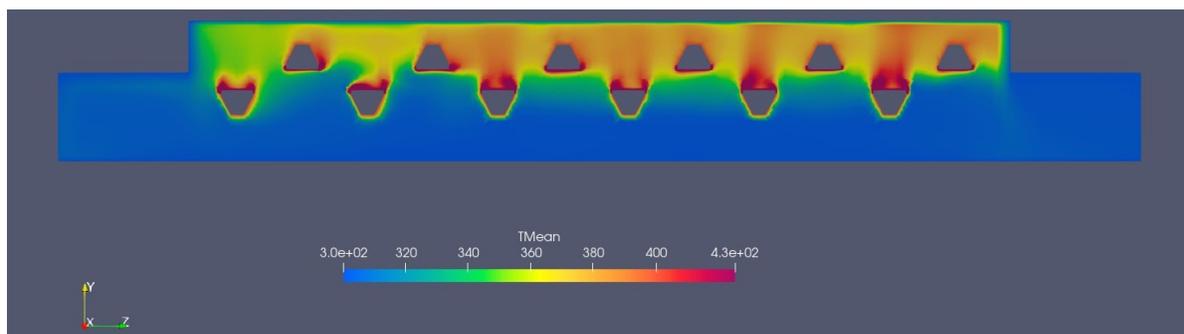


Figura 4-26: Temperatura para  $T=48s$

Como se puede observar en la figura 4-25, la temperatura en algunas zonas fuera de la superficie del horno llega a 400 k mostrando un aumento de temperatura en un corto tiempo, lo que reflejaría una posible estabilidad de temperatura en un menor tiempo. De la misma manera en la figura

4-26 la temperatura en la parte superior del horno alcanza temperaturas de alrededor 450K y una temperatura mayor media a lo largo de todo el horno. Es preciso mencionar que la acumulación de estas zonas de temperaturas elevadas está situada en la parte superior en la trayectoria de la banda N1, sin embargo, La manera como se planteó la simulación no permite reflejar la transferencia de calor de los quemadores superiores, esta fuente de calor mas que una superficie caliente es generada por un flujo de calor emitida por el fogón, en la figura 4-27 podemos observar lo planteado anteriormente.

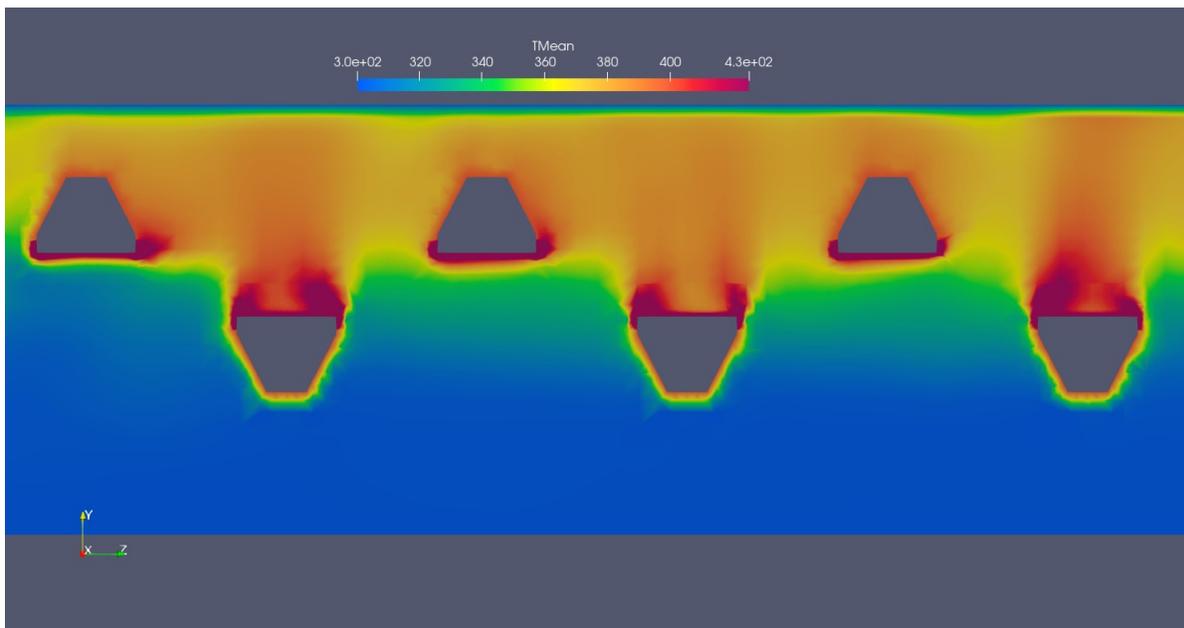


Figura 4-27: Temperatura media en T=48s

En la introducción de este trabajo de grado se expuso varios estudios en los que se analizaba la temperatura del fluido para diferentes hornos, en los cuales se obtuvieron curvas características de temperatura [19] y [20], donde se detallo una estructura en los primeros instantes de tiempo con una pendiente pronunciada llegando a una aparente convergencia de temperatura. En la figura 4-28 graficamos la temperatura para los sensores 1, 2 y 3, cuyo comportamiento deja en evidencia la similitud que tiene la temperatura del fluido en nuestro estudio en comparación con la bibliografía del mismo campo aplicado a hornos de cocción de alimentos y tratamiento de otros procesos. Se logra alcanzar temperaturas en el sensor de 360 K dado que los sensores expuestos no están sobre la superficie de los fogones, sin embargo, tenemos el sensor A posicionado sobre uno de los fogones y graficamos su comportamiento en la figura 4-29 donde podemos apreciar el crecimiento de la temperatura logrando un valor máximo de 380K.

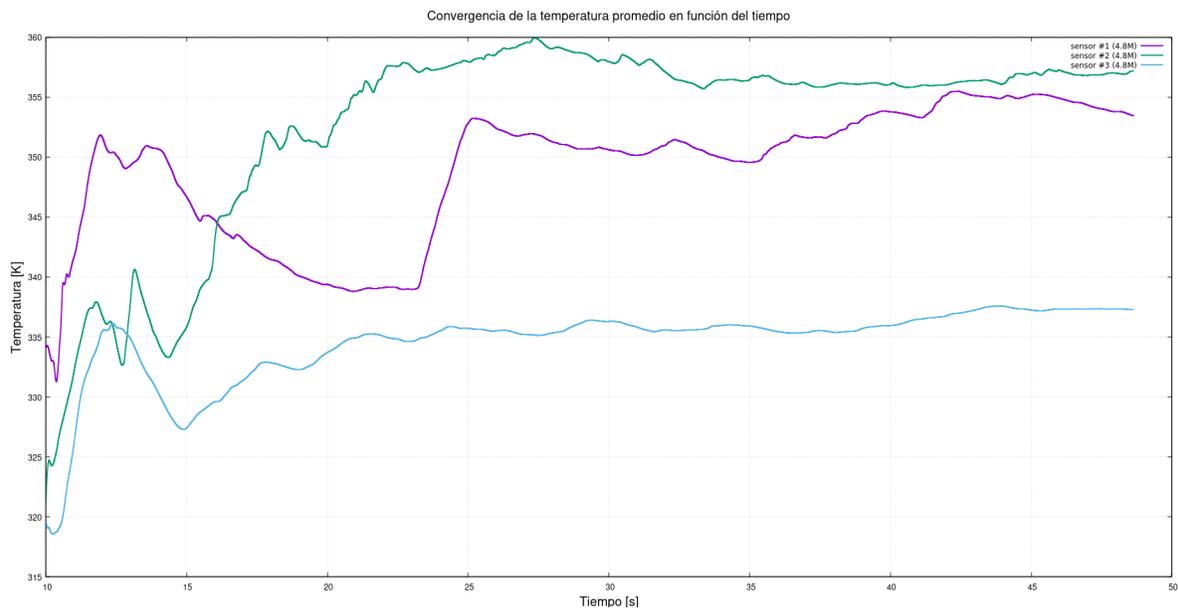


Figura 4-28: Temperatura media para los sensores 1, 2 y 3

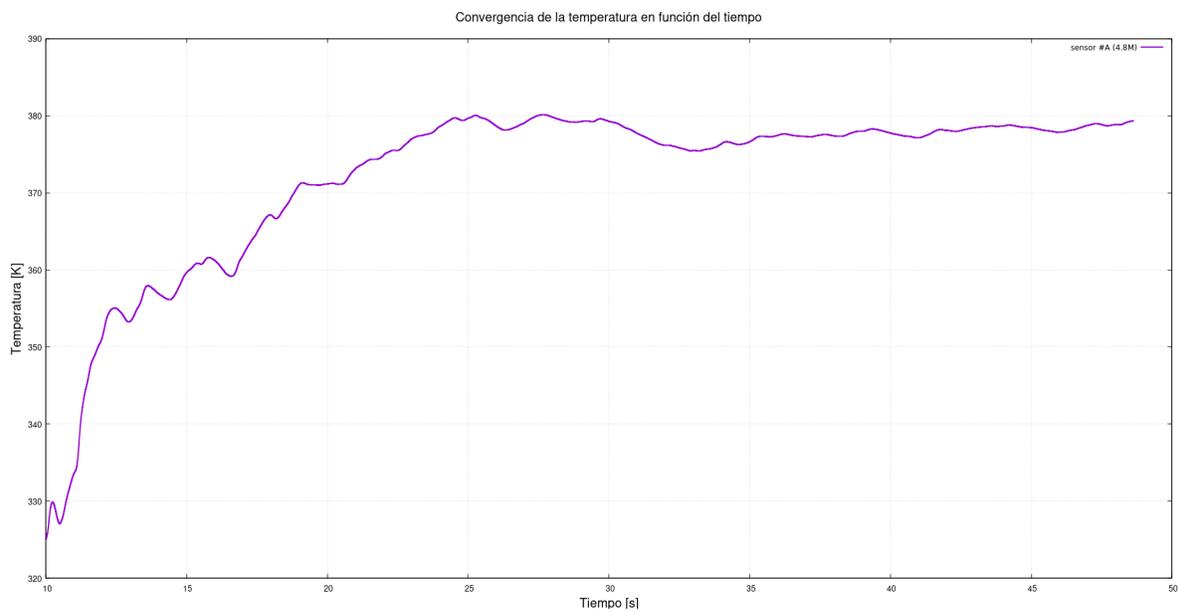


Figura 4-29: Temperatura media sensor A

Ahora bien, en la figura 4-30 se grafica la temperatura del fluido en el sensor 4 ubicado en la parte superior del horno. Como lo mencionamos anteriormente, la temperatura en la parte superior llega a valores de 390K evidenciando las zonas donde presentan mayor concentración de calor en el equipo.

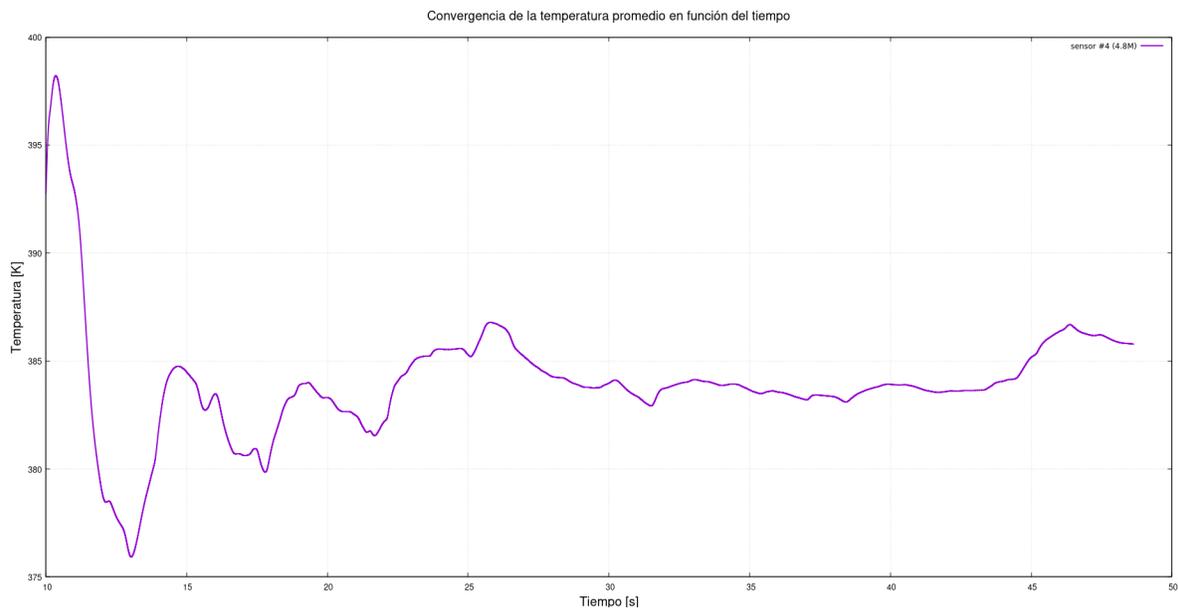


Figura 4-30: Temperatura para el sensor 4

Por el contrario, para el sensor N 5 ubicado en la parte inferior del horno la temperatura medida no tiene mayor cambio con respecto a la temperatura inicial con tan solo una variación de 2K, esto puede ser causado en primera medida por el flujo de aire arrastrado por la banda inferior y por otro lado, por el desplazamiento de aire caliente a la parte superior del horno debido por la diferencia de densidades del aire caliente.

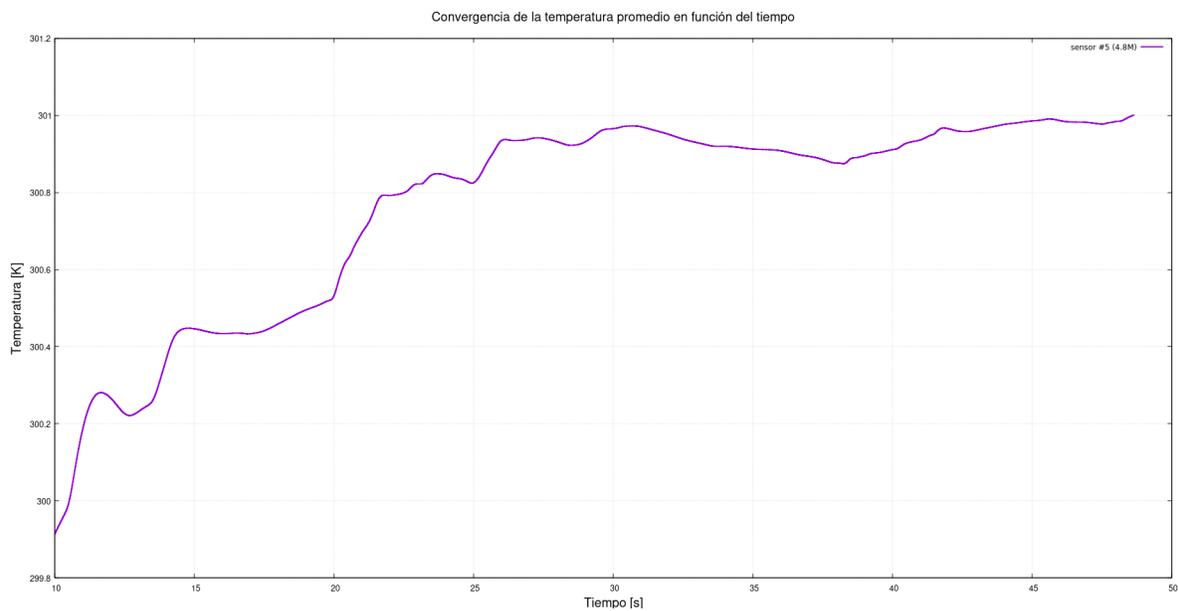


Figura 4-31: Temperatura para el sensor 5

### 4.2.3 Vorticidad

A continuación, prestamos un análisis de vorticidad y del factor Q evidenciados en el horno. En la figura 4-32 se realizó un corte paralelo al plano XY atravesando unos de los fogones lo cual reflejó la incidencia de los quemadores en la generación de vórtices, de la misma manera, se presenta la figura 4-33 donde la distancia a los vórtices sobre el eje Z se redujo a la mitad esto debido al aumento de la magnitud del vector velocidad  $\mu$  resultando un aumento en el vector de vorticidad  $\omega$  de 20 veces con respecto a la simulación sin variación de temperatura. La siguiente expresión representa matemáticamente vector vorticidad

$$\omega = \nabla \times \mu$$

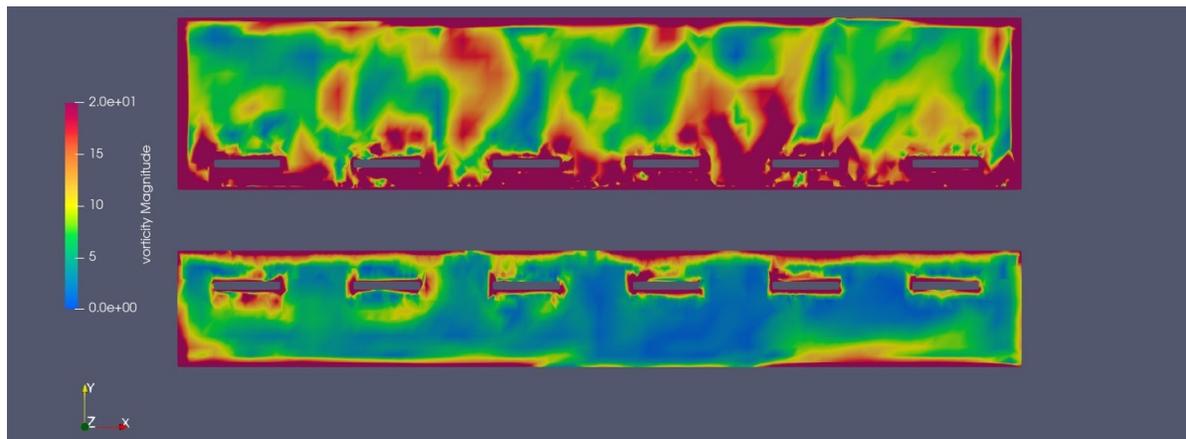


Figura 4-32: Magnitud de la vorticidad en T=48s

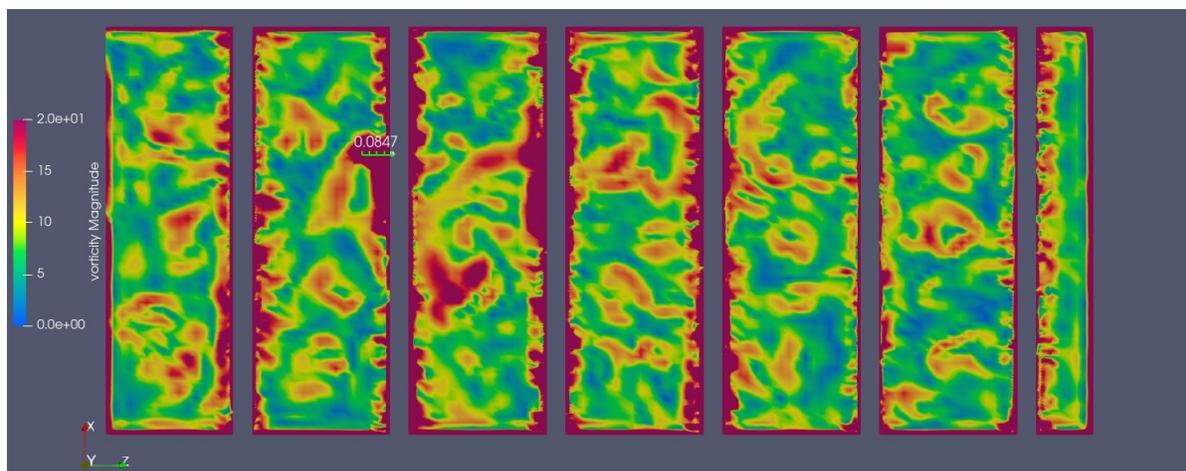


Figura 4-33: Magnitud de la vorticidad en T=48s

Otro factor que tuvo cambios significativos durante la simulación con variación de temperatura fue el criterio  $Q$ , el cual representa la segunda invariante del tensor de gradiente de velocidad, el cual es un buen indicador de estructuras de flujo turbulento. En la figura 4-34 realizamos un corte a 2 cm de la banda superior visualizando el criterio  $Q$  donde los vórtices de menor diámetro pero con más frecuencia. Por otro lado, en la figura 4-35 realizamos un corte a la altura de los fogones superiores donde se evidencian vórtices de mayor diámetro cercanos a los fogones lo que repercute en una posible concentración de energía calórica inefectiva en las zonas superiores

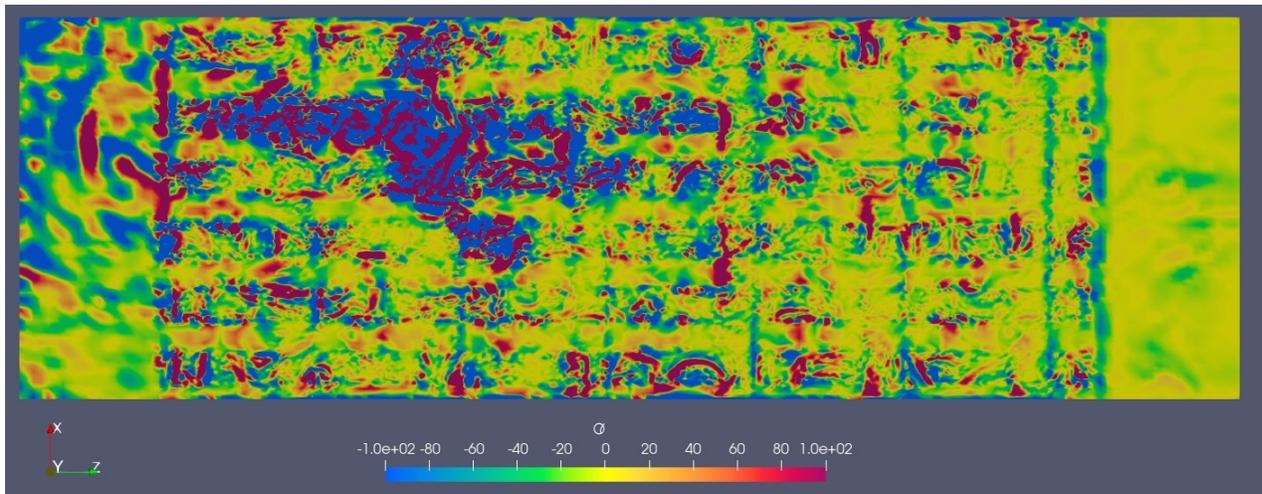


Figura 4-34: criterio  $Q$  (altura banda N1) en  $T=48s$

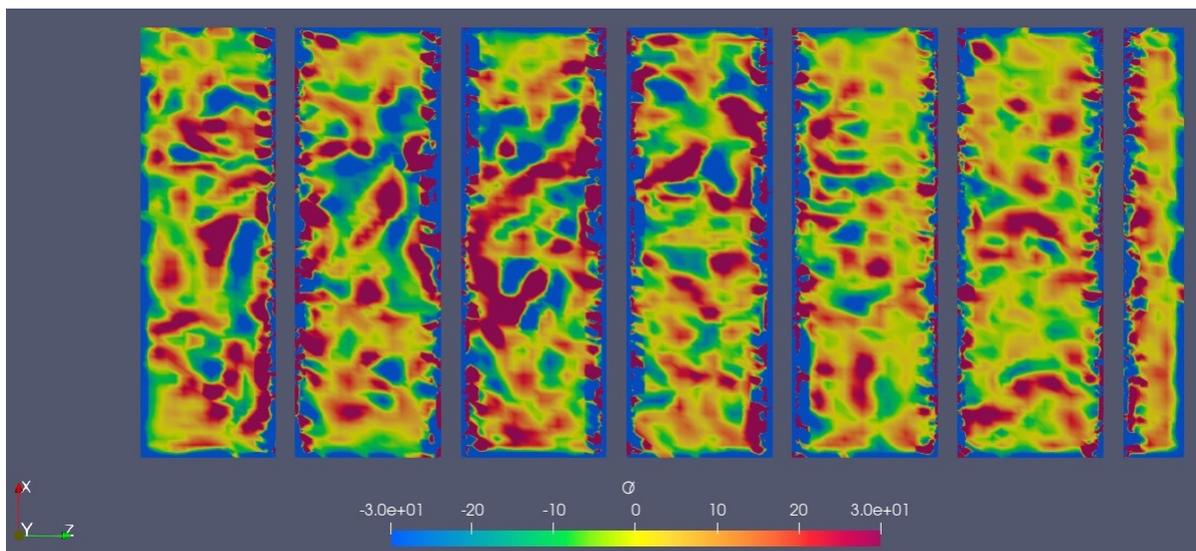
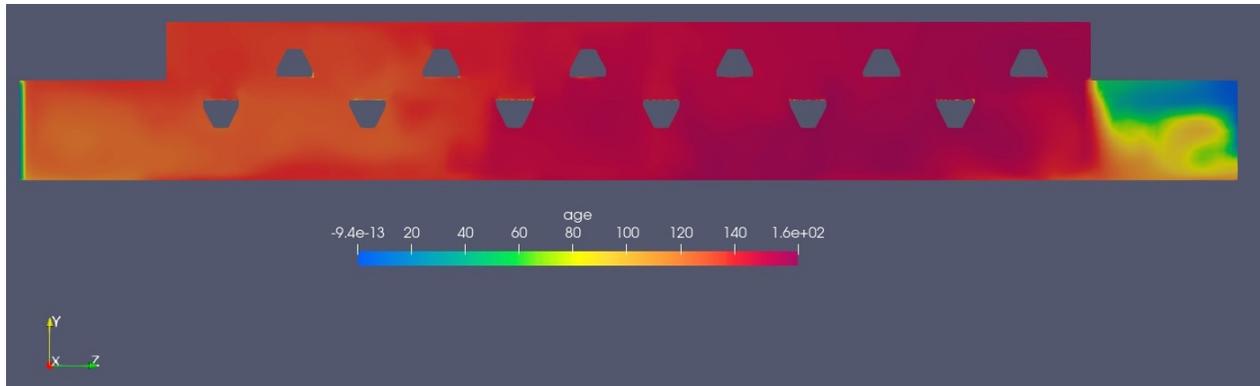


Figura 4-35: criterio  $Q$  (altura fogones) en  $T=48s$

#### 4.2.4 Edad del Aire

Durante la simulación con la temperatura constante el parámetro AGE arrojaba valores de alrededor de 500s; ahora bien, con la simulación con la temperatura variable se alcanzaron valores de 160s en su punto mas alto. Esta zona donde se presentan los valores más altos de retención de aire son las ubicadas entre las dos bandas, después de la segunda mitad del horno evidenciados en la figura 4-36. En la figura 4-37 presenta la grafica de la edad del tiempo a lo largo del horno la cual cae al llegar al final del horno producto de la frontera libre. Es probable que los valores sean bajos por la velocidad del fluido, permitiendo una mejor circulación de aire, por otro lado, es posible que los valores no hayan alcanzado un valor máximo dada la diferencia entre los tiempos finales de ambas simulaciones.



**Figura 4-36:** Edad del aire T=48s

En la figura anterior ratificamos la idea de escasez de de aire limpio para los fogones de la parte final, lo que dificulta la combustión de dichos fogones, por el contrario, los fogones iniciales los cuales manejan una mayor temperatura y posteriormente un desgaste prematuro.

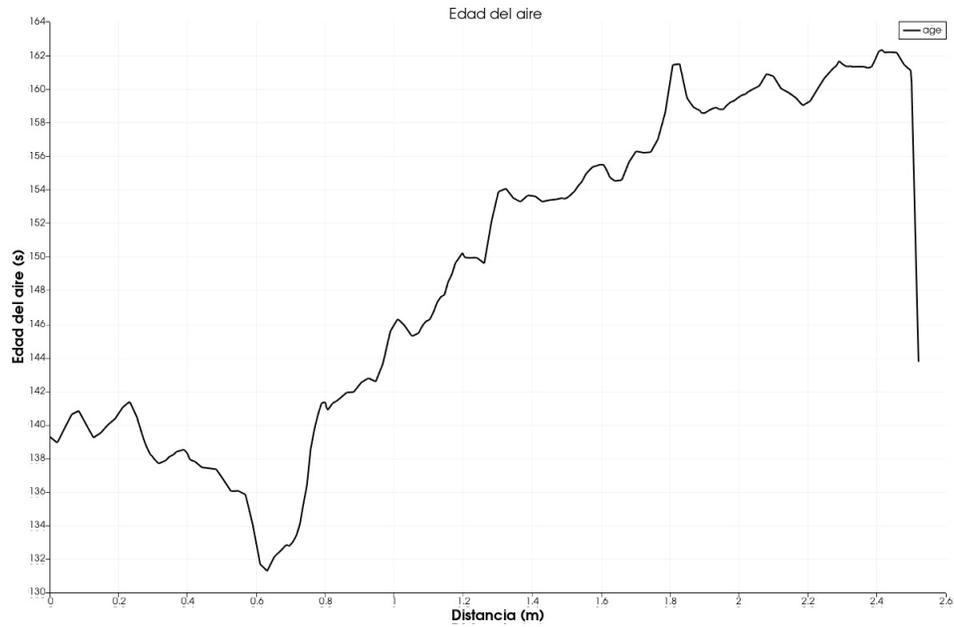


Figura 4-37: Grafica Edad del aire en función de la distancia

## 5 Conclusiones

Este proyecto dio inicio, al evidenciar el desconocimiento de este tipo hornos desde su fabricación hasta sus parámetros de operación. Como tal, partimos de la conceptualización de un modelo CAD con base en los diseños del mercado, claramente cambiando algunos componentes dado nuestro conocimiento en el proceso de fabricación de arepas, posterior a esto paralelamente a sus construcción comenzamos con el planteamiento de este trabajo de grado, con el fin de definir los comportamientos de flujo y térmicos que en la práctica desconocemos, con lo cual, se espera a partir de los hallazgos logrados conocer la incidencia de los componentes y sus parámetros como son: velocidad de la banda, área efectiva de banda, temperatura de quemadores, entradas y salidas de aire, etc.

A partir de los resultados obtenidos para el comportamiento del flujo en el interior del horno se logra concluir con base en el parámetro edad del aire que existe unas regiones del horno las cuales se presenta poca renovación de aire, poca fluidez, lo que frena la extracción natural de los gases producto de la combustión del gas natural, que como se menciono anteriormente reduce la intensidad del quemador al no tener aire secundario lo cual queda prácticamente inactivo. En contra parte, al inicio del horno se logro evidenciar un flujo contante con un valor de edad del aire bajo lo que indica que el funcionamiento de esos fogones es optimo y en algunos casos sobre-esforzado dada la presión de gas obtenida de los fogones que no funcionan, lo que puede generar la causa de uno de las problemáticas actuales en nuestra planta, lo quemadores del inicio requieren con mayor frecuencia mantenimiento con respecto a los quemadores del final.

Partiendo de las evidencias obtenidas con respecto al comportamiento de vorticidad y el flujo de calor con base al aumento de temperatura en la parte superior del horno se logra entrelazar otra posible causa de las deformaciones de las estructuras del horno con la presencia de vórtices y altas temperaturas, lo cual se cree que podría hacer una acumulación excesiva de calor en estas zonas deformando elásticamente los soportes de cada quemador ubicados a 5cm de cada uno, la cual puede concordar con la medida tomada de los centros de vorticidad del criterio Q. Esta posible acumulación de temperatura también se efectúa en las esquinas superiores, las cuales ya se cuentan con una alternativa de solución, sin haber generado ningún resultado de este estudio,

## 5. Conclusiones

---

este comportamiento ya se había evidenciado en algunos instantes de tiempo algunos productos presentaban quemaduras , al instalar una compuerta de desfogue en esto dejaba de presentarse, esto ocurre luego de 1 hora de encendido del equipo.

Es clara la necesidad de continuar realizando incorporaciones al modelo para lograr obtener un perfil de temperatura completo, al igual de la definición de los parámetros de vorticidad y edad del aire, la incorporación del producto al modelo agregando comportamientos de cambio de fase, modelos de pérdida de masa, entre otros necesarios para mejora del proceso y lograr en un futuro la automatización de la línea de producción al lograr conocer que parámetros de tiene que controlar y con que frecuencia, por lo menos en cuanto al proceso de horneado.

## Referencias Bibliográficas

- [1] OpenFOAM Guide/The PIMPLE Algorithm in OpenFOAM - OpenFOAMWiki.
- [2] M Al-Nasser, I Fayssal, and F Moukalled. Numerical simulation of bread baking in a convection oven. *Applied Thermal Engineering*, 184:116252, 2021.
- [3] N Chhanwal, D Indrani, KSMS Raghavarao, and C Anandharamakrishnan. Computational fluid dynamics modeling of bread baking process. *Food Research International*, 44(4):978–983, 2011.
- [4] Marwan Darwish and Fadl Moukalled. *The finite volume method in computational fluid dynamics: an advanced introduction with OpenFOAM® and Matlab®*. Springer, 2016.
- [5] Paul Dillon. A dual-solver cfd model for conjugate heat transfer in continuous thermal processing. *Case Studies in Thermal Engineering*, 49:103337, 2023.
- [6] Aberham Hailu Feyissa, KV Gernaey, Saranya Ashokkumar, and Jens Adler-Nissen. Modelling of coupled heat and mass transfer during a contact baking process. *Journal of food engineering*, 106(3):228–235, 2011.
- [7] Christopher J Greenshields and Henry G Weller. Notes on computational fluid dynamics: General principles. (*No Title*), 2022.
- [8] My Lan Hoang, Pieter Verboven, Josse De Baerdemaeker, and BM Nicolaï. Analysis of the air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics. *International Journal of Refrigeration*, 23(2):127–140, 2000.
- [9] Shabani Nejad Hoda, Seyyed Abdolreza Gandjalikhan Nassab, and Jahanshahi Javaran Ebrahim. Three dimensional numerical simulation of combustion and heat transfer in porous radiant burners. *international journal of thermal sciences*, 145:106024, 2019.
- [10] Uroš Kokolj, Leopold Škerget, and Jure Ravnik. A numerical model of the shortbread baking process in a forced convection oven. *Applied Thermal Engineering*, 111:1304–1311, 2017.
- [11] Yuchuan Lei and Zhenqian Chen. Numerical study of condensation heat transfer in curved triangle microchannels. *Procedia Engineering*, 205:64–70, 2017.
- [12] Yves Mansour, Olivier Rouaud, Rayan Slim, and Pierre Rahmé. Thermal characterization of a high-temperature industrial bread-baking oven: A comprehensive experimental and numerical study. *Applied Thermal Engineering*, 236:121467, 2024.
- [13] Edxon Meneses, Julian E Jaramillo, and Elisabet Mas de les Valls. Numerical analysis of the thermal and fluid dynamic behaviour of the flue gases in a traditional furnace for panela production. *Inge Cuc*, 15(1):133–141, 2019.
- [14] Arpita Mondal and AK Datta. Two-dimensional cfd modeling and simulation of crustless bread baking process. *Journal of food Engineering*, 99(2):166–174, 2010.
- [15] Michele Pinelli and Alessio Suman. Thermal and fluid dynamic analysis of an air-forced convection rotary bread-baking oven by means of an experimental and numerical approach. *Applied Thermal Engineering*, 117:330–342, 2017.

- [16] Emmanuel Purlis and Viviana O Salvadori. Bread baking as a moving boundary problem. part 2: Model validation and numerical simulation. *Journal of food engineering*, 91(3):434--442, 2009.
- [17] Ravula Sudharshan Reddy, Divyasree Arepally, and Ashis K Datta. Estimation of heat flux in bread baking by inverse problem. *Journal of Food Engineering*, 271:109774, 2020.
- [18] Paola Elizabeth Rodríguez-Ocampo, Juan Carlos Alcérreca-Huerta, Rodolfo Silva Casarín, and Edgar Mendoza. Modelo numérico cfd para el análisis termodinámico en aplicaciones de ingeniería costera.
- [19] Nantawan Therdthai, Weibiao Zhou, and Thomas Adamczak. Three-dimensional cfd modelling and simulation of the temperature profiles and airflow patterns during a continuous industrial baking process. *Journal of Food Engineering*, 65(4):599--608, 2004.
- [20] Shin-Yee Wong, Weibiao Zhou, and Jinsong Hua. Cfd modeling of an industrial continuous bread-baking process involving u-movement. *Journal of Food Engineering*, 78(3):888--896, 2007.
- [21] J Zhang, AK Datta, and S Mukherjee. Transport processes and large deformation during baking of bread. *AIChE Journal*, 51(9):2569--2580, 2005.