



**Evaluación numérica de un secador centrífugo para carbonato de calcio con alto contenido de sólidos en suspensión acuosa**

Mateo Giraldo Gaviria

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería Mecánica

Asesor

Andrés Felipe Colorado Granda, Doctor (PhD)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería Mecánica

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	Giraldo M. [1]
<b>Referencia</b>	[1] M. Giraldo Gaviria, “Evaluación numérica de un secador centrífugo para carbonato de calcio con alto contenido de sólidos en suspensión acuosa”, Tesis de maestría, Maestría en Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.
Estilo IEEE (2020)	



Maestría en Ingeniería Mecánica, Línea de Énfasis – Energética.

Grupo de Investigación Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía (GASURE).



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

**Evaluación numérica de un secador centrífugo para carbonato de calcio  
con alto contenido de sólidos en suspensión acuosa**

**Trabajo realizado por:**

**I.Q. MATEO GIRALDO GAVIRIA**

Presentado para optar al título de Magíster en Ingeniería Mecánica, Énfasis en  
Energía

**Dirigido por:**

**ANDRÉS FELIPE COLORADO GRANDA**

M. Sc. Ph. D. Ingeniería Mecánica y Aeroespacial

Profesor de planta de la Universidad de Antioquia

Investigador del grupo GASURE

**Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Noviembre 2021**



**GASURE**  
Grupo de Ciencia y Tecnología del  
Gas y Uso Racional de la Energía

# **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres por su apoyo incondicional durante toda mi vida.

A mis amigos por su apoyo y animo durante todo este proceso, especialmente a mis grandes amigos Cristian Mejia y Giovanni Rojas, por sus valiosas recomendaciones.

Al profesor Andrés Felipe Colorado, quien fue el director del presente trabajo de investigación y su acompañamiento constante en mi proceso de formación como magister. Al profesor Andres Amell Arrieta, director del grupo GASURE por sus importantes sugerencias y permitirme desarrollar este trabajo de investigación en el grupo.

A Omya Andina S.A.S, por permitirme desarrollar este trabajo de investigación a partir de la información técnica de unos de sus procesos productivos.

A la Universidad de Antioquia y en especial al Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía (GASURE) por todo el apoyo a nivel económico, ya que se me permitió realizar las simulaciones en sus equipos computacionales.

## RESUMEN

En este trabajo de investigación se evaluó de forma numérica un secador centrífugo para carbonato de calcio, con un tamaño de partícula entre 1 a 2  $\mu\text{m}$ , en suspensión acuosa con alto contenido de sólidos, igual al 75%, en donde el análisis considero la combustión del gas natural (trabajando con 702 kW de potencia con base al PCI) con aire, el calentamiento de aire en exceso y gases de combustión, la generación de chorro térmico y el proceso de secado como tal. Para este sistema se evaluó el efecto que tiene cambios en la geometría en la fluidodinámica del sistema o en el sistema de combustión, así como en la eficiencia global del mismo; adicionalmente se buscó comprender la forma en que se desarrolla el secado de partículas, en el que se encuentra involucrado un sistema multifásica, gas – líquido – partículas. Las simulaciones numéricas se desarrollaron en el Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso racional de la energía (GASURE) de la universidad de Antioquia. La validación de resultados se realizó mediante comparación directa con mediciones realizadas al equipo real, el cual pertenece a una línea productiva de carbonato de calcio de Omya Andina S.A.S.

Para el desarrollo numérico de este trabajo de investigación, se realizaron simulaciones CFD mediante el software ANSYS – Fluent, con en el cual se evaluaron los diferentes perfiles (Temperatura, presión, velocidad, especies) para las diferentes configuraciones planteadas. Los modelos utilizados para la estimación de la turbulencia, interacción cinética química - turbulencia y radiación fueron los modelos k- $\epsilon$  realizable, *Eddy Dissipation* y ordenadas discretas respectivamente. Se empleó un mecanismo de reacción de 2 pasos para el metano con el que se obtiene información de la emisión de monóxido de carbono (CO) en el proceso, Adicionalmente a partir de post-procesamiento básico de la información generada se obtiene una aproximación de la emisión de NOx. Esta modelación numérica se realizó utilizando la tecnología de mallado “Mosaic” de Ansys, en la cual se prioriza el uso del Poli-Hexacore [4], mediante el uso de esta metodología se evidencia una reducción de un 45.8% de elementos y una simulación 66% más rápida frente a mallado estructurado convencional.

El trabajo se dividió en tres secciones principales de interés. La primera corresponde con el análisis de cámara de combustión y quemador, para el cual se encuentra que mediante una modificación en la fluidodinámica del sistema se puede obtener un ahorro energético de 19 Ton de gas natural al año lo que es equivalente a un ahorro de 23 Millones COP y una reducción de 52 Ton de CO<sub>2</sub> Equivalente. Para la segunda sección fue de interés el análisis de la zona del manifold, que corresponde con la generación del chorro térmico y para la cual se evidencias errores considerables de concepción, pues el diseño del mismo está ocasionando puntos de concentración con considerables perdidas energéticas que van desde 75 hasta 97 kW. Finalmente, para la tercera sección que considera la zona de secado, es posible evidenciar la interacción del flujo multifásico, así como concluir que el tiempo de residencia y la presión de las diferentes fronteras del sistema juegan un papel fundamental en la operación del mismo.

De forma general se consiguen resultados altamente ajustados al sistema real, márgenes de error menores al 5%, y se logra evidenciar que cambios positivos en la fluidodinámica de este tipo de sistemas, pueden llevar a aumentos entre un 2 a 4% de la eficiencia global del sistema con base al consumo de gas natural.

**Palabras clave:** secador centrífugo, carbonato de calcio, fluidodinámica, eficiencia energética, CFD, Fluent, Mosaic, Poli – Hexacore.

## ABSTRACT

In this research work, a centrifugal dryer for calcium carbonate was numerically evaluated, with a particle size distribution between 1 to 2  $\mu\text{m}$ , in aqueous suspension with high solids content, equal to 75%. The analysis considered combustion of natural gas (working with 702 kW of power based on the LHV) with air, the heating of excess air and combustion gases, the generation of thermal jet and the drying process. For this system, the effect on the fluid dynamics and overall efficiency was evaluated due to changes in the geometry of the equipment. In addition, it was sought to understand the way in which the drying of particles takes place, in the multiphase system of interest (gas - liquid - particles). The numerical simulations were developed in the Group of Science and Technology of Gas and Rational Use of Energy (GASURE) of the University of Antioquia. The validation of the results was carried out by direct comparison with measurements made to the real equipment, which belongs to a production line of calcium carbonate of Omya Andina S.A.S.

For the numerical development of this research work, CFD simulations were carried out using ANSYS-Fluent software, where different profiles (Temperature, pressure, speed, species) were evaluated for the different configurations proposed. The models used to estimate turbulence, interaction between chemical kinetic and turbulence, and radiation were the k- $\epsilon$  realizable, Eddy Dissipation and discrete ordinate models respectively. A 2-step reaction mechanism was used for methane with which information on the emission of carbon monoxide (CO) in the process is obtained. In addition, from the basic post-processing of the information generated, an approximation of the NO<sub>x</sub> emission was done. This numerical modeling was carried out using Ansys's "Mosaic" meshing technology, in which the use of Poli-Hexacore [4] is prioritized. Through the use of this methodology, a reduction of 45.8% of elements is obtained and a simulation 66% faster compared to conventional structured meshing.

This research work was divided in three main sections of interest. The first one corresponds to the analysis of the combustion chamber and burner, for which it is found that by modifying the fluid dynamics of the system, an energy saving of 19 Tons of natural gas per year can be obtained, which is equivalent to a saving of 23 Million COP (Colombian pesos) and a reduction of 52 Ton of CO<sub>2</sub> Equivalent. For the second section, was made the analysis of the manifold zone, which corresponds to the generation of the thermal jet and for which considerable design errors are evident, since its design is causing concentration points with considerable energy losses between 75 to 97 kW. Finally, for the third section that considers the drying zone, it is possible to show the interaction of the multiphase flow, as well as to conclude that the residence time and outlet pressure play a fundamental role in its operation.

In general, results highly adjusted to the real system are achieved, error margins less than 5%, and it is possible to show that positive changes in the fluid dynamics of this type of systems can lead to increases global efficiency in a 2 until 4%.

**Keywords:** centrifugal dryer, calcium carbonate, fluid dynamics, energy efficiency, CFD, Fluent, Mosaic, Poli - Hexacore.

# Contenido

AGRADECIMIENTOS .....	4
RESUMEN.....	5
ABSTRACT .....	6
1. INTRODUCCIÓN .....	12
2. OBJETIVOS .....	14
2.1. Objetivo general .....	14
2.2. Objetivos específicos.....	14
3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE .....	14
3.1. Generalidades del carbonato de calcio .....	14
3.2. Procesos industriales de secado de sólidos.....	15
3.3. Dinámica de fluidos computacional (CFD) aplicada al proceso de secado de solidos .....	17
3.4. Tecnología de mallado “Mosaic” .....	24
4. Metodología .....	25
4.1. Información de proceso secador real.....	25
4.2. Gases de ensayo .....	27
4.3. Variables de entrada y variables respuesta.....	28
4.4. Metodología numérica.....	28
4.4.1. Simplificaciones a geometría y proceso .....	29
4.4.2. Información específica de mallado e independencia de mallado .....	33
4.4.3. Modelos utilizados .....	37
4.4.4. Criterios de Convergencia.....	39
4.4.5. Estimación de NO <sub>x</sub> .....	40
5. RESULTADOS .....	40
5.1. Resultados numéricos para la cámara de combustión y quemador .....	40
5.1.1. Análisis de resultados sobre perfiles obtenidos y planteamiento de modificaciones .....	40
5.1.2. Efecto de la radiación en la cámara de combustión .....	43
5.1.3. Evaluación numérica de la modificación a la cámara de combustión, comparativa de eficiencia y su potencial efecto sobre el sistema de secado real .....	44
5.1.4. Comparativa de producción de NO <sub>x</sub> mediante análisis de post procesamiento vs mediciones realizas .....	47
5.2. Resultados numéricos para el manifold.....	48
5.2.1. Análisis de resultados sobre perfiles obtenidos y planteamiento de propuesta de modificación.....	48
5.2.2. Efecto de la radiación en el manifold .....	50

5.2.3.	Validación de los resultados obtenidos de manera numérica mediante la comparación de temperatura de proceso medidas y los resultados numéricos .....	51
5.2.4.	Evaluación numérica de las diferentes combinaciones de modificación planteadas y su efecto sobre el sistema de secado .....	52
5.2.5.	Análisis de la eficiencia de secado para este tipo de sistema. ....	54
5.2.6.	Comparativa de resultados para el manifold, mediante mallado convencional vs mallado con tecnología “Mosaic” .....	56
5.3.	Resultados Numéricos para zona de secado.....	58
5.3.1.	Análisis de resultados sobre perfiles obtenidos.....	58
5.3.2.	Validación de los resultados obtenidos de manera numérica mediante la comparación con parámetros medidos.....	61
6.	CONCLUSIONES .....	62
7.	BIBLIOGRAFIA.....	65

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Thermal Jet Dryer [10] .....	16
<b>Figura 2.</b> Ilustración de la interacción partícula – partícula y sus velocidades [42]. .....	22
<b>Figura 3.</b> Metodología de solución DEM [43]. .....	22
<b>Figura 4.</b> Comparativo costo computacional para modelos de flujo multifase [44]. .....	23
<b>Figura 5.</b> Ejemplo de mallado con tecnología Mosaic [49]. .....	24
<b>Figura 6.</b> Comparativa de mallado con tecnología Mosaic vs mallado convencional [49]. .....	25
<b>Figura 7.</b> Isométrico de geometría real de Secador (Manifold + Zona de secado) .....	26
<b>Figura 8.</b> Isométrico quemador .....	26
<b>Figura 9.</b> Isométrico cámara de combustión + Manifold .....	26
<b>Figura 10.</b> Diagrama de procesos simplificado.....	27
<b>Figura 11.</b> Cámara de combustión + quemador simplificado (En ranuras).....	30
<b>Figura 12.</b> Manifold Simplificado.....	30
<b>Figura 13.</b> Esquema cámara de combustión + quemador.....	31
<b>Figura 14.</b> Modificación realizada a la cámara de combustión.....	31
<b>Figura 15.</b> Esquema Manifold.....	32
<b>Figura 16.</b> Esquema Manifold modificado.....	32
<b>Figura 17.</b> Esquema Zona de secado.....	33
<b>Figura 18.</b> (a) Perfil de temperatura, (b) Perfil de velocidades para la cámara de combustión.....	34
<b>Figura 19.</b> (a) Perfil de temperatura, (b) Perfil de velocidades para el Manifold.....	35
<b>Figura 20.</b> Distribución de líneas sobre las cuales se evaluó la independencia de mallado para la zona de secado.....	37
<b>Figura 21.</b> (a) Perfil de temperatura, (b) Perfil de velocidades, para la zona de secado .....	37
<b>Figura 22.</b> Líneas de corriente para velocidad, en cámara de combustión.....	41
<b>Figura 23.</b> Perfil de presión en Pascales (Pa) en cámara de combustión .....	41
<b>Figura 24.</b> Perfil de fracción CH <sub>4</sub> en cámara de combustión .....	42
<b>Figura 25.</b> Perfil de fracción O <sub>2</sub> en cámara de combustión.....	42
<b>Figura 26.</b> Perfil de temperatura en cámara de combustión .....	43
<b>Figura 27.</b> Perfil de temperatura a lo largo de la cámara de combustión con radiación vs sin radiación.....	43
<b>Figura 28.</b> Líneas de corriente para velocidad. (a) cámara de combustión original, (b) cámara de combustión modificada .....	44
<b>Figura 29.</b> Perfil de presión. (a) cámara de combustión original, (b) cámara de combustión modificada.....	45
<b>Figura 30.</b> Perfil de fracción CH <sub>4</sub> en cámara de combustión modificada .....	45
<b>Figura 31.</b> Perfil de fracción O <sub>2</sub> en cámara de combustión modificada.....	46
<b>Figura 32.</b> Perfil de temperatura. (a) cámara de combustión original, (b) cámara de combustión modificada.....	46
<b>Figura 33.</b> Temperatura y disponibilidad energética para la cámara de combustión original y modificada.....	47
<b>Figura 34.</b> Ppm NO <sub>x</sub> (composición másica), determinados en la chimenea del secador.....	48
<b>Figura 35.</b> Líneas de corriente para velocidad, en Manifold.....	49
<b>Figura 36.</b> Distribución de flujo másico por cada boquilla del Manifold .....	49
<b>Figura 37.</b> Perfil de presión (Pa) para el Manifold.....	50

<b>Figura 38.</b> Perfil de temperatura en Manifold .....	50
<b>Figura 39.</b> Perfil de temperatura a lo largo del Manifold con radiación vs sin radiación. ....	51
<b>Figura 40.</b> Ubicación termocuplas para el sistema real.....	51
<b>Figura 41.</b> Comparativa de resultados Termocupla 3 y 4 vs resultado simulación CFD .....	52
<b>Figura 42.</b> Líneas de contorno de velocidad. (a)Cámara de combustión original + Manifold Original, (b) Cámara de combustión original + Manifold Modificado, (c) Cámara de combustión modificada + Manifold Original, (d) Cámara de combustión modificada + Manifold modificado..	52
<b>Figura 43.</b> Flujo másico por cada boquilla para cada configuración.....	53
<b>Figura 44.</b> Perfil de presión. (a)Cámara de combustión original + Manifold Original, (b) Cámara de combustión original + Manifold Modificado, (c) Cámara de combustión modificada + Manifold Original, (d) Cámara de combustión modificada + Manifold modificado .....	53
<b>Figura 45.</b> Perfil de temperatura. (a)Cámara de combustión original + Manifold Original, (b) Cámara de combustión original + Manifold Modificado, (c) Cámara de combustión modificada + Manifold Original, (d) Cámara de combustión modificada + Manifold modificado .....	54
<b>Figura 46.</b> Eficiencias térmicas para cada una de las combinaciones evaluadas con base a la ecuación 1.....	55
<b>Figura 47.</b> Comparativo entre temperatura (K), Velocidad (m/s) para mallado con Mosaic vs Estructurado. ....	56
<b>Figura 48.</b> Líneas de contorno para la velocidad (m/s). (a) Mallado con Mosaic, (b) mallado estructurado. ....	57
<b>Figura 49.</b> Perfil de temperatura (°C). (a) Mallado con Mosaic, (b) mallado estructurado. ....	57
<b>Figura 50.</b> Relación cantidad de elementos – Calidad de mallado (Aspect Ratio). Estructurado vs Mosaic .....	57
<b>Figura 51.</b> Contorno de temperatura (°C) en la zona de secado.....	58
<b>Figura 52.</b> Contorno de fracción másica de agua líquida en la zona de secado .....	59
<b>Figura 53.</b> Contorno de presión (Pa) en la zona de secado .....	60
<b>Figura 54.</b> Tracking de partículas (kg/s) en la zona de secado.....	60
<b>Figura 55.</b> Tiempo de residencia medio (s) en la zona de secado.....	61
<b>Figura 56.</b> Comparativa % humedad de producto real vs simulada.....	61
<b>Figura 57.</b> Comparativa Temperatura a la salida del secador, medida vs simulada.....	62

## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Tecnologías de secado convencional para minerales [6]</i> .....	15
<i>Tabla 2. Eficiencias típicas de algunas tecnologías de secado</i> .....	17
<i>Tabla 3. Información corrientes diagrama simplificado de proceso</i> .....	27
<i>Tabla 4. Condiciones generales de operación</i> .....	27
<i>Tabla 5. Información de corrientes para el proceso de secado</i> .....	28
<i>Tabla 6. Simulaciones realizadas durante el desarrollo de este trabajo de investigación</i> .....	29
<i>Tabla 7. Propiedades térmicas de la manta aislante utilizada</i> .....	33
<i>Tabla 8. Calidad y # elementos mallas realizadas en cámara de combustión</i> .....	34
<i>Tabla 9. Calidad y # elementos malla realizada en cámara de combustión modificada</i> .....	35
<i>Tabla 10. Calidad y # elementos mallas realizadas en Manifold</i> .....	35
<i>Tabla 11. Calidad y # elementos malla realizada en Manifold modificado</i> .....	36
<i>Tabla 12. Calidad y # elementos malla realizada en Manifold modificado – Malla estructurada</i> ..	36
<i>Tabla 13. Calidad y # elementos mallas realizadas en Manifold</i> .....	36
<i>Tabla 14. Mecanismo de reacción implementado en las simulaciones.</i> .....	38
<i>Tabla 15. Paso a paso seguido para convergencia de simulaciones</i> .....	38
<i>Tabla 16. Paso a paso seguido para convergencia de simulaciones en la zona de secado</i> .....	39
<i>Tabla 17. Residuales para cada una de las simulaciones realizadas (Ver tabla 6)</i> .....	39
<i>Tabla 18. % de error para los balances de masa y energía para cada una de las simulaciones realizadas (Ver tabla 6)</i> .....	40
<i>Tabla 19. Estimación NOx para simulaciones en cámara de combustión</i> .....	47
<i>Tabla 20. Medición isocinética de NOx en la chimenea del secador</i> .....	48
<i>Tabla 21. Temperaturas (°C) en la salida de cada boquilla para las diferentes combinaciones</i> .....	54
<i>Tabla 22. Potencia disponible (kW) en la salida de cada boquilla para las diferentes combinaciones</i> .....	55
<i>Tabla 23. Potencia perdida (kW) debida al paso por el Manifold</i> .....	56
<i>Tabla 24. Comparativa Mallado estructurado vs Mosaic</i> .....	57

# 1. INTRODUCCIÓN

El carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) es un mineral no metálico, proveniente de la piedra caliza y el cual es de alta importancia a nivel industrial, pues desempeña un papel preponderante en diferentes industrias como la química, alimenticia, petrolera, siderúrgica, agrícola, etc.; Este se utiliza en la producción de fertilizantes, así como en la elaboración de jabones, detergentes, dentífricos, pintura y papel. En la agricultura, el carbonato se emplea en la aplicación directa a los suelos, y en la formulación de piensos para la alimentación animal [3]. En el sector plástico el carbonato se utiliza en los materiales de empaque y materiales compuestos (tubería de PVC, material protector de cables eléctricos, etc.), en el sector farmacéutico, en el sector construcción, en la producción de materiales como el cemento, morteros, estucos, masillas, etc. Dada su condición de materia prima polifuncional es de interés el estudio de procesos productivos asociados a su producción, pues es un material de elevados volúmenes de producción, por ejemplo, para el 2016 se estimó un consumo mundial de 110 Mton [1]. La participación del sector colombiano se estimó en una explotación de 12,8 Mton de caliza para ese mismo año [2].

Omya Andina S.A.S es una empresa del sector minero – químico que cuenta con una amplia participación en el mercado colombiano y latinoamericano y que basa su producción en la extracción de piedra caliza y su procesamiento a carbonato de calcio. En una de sus líneas de producción se encuentra un proceso, en el cual una suspensión de carbonato de calcio en agua con un alto porcentaje de sólidos (cercano al 75% en masa), es pasada a través de un secador centrífugo o de chorro térmico, con el fin de obtener un producto de partículas sólidas de tamaño medio entre 1 a 2  $\mu\text{m}$  y con un contenido de humedad inferior al 0.2%. Este secador funciona a partir de un sistema de combustión de gas natural con aire no premezclado y que permite alcanzar temperaturas cercanas a 700°C de los gases de combustión mezclados con aire, lo cual es puesto en contacto directo con el material atomizado a secar (Suspensión de carbonato de calcio), ocurriendo así el proceso térmico de secado en continuo de aproximadamente 2 toneladas por hora de material seco. El funcionamiento de este proceso es medianamente empírico, pues se desconoce la distribución de flujos de gases calientes, las caídas de presión, y en general las características aerodinámicas internas del sistema. Es importante destacar que a nivel mundial procesos de secado aplicados al carbonato de calcio son comunes, pues muchos de los procesos de beneficiamiento del material como el incremento de pureza o mejora en características específicas, se realizan vía húmeda por lo que posterior a estos procesos es requerido el secado del material.

Con lo anterior en mente y considerando que el carbonato de calcio es clasificado como un producto commodity, los cuales son materiales producidos en altos volúmenes a bajos costos, y para el cual su estructura de costos busca llevar al mínimo los costos variables de producción, que permitan una competitividad en el mercado y esto sumado a que durante los últimos años el sector industrial busca desarrollar procesos productivos más eficientes y con menor impacto ambiental, que conlleven a una reducción de gases efecto invernadero y emisiones contaminantes. Dadas las condiciones actuales de nuestro entorno es necesario implementar procesos sostenibles, teniendo en cuenta el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el desarrollo social. Así pues, este trabajo busca desarrollar propuestas de mejora de un secador centrífugo para carbonato de calcio con alto contenido de sólidos en suspensión acuosa a partir de su evaluación numérica utilizando simulación de dinámica de fluidos computacional CFD (Computational Fluid Dynamics) mediante el Software Ansys

FLUENT, esto mediante la tecnología de mallado “Mosaic” la cual contiene una topología de malla dominante hexaédrica y es de gran utilidad para facilitar el mallado y convergencia de geometrías complejas [4], pues esto permitirá evaluar opciones de modificación sin cambios estructurales en el equipo. El proyecto busca el aumento en la eficiencia energética de la cámara de combustión del secador y una reducción en emisiones de gases de efecto invernadero (Determinado mediante  $\text{CO}_2$  equivalente), así como el entendimiento de la transferencia de calor entre el aire caliente cuando entra en contacto directo con los sólidos en suspensión. Este trabajo se desarrollará en compañía del Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía (GASURE) perteneciente a la Universidad de Antioquia. Para el desarrollo del problema de interés se plantean las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Es posible mejorar las condiciones de operación del sistema de combustión y secado que conduzcan a tener un proceso más eficiente energéticamente, disminuyendo el consumo de combustible, con menor tasa de producción de  $\text{CO}_2$  y con menores costos de operación a partir de la evaluación numérica del proceso de secado?
- ¿Cuál es la participación de los diferentes modos de transferencia de calor conducción, convección y radiación en el proceso de secado?
- ¿Qué variaciones de la geometría del cuerpo del secador, cámara de combustión y cuerpo del quemador, afectan la eficiencia energética del sistema?
- ¿Cómo ocurre el proceso simultáneo de transferencia de calor y masa que hacen posible el proceso térmico de secado del carbonato de calcio en suspensión acuosa a partir del aire caliente de secado y que variables tienen el mayor efecto en el desempeño térmico y ambiental de este proceso?

Con este trabajo se busca mostrar formas consistentes y adecuadas de realizar optimizaciones a procesos industriales, así como evidenciar como la geometría y por lo tanto fluidodinámica afecta potencialmente las eficiencias del sistema y evidenciar, y/o profundizar, el comportamiento que se tiene un proceso multifásico (Mezcla líquido – gas – partículas) con las características ya definidas. De forma específica se busca que el trabajo aquí desarrollado consiga los siguientes impactos:

- Se espera que los resultados numéricos encontrados sean utilizados en la mejora de procesos industriales reales que ayuden a la optimización energética y a la reducción de los gases efecto invernadero generados.
- Con los resultados que se encuentren en este trabajo, se buscará incentivar la incursión del sector industrial en este tipo de análisis numérico, permitiendo la mejora de sus procesos industriales (En cuanto a eficiencia energética y reducción de impacto ambiental) y aumentando el conocimiento detallado de los diferentes fenómenos implicados, en particular: la combustión del quemador de calentamiento, sus emisiones de  $\text{NO}_x$ , la aerodinámica interna en la distribución de flujos, las caídas de presión y los fenómenos de recirculación
- Generar nuevo conocimiento sobre los procesos de secado industrial para carbonato de calcio y los efectos que tienen las variables involucradas en la eficiencia energética del sistema.
- Profundización en un tema de interés global, los procesos de secado industrial, pues son una de las técnicas más utilizadas actualmente y que ocupan un lugar importante entre los procesos con mayor consumo energético mundial

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo general

Evaluar numéricamente el diseño de un secador centrífugo para carbonato de calcio con alto contenido de sólidos en suspensión acuosa y proponer variaciones al diseño para el aumento de la eficiencia térmica.

### 2.2. Objetivos específicos

- Revisar el estado del arte del diseño y operación de secadores centrífugos y contrastar los resultados con la operación del secador instalado Omya Andina S.A.S
- Revisar el estado del arte de la simulación de secadores centrífugos y determinar los modelos numéricos más adecuados para la simulación de los fenómenos de turbulencia, combustión, transferencia de calor y transferencia de masa.
- Determinar numéricamente opciones de mejoramiento de la operación para el secador Thermal Jet, que conduzca a un aumento en la eficiencia energética del sistema, de secado de aproximadamente 2 tph de una suspensión acuosa de carbonato de calcio de bajo tamaño de partícula (Diámetro medio: 1 – 2  $\mu\text{m}$ ) y con alto contenido de sólidos, y a una reducción de gases efecto invernadero ( $\text{CO}_2$  equivalente).
- Analizar numéricamente el efecto de al menos dos (2) variaciones de la geometría de la cámara de combustión y del manifold y su efecto en la eficiencia global del proceso, con base a propuestas empíricas planteadas que pretenden reducir las caídas de presión en estas zonas del sistema.
- Determinar numéricamente las principales variables del proceso de secado multifase (Gas – líquido – partículas) de la suspensión acuosa de carbonato de calcio.

## 3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

### 3.1. Generalidades del carbonato de calcio

El carbonato de calcio se obtiene a partir del procesamiento de la piedra caliza, de forma general el mecanismo comúnmente utilizado es mediante la molienda o procesos de fractura de partículas. Este proceso se puede subdividir en dos formas de obtención: molienda en seco y molienda en húmedo. La molienda en húmedo se caracteriza principalmente por tener un menor consumo energético que la molienda en seco, entre un 15% - 50% menos y alcanza tamaños de partícula menores para el mismo consumo energético; Chehreh et al (2019) [5] reportan que para un consumo energético de 0.075 kWh la relación de reducción, dada por la división entre el diámetro 80 ( $D_{80}$ ), donde el 80% de la distribución tiene un tamaño de partícula menor, de la alimentación respecto al producto, es de 10.10 para la molienda en húmedo y 9.78 para la molienda en seco, es importante destacar que entre mayor sea esta relación, menor será el tamaño de partícula alcanzado para la misma distribución granulométrica del material de alimentación. Esto sumado a las ventajas que conlleva la manipulación del lodo (material a moler), en cuanto al ingreso en continuo a los equipos de molienda y a los equipos de beneficiamiento de materiales (normalmente procesos de flotación, que requieren que el material esté en suspensión acuosa)

aguas arriba o aguas abajo del proceso y a la reducción de las emisiones de material particulado generadas en comparación con la molienda en seco, esto hace que la molienda en húmedo sea típica para el procesamiento de este material.

El producto obtenido a partir de la molienda en húmedo tienen un alto contenido de sólidos (normalmente superior al 60%) y su procesamiento final generalmente se realiza estando de esta forma, sin embargo, para determinadas aplicaciones es necesario eliminar el contenido de agua de la suspensión y obtener el material sólido seco; lo que conlleva a la necesidad de utilizar procesos de secado asociados, los cuales deben garantizar una alta eficiencia energética, y bajos costos de operación, pues por un lado se requiere evitar un incremento desproporcionado en los costos del producto final y por el otro la cantidad de energía utilizada en este proceso es bastante elevada dado que es un material que se obtiene en grandes volúmenes.

### 3.2. Procesos industriales de secado de sólidos

Para el procesamiento de minerales existe una gran variedad de mecanismos de secado, Wu et al (2010) [6] hacen una recopilación de los tipos de secadores convencionales, estos se recopilan en la Tabla 1. *Tecnologías de secado convencional para minerales [6]*.

**Tabla 1. Tecnologías de secado convencional para minerales [6]**

Secador	Características de los métodos de secado
Secador de chimenea	Secado por conducción, inherentemente lento y muy laborioso. Usado para el secador de los concentrados de flotación de zinc y plomo, lodo de cobre, caolín lavado, etc. Eficiencia térmica del 10 al 30%
Secador de parrilla	Secado por convección. Secado de "bolas verdes" en la fabricación de hierro, cobre y cromo. Eficiencia térmica de 30 - 60%. 25 - 75 kg de evaporación de agua/h/m <sup>2</sup> de área de parrilla
Secador de eje	Secado por convección. Usado en industrias de zinc y hierro. Tamaño típico 2x2x20 m. Eficiencia térmica de 35 - 60%. Bajos costos de capital y mantenimiento.
Secador rotatorio	Calor directo o indirecto. Operando en vacío o presión casi atmosférica. Secado de torta amarilla en el proceso de lixiviación de uranio. Tiempo de retención de 5 a 25 min. Carga del secador de 3 a 15%
Secador en Spray (Spray dryer)	Usado en el secado de una amplia variedad de concentrados de flotación mineral. Maneja contenido de sólido de 55 - 70% en peso. Alta eficiencia térmica y bajo contenido de humedad del producto (< 5%). Se requiere de elección cuidadosa del atomizador
Secador de vacío	Operación ambientalmente segura sin problemas de polvo. Alta recuperación de agua caliente. Secado por lotes
Secador de lecho fluidizado	Secado por lotes o continuo en flujo ascendente de gas caliente. Método eficiente de secado para sólidos fluidizables, no pegajosos, o incluso lechadas como dióxido de titanio, silicato de circonio, carbón, etc. Tiempo de residencia de 5 a 25 min
Secador flash (flash dryer)	Los secadores flash o neumáticos transportan sólidos pulverizados húmedos en una corriente de aire caliente. Adecuado para la alimentación fina, bajos tamaños de partícula. Secado rápido y se usa a menudo para eliminar la humedad de la superficie
Secador transportador (Tornillo transportador)	El alimento húmedo se transporta en una banda y un tornillo vibratorio pasando por una cámara de calentamiento. Ejes huecos encontrados en secador de tornillo. Muy adecuado como secador suplementario para un secador existente
Secador de tambor	Se utiliza para lechadas o pastas. Recubrimiento de material húmedo en la superficie exterior de un tambor giratorio calentado con vapor. Se puede aplicar vacío
Secador de disco	Principio de funcionamiento similar al secador de tambor. Usado para secar materiales como bauxita, bórax, carbonato de calcio, carbón en polvo, caolín, mica, carbonato de sodio, dióxido de torio, polvo de zinc y concentrado de mineral de hierro

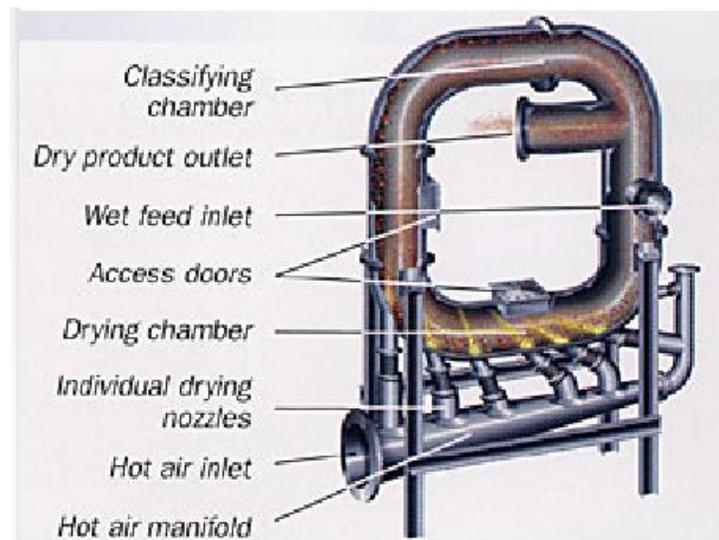
De la Tabla 1, son de particular interés los secadores “Spry Dryer” y “Flash Dryer”, pues satisfacen algunas condiciones del proceso de secado de interés para este trabajo de investigación, para la primer tecnología de secado se tiene que es ideal para un material de alimentación con alto contenido de sólidos, el cual alcanza un bajo contenido de humedad en el producto, y respecto a la segundo se destaca que es adecuado para materiales finos (bajos tamaños de partícula) y procesos de secado rápidos o casi instantáneos, las características de cada uno de estos procesos son propias de la tecnología de secado de interés.

Por su parte, Tuncal et al (2014) [7] clasifican las tecnologías de secado en cuatro grupos, dependiendo de la forma en que se suministra la energía al lodo: secado por convección o directo,

secado por conducción o contacto o indirecto, secado por radiación y sistemas combinados; en donde se destaca de estos últimos que usan transferencia de calor convectiva, conductiva y radiativa en el mismo dispositivo, provocando que el tiempo de residencia requerido sea muy corto debido a la alta eficiencia de la transferencia de calor combinada. Adicionalmente se hacen dos notaciones importantes, en donde se indica que, a pesar de la importancia industrial y económica de los procesos de secado, se han realizado pocos trabajos para comprender mejor los mecanismos de control y la principal consecuencia práctica es que el comportamiento de secado de lodo aún es difícil de predecir.

Adicionalmente, Alnak et al (2012) [8] destacan una tecnología alternativa, en donde los procesos emplean choque de chorro. Este tipo de procesos son ampliamente utilizados para aumentar la transferencia de calor y masa en diferentes aplicaciones industriales, tales como procesamiento de alimentos, fabricación de textiles y papel.

Ahora, si se combina las tecnologías de Spray Dryer y Flash Dryer descritas por Wu et al (2010) [6], los sistemas combinados (secadores híbridos) de Tuncal et al (2014) [7] y los procesos que emplean choque de chorro de Alnak et al (2012) [8] como un “Toroidal Jet Milling” (Molino por chorro toroidal), en donde se usa un gas caliente de baja presión (2-10 psig) para secar y desaglomerar (Moler en algunos casos) una suspensión de sólidos (generalmente de bajo tamaño de partícula,  $< 10 \mu\text{m}$ ) [9]. Es posible describir los secadores centrífugos o secadores de chorro térmico, los cuales son equipos comerciales (ver **Figura 1**. Thermal Jet Dryer [10]Figura 1), en donde el gas caliente es introducido al cuerpo del secador (mediante choque de chorro) a través de sus boquillas para crear una corriente giratoria de gas/producto de alta velocidad. La corriente de gas barre rápidamente el material de alimentación (con alto contenido de sólidos) húmedo entrante en la cámara de secado, donde el aire caliente turbulento desaglomera rápidamente el material de alimentación creando colisiones de partículas a partículas. Estas colisiones aumentan enormemente la superficie expuesta al fluido de secado, lo que facilita el intercambio instantáneo de calor necesario para un secado casi instantáneo (Entre 1 a 2 segundos) [10]



**Figura 1.** Thermal Jet Dryer [10]

Así pues, la tecnología de secado de principal interés para este trabajo de investigación es “Thermal Jet Dryer” o secador de chorro térmico. En la literatura se encuentra que Hayashi et al. [11] desarrollan un secador de chorros térmicos altamente eficiente (75%, calculado a partir de la ecuación

1, en donde la energía requerida para el proceso de secado corresponde con la requerida para la evaporación de agua más la requerida para el calentamiento del material) y lo evalúan experimentalmente para tres tipos de sólidos encontrando que existe una velocidad crítica de alimentación, en la que el rendimiento de secado cambia drásticamente.

$$Eficiencia (\%) = \frac{(Energía\ utilizada\ para\ el\ proceso\ de\ secado) \left(\frac{kcal}{h}\right)}{Calor\ sensible\ del\ chorro\ termico \left(\frac{kcal}{h}\right)} \quad Ec. 1$$

Por otro lado, las demás tecnologías de secado convencionales presentan eficiencias como las mostradas en la Tabla 2, calculadas igualmente mediante la ecuación 1.

**Tabla 2.** Eficiencias típicas de algunas tecnologías de secado

Tecnología de secado	Eficiencia	Fuente
“Spray Dryer”	60%	[12]
“Flash Dryer”	57 – 86%	[13]
Secador rotatorio	80 – 85%	[14]
Secador de lecho fluidizado	30%	[15]

### 3.3. Dinámica de fluidos computacional (CFD) aplicada al proceso de secado de sólidos

La dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) es una herramienta robusta que es utilizada para dar solución numérica a ecuaciones que describen el comportamiento de flujos tanto reactivos como no reactivos, generando así predicciones bastante ajustadas de los modelos reales. Así, basado en el sistema de interés que contempla flujo reactivo e interacción multifásica (gas – líquido – partículas) se plantea una descripción de los diferentes modelos utilizados en la literatura para describir la turbulencia, cinética química, interacción turbulencia – cinética química, radiación, interacción entre partículas y modelos que describen el proceso de secado para sistemas similares. La revisión del estado del arte muestra que la interacción del sistema completo considerando desde la cámara de combustión hasta el proceso de secado no ha sido abordado en detalle, es necesario subdividir la búsqueda de información en 4 componentes clave: a) análisis de cámara de combustión y quemador, b) generación de chorro térmico y su distribución (análisis de zona “manifold”), c) modelación de partículas y d) proceso y modelación de secado. Esto con el fin de tener la información necesaria que permita un acoplamiento de toda la información desde el análisis de la combustión no premezclada hasta el proceso de secado.

#### a) Análisis de cámara de combustión y quemador

La cámara de combustión y quemador contempla la combustión entre gas natural y aire, así como el calentamiento del aire en exceso que posteriormente realizara la función de secado. Rahmatika et al (2016) [16] estudian un proceso de secado similar a partir de modelación CFD. Para esto consideran el gas de secado (aire) como gas ideal, un modelo de turbulencia k-ε estándar y el modelo de integración cinética química – turbulencia Eddy Disipation Concept (EDC), adicionalmente es importante destacar que consideran únicamente los efectos debido a la convección y conducción para la transferencia de calor. Mediante estas consideraciones, alcanzan una representación bastante adecuada para su proceso de combustión.

Gaikwad et al (2019) [17] indican que para llevar a cabo el proceso de combustión no premezclado de gas de síntesis bajo modelación CFD se han utilizado los siguientes modelos de combustión, el modelo flamelet [18], el modelo CMC (Conditional moment closure) y el flamelet lagrangiano [19], el modelo fractal combinado con LES (Large eddy simulation) [20], el enfoque de PDF transportado [21] y Eddy disipation concept (EDC) [22]. Siendo de interés particular para los autores la integración del modelo CMC en el software OpenFoam, con esto obtienen que los resultados pronosticados del solucionador acoplado muestran un excelente ajuste con los datos experimentales, tanto en el espacio de fracción de mezcla como en el espacio físico. Destacando que el solucionador acoplado tiene la capacidad de manejar mallas estructuradas y no estructuradas.

Múnera et al (2009) [23] muestran que los modelos de turbulencia  $k-\epsilon$  estándar y el  $k-\epsilon$  realizable son adecuados y robustos, requieren bajo costo computacional y presentan una precisión razonable para un amplio rango de flujo turbulentos, respecto a la modelación de la combustión plantea a el modelo de EDC como el más adecuado para interacción entre la cinética química y la turbulencia.

Khodabandeh et al (2020) [24] realizan un análisis numérico exhaustivo para la combustión turbulenta no premezclada. Realizan un estudio comparativo entre los modelos: El modelo del tensor de Reynolds (RSM),  $k-\epsilon$  estándar y  $k-\epsilon$  RNG (Renormalization Group Theory). Respecto a la transferencia de calor por radiación, se modela utilizando los modelos de ordenada discreta (DO), este es el modelo normalmente más aplicado para describir la radiación en sistemas no premezclados [25], [26], siendo ajustado con el modelo de suma pondera de los gases grises (WSGGM, por sus siglas en inglés) el cual es usado para determinar los coeficientes de absorción de los gases de combustión. Respecto al mecanismo de reacción se utiliza un mecanismo de un solo paso para quemar el combustible. Los resultados numéricos se contrastan con los experimentales y se observa un nivel adecuado de predicción. Los contornos encontrados muestran que la longitud de la zona de recirculación interna se estima mejor utilizando el modelo RSM. En consecuencia, la concentración de  $\text{CH}_4$  y los contornos de turbulencia revelan que aumentar el número de remolinos conduce a una mayor recirculación de fluidos e impacto del combustible y el aire cerca del quemador, lo que resulta en la estabilización de la llama.

Respecto a los modelos que describen la integración química de sistemas no premezclados. Es posible considerar tres opciones en FLUENT: equilibrio químico, este modelo utiliza la opción del límite de inflamabilidad rica (RFL, por sus siglas en inglés) en donde las regiones ricas se modelas como una mezcla de combustible puro sin quemar y una línea más delgada de combustible quemado, este enfoque supone que la química es infinitamente rápida e irreversible, con especies de combustible y oxidantes que nunca coexisten en el espacio y dando la conversión en un solo paso a productos finales. Esta descripción permite que las fracciones de masa de las especies se determinen directamente a partir de la estequiometría de reacción dada, sin que se requiera información de velocidad de reacción o equilibrio químico. Debido a que no se requieren cálculos de velocidad de reacción o equilibrio, esta aproximación se calcula rápida y fácilmente. Sin embargo, el modelo se limita a la predicción de reacciones de un solo paso y no puede predecir la formación de especies intermedias o los efectos de disociación [27]. El modelo de Steady Diffusion Flamelet modela la llama turbulenta como un ensamble de llamas laminares conocidas como llamas de difusión, se asume que estas llamas de difusión tienen la misma estructura de llamas laminares en una configuración simple y son obtenidas mediante experimentos o cálculos; mediante mecanismos detallados ANSYS Fluent puede calcular las llamas de difusión laminar de flujo opuesto para la combustión no premezclada. La principal ventaja del modelo de llamas de difusión es que se pueden incorporar efectos cinéticos químicos realistas en llamas turbulentas. Sin embargo, este modelo se limita a modelar la combustión con una

química relativamente rápida, en donde se supone que la llama responde instantáneamente a la tensión aerodinámica, por lo que el modelo no puede capturar efectos profundos de desequilibrio como ignición, extinción y química lenta como las emisiones de NOx) [27]; Unsteady Diffusion Flamelet, este modelo corrige los cálculos imprecisos que presenta el modelo anterior para las especies de formación lenta, como contaminantes gaseosos o rendimientos de productos en reactores líquidos, la cinética química computacionalmente costosa se ve reducida a una dimensión lo que hace que el modelo sea más rápido que los modelos laminar-finite-rate, EDC o PDF, donde la cinética se calcula en dos o tres dimensiones [27]

En aquellos casos en los que la formación e influencia de especies intermedias es considerables, se hace necesario especificar los mecanismos de reacción, para procesos de combustión no premezclada se han usado los mecanismos basados en The GRI Mech, específicamente la versión 2.1 [28] y la versión 3.0 [29].

Dado que el sistema de interés para este trabajo de investigación es robusto y complejo en términos geométricos y con el fin de no incurrir en elevados costos computacionales que conllevan el uso de mecanismos de reacción complejos e integraciones entre cinética química y turbulencia detallados, es recomendable, en algunos casos, describir el sistema mediante mecanismos de reacción de uno o dos pasos y trabajar únicamente con el modelo ED-Eddy Dissipation para el acople entre cinética química y turbulencia, pues variaciones detalladas en la combustión que causen impactos pequeños en la información de salida de la cámara de combustión no son de interés para este sistema particular.

#### ***b) Generación de chorro térmico (Análisis de manifold)***

Para la modelación CFD del fenómeno que tiene lugar en el manifold del secador de interés (Thermal Jet Dryer, Figura 1),. En la actualidad, los modelos de turbulencia RANS (Reynolds-Averaged Navier–Stokes) se aplican ampliamente en modelos prácticos de turbulencia para una precisión y eficiencia apropiadas para este tipo de flujos [30], más aun considerando la escala a trabajar para un sistema industrial. Para describir este comportamiento, todos los modelos de turbulencia lineal, como el modelo k- $\epsilon$ , adoptaron el supuesto de la isotropía de los esfuerzos normales de Reynolds y arrojaron resultados insatisfactorios (Wilcox et al (1994) [31]). Por su parte Chen (1995) [32] informó que el modelo k -  $\epsilon$  RNG, presentó los mejores resultados para el flujo del chorro. Mason et al (2007) [33] indicaron que el transporte de esfuerzo cortante (SST) k -  $\omega$  es el mejor para describir el flujo, pero también señalaron que el modelo RSM empleado no podía considerar los efectos de reflexión de la pared que pueden afectar su rendimiento. Sengupta et al (2008) [34] sugirieron que los modelos LES, realizables k- $\epsilon$  y RSM son más precisos que otros modelos. Li et al (2009) [35] encontró que el modelo lineal de dos ecuaciones, el modelo RNG k -  $\epsilon$ , no predice el crecimiento del espesor de la capa límite del chorro de impacto. Sin embargo, los resultados de RSM son bastante razonables. Por lo tanto, Li et al (2012) [30] consideran que RSM es el modelo de turbulencia más adecuado para predecir este tipo de flujo, pues puede tener en cuenta la anisotropía de la turbulencia, sin embargo, RSM tiene que resolver seis ecuaciones de transporte de esfuerzos de Reynolds adicionales, lo que resulta en un aumento de los costos computacionales-.

#### ***c) Interacción y modelación de partículas***

Hayashi et al (2007) [36] han trabajado un análisis aproximado al sistema real de interés para este trabajo de investigación, en el cual utilizan los resultados experimentales de su estudio previo [11] para realizar un análisis numérico a su secador de chorro térmico en el software ANSYS FLUET V 6.1, con el fin de evaluar las características del flujo multifase (aire - partícula), el tiempo de residencia medio y su influencia en el proceso de secado. Para esto realizaron inicialmente la

simulación con aire a temperatura ambiente y un material sólido seco (con tamaño de partícula igual a 3 mm), sin considerar el material a secar (agua). Para llevar a cabo la simulación CFD se consideraron las ecuaciones de conservación de masa y momento. Como modelo de flujo de turbulencia, se seleccionó el modelo RSM, pues a menudo se ha aplicado para el análisis de flujos en espiral. Para calcular las trayectorias de las partículas, se empleó el modelo de fase discreta (DPM) con cálculo de acoplamiento bidireccional. En este cálculo, se consideró la interacción entre el flujo de aire y las partículas, pero la interacción entre las partículas fue ignorada. El método que también tiene en cuenta esta última interacción se denomina cálculo de acoplamiento de cuatro vías, un método de elemento discreto (DEM), pero este requiere un tiempo excesivo para una simulación tridimensional de decenas de miles de partículas. Existe otro enfoque prometedor para una simulación tridimensional de un gran número de partículas que representa el flujo de partículas como un flujo de fluido, el llamado método Eulerian-Eulerian. Para las partículas se supuso que el momento de las partículas cambiaba por la resistencia newtoniana del flujo de aire, la flotabilidad, la gravedad y la fuerza de elevación de Magnus. La fuerza de elevación de Magnus puede ser generada por la rotación a alta velocidad de una partícula. La fuerza de elevación de Saffman y la fuerza browniana no se consideraron porque el tamaño de partícula era relativamente grande. Adicionalmente se usó el modelo para la colisión de una partícula con la pared, que fue derivado por Crowe et al (2011) [37]. Este modelo muestra la correlación entre la velocidad de una partícula antes y después de su colisión con la pared, encontrando que los valores calculados correspondían estrechamente a los valores experimentales. Por lo tanto, el método de cálculo que utiliza el cálculo de acoplamiento bidireccional es apropiado para los cálculos de flujo multifásico de partículas de aire donde la concentración de sólidos es pequeña. Esto es debido a que la interacción entre partículas era mínima. Tras completar esta simulación incorporaron los procesos de transferencia de calor y secado, mediante la ecuación de conservación de energía que solo se tuvo en cuenta la transferencia de calor por convección del flujo de aire y descartó la contribución de la radiación desde la pared del secador. Para el modelo de secado se consideró que hay dos períodos en el secado, el período de velocidad constante y el período de caída. En el software CFD, solo se pudo tener en cuenta el primero, pero a partir de los datos experimentales sobre el secado de lodos orgánicos, se demostró que el período de caída de la tasa de secado fue comparativamente largo. Por lo tanto, la función para calcular este período se incorporó al solucionador CFD; Finalmente, para definir el modelo de velocidad de secado descendente, se supuso que la velocidad de secado descendente era proporcional al contenido de humedad de una partícula y se consideró que esta suposición era apropiada para las partículas dispersas que se secaban. Con esto se encuentra que los datos experimentales coincidieron razonablemente bien con los resultados del modelo CFD.

Sin embargo, a pesar de los aspectos de la simulación descrita por Hayashi et al (2007) [36] no se evidencia que se haya desarrollado una evaluación numérica detallada que incorpore el análisis desde el sistema de combustión, generación del chorro térmico, inyección del material a secar hasta el proceso de secado e interacción de partículas para tamaños de partícula considerablemente pequeños (entre 1 a 2  $\mu\text{m}$ ), lo cual hace parte del alcance de la propuesta aquí planteada.

Por otro lado, y de forma específica a continuación se describen los enfoques que permiten la integración de las involucradas en el proceso (Gas – líquido – partículas). Dentro de la literatura, para la integración de dos fases, continua (gas, líquido) – discreta (partículas, gotas), se destacan el uso de los métodos Euleriano - Euleriano y Euleriano – Lagrangiano (Asociado a DPM, por sus siglas en inglés). [38], [39].

En el marco Euleriano - Euleriano, la fase dispersa (gotas) se trata como una fase continua, es decir, hay dos fases eulerianas, una para el gas y otra para las gotas, que están interactuando continuamente. Cada volumen de control computacional contiene ciertas fracciones de gas y gotas, y las ecuaciones de transporte se escriben de tal manera que las fracciones de volumen de gas y líquido suman la unidad. Si la celda computacional consta de una sola fase, las ecuaciones de transporte para las dos fases vuelven al sistema monofásico convencional [39]. Las ventajas del enfoque Euleriano - Euleriano son que generalmente es relativamente barato en términos de demanda computacional y la turbulencia se puede modelar de manera bastante simple. Sin embargo, si se resuelve un conjunto separado de ecuaciones de transporte para cada tamaño de partícula (se usa un diámetro de partícula individual o rangos de tamaños de partícula para la fase dispersa), entonces el enfoque de Euleriano puede ser costoso. Además, existe cierta incertidumbre sobre los coeficientes de difusión eulerianos y los coeficientes de transferencia de calor más apropiados. Por lo tanto, el enfoque euleriano es el más adecuado para flujos con un rango estrecho de tamaños de partículas donde no se necesita una alta resolución de las propiedades de las partículas [39].

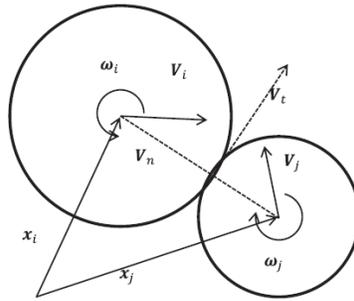
En el enfoque de movimiento de partículas Euleriano - Lagrangiano, la fase gaseosa se modela utilizando el enfoque Euleriano (Continuo) y la fase discreta está representada por una serie de "partículas" computacionales, como el Método de Elementos Discretos (DEM, por sus siglas en inglés) [38]. Las partículas individuales se rastrean a través del dominio de flujo desde su punto de inyección hasta que escapan del dominio en un marco de trabajo lagrangiano. El modelo Euleriano - Lagrangiano tiene la ventaja de ser computacionalmente más barato que el método Euleriano - Euleriano para una amplia gama de tamaños de partículas. También puede proporcionar más detalles sobre el comportamiento y los tiempos de residencia de las partículas individuales y potencialmente puede aproximar la transferencia de masa y calor con mayor precisión. Por otro lado, el enfoque puede ser costoso si hay que rastrear una gran cantidad de partículas y es mejor cuando la fase dispersa no excede el 10% en volumen de la mezcla en cualquier región [40].

En los métodos Euleriano - Euleriano y Euleriano - Lagrangiano, debe modelarse el intercambio de impulso entre partículas y gas (O fase continua). Este intercambio puede consistir en varias fuerzas como, arrastre, elevación, masa virtual y fuerzas de muro. De forma general se concluye que los enfoques de modelado de Euleriano y Lagrangiano daban predicciones similares para la dispersión de gotas turbulentas y la aglomeración de aerosoles para una amplia gama de flujos de gotas y gases [39].

Han et al (2002) [41] desarrollan en conjunto el método de elementos discretos (DEM) y CFD para simular un Toroidal Jet Mill en 2D, para esto consideran únicamente la fase gaseosa (Chorro que muele), y la fase discreta (Partículas a ser molidas). Con esto encuentran la influencia que está teniendo el flujo de partículas, el ángulo de ingreso y el flujo de aire en el sistema. Los resultados numéricos fueron similares a los experimentales.

Por su parte, Brosh et al (2014) [42] desarrollan un modelo numérico en 3D para un molino de chorro en espiral (Jet Mill) para predecir su comportamiento. Esto se logra mediante un acople del método de elementos discretos (DEM) y simulación de dinámica computacional (CFD). Para los modelos de movimiento de partículas, se consideró que la rotación y traslación de partículas ocurre debido a la segunda ley de Newton, en donde la fuerza total experimentada por cada partícula es debida a interacciones partícula - pared, partícula - partícula, interacciones fluido - sólido e interacciones sin contacto (Como fuerzas de Van der Waals, la cual es importante considerar debido a que es la que ocasiona las aglomeraciones del material y aumenta para tamaños de partícula muy pequeños). Las fuerzas producto de la interacción partícula - partícula y partícula - pared se determinan a partir de

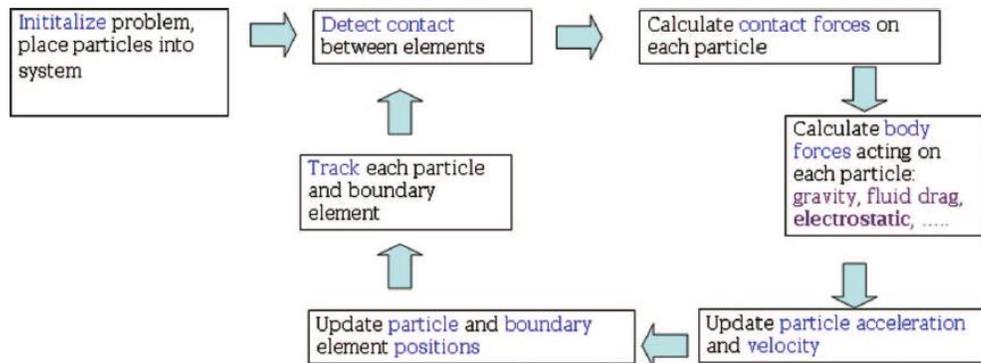
las velocidades normales y tangenciales que aparecen cuando estas entran en contacto (ver Figura 2, para partícula - partícula); la fuerza de Van der Waals entre partículas, se determina a partir de la aproximación de Derjaguin y finalmente la fuerza debido a la interacción sólido - fluido, considera las interacciones sólido - fluido debido a la fuerza de arrastre, la fuerza de elevación de corte, la fuerza de elevación rotacional (Fuerza de Magnus) y la flotabilidad.



**Figura 2.** Ilustración de la interacción partícula - partícula y sus velocidades [42].

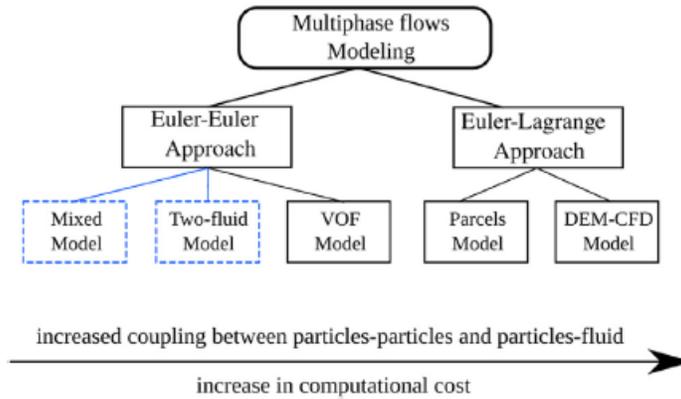
Este análisis muestra que al agregar las fuerzas de Van der Waals a la simulación se puede esperar un ajuste ligeramente mejor, y se destaca que, debido a la gran cantidad de partículas, es necesario un paso de tiempo bastante pequeño y por lo tanto llegar a la estabilidad del sistema les tomó un par de meses.

Finalmente, Hobbs (2009) [43] presenta un acoplamiento entre FLUENT y DEM para simular la transferencia de calor de la llama del quemador al agregado en 3D. Una simulación CFD de reacción completa de una llama de gas natural se acopló a una simulación DEM utilizando un modelo Euleriano con transferencia de calor e impulso intercambiado entre las fases. Para la solución DEM se presenta el algoritmo de la Figura 3.



**Figura 3.** Metodología de solución DEM [43].

Al estudiar un sistema multifásico en el cual se tienen regímenes de flujo turbulento es necesario evaluar los costos computacionales asociados, pues pueden llegar a ser bastante elevados [44]. En la Figura 4, se presenta un comparativo de los costos computacionales requeridos para modelación multifase.



**Figura 4.** Comparativo costo computacional para modelos de flujo multifase [44].

Sin embargo, los modelos que requieren mayor costo computacional, dan un mayor detalle a la interacción de las partículas, por lo tanto, en caso de no requerirse esto es recomendado usar una aproximación Euler – Euler (o Eulerian – Eulerian), en caso de requerirse se debe usar una aproximación Euler – Lagrange (o Eulerian – Lagrangian), que será limitada por la cantidad de partículas a considerar (E indirectamente por el tamaño de estas). Aunque en la literatura se han desarrollado simulaciones para este tipo de procesos con hasta 7.68 millones de partículas, los costos y tiempo de simulación son bastante elevados [45].

#### **d) Proceso y modelación de secado**

Respecto al modelamiento del proceso de secado en específico Ramachandran et al (2018) [46] presentan una revisión sobre los diferentes modelos matemáticos existentes para realizar la simulación CFD. Estos se dividen en cuatro grupos principales (modelos de capacitancia agrupada, modelos de difusión, modelos basados en la teoría de medios porosos con un enfoque de equilibrio y modelos de no equilibrio).

Los modelos de capacitancia agrupada son basados en experimentos, ya que se basan en ecuaciones empíricas que son capaces de predecir el contenido promedio de humedad en función del tiempo de secado. Los modelos de capacitancia agrupados son adecuados para un producto específico y condiciones de procesamiento específicas [47]. Estos modelos son limitados y no pueden utilizarse incluso en condiciones de procesamiento ligeramente diferentes [48].

Los modelos de difusión son modelos mejorados que suponen un fenómeno de transferencia de calor conductivo para la energía y un transporte difusivo de humedad. Estos modelos utilizan una ecuación de difusión transitoria donde la difusividad efectiva se determina experimentalmente. Incorporan la evaporación usando una condición de límite de superficie en la ecuación de transferencia de calor mientras descuidan la evaporación dentro del dominio. Estos tipos de modelos generalmente predicen el contenido de humedad que varía con el tiempo y el espacio y explican el transporte físico de humedad dentro del material, dando un valor más fundamental que los modelos empíricos puros [47].

Los modelos basados en la teoría de medios porosos con un enfoque de equilibrio, estos modelos se desarrollan con base a la suposición de que existe un límite de movimiento agudo entre las regiones húmedas y secas del sólido. Bajo esto se determina una función para la tasa de secado con la cual es posible predecir este proceso [47].

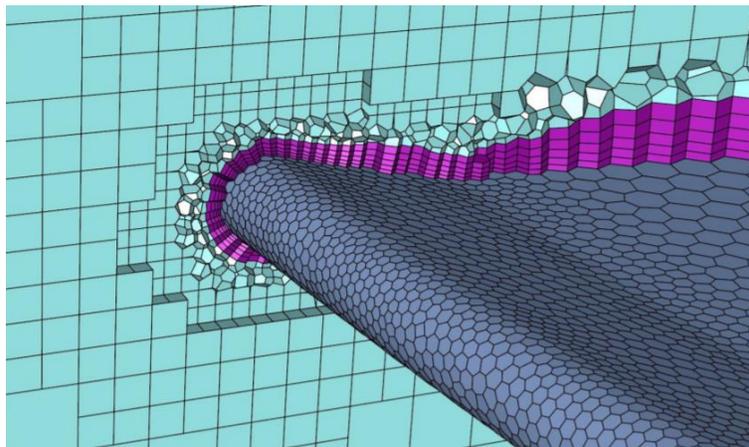
Los modelos de no equilibrio suponen que la evaporación se produce sobre una zona en lugar de en una interfaz distinta en comparación con los modelos de límites agudos, donde se supone un límite de movimiento agudo entre las zonas secas y húmedas en el secado. Estos modelos también se conocen como modelos mecanicistas ya que consideran ecuaciones de transporte para cada fase en medios porosos. El modelo se basa en el supuesto de que la porosidad equivalente es la fracción de volumen ocupada por gas y líquido y, por lo tanto, la porosidad permanece constante [47].

Finalmente, como se puede apreciar en el desarrollo del estado del arte, hasta el momento no se tienen estudios que relacionen desde el proceso de combustión hasta el secado del material, en secadores de chorro térmico, aunque en algunos casos se encuentran descripciones detalladas del proceso, pero estas no consideran los efectos que se tiene aguas abajo o aguas arriba de cada proceso específico, ni los bajos tamaños de partícula asociados (diámetro medio: 1 – 2  $\mu\text{m}$ ), lo cual es uno de los principales objetivos de esta investigación, pues además de pretender evidenciar los efectos que tiene cada variable en el proceso conjunto, también se busca que lo la mejora de procesos industriales y operaciones de secado sostenibles para el entorno del país

### 3.4. Tecnología de mallado “Mosaic”

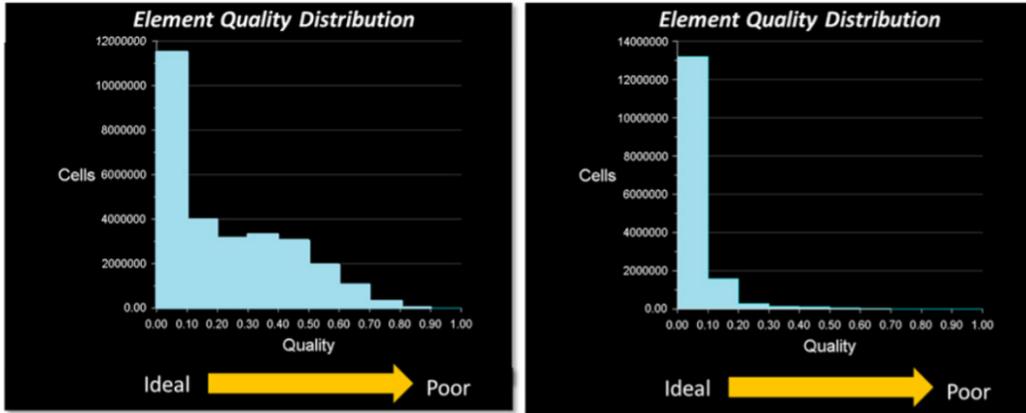
En el 2018 ANSYS lanza la tecnología “Mosaic” con la cual busca semi-automatizar el mallado de diferentes y complejas geometrías a partir de una topología de malla dominante hexaédrica (Ver Figura 5), con esta pretende resolver los problemas de mallado en la transición entre diferentes tipos de elementos de malla en geometrías complejas y regímenes de flujo [49].

En promedio, los elementos hexaédricos tienen menos caras que los elementos poliédricos generalizados, lo que reduce el tiempo de cálculo y los requisitos de memoria y espacio en disco. Los elementos poliédricos utilizados como conectores en la tecnología Mosaic proporcionan una transición de alta calidad entre las mallas de diferentes tipos, por lo que mantienen la alta calidad de la generación poliédrica anterior. [49]



*Figura 5. Ejemplo de mallado con tecnología Mosaic [49].*

La tecnología Mosaic se comparó con la tecnología de mallado Tet-Hexcore convencional en un ala genérica de Fórmula Uno. En este ejemplo, la tecnología Mosaic proporciona una reducción del 46% en el tamaño de la malla, así como una mejora sustancial en la calidad de la malla. El resultado es tiempos de resolución más rápidos y una mejor precisión de la solución, la comparación de estas mallas se encuentra en la Figura 6.



<b>Conventional: Hexcore with Tetrahedral Elements</b>	<b>Poly-Hexcore with Mosaic Technology</b>
6.3 million prism elements	3.2 million poly prism elements
10.1 million cartesian hex elements	8.5 million Cartesian hex elements
11.8 tetrahedral transition elements	3.6 million polyhedral transition elements
Total size: 28.2 million elements	Total size: 15.3 million elements
	<b>46 percent size reduction</b>

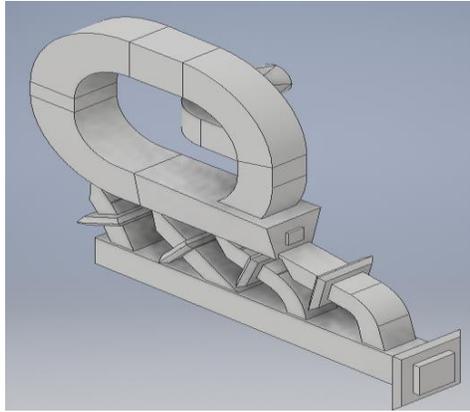
**Figura 6.** Comparativa de mallado con tecnología Mosaic vs mallado convencional [49].

La tecnología de mallado Mosaic nace como una alternativa bastante prometedora pues permite realizar mallados complejos en tiempos cortos, que permiten una reducción de cantidad de elementos, a disminuir costos computacionales y facilitar la convergencia de las simulaciones CFD, por lo que este trabajo utiliza dicho método de mallado.

## 4. Metodología

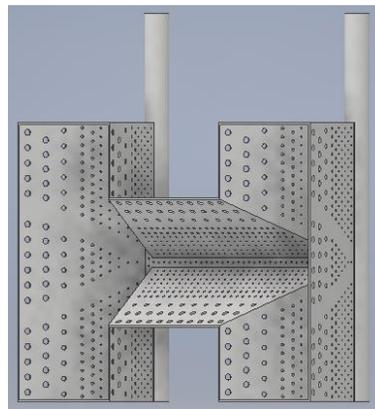
### 4.1. Información de proceso secador real

En la Figura 7 es posible encontrar la geometría del proceso de secado real, que contempla la zona de manifold (En donde se da la generación del chorro térmico) y la zona donde ocurre el secado multifásico, es importante destacar que para este proceso se cuentan con 3 termocuplas (Dos ubicadas en el manifold y una ubicada a la salida del secador); esta información es tomada por un PLC el cual realiza almacenamiento de información cada 10 segundos. Adicionalmente se cuenta con mediciones realizadas en la chimenea del secador para el contenido de NOx presente. Finalmente, con la información de las termocuplas y las mediciones de NOx se pretende realizar la validación de los resultados numéricos.



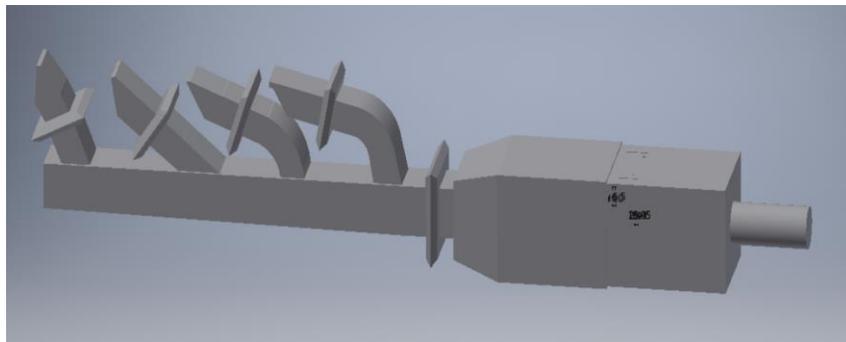
**Figura 7.** *Isometrico de geometría real de Secador (manifold + Zona de secado)*

Por otro lado, la Figura 8 presenta la geometría del quemador, en donde los tubos superiores permiten la admisión del gas natural y los orificios que se presentan tienen la función de permitir el paso de aire (Proveniente de un ventilador industrial) con el que se realiza la combustión. Es importante tener en cuenta que el quemador se encuentra en el medio de la cámara de combustión.



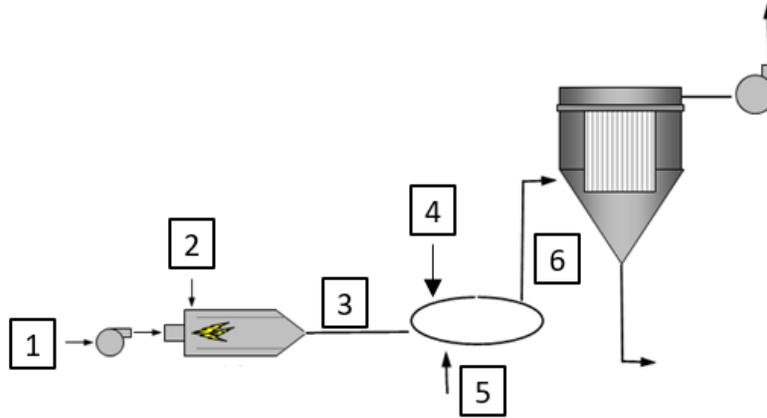
**Figura 8.** *Isometrico quemador*

Finalmente en la Figura 9, se presenta la cámara de combustión acoplada al manifold:



**Figura 9.** *Isométrico cámara de combustión + manifold*

Ahora bien, llevando la información del secador a un diagrama simplificado de proceso es posible encontrar la configuración mostrada por la Figura 10.



**Figura 10.** Diagrama de procesos simplificado

En la Tabla 3 se presenta información relacionada y de interés para el proceso

**Tabla 3.** Información corrientes diagrama simplificado de proceso

Punto	Información	Temperatura (°C)
1	Aire	25
2	Gas Natural (CH <sub>4</sub> )	25
3	Aire	550
4	Aire Boquilla	90
5	CaCO <sub>3</sub>	50
	Agua	50
6	Aire	150
	CaCO <sub>3</sub>	150
	Agua	150
	Vapor Agua	150

Por otro lado, algunas condiciones de proceso generales se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Condiciones generales de operación

Información	Valor
Potencia térmica con base al PCI	702 kW
Presión línea de gas natural	20 psi
Velocidad de entrada del aire	31 m/s
Elevación	2142 m.s.n.m
Presión atmosférica	78104 Pa
Mineral	Marmol
Capacidad Calorífica CaCO <sub>3</sub>	0.88 kJ/kg*K

## 4.2. Gases de ensayo

Se realiza la simulación de un proceso de secado de carbonato de calcio con un 25% de humedad a partir de aire el cual es previamente calentado en una cámara de combustión que funciona con gas natural; La cámara de combustión trabaja con 702 kW de potencia térmica con base al PCI. En la Tabla 5 se presentan la información de algunos flujos de interés, tener en cuenta que como se verá posteriormente el gas natural fue aproximado a 100% metano (CH<sub>4</sub>) para fines de este trabajo de investigación.

*Tabla 5. Información de corrientes para el proceso de secado*

Punto	Información	Flujo másico (kg/hr)
1	Aire	4596
2	Gas Natural (CH <sub>4</sub> )	49
3	Aire	4596
4	Aire Boquilla	35
5	CaCO <sub>3</sub>	1877
	Agua	636
6	Aire	4631
	CaCO <sub>3</sub>	1877
	Agua	3.2
	Vapor Agua	632.8

### 4.3. Variables de entrada y variables respuesta

Las variables que se tuvieron en cuenta durante la toma de datos del secador real fueron:

- **Variables de entrada:** flujo de aire, potencia térmica con base al PCI, flujo de suspensión Carbonato de calcio + agua, temperatura y presión de ingreso de cada corriente al sistema.
- **Variables no controlables:** humedad del ambiente, composición del gas natural, variaciones propias de los sistemas (Bomba de dosificación de suspensión, válvula dosificadora de gas natural), errores humanos.
- **Variables de salida:** temperatura medida en los 3 puntos en los que se tienen las termocuplas y emisiones de NO<sub>x</sub> en chimenea, eficiencia térmica del proceso de calentamiento, humedad al final del proceso.
- **Número de repeticiones:** Con el fin de tener una estabilidad de proceso, la información con la cual se validará las evaluaciones numéricas se tomó en forma continua por un periodo de 3 horas, con lo que considerando almacenamiento de datos cada 10 segundos, corresponde con una cantidad interesante de información.

### 4.4. Metodología numérica

La metodología numérica pretende dar solución a los principales objetivos planteados en este trabajo de investigación mediante análisis numérico de simulaciones CFD. Para esto se utilizó el Software ANSYS – Fluent 19.2 (para las simulaciones 3D) y el Software ANSYS – Fluent 20.1 (para la simulación en 2D); Esto con el fin de determinar los perfiles de temperatura, especies, velocidad y presión que permitan concluir sobre la incidencia que tiene la geometría del sistema en la eficiencia de este, así como conocer las principales variables que afectan el proceso de secado, adicionalmente se buscó determinar el NO<sub>x</sub> mediante post procesamiento.

Las simulaciones se dividen en tres secciones como se especifica a continuación:

- La primera evalúa el comportamiento de la cámara de combustión, determina la generación de NO<sub>x</sub> mediante post procesamiento, evalúa la incidencia de cambios en su geometría y su efecto en la eficiencia del sistema, y cuantifica el efecto que tiene la radiación en el sistema. Esta simulación se desarrolla en 3D
- La segunda evalúa el comportamiento del manifold, evalúa la incidencia de cambios en su geometría y su efecto en la eficiencia del sistema, cuantifica el efecto que tiene la radiación en el sistema y compara el mallado hexaédrico (Tecnología Mosaic) vs mallado estructurado convencional. Esta simulación se desarrolla en 3D
- La tercera evalúa el comportamiento de la zona de secado, como sucede el secado de las partículas y define las principales características de este proceso. Esta simulación se desarrolla en 2D.

Los flujos y condiciones simuladas corresponden a la información presentada en las tablas Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5, y así de forma consolidada en la Tabla 6 se muestran las simulaciones realizadas.

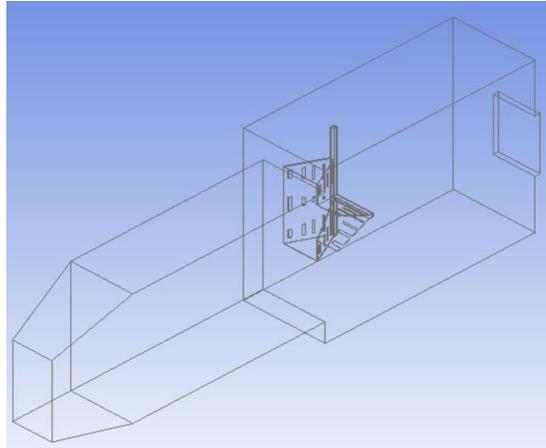
**Tabla 6.** Simulaciones realizadas durante el desarrollo de este trabajo de investigación

#Simulación	Descripción
1	Simulación cámara de combustión
2	Simulación cámara de combustión + post procesamiento NO <sub>x</sub>
3	Simulación cámara de combustión sin radiación
4	Simulación cámara de combustión modificada
5	Simulación cámara de combustión modificada + post procesamiento NO <sub>x</sub>
6	Simulación manifold (Cámara de combustión original)
7	Simulación manifold (Cámara de combustión original) – Malla Tetraédrica
8	Simulación manifold (Cámara de combustión Modificada)
9	Simulación manifold modificada (Cámara de combustión original)
10	Simulación manifold Modificada (Cámara de combustión Modificada)
11	Simulación manifold (Cámara de combustión Original) sin radiación
12	Simulación Zona de Secado (manifold Original, cámara de combustión original)

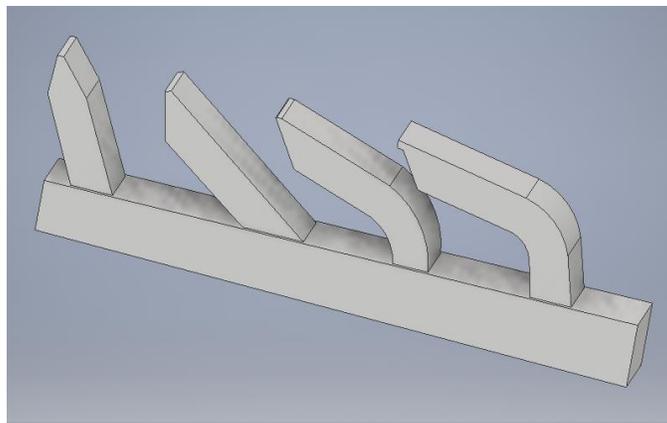
A continuación, se presentan las simplificaciones realizadas al sistema.

#### 4.4.1. Simplificaciones a geometría y proceso

Las principales simplificaciones realizadas para la geometría consistieron en disminuir la complejidad del quemador (ver Figura 8) reemplazando los orificios del mismo por ranuras de área equivalente y modificar el ingreso del aire de una sección circular a una sección cuadrada como se presenta en la Figura 11 y abolir en las toberas del manifold las zonas que permiten la expansión/dilatación del material de construcción debido a la temperaturas de operación, obteniendo lo encontrado en la Figura 12.



**Figura 11.** Cámara de combustión + quemador simplificado (En ranuras)

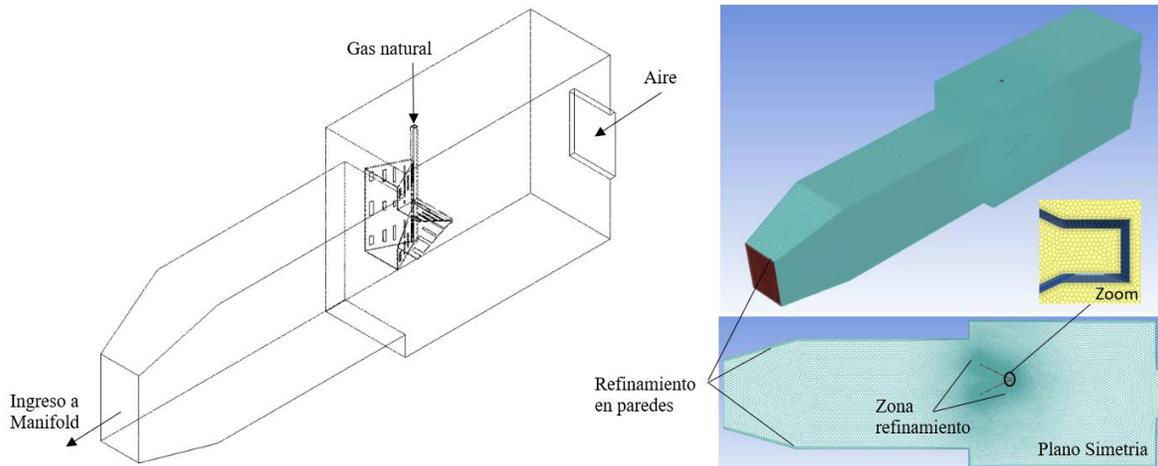


**Figura 12.** Manifold Simplificado

Con esto los esquemas detallados para cada una de las secciones de interés se presentan a continuación:

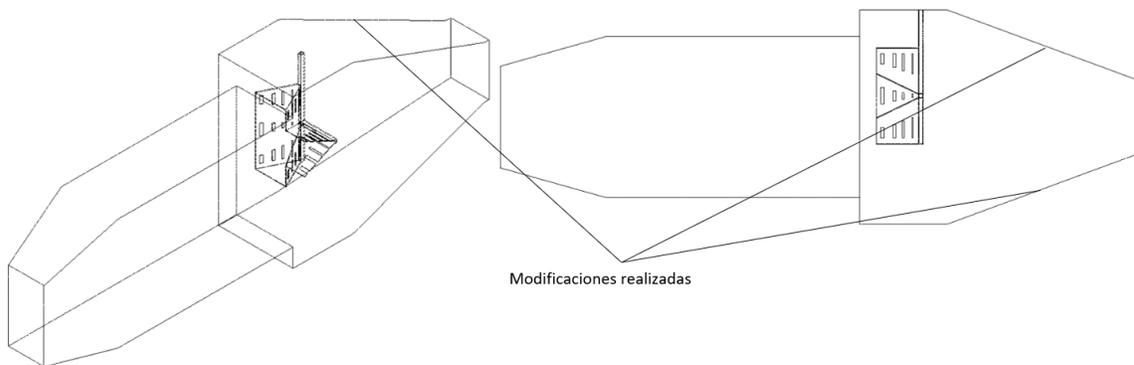
**Sección 1: Cámara de combustión**

La Figura 13, presenta el esquema de la cámara de combustión y quemador, así como el mallado con topología hexaédrica dominante.



**Figura 13.** Esquema cámara de combustión + quemador

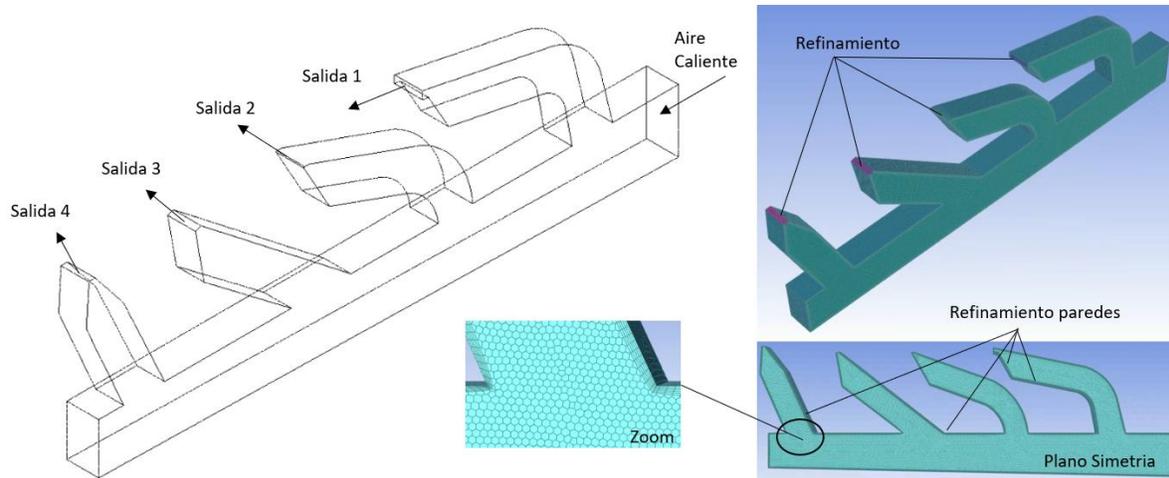
Con base a la simulación realizada se propone una modificación a la geometría de la cámara de combustión la cual se puede observar en la Figura 14 y consiste en implementar deflectores que direccionen el flujo del aire de ingreso hacia el quemador.



**Figura 14.** Modificación realizada a la cámara de combustión

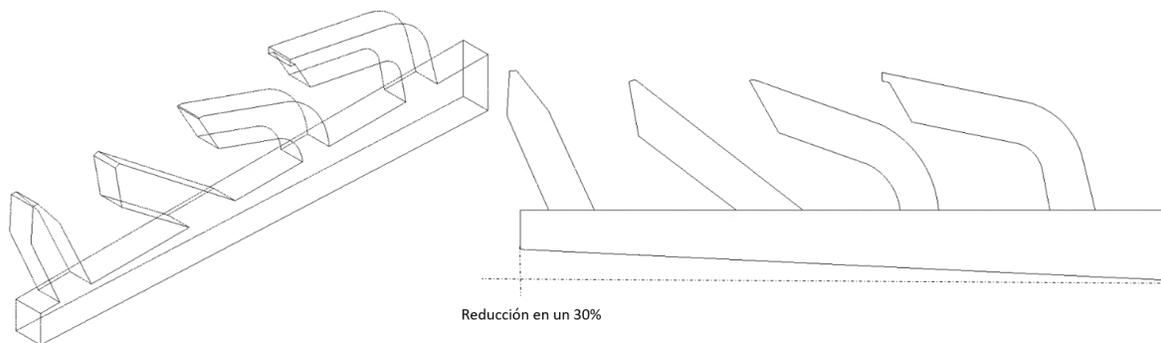
### **Sección 2: manifold**

La Figura 15, presenta el esquema del manifold, así como el mallado con topología hexaédrica dominante.



**Figura 15.** Esquema manifold

Con base a la simulación realizada se propone una modificación a la geometría del manifold la cual se puede observar en la Figura 16 y consiste en reducir en un 30% la sección de la parte inferior del mismo.

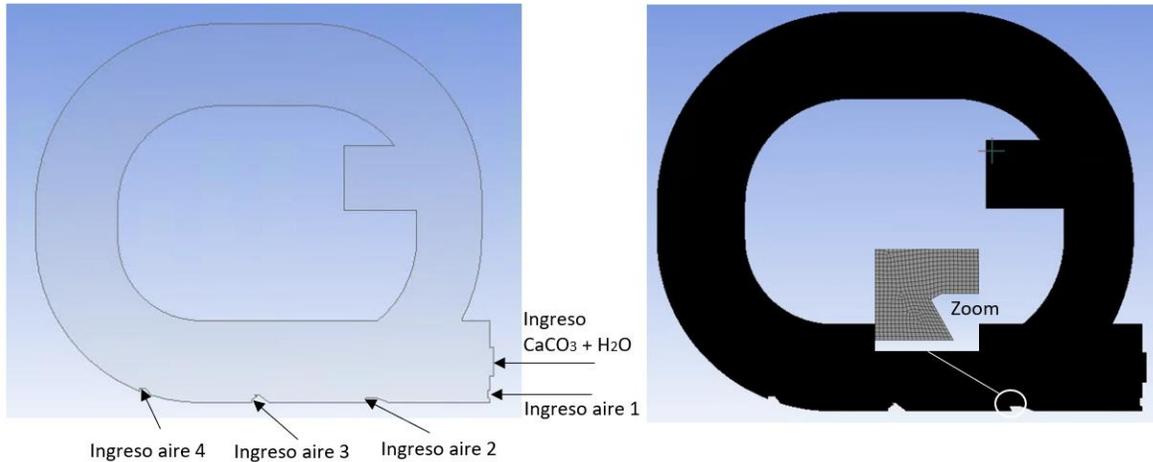


**Figura 16.** Esquema manifold modificado

Para la modificación del manifold se llevó a cabo un mallado con topología hexaédrica, mediante los parámetros de mallado previamente encontrados y un mallado estructurado convencional con el fin de evaluar la incidencia del tipo de mallado sobre los resultados encontrados.

### **Sección 3: Zona de Secado**

La Figura 17, presenta el esquema de la zona de secado, así como el mallado realizado, es de considerar que esta simulación se llevó a cabo en 2D, dado el posible alto costo computacional que conlleva realizar una simulación multifásica. Adicionalmente es importante tener en cuenta que la tecnología Mosaic únicamente está disponible para geometrías en 3D.



**Figura 17.** Esquema Zona de secado

Respecto a las condiciones de frontera, la información de corrientes y condiciones especificada corresponde con la presentada en las tablas Tabla 3, Tabla 4 y Tabla 5; se utilizó una intensidad de turbulencia del 5% y un diámetro hidráulico igual al diámetro real de cada sección de entrada o salida. Para las paredes se especificó una transferencia de calor mixta, considerando tanto la conducción como la convección, y adicionalmente en el software se consideró el material aislante de 3.5 cm de espesor, con un coeficiente convectivo de  $0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$  el cual presenta las propiedades mostradas en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Propiedades térmicas de la manta aislante utilizada

Propiedad	Valor
Capacidad calorífica	795 J/kgK
Conductividad térmica	0.3 W/mK
Densidad	128 kg/m <sup>3</sup>

Finalmente, tener en cuenta que las simplificaciones de proceso realizadas consistieron en considerar el gas natural únicamente como metano ( $\text{CH}_4$ ).

#### 4.4.2. Información específica de mallado e independencia de mallado

Para las simulaciones realizadas se encuentra simetría en el dominio computacional, razón por la cual únicamente se malla la mitad de la geometría para las simulaciones en 3D y la superficie frontal en la simulación 2D, dado que se tuvieron varias geometrías a continuación se presenta las mallas para cada sección de interés.

La definición del número de elementos adecuados para cada simulación se definió a partir de independencias de mallado, este procedimiento es de suma importancia pues mediante el mismo se puede determinar la cantidad de elementos adecuada y que asegure que la solución obtenida no sea afectada de forma significativa por la cantidad de elementos, así mismo que el número de elementos sea el mínimo posible permitiendo ahorros computacionales.

Respecto a la calidad de mallado, de forma ideal se espera cumplir con los siguientes parámetros; una relación de aspecto menor a 10, un “Skewness” menor a 0.85, una calidad ortogonal mayor a 0.25. Sin embargo, para geometrías en 3D complejas es posible manejar una relación de aspecto de hasta 30. La relación de aspecto es una medida del estiramiento de la celda, la cual, si es rectangular se define como la razón entre el lado más largo y el lado más corto. El “Skewness” es la diferencia entre la forma de la celda y la forma de una celda equilátera de volumen equivalente, donde celdas con altos valores de este factor pueden decrecer la precisión y desestabilizar la solución. La calidad ortogonal está referida a qué tan cerca están los ángulos entre las caras de los elementos adyacentes a un ángulo óptimo, el cual depende de la topología de la celda.

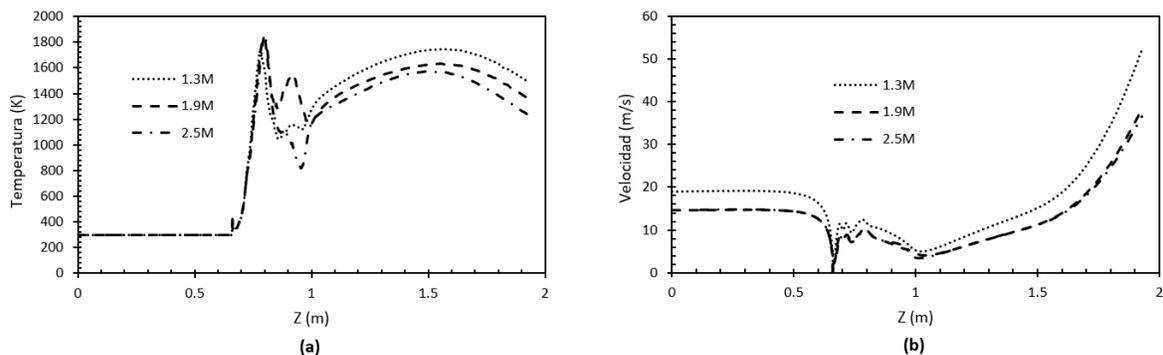
### Sección 1: Cámara de combustión y quemador

Para la zona de la cámara de combustión y quemador se realizaron 3 mallas mediante el mallado automático de la tecnología Mosaic, en donde se encuentran los resultados consolidados en la Tabla 8.

**Tabla 8. Criterios de calidad y # elementos mallas realizadas en cámara de combustión**

	Malla #1	Malla #2	Malla ##
# Elementos	1'334,820	1'945,153	2'464,835
Minimum Orthogonal Quality	0.4	0.43	0.38
Maximum Aspect Ratio	23.5	19.5	19.8
Maximun Skewness	0.6	0.57	0.62

Con base a esto, se construye la independencia de mallado encontrada en la Figura 18, en donde se toma como criterio el perfil de temperatura y velocidades sobre el eje central del quemador a las condiciones de operación a evaluar.



**Figura 18. (a) Perfil de temperatura, (b) Perfil de velocidades para la cámara de combustión**

De acuerdo con este resultado se toma como adecuada para la simulación de interés la malla de 1.9 M de elementos, que, aunque presenta leves variaciones en el perfil de temperatura en la zona donde está ubicado el quemador; para la salida del cámara de combustión, la variación de temperatura obtenida es comparable a la temperatura medida en el proceso industrial.

Por otro lado, para la modificación realizada a la cámara de combustión, se mantiene la configuración de mallado de la geometría original. Esta malla tiene las características presentadas en la Tabla 9

**Tabla 9.** Calidad y # elementos malla realizada en cámara de combustión modificada

	Valor
# Elementos	1'665,573
Minimum Orthogonal Quality	0.43
Maximum Aspect Ratio	25
Maximun Skewness	0.56

Ahora bien, considerando que se están manteniendo los criterios de mallado utilizados en la geometría original de la cámara de combustión, se da como valida esta malla presentada para la simulación de interés en este punto.

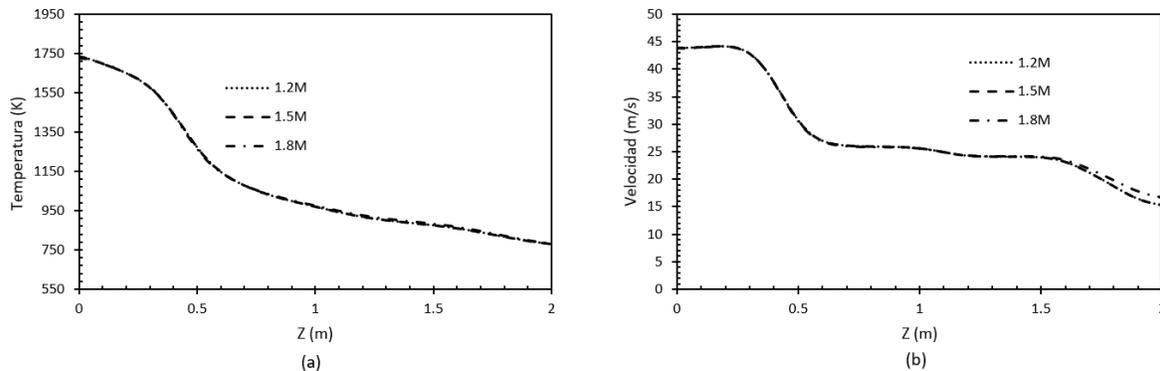
### Sección 2: manifold

Para la zona del manifold se realizaron 3 mallas mediante la tecnología Mosaic. Los resultados consolidados de las 3 mallas se presentan en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Calidad y # elementos mallas realizadas en manifold

	Malla #1	Malla #2	Malla ##
# Elementos	1'176,700	1'516,165	1831,505
Minimum Orthogonal Quality	0.4	0.4	0.4
Maximum Aspect Ratio	29.1	29.2	29.1
Maximun Skewness	0.6	0.6	0.6

Con base a esto, se construye la independencia de mallado encontrada en la Figura 19, en donde se toma como criterio el perfil de temperatura a lo largo de la zona de distribución del manifold a las condiciones de operación a evaluar.



**Figura 19.** (a) Perfil de temperatura, (b) Perfil de velocidades para el manifold

De acuerdo con este resultado se toma como adecuada para la simulación de interés la malla de 1.2 M de elementos, pues no presenta variaciones relevantes respecto a las demás mallas evaluadas.

Respecto a la modificación realizada en el manifold, de igual forma que para la cámara de combustión, se mantiene los parámetros de mallado de la geometría original y se dan como aceptados y válidas

para llevar a cabo la simulación de interés. Los aspectos de calidad para esta malla se dan en la Tabla 11.

**Tabla 11.** *Calidad y # elementos malla realizada en manifold modificado*

	<b>Valor</b>
# Elementos	1'085,484
Minimum Orthogonal Quality	0.4
Maximum Aspect Ratio	31.9
Maximun Skewness	0.6

Finalmente, respecto al mallado estructurado realizado se encuentran los siguientes parámetros de calidad (Tabla 12):

**Tabla 12.** *Calidad y # elementos malla realizada en manifold modificado – Malla estructurada*

	<b>Valor</b>
# Elementos	2'001,031
Minimum Orthogonal Quality	0.54
Maximum Aspect Ratio	18
Maximun Skewness	0.65

Es importante destacar que para el mallado estructurado este fue el número de elementos mínimos que permitieron una convergencia de la simulación y únicamente se realiza este con fines comparativos entre las mallas.

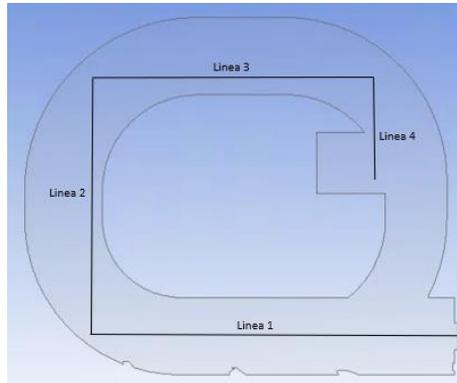
### **Sección 3: Zona de Secado**

Para la zona de secado se realizaron 3 mallas, estas a partir de mallado convencional, dado que la geometría es en 2D y la tecnología Mosaic no está disponible para esto. Los resultados de la calidad de mallado se presentan en la Tabla 13.

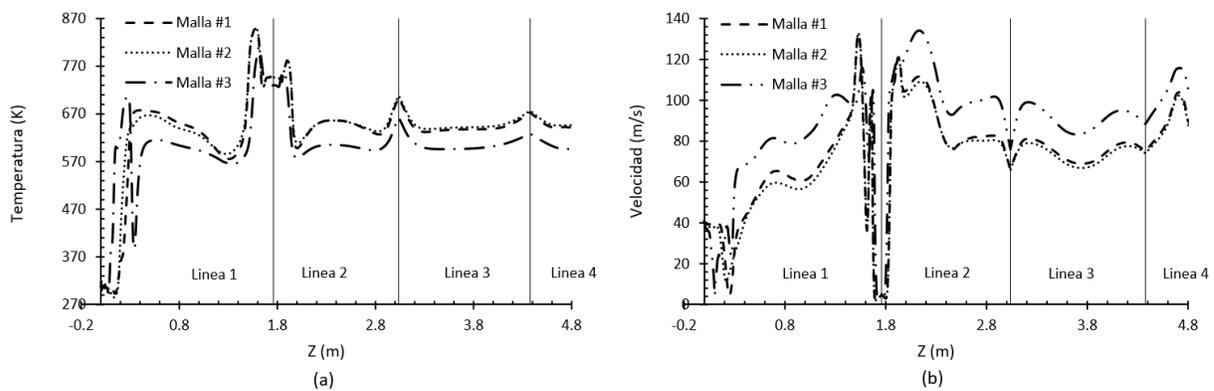
**Tabla 13.** *Calidad y # elementos mallas realizadas en manifold*

	<b>Malla #1</b>	<b>Malla #2</b>	<b>Malla #3</b>
# Elementos	935,483	652,321	524,996
Minimum Orthogonal Quality	0.55	0.50	0.51
Maximum Aspect Ratio	3.2	3.9	2.9
Maximun Skewness	0.73	0.84	0.71

Ahora bien, la independencia de mallado se llevó a cabo comparando la temperatura y velocidad encontrada para cuatro líneas distribuidas a lo largo de la zona de secado (Ver Figura 20) a las condiciones de operación a evaluar con lo que se encuentra lo presentado en la Figura 21.



**Figura 20.** Distribución de líneas sobre las cuales se evaluó la independencia de malla para la zona de secado



**Figura 21.** (a) Perfil de temperatura, (b) Perfil de velocidades, para la zona de secado

Con base a estos resultados se selecciona la malla #1, por ser la más refinada y no presentar una variación significativa respecto a la malla #2, también refinada.

#### 4.4.3. Modelos utilizados

Dado que, para cada sección del equipo del proceso de secado global, se cuentan con diferentes condiciones de operación, por ejemplo, en la cámara de combustión se tiene un flujo reactivo y turbulento, mientras que en el manifold se cuenta únicamente con flujo turbulento sin reacciones, y en la zona de secado, se cuenta con fenómenos multifase que incluyen la dispersión de partículas, el calentamiento, la evaporación y la ebullición; por lo anterior se consideró la división del dominio computacional en tres partes. En todos los casos se resuelven de manera numérica las ecuaciones de continuidad, Navier Stokes mediante modelos RANS.

Para las 3 secciones se utilizan los siguientes modelos en común:

- Para el modelamiento de los fenómenos turbulentos se utilizó el modelo  $k-\epsilon$  realizable con tratamiento de pared mejorado que presenta un adecuado desempeño para este tipo de sistemas [23]. El modelo  $k-\epsilon$  es parte de la familia de modelos basados en RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes). Para la zona de secado que se utilizaron funciones de pared estándar, y aunque se pensará que la mejor opción para la zona de secado es el modelo Reynolds Stress, el alto costo computacional considerando flujo multifásico lleva a una

simulación demasiado robusta, mientras que con el modelo seleccionado se consiguen resultados adecuados a un costo computacional más bajo.

- Para el modelamiento de la radiación se utilizó el modelo de Ordenadas Discretas (OD), junto al modelo de suma ponderada de gases grises (wsggm, por sus siglas en inglés) el cual ayuda a obtener una mejor predicción [25], [26].

Ahora bien, de forma específica es necesario considerar los siguientes modelos:

- Cámara de combustión y quemador:

Al contar con flujo reactivo en esta zona, se optó por utilizar el modelo de Eddy Dissipation para predecir la interacción entre la cinética química y turbulencia debido a que tiene un costo computacional bajo y predice con exactitud adecuada los parámetros de interés para esta zona.

Respecto a la cinética química se utilizó el mecanismo de dos pasos para el metano descrito en Fluent, este se presenta en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Mecanismo de reacción implementado en las simulaciones.

Reacción #	Reacción
1	$CH_4 + 1.5 O_2 \rightarrow CO + 2 H_2O$
2	$CO + 0.5 O_2 \rightarrow CO_2$

- Zona de secado:

Para el flujo multifásico, específicamente la simulación de partículas se realizó mediante el modelo de fase discreta (DPM) con cálculo de acoplamiento bidireccional. En este cálculo, se consideró la interacción entre el flujo de aire y las partículas, pero la interacción entre las partículas fue ignorada. Este presenta una adecuada precisión en los resultados para este tipo de sistemas (% de partículas > 10%) con un relativo bajo costo computacional [36]

Finalmente, la metodología con la que de forma general se llevó a cabo cada una de las simulaciones se describe en la Tabla 15, con la cual fue posible obtener convergencia para la mayoría de las simulaciones, en el caso de las partículas de la zona de secado se utilizó el procedimiento descrito en la Tabla 16.

**Tabla 15.** Paso a paso seguido para convergencia de simulaciones

Cálculo	Momento	k	E	Energía	Especies	Radiación
1	Primer orden			No	No	No
2	Primer orden				Primer orden	
3	Primer orden					
4	Primer orden					
5	Segundo orden					

**Tabla 16.** Paso a paso seguido para convergencia de simulaciones en la zona de secado

Cálculo	Momento	k	E	Energía	Especies	Radiación
1	Primer orden			No	No	No
2	Primer orden				Primer orden	
3	Primer orden					
4	Primer orden					
5	Segundo orden	Primer Orden				
6	Segundo orden	Primer Orden			Segundo orden	Primer Orden
7	Segundo orden	Primer Orden		Segundo orden		Primer Orden
8	Segundo orden	Primer Orden		Segundo orden		
9	Segundo orden		Primer Orden	Segundo orden		
10	Segundo orden					

\*Para todos los casos estuvo activo el modelo DPM

#### 4.4.4. Criterios de Convergencia

Para determinar la convergencia de las simulaciones, se tuvieron en cuenta los residuales obtenidos, los errores en los balances de masa y energía y que los monitores de temperatura y fracción de CO<sub>2</sub>, calculados como el promedio por áreas a la salida de cada uno de los dominios, Se busca que la variación de residuales y variables sea mínima entre iteraciones. Para las simulaciones descritas en la Tabla 6, se encontraron los siguientes ordenes de magnitud:

*Tabla 17. Ordenes de magnitud de los residuales para cada una de las simulaciones realizadas (Ver Tabla 6)*

Simulación	Continuidad	Momento	K	E	Energía	Especies	Radiación
1	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>
2	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>
3	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-4</sup>	n.a.
4	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>
5	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>
6	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>
7	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>
8	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>
9	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>
10	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>
11	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	n.a.
12	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>

**Tabla 18.** % de error para los balances de masa y energía para cada una de las simulaciones realizadas (Ver Tabla 6)

<b>Simulación</b>	<b>% Balance de masa</b>	<b>% Balance de Energía</b>
1	0.0020%	0.820%
2	0.0020%	0.820%
3	0.0020%	0.830%
4	0.0004%	0.310%
5	0.0004%	0.310%
6	0.0000%	0.014%
7	0.0000%	0.033%
8	0.0000%	0.000%
9	0.0202%	0.022%
10	0.0008%	0.003%
11	0.0000%	0.000%
12	0.0000%	0.051%

Adicionalmente, para todos los casos los monitores de temperatura y concentración de CO<sub>2</sub> a la salida de cada geometría, fueron constantes, con lo que es posible concluir que la convergencia de las simulaciones realizadas es bastante adecuada.

#### **4.4.5. Estimación de NO<sub>x</sub>**

Las concentraciones de NO<sub>x</sub> generadas en los sistemas de combustión son generalmente bajas. Como resultado, la química del NO<sub>x</sub> tiene una influencia insignificante en el campo de flujo, la temperatura y las principales concentraciones de productos de combustión. De ello se deduce que la forma más eficaz para la predicción de NO<sub>x</sub> es mediante el post-procesamiento del cálculo de combustión principal. La estimación de NO<sub>x</sub> se realizó mediante el post procesamiento de Fluent, que considera NO, NO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O, para todos los casos los residuales fueron de 10<sup>-6</sup>.

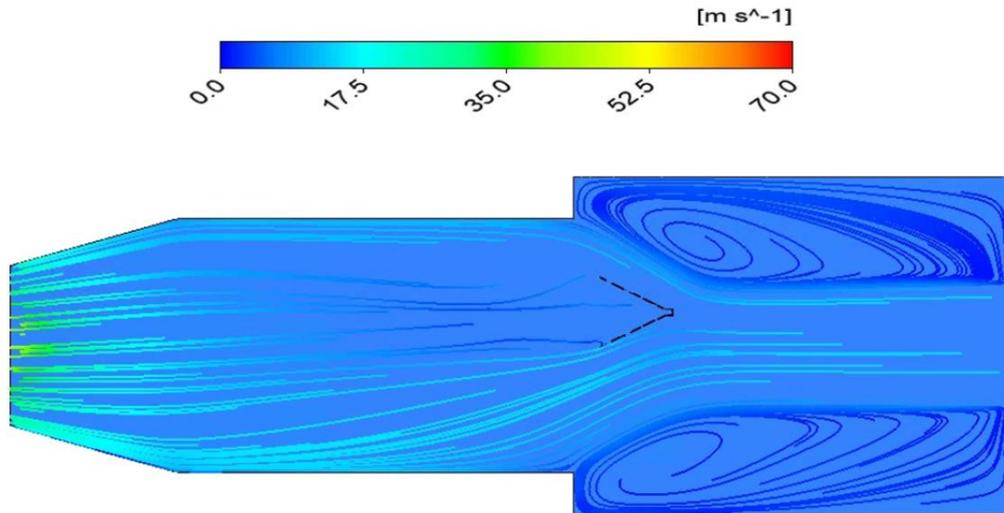
## **5. RESULTADOS**

### **5.1.Resultados numéricos para la cámara de combustión y quemador**

Los resultados numéricos obtenidos para la cámara de combustión y quemador se presentan de forma tal que evidencia el funcionamiento actual del sistema, enfatizando oportunidades de mejora y planteamiento de estas.

#### **5.1.1. Análisis de resultados sobre perfiles obtenidos y planteamiento de modificaciones**

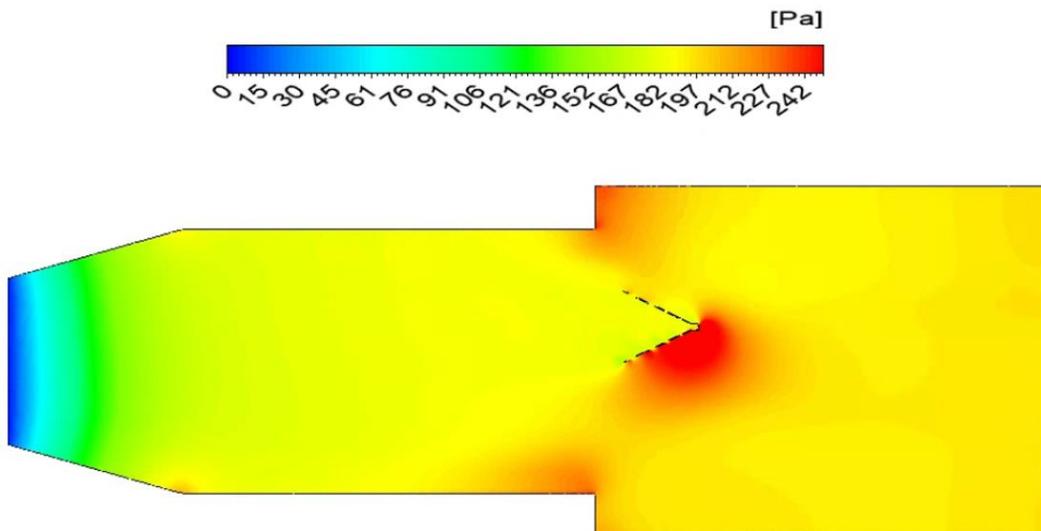
En la Figura 22 se presenta las líneas de corriente para la velocidad en la cámara de combustión en su condición de diseño actual.



**Figura 22.** Líneas de corriente para velocidad, en cámara de combustión

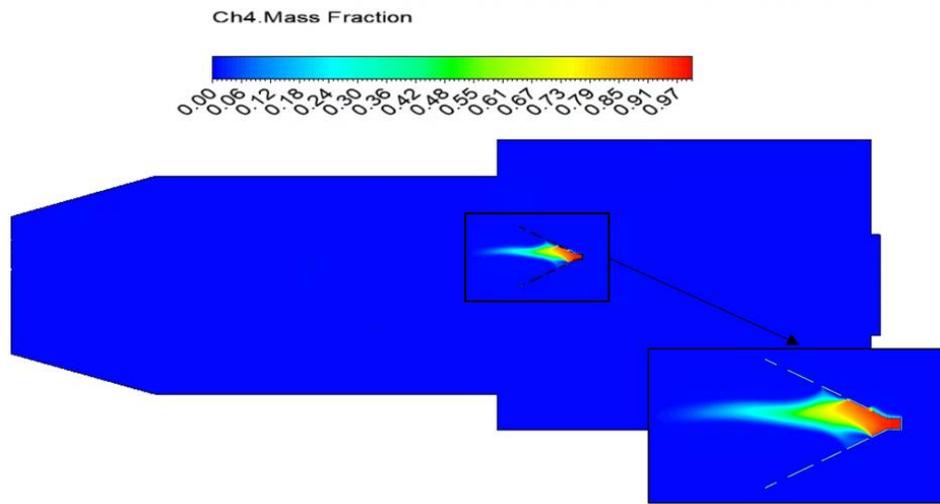
En las zonas laterales de la geometría se presenta zonas de elevada recirculación, causando una ineficiente aerodinámica del sistema que incrementan las caídas de presión provocando así pérdidas energéticas que disminuyen la eficiencia del sistema. Con base a esto como propuesta de modificación se plantea la instalación de deflectores que atenúen las zonas de recirculación, la evaluación de esta propuesta se realiza en la sección 5.1.3.

Adicionalmente, el hecho de que el quemador se encuentre justo en el medio de la cámara de combustión ocasiona pérdidas de presión considerables, así como pérdidas energéticas para el ventilador que suministra el aire de proceso, en la Figura 23 se presenta el perfil de presión para el sistema, en el cual se evidencia lo planteado. Para futuras investigaciones se propone evaluar diferentes sistemas de combustión, incluyendo variantes que no interfieran con el flujo principal de aire y que contribuyan a reducir las altas caídas de presión del sistema, así como a incrementar su eficiencia global.

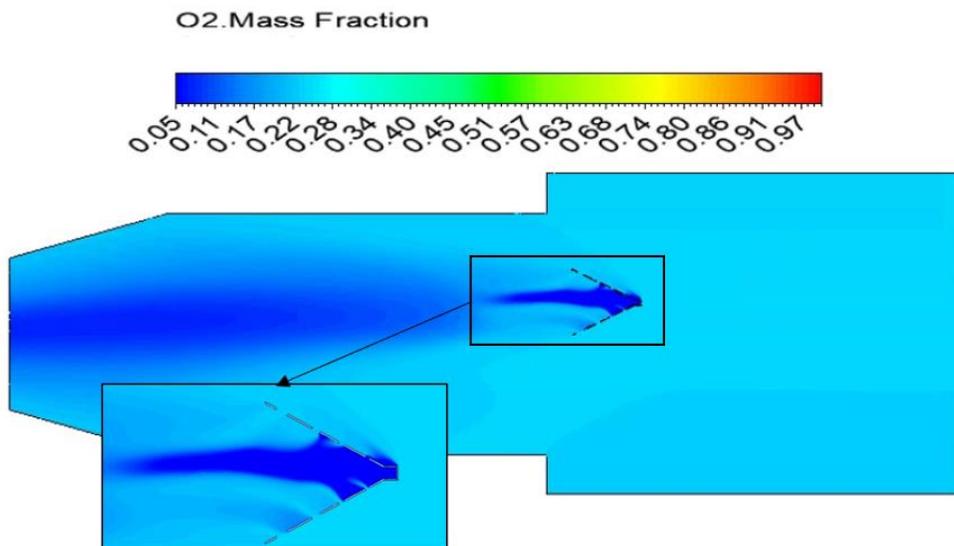


**Figura 23.** Perfil de presión en Pascales (Pa) en cámara de combustión

Respecto a la zona de combustión se presentan los perfiles para la fracción másica de  $\text{CH}_4$  y  $\text{O}_2$ , en las Figura 24 y Figura 25 respectivamente, en donde se evidencia la forma en que el  $\text{CH}_4$  es puesto en contacto con el aire y así comienza el proceso de combustión.



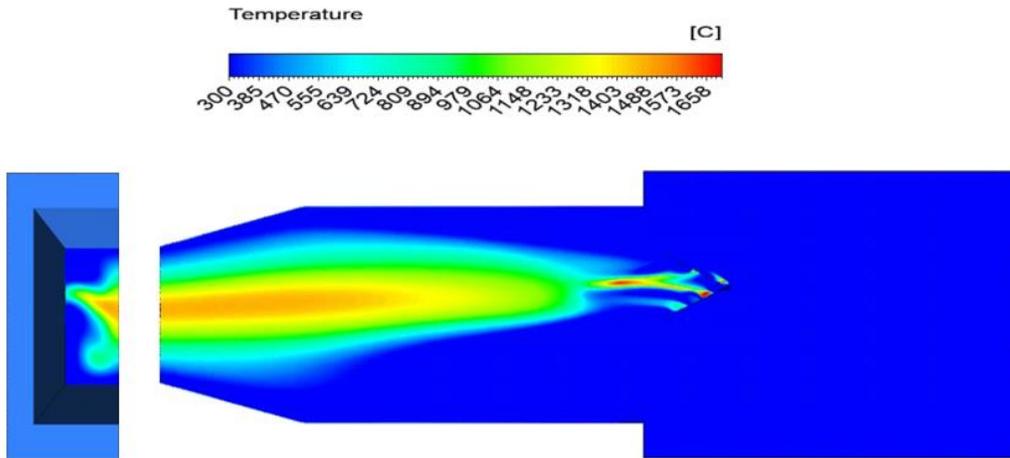
*Figura 24. Perfil de fracción  $\text{CH}_4$  en cámara de combustión*



*Figura 25. Perfil de fracción  $\text{O}_2$  en cámara de combustión*

Con base a estas figuras (Figura 24 y Figura 25) se evidencia como el aire ingresa a la zona de combustión, en mayor proporción por la zona inferior haciendo una no muy uniforme combustión. Por otro lado se evidencia como en las zonas laterales de la cámara de combustión la concentración de  $\text{O}_2$  incrementa levemente, contrastando así con las zonas de recirculación presentadas en la Figura 22.

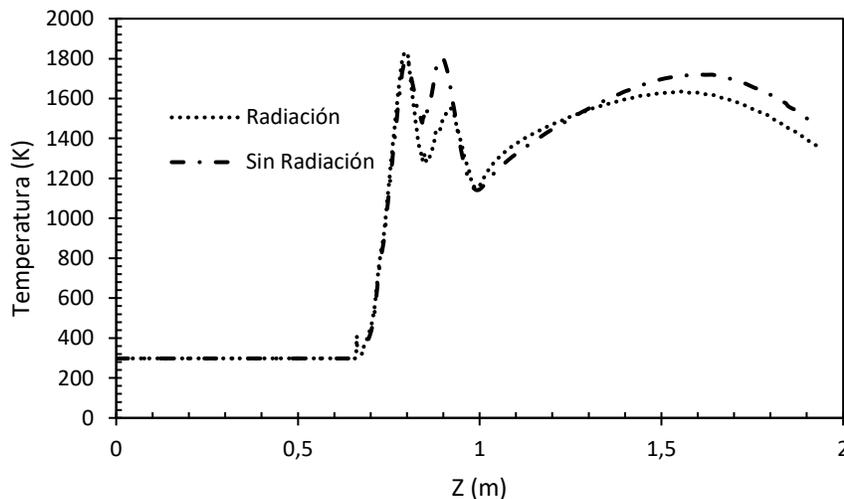
Finalmente, en la Figura 26 se presenta el perfil de temperatura obtenido para el sistema, en donde se evidencia como mediante la combustión se produciendo el calentamiento paulatino del aire en exceso y el cual, una vez caliente, representa la mayor carga de secado.



*Figura 26. Perfil de temperatura en cámara de combustión*

### 5.1.2. Efecto de la radiación en la cámara de combustión

Para evaluar el efecto de la radiación, se realiza la simulación sin considerar la misma y de forma comparativa se evalúa como cambia la temperatura a lo largo del cuerpo de la cámara de combustión, específicamente sobre el eje central del quemador, así pues se obtiene la Figura 27.

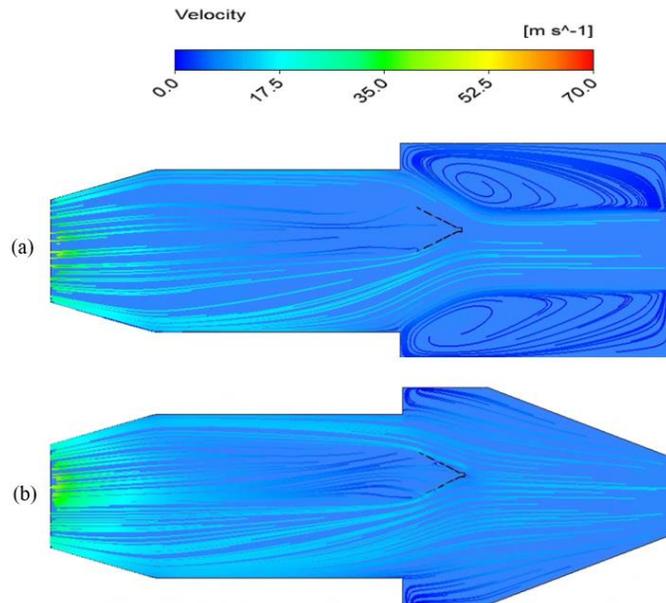


*Figura 27. Perfil de temperatura a lo largo de la cámara de combustión con radiación vs sin radiación.*

Aunque la diferencia encontrada entre el proceso considerando la radiación y el que no lo considera no es tan marcada, es importante destacar que la tendencia es que en términos de temperatura se mantenga superior la que no la considera, dado que para este caso la radiación está siendo directamente proporcional a las pérdidas energéticas en el sistema, lo cual va de la mano con las elevadas temperaturas de operación. Así pues se considera la radiación como un mecanismo importante en el sistema de interés, ya que permite tener resultados más precisos al considerar las transferencias energéticas radiativas.

### 5.1.3. Evaluación numérica de la modificación a la cámara de combustión, comparativa de eficiencia y su potencial efecto sobre el sistema de secado real

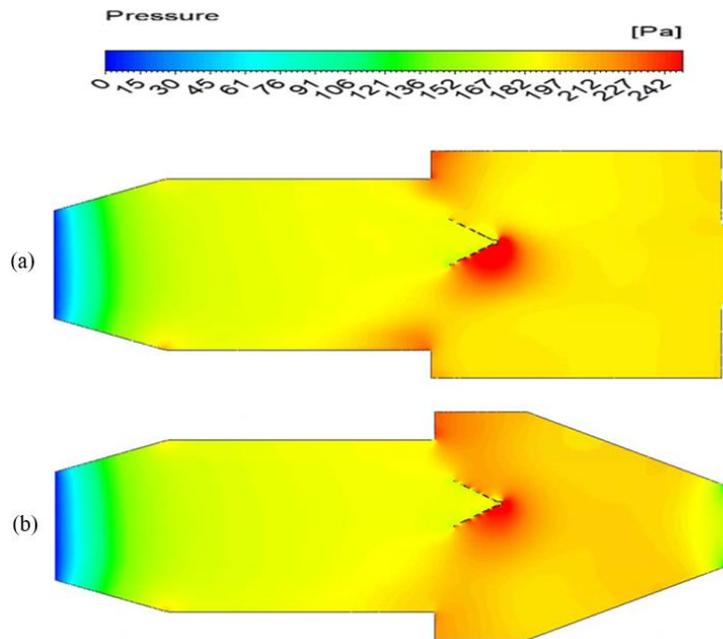
Considerando lo encontrado en la sección 5.1.1 se procede a evaluar la cámara de combustión modificada en donde en primera instancia se encuentra las líneas de corriente de velocidad presentadas en la Figura 28.



**Figura 28.** Líneas de corriente para velocidad. (a) cámara de combustión original, (b) cámara de combustión modificada

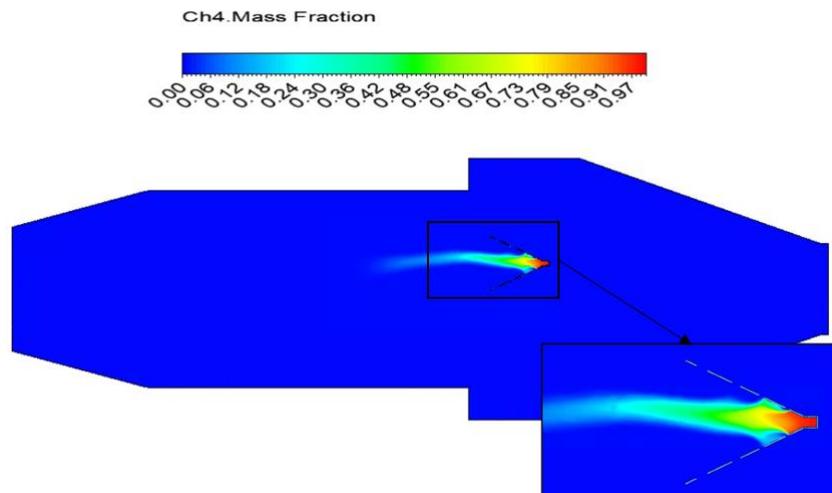
Como se puede apreciar, la modificación planteada elimina casi que completamente la zona de recirculación esto en principio genera un incremento en la velocidad del gas a la salida de la cámara de combustión y como se verá más adelante este cambio en la fluidodinámica tiene un efecto considerable en la eficiencia del sistema.

Ahora bien, en términos de presión, se visualiza en la Figura 29 una mejor distribución de las cargas de presión en el sistema y no una caída netamente localizada como es el caso de la geometría original, sin embargo, en este caso el hecho de que el quemador se encuentra en el centro de la geometría continua generando pérdidas energéticas al sistema, que aunque se evidencia una mejora, esta no es suficiente.

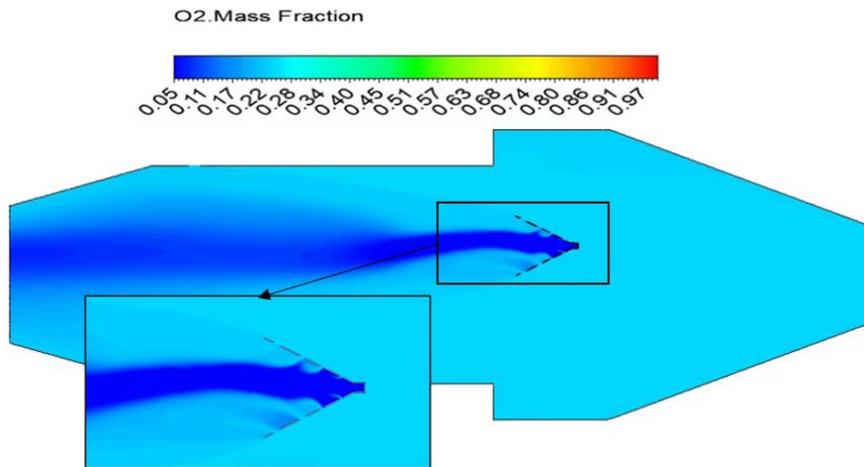


**Figura 29.** Perfil de presión. (a) cámara de combustión original, (b) cámara de combustión modificada

Así mismo en las figuras Figura 30 y Figura 31, se presentan los perfiles para la fracción másica de  $\text{CH}_4$  y  $\text{O}_2$ , en donde se evidencia una mayor uniformidad en el ingreso del aire a la zona de combustión, así como una reacción geoméricamente más centrada, ayudando a que el aire en exceso se caliente con una mayor homogeneidad, así mismo se evidencia la ruptura de la zona de recirculación (Figura 31).

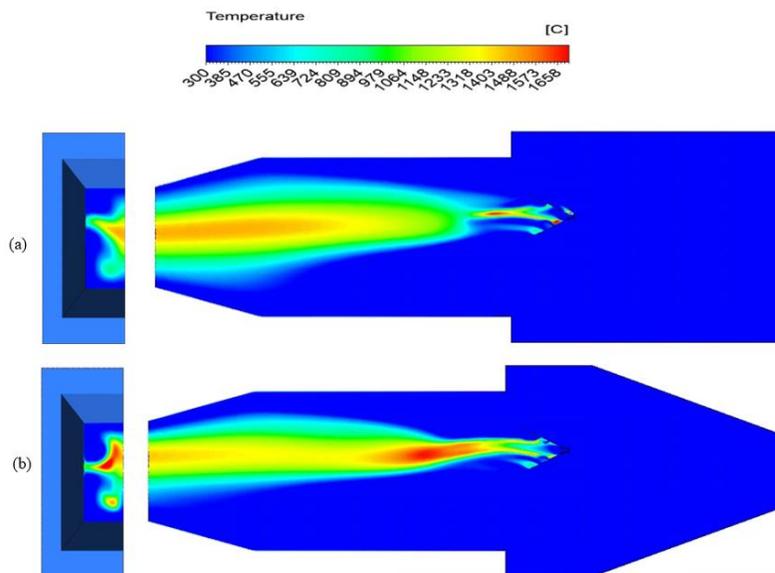


**Figura 30.** Perfil de fracción  $\text{CH}_4$  en cámara de combustión modificada



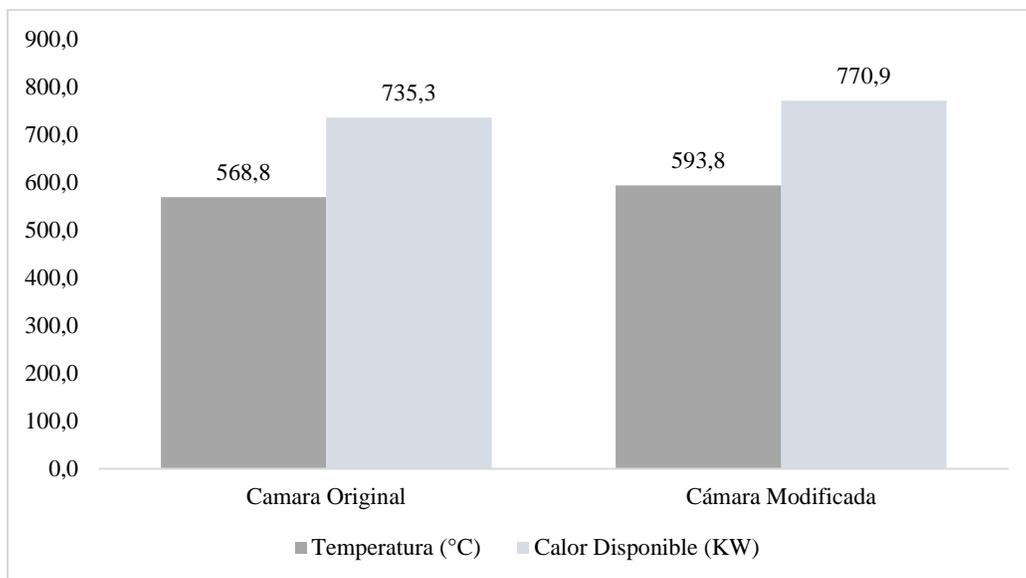
**Figura 31.** Perfil de fracción  $O_2$  en cámara de combustión modificada

Finalmente, para el perfil de temperatura se presenta la Figura 32, en donde se puede evidenciar un incremento importante en la temperatura de salida del sistema lo que contribuye directamente a un proceso con menores pérdidas energéticas.



**Figura 32.** Perfil de temperatura. (a) cámara de combustión original, (b) cámara de combustión modificada

Llevando lo expresado en la Figura 32 a valores numéricos se encuentran las temperaturas y disponibilidades energéticas presentas en la Figura 33, las cuales son calculadas para la salida de cada geometría, de aquí se destaca que el incremento en la temperatura fue del 4.4% mientras el incremento en la disponibilidad energética fue del 4.8%.



**Figura 33.** Temperatura y disponibilidad energética para la cámara de combustión original y modificada

A partir de estos resultados, y con la eficiencia definida por la ecuación 1, es posible encontrar que para la cámara combustión original la eficiencia está siendo del 73.6% y para la cámara de combustión modificada del 70.2%, esta disminución es debida a que la disponibilidad energética incrementa y la energía requerida se mantiene constante, ahora bien para igualar nuevamente esta eficiencia es posible reducir el suministro de gas natural de 49 Kg/hr a 46.6 kg/hr, lo que ocasiona un ahorro anual de 19 Ton de gas natural, o lo que es equivalente a un ahorro de \$23 Millones COP y una reducción de 52 Ton de CO<sub>2</sub> Equivalente. Así pues, determinando la eficiencia respecto al gas natural para la cámara de combustión original se tiene un valor de 77.1% mientras que para la cámara de combustión modificada del 80.1%.

#### 5.1.4. Comparativa de producción de NO<sub>x</sub> mediante análisis de post procesamiento vs mediciones realizas

Mediante el post procesamiento de fluent se estima la producción de NO<sub>x</sub> tanto para la cámara de combustión original, como para la cámara de combustión modificada, los resultados de esto se presentan en la Tabla 19.

**Tabla 19.** Estimación NO<sub>x</sub> para simulaciones en cámara de combustión

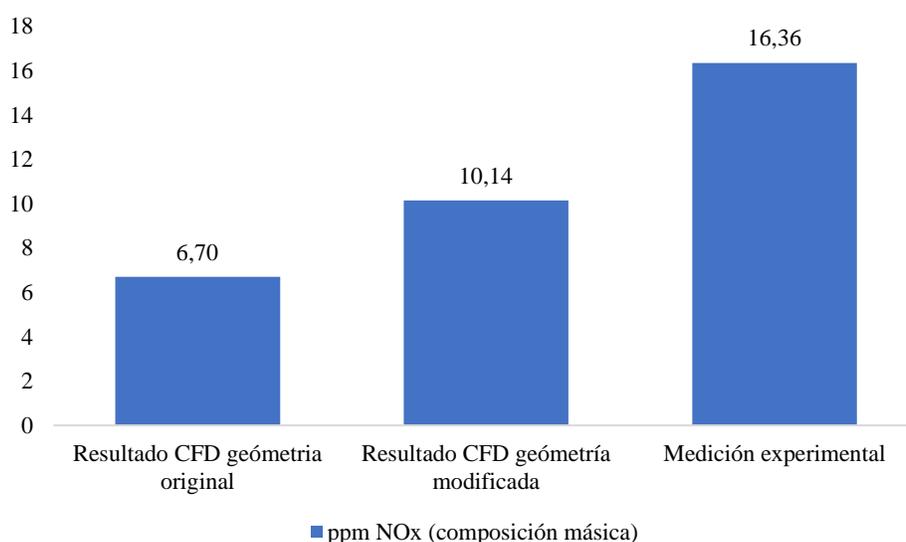
Descripción	Fracción másica NO (ppm)	Fracción másica N <sub>2</sub> O (ppm)	Flujo NO (kg/hr)	Flujo N <sub>2</sub> O (kg/hr)
Cámara de combustión original	6.7	0.01	0.036	4.52E-05
Cámara de combustión modificada	10.1	0.02	0.054	9.62E-04

Adicionalmente a esto, se cuenta con una medición real realizada al equipo, la cual se presenta en la Tabla 20.

**Tabla 20.** Medición isocinética de NOx en la chimenea del secador

Proceso	Contaminante	Emisión			Estándar de emisión (mg/m <sup>3</sup> )	Inferior o superior al estándar
		mg/m <sup>3</sup>	U mg/m <sup>3</sup>	Kg/h		
SECADO	Material Particulado (MP)	6.35	± 0.16	2.59E-02	250	Inferior
	Óxidos de Nitrógeno (NOx)	19.54	± 2.70	8.69E-02	550	Inferior

Así pues, de forma comparativa se obtienen los valores presentados en la Figura 34, de los cuales es posible concluir una adecuada predicción y más considerando los órdenes de magnitud trabajados. Por lo que de acuerdo con esto es necesario prestarle atención a la producción de NOx realizando el cambio en la cámara de combustión, sin embargo, aunque incremente el doble en su magnitud seguirá estando dentro de los límites permitidos.



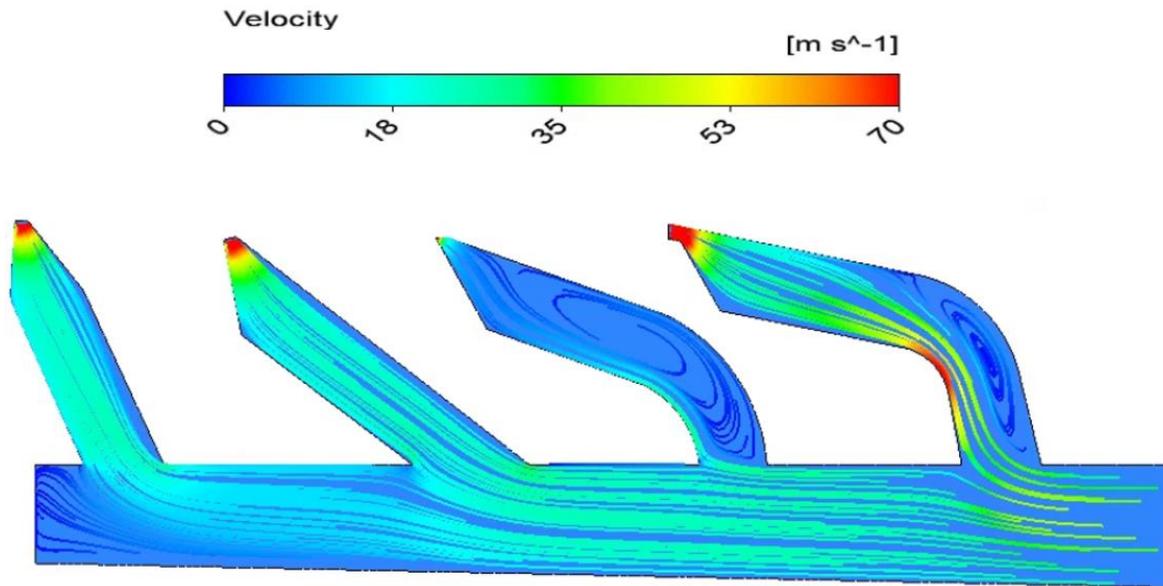
**Figura 34.** Ppm NOx (composición másica), determinados en la chimenea del secador

## 5.2. Resultados numéricos para el manifold

Los resultados numéricos obtenidos para la generación del chorro térmico en la zona del Manifold se presentan de forma tal que evidencia el funcionamiento actual del sistema, enfatizando oportunidades de mejora, planteamiento de las mismas y evaluación de las diferentes combinaciones de oportunidades de mejora generadas.

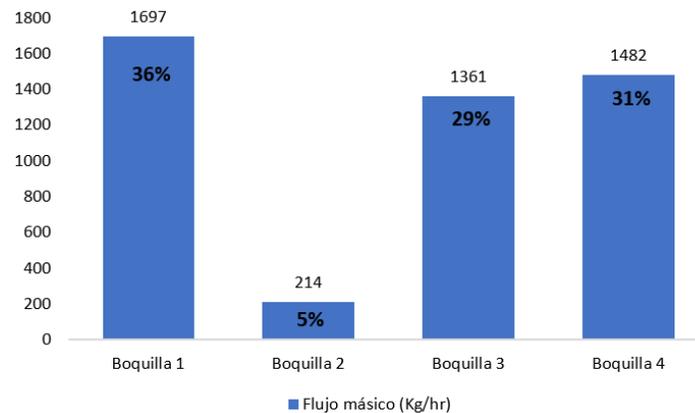
### 5.2.1. Análisis de resultados sobre perfiles obtenidos y planteamiento de propuesta de modificación

En la Figura 35 se presenta las líneas de corriente para la velocidad en el manifold.



**Figura 35.** Líneas de corriente para velocidad, en manifold

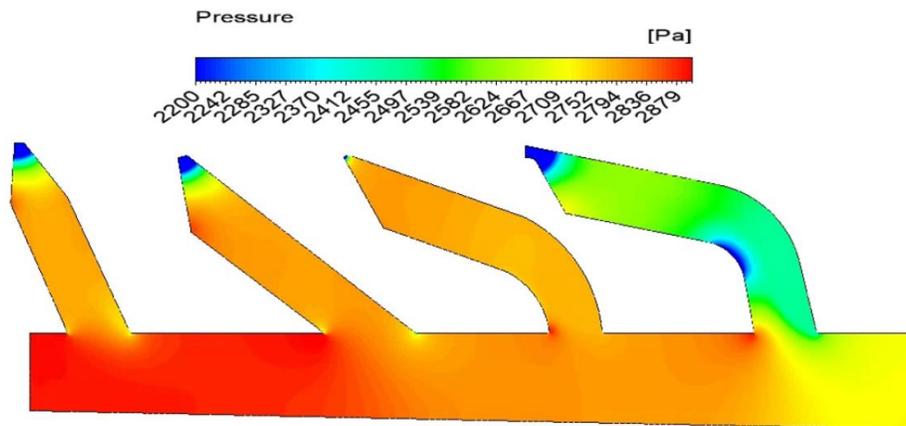
Aquí es posible evidenciar en primera instancia que la boquilla numero 2 (Contando de derecha a izquierda) presenta leves contornos de velocidad, lo indica en primera instancia que el flujo de material caliente que pasa por la misma es mínimo, lo cual es validado mediante el resultado de la Figura 36 en donde se presentan los flujos máxicos que salen de cada una de las boquillas y que proporción es respecto al flujo total; en segunda instancia se evidencia un punto de recirculación en la parte final de la zona inferior del manifold, lo que normalmente no es adecuado para este tipo de sistemas, por lo que contrastando esto con la información encontrada en la literatura, como se mencionó anteriormente, la reducción en la sección inferior debe ser mayor que la de la geometría original, siendo así se plantea una reducción de un 30% para esta zona y los resultados encontrados se describen en la sección 5.2.3.



**Figura 36.** Distribución de flujo másico por cada boquilla del manifold

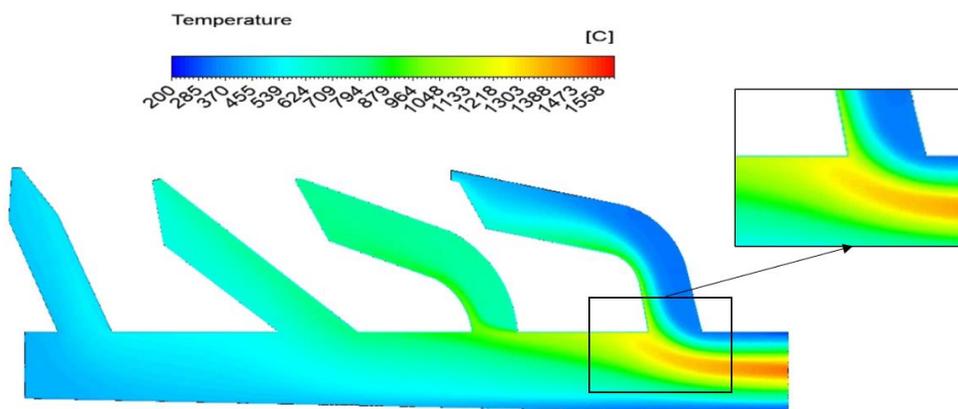
Como se aprecia únicamente el 5% del flujo másico sale por la boquilla número 2, lo que cuestiona enormemente el diseño del sistema y definitivamente plantea la necesidad de modificación.

Ahora bien, respecto al perfil de presión, que se tiene en la Figura 37, es posible observar que se generan zonas de concentración de presión en la parte de distribución del manifold lo que promueve aún más la modificación geométrica del sistema.



*Figura 37. Perfil de presión (Pa) para el manifold*

Finalmente, en la Figura 38 se presenta el perfil de temperatura obtenido para el sistema, en donde es de particular interés la forma en que la zona de mayor temperatura termina descargando directamente sobre las paredes del sistema ocasionando una concentración de pérdidas energéticas.

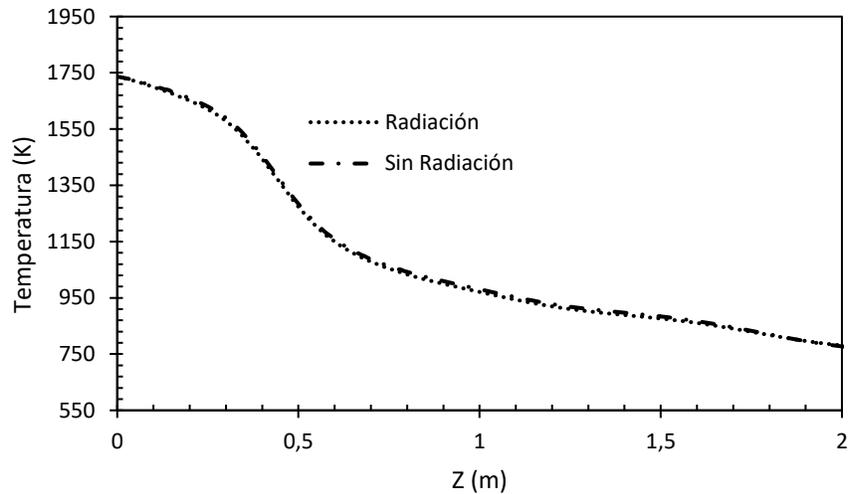


*Figura 38. Perfil de temperatura en manifold*

Así pues, por las diferentes razones expuestas a lo largo de esta sección es posible afirmar que el diseño del manifold, en la que se presenta la generación del chorro térmico es bastante ineficiente por lo que para futuras investigaciones se debe generar una geometría que presente una alta eficiencia y disminuya las pérdidas energéticas.

### **5.2.2. Efecto de la radiación en el manifold**

El efecto de la radiación para el Manifold se evaluó de la misma forma ya presentada, así pues se obtiene la Figura 39.

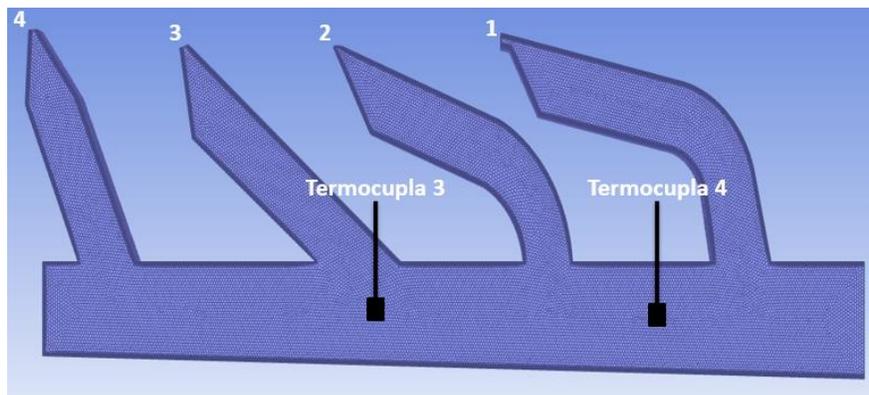


**Figura 39.** Perfil de temperatura a lo largo del manifold con radiación vs sin radiación.

En este caso no se encuentra diferencia significativa, por lo que se podría asumir que en principio la radiación no es considerable en el Manifold, pues están predominando mayormente los otros mecanismos de transferencia de calor presentes en el proceso.

### 5.2.3. Validación de los resultados obtenidos de manera numérica mediante la comparación de temperatura de proceso medidas y los resultados numéricos

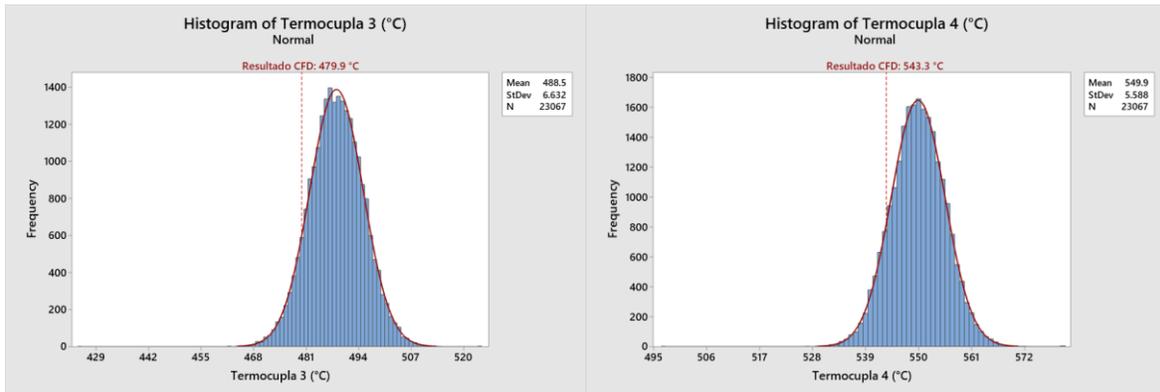
La validación de resultados se realizó mediante comparación directa entre los resultados de la simulación y valores medidos por termocuplas dentro del sistema, en la Figura 40, es posible ubicar la zona en las que se encuentran estas. La recolección de datos del secador real se llevó a cabo durante 3 horas en operación estable.



**Figura 40.** Ubicación termocuplas para el sistema real.

Con esto, se procede a realizar una comparación entre la estadística de datos recopilados por las termocuplas y el valor promediado de la temperatura obtenida de la simulación en la zona donde se encuentran ubicadas físicamente las termocuplas, con esto se construye la Figura 41, en donde bajo

la comparación de estos resultados, se concluye que las suposiciones y métodos utilizados para simulación CFD fueron acertados.

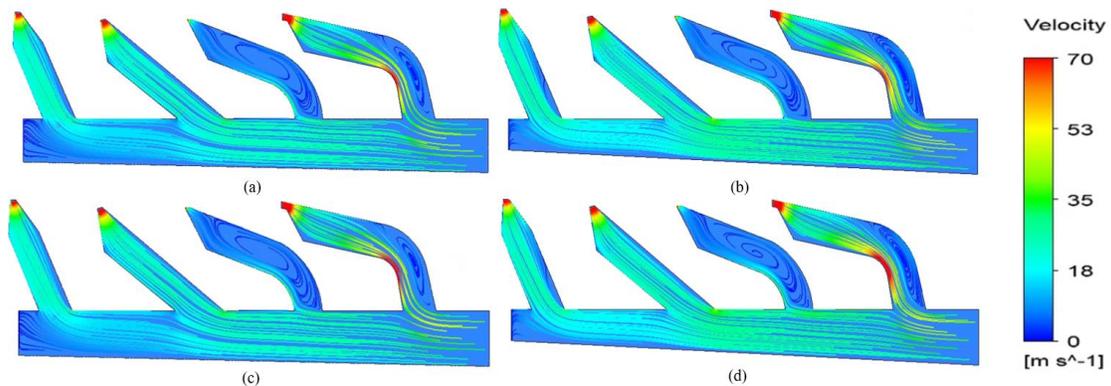


**Figura 41.** Comparativa de resultados Termocupla 3 y 4 vs resultado simulación CFD

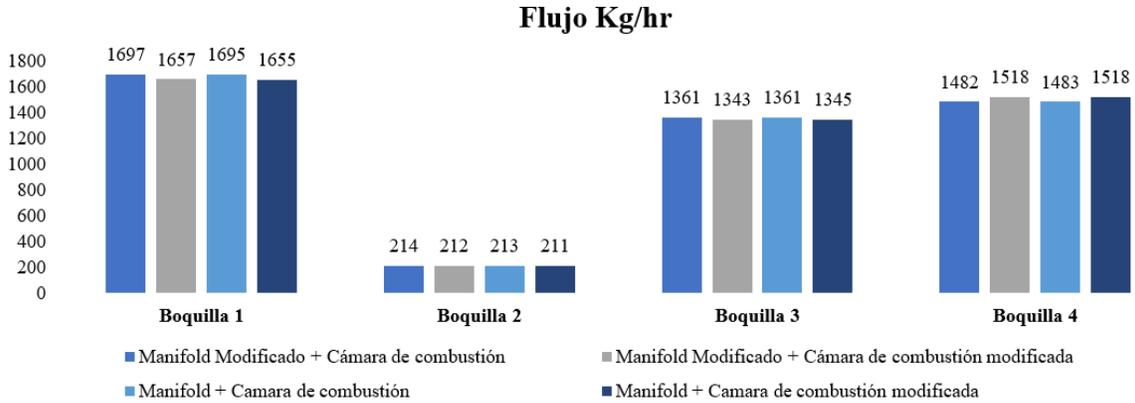
### 5.2.4. Evaluación numérica de las diferentes combinaciones de modificación planteadas y su efecto sobre el sistema de secado

Evaluando la modificación descrita para el manifold y de forma general, realizando un comparativo para las diferentes combinaciones obtenidas de la modificación (1. Cámara de combustión original + Manifold Original, 2. Cámara de combustión original + Manifold Modificado, 3. Cámara de combustión modificada + Manifold Original, 4. Cámara de combustión modificada + Manifold modificado) es posible realizar el siguiente análisis de resultados.

En la Figura 42, se presentan las líneas de corriente de velocidad para cada una de las combinaciones, en donde se encuentra que este cambio no ocasiona un movimiento significativo en la proporción de flujo que lleva cada boquilla (Ver Figura 43), incluso si se compara directamente la combinación en la que se tiene la cámara de combustión original y el manifold modificado, se tiene que la distribución por la boquilla 2, continua siendo del 5%, ahora bien con la modificación del manifold es posible evidenciar como disminuye la recirculación que se encuentra al final de la parte inferior de la geometría, sin embargo esta no se abole completamente, lo que indica que es necesario reducir aún más esta sección.



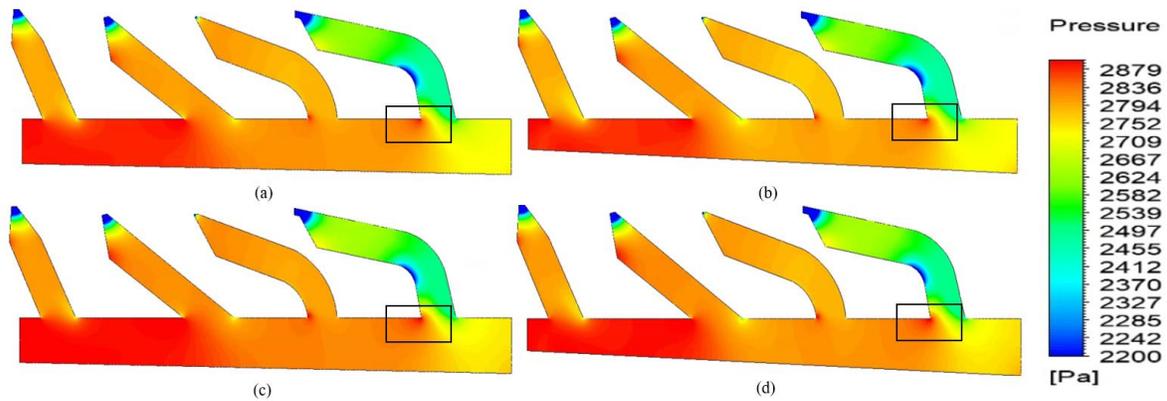
**Figura 42.** Líneas de contorno de velocidad. (a) Cámara de combustión original + manifold original, (b) Cámara de combustión original + manifold modificado, (c) Cámara de combustión modificada + manifold original, (d) Cámara de combustión modificada + manifold modificado



**Figura 43.** Flujo másico por cada boquilla para cada configuración

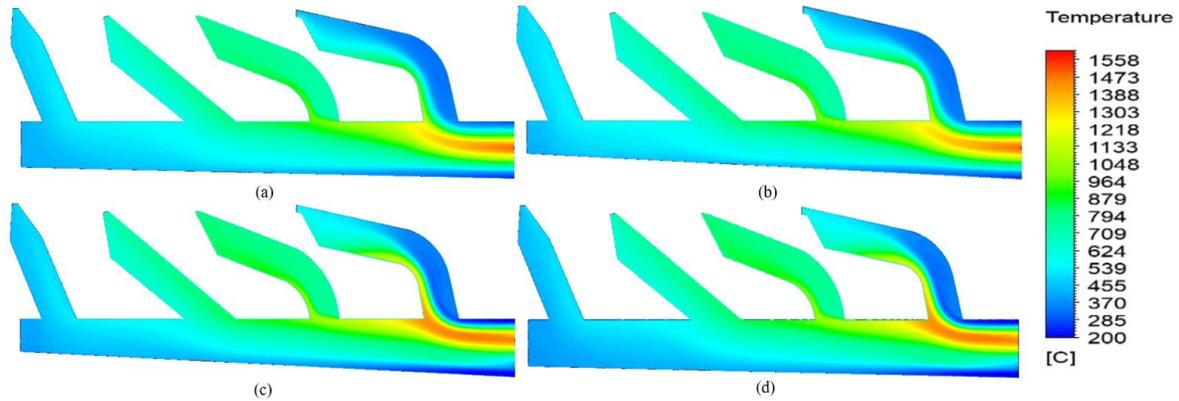
Ahora bien, en el caso de la presión se encuentra el comportamiento evidenciado por la Figura 44, para el cual se encuentra que en los casos en los que se tiene la cámara de combustión modificada la concentración de presión que se tiene en la primera boquilla es más grande (Ver recuadros encerrados) que, en los otros casos, por lo que seguramente la pérdida energética será mayor, esto se evaluará más adelante.

Por otro lado, respecto a la modificación en el manifold no se encuentran cambios significativos que contribuyan con la uniformidad en la presión para la zona de distribución por lo que al parecer la reducción de un 30% en la sección no es aún significativa.



**Figura 44.** Perfil de presión. (a) Cámara de combustión original + manifold Original, (b) Cámara de combustión original + manifold modificado, (c) Cámara de combustión modificada + manifold Original, (d) Cámara de combustión modificada + manifold modificado

Finalmente en el caso de la temperatura (Figura 45), se evidencia lo mismo comentado para el caso de la presión (Ver Figura 44), en los casos para los cuales la cámara de combustión esta modificada, se tiene una concentración de energía para los valores más altos de temperatura que causan una mayor pérdida energética, por lo que seguramente parte de la eficiencia ganada con la modificación en la cámara de combustión se perderá por la inadecuada geometría del manifold.



**Figura 45.** Perfil de temperatura. (a) Cámara de combustión original + manifold Original, (b) Cámara de combustión original + Manifold Modificado, (c) Cámara de combustión modificada + manifold Original, (d) Cámara de combustión modificada + manifold modificado

Así pues, es posible evidenciar que la modificación en la cámara de combustión tiene una influencia importante tanto en la cámara como en el manifold, así mismo se evidencia que la modificación en el Manifold no genera cambios significativos, por lo que se concluye que la modificación a realizar debe ser más extrema que la evaluada en este trabajo de investigación (Disminución de sección mayor al 30%). Finalmente se evidencia como un análisis fluidodinámico ahorra como resultados una importante influencia energética y que, dependiendo de esto, las pérdidas energéticas pueden ser mayores o menores.

### 5.2.5. Análisis de la eficiencia de secado para este tipo de sistema.

Para determinar la eficiencia térmica respecto al material que es entregado por el Manifold se promedia inicialmente las temperaturas de salida de cada boquilla (Tabla 21), seguido de esto se determina la potencia disponible para cada boquilla y la total (Tabla 22).

**Tabla 21.** Temperaturas ( $^{\circ}\text{C}$ ) en la salida de cada boquilla para las diferentes combinaciones

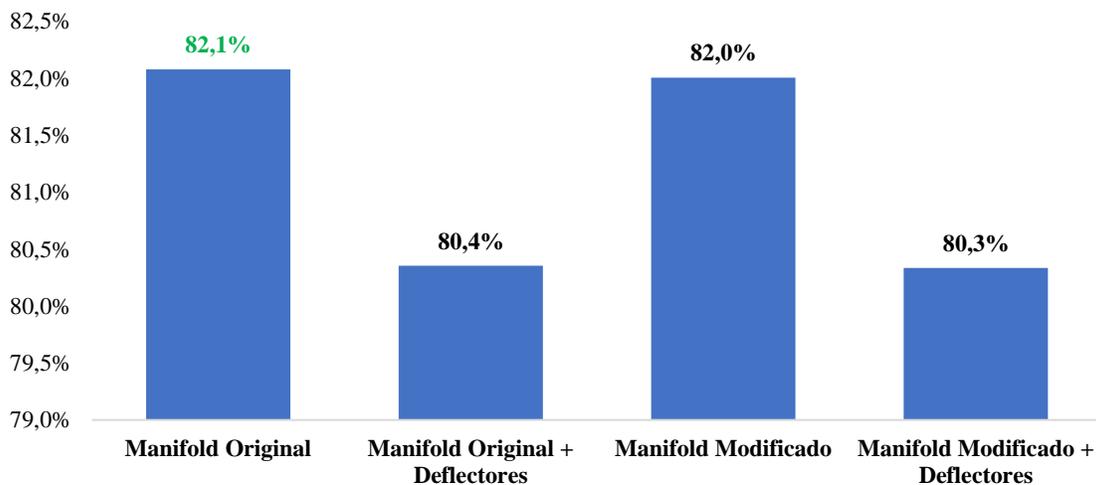
Combinación	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )			
	Boquilla 1	Boquilla 2	Boquilla 3	Boquilla 4
Manifold Original + Cámara de combustión original	437.0	747.40	596.48	460.17
Manifold Original + Cámara de combustión modificada	473.4	778.45	624.10	430.05
Manifold Modificado + Cámara de combustión original	437.2	749.88	597.96	459.85
Manifold Modificado + Cámara de combustión modificada	473.8	777.67	623.64	430.20

**Tabla 22.** Potencia disponible (kW) en la salida de cada boquilla para las diferentes combinaciones

Combinación	Potencia Disponible (kW)				Total
	Boquilla 1	Boquilla 2	Boquilla 3	Boquilla 4	
Manifold Original + Cámara de combustión original	200.8	45.8	227.0	185.7	<b>659.3</b>
Manifold Original + Cámara de combustión modificada	214.2	47.4	235.5	176.5	<b>673.5</b>
Manifold Modificado + Cámara de combustión original	200.7	45.8	227.7	185.6	<b>659.9</b>
Manifold Modificado + Cámara de combustión modificada	214.2	47.2	235.6	176.6	<b>673.6</b>

Con esta información, se construye la Figura 46, en donde se plasman las eficiencias calculadas mediante la ecuación 1. Las eficiencias determinadas en este punto corresponden con las reportadas en la literatura, que como se vio se encuentran entre el 80 – 85%, por lo que a partir de esto es posible concluir que el secador centrífugo evaluado presenta una eficiencia dentro del rango de las tecnologías convencionales de secado, pero no sobresale particularmente.

Es posible reducir el consumo de gas natural de 49 kg/hr a 47.9 kg/hr para igualar la eficiencia con la cámara de combustión modificada, esto trae un reducción de 8.5 Ton/año de gas natural, lo que es equivalente a \$ 10.5 Millones COP, y 23 Ton de CO<sub>2</sub> Equivalente. Ahora bien, respecto a la eficiencia en términos de gas natural se pasaría de un valor de 77.1% a 78.8%.



**Figura 46.** Eficiencias térmicas para cada una de las combinaciones evaluadas con base a la ecuación 1.

Ahora bien, como se puede apreciar cuando se hace el análisis del efecto de la cámara de combustión modificada en la sección 5.1.3 se obtiene un ahorro energético superior que el que se está encontrando en esta sección, esto es debido a que como indica la Tabla 23 se está desperdiciando una cantidad de energía mayor en el Manifold cuando se tiene la cámara de combustión modificada vs la original, de acuerdo con el balance de energía. Esto se explica considerando la concentración de pérdida de calor

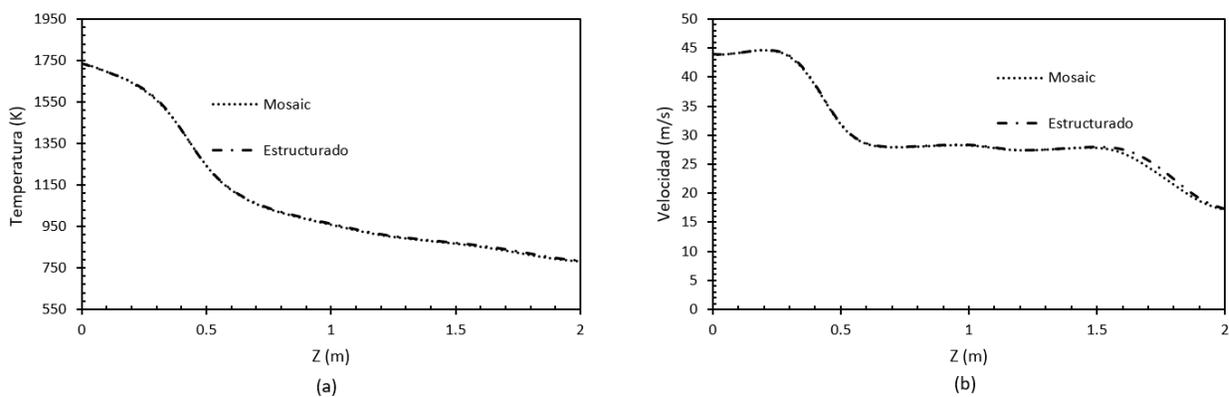
que se está teniendo (ver Figura 45) en el Manifold, cerca de la primer boquilla siempre que se evalúa la cámara de combustión modificada tanto para el Manifold original como el modificado, de acuerdo con esto y los demás resultados mostrados a lo largo de la sección 5.2 se concluye que un diseño adecuado del Manifold permitirá tener una eficiencia energética superior con importantes ahorros económicos así como de CO<sub>2</sub> equivalente lo que hace que la fluidodinámica juegue un papel determinante en el diseño de este tipo de sistemas.

**Tabla 23.** Potencia perdida (kW) debida al paso por el manifold

Combinación	kW Perdidos en Manifold
Manifold Original + Cámara de combustión original	75.9
Manifold Original + Cámara de combustión modificada	<b>97.5</b>
Manifold Modificado + Cámara de combustión original	75.4
Manifold Modificado + Cámara de combustión modificada	<b>97.3</b>

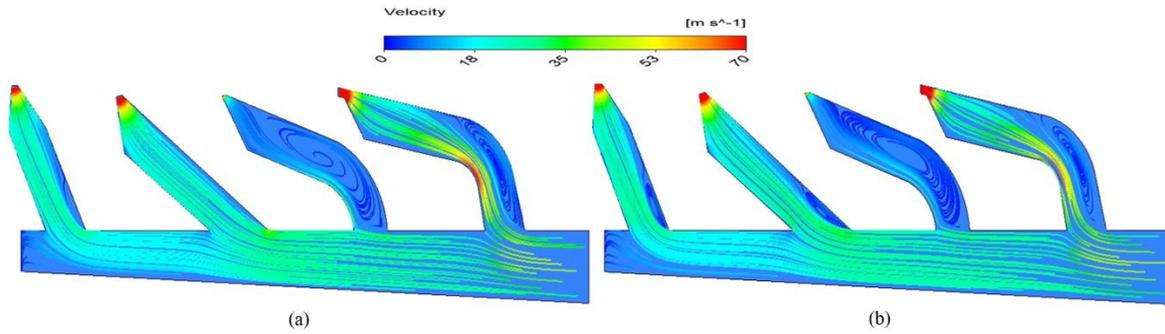
### 5.2.6. Comparativa de resultados para el manifold, mediante mallado convencional vs mallado con tecnología “Mosaic”

Con el fin de comparar la precisión del mallado correspondiente con la tecnología Mosaic de Ansys, se presentan los resultados comparativos entre una malla estructurada convencional y el mallado automático mediante esta tecnología para el manifold modificado con cámara de combustión original. En principio se presenta la Figura 47, en la cual se compara la temperatura y velocidad sobre el central de la parte inferior del manifold, como se puede observar las diferencias entre uno u otro son mínimas.

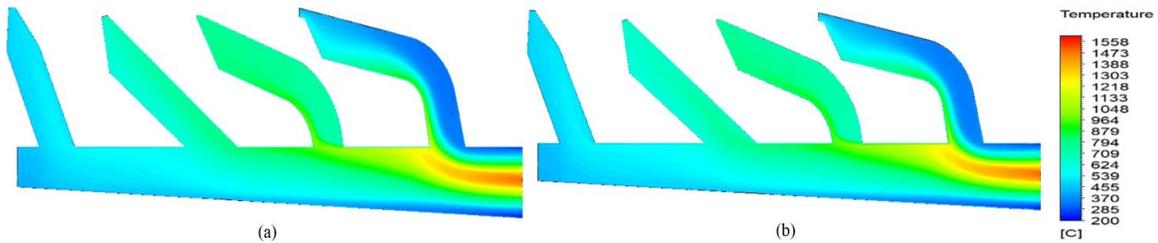


**Figura 47.** Comparativo entre temperatura (K), Velocidad (m/s) para mallado con Mosaic vs Estructurado.

En términos de los perfiles a lo largo de toda la geometría se construyen las gráficas Figura 48 y Figura 49, para la temperatura (°C) y la velocidad en (m/s) respectivamente; para esto se encuentran diferencias mínimas por lo que se considera que no hay diferencias significativas debidas al mallado.

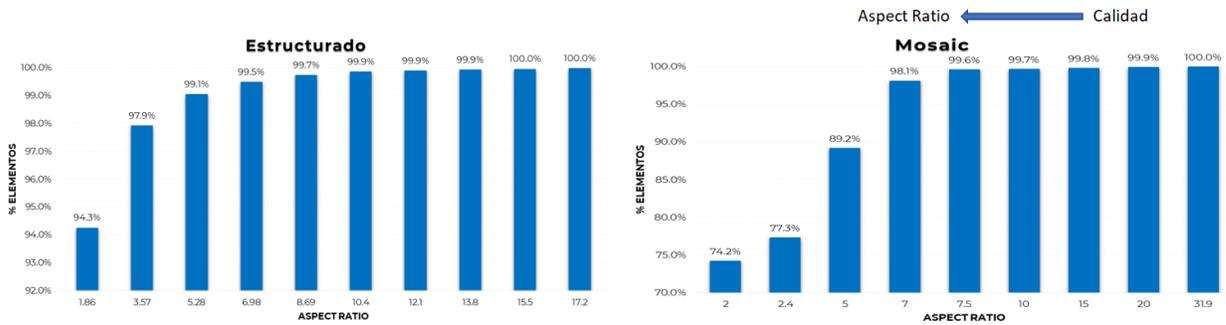


**Figura 48.** Líneas de contorno para la velocidad (m/s). (a) Mallado con Mosaic, (b) mallado estructurado.



**Figura 49.** Perfil de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ). (a) Mallado con Mosaic, (b) mallado estructurado.

El mallado estructurado requirió de una mayor cantidad de elementos para lograr su convergencia, por lo que realizando una comparación en términos de elementos, calidad, tiempo de simulación, tiempo de mallado, etc es posible construir la Figura 50 y la Tabla 24.



**Figura 50.** Relación cantidad de elementos – Calidad de mallado (Aspect Ratio). Estructurado vs Mosaic

**Tabla 24.** Comparativa mallado estructurado vs mosaic

Estructurado	Mosaic
2'001.031 Elementos	1'085.484 Elementos
2 horas – Tiempo de mallado	10 minutos – Tiempo de mallado
22 horas – Tiempo de simulación	8 horas – Tiempo de simulación
	45.8% menos elementos
	66% más rápido

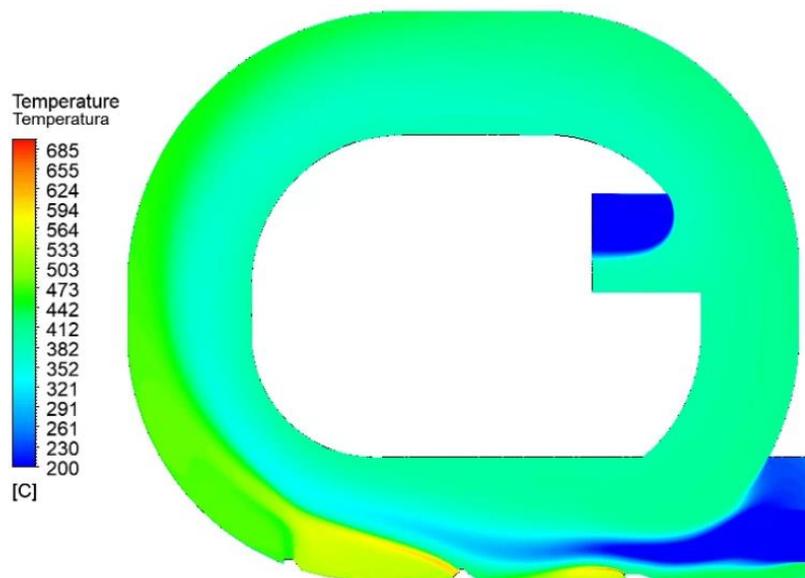
Con base a estos resultados y comparativas, es posible concluir que la malla estructurada presenta levemente una mejor calidad de mallado; Sin embargo, el mallado bajo la tecnología Mosaic presenta una serie de ventajas adicionales como una considerable menor cantidad de elementos, por lo tanto un costo computacional menor, así como tiempos de simulación y mallado menores, lo que lo convierte en una tecnología robusta y de gran interés para la simulación CFD de geometrías complejas.

### 5.3.Resultados Numéricos para zona de secado

Los resultados numéricos obtenidos para la zona de secado se presentan de forma tal que se evidencia la fluidodinámica de cada fase (gas – líquido – partículas) así como la forma en la que se realiza el secado, en donde es de particular interés la humedad final alcanzada.

#### 5.3.1. Análisis de resultados sobre perfiles obtenidos

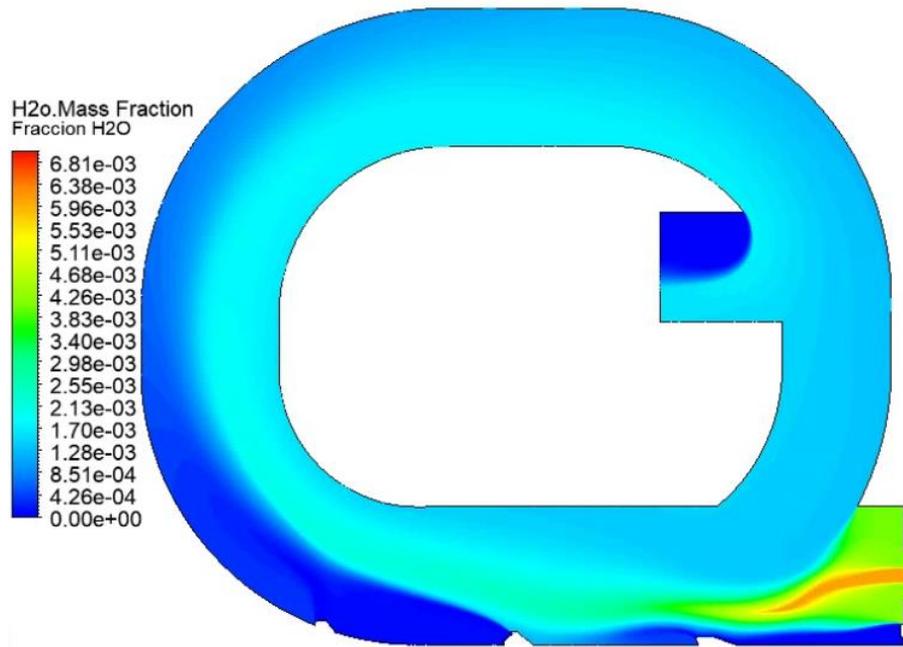
En la Figura 51 se presenta el contorno de temperatura obtenida en la zona de secado, en donde es posible apreciar como el aire caliente va transfiriendo la energía al chorro de carbonato de calcio en suspensión y en donde cada fase involucrada en el proceso va tomando una temperatura constante en la salida de 239.5 °C.



*Figura 51. Contorno de temperatura (°C) en la zona de secado*

Ahora bien, es posible evidenciar el proceso de secado mediante la evaluación del contorno de fracción de másica de agua líquida, presentado en la Figura 52, en este se observa principalmente dos situaciones de interés, la primera es que el proceso de secado se desarrolló principalmente en la zona donde están ubicadas las 3 primeras boquillas de aire caliente y la segunda el flujo de recirculación que se está teniendo en el sistema. Así pues, considerando que la boquilla # 2 está suministrando únicamente el 5% del flujo total de material secante, debido al diseño del Manifold (Ver Figura 36), se hace bastante interesante, pues de contar con un diseño más adecuado que permita una mejor fluidodinámica en el sistema, es posible que el proceso de secado mejore ostensiblemente dado que se esperaría que el tiempo de residencia medio disminuya lo que ocasiona que el material recirculante que retorna al inicio de la zona de secado disminuya, incurriendo así en una transferencia de calor

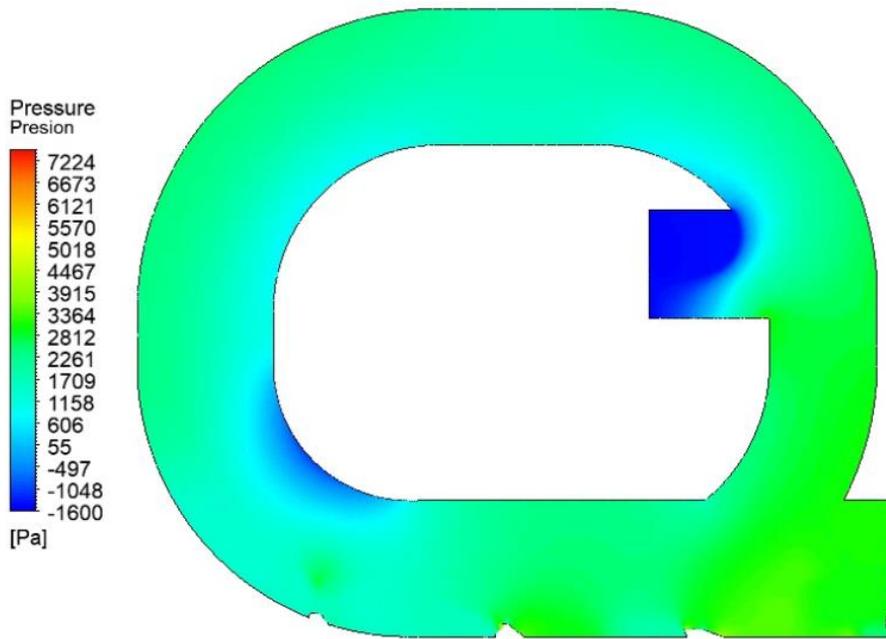
más eficaz provocando que sea posible una reducción de los kW consumidos o una aceptación de mayor material a secar.



**Figura 52.** Contorno de fracción másica de agua líquida en la zona de secado

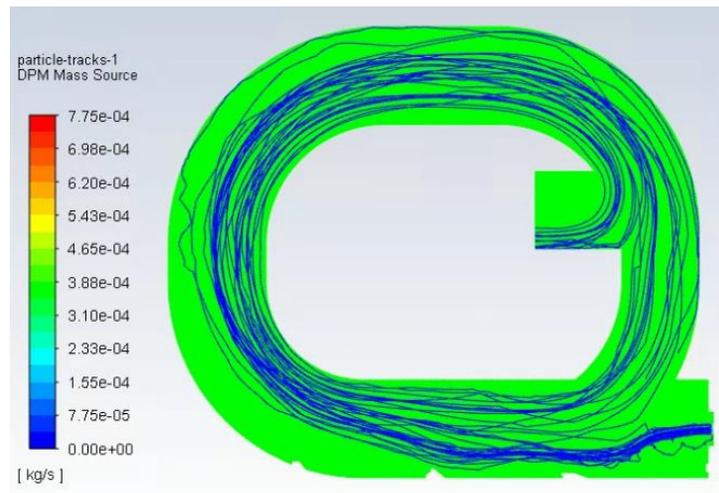
Con base a este resultado para la fracción másica encontrada, es posible determinar que a la salida la humedad es del 0.82% (Para este cálculo únicamente se considera el carbonato de calcio y el agua líquida).

Por otro lado, en la Figura 53, se presenta el contorno de presión a lo largo de la zona de secado, para el cual es evidente que sale material del equipo debido a que es arrastrado por la considerable presión negativa (o de succión) que se tiene en la salida. Esta situación se presenta debido a que las partículas que se encuentran más cerca de la salida son menos pesadas pues cuentan levemente con menos cantidad de agua, mientras que las partículas que se encuentran aún más húmedas tienden a irse a las paredes exteriores del sistema por la fuerza de arrastre presentada.

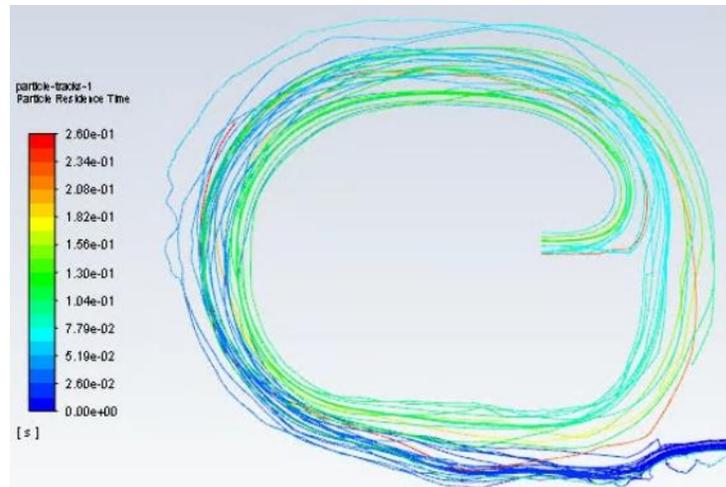


**Figura 53.** Contorno de presión (Pa) en la zona de secado

En las figuras Figura 54 y Figura 55. Tiempo de residencia medio (s) en la zona de secado se presenta la trayectoria de partículas y el tiempo de residencia respectivamente, en estos es gráficos es posible evidenciar de una forma más clara lo mencionado, y además ayudan a determinar el tiempo de residencia máximo, encontrando un valor de 0.25 s, y rata de recirculación que se está presentando en el sistema, 2.24 kg/s vs 1.98 kg/s como rata de salida del secador, lo que conlleva a que el material recirculado sea un 113% del material de salida.



**Figura 54.** Tracking de partículas (kg/s) en la zona de secado

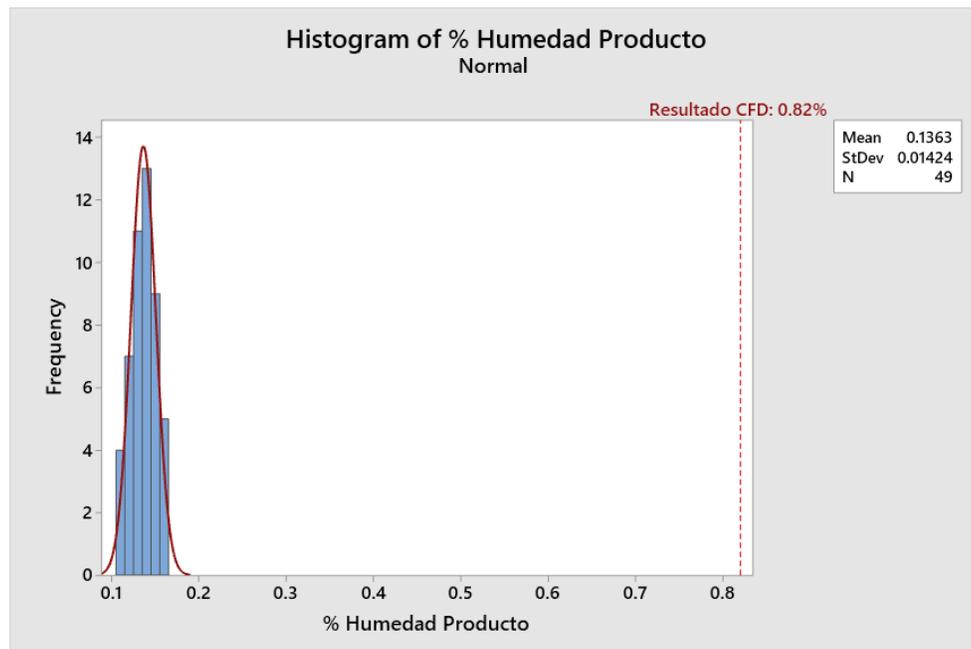


*Figura 55. Tiempo de residencia medio (s) en la zona de secado*

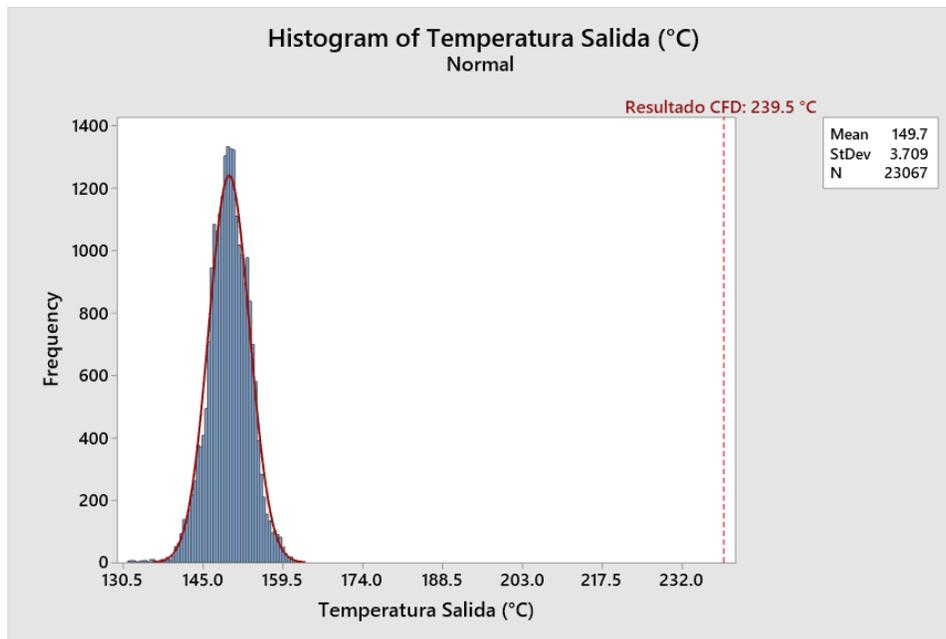
### 5.3.2. Validación de los resultados obtenidos de manera numérica mediante la comparación con parámetros medidos

La validación de resultados y comparación con el sistema de secado real se llevó a cabo mediante resultados históricos de la humedad del material seco de salida y mediciones tomadas de una termocupla que se encuentra a la salida del secador, no específicamente en la salida de la geometría simulada, pero con pérdidas de temperatura mínima entre uno y otro punto (Aproximadamente entre 10 – 15 °C), lo que para los fines comparativos aquí deseados es bastante válido.

Así pues, en la comparativa de humedad se encuentra lo presentado en la figura 56, mientras que la comparación para la temperatura se presenta en la figura 57.



*Figura 56. Comparativa % humedad de producto real vs simulada*



**Figura 57.** Comparativa Temperatura a la salida del secador, medida vs simulada

Como es posible apreciar en las dos figuras anteriores, se encuentra un desfase considerable entre la humedad del producto y la temperatura de salida para las mediciones realizadas vs los resultados obtenidos bajo la simulación CFD, con base a esto es posible concluir que el modelo planteado predice el comportamiento del sistema para la forma en que se realiza el proceso de secado, sin embargo no predice con exactitud los valores de proceso obtenidos. Ahora bien, de acuerdo con la temperatura de salida encontrada en la simulación CFD, indica que aun es posible realizar una transferencia de calor en el sistema que ocasione una reducción de esta misma temperatura así como una disminución en la humedad del producto simulada, de forma que los datos se aproximen más a las condiciones reales del sistema. Así pues, esto indicaría que el tiempo residencia que se esta teniendo en el sistema no es el suficiente para permitir que la transferencia de calor faltante se de por lo que para futuras investigaciones es necesario replantear el modelo que permita mejorar este tiempo de residencia y así ajustar aún más la simulación a las condiciones reales dele equipo.

## 6. CONCLUSIONES

Este trabajo evaluó de manera numérica un secador centrífugo para carbonato de calcio, con un tamaño de partícula entre 1 a 2  $\mu\text{m}$ , en suspensión acuosa con alto contenido de sólidos, igual al 75%, en donde el análisis considero la combustión del gas natural (trabajando con 702 kW de potencia con base al PCI) con aire, el calentamiento de aire en exceso y gases de combustión, la generación de chorro térmico y el proceso de secado como tal. Así pues, el análisis se definió en 3 secciones geométricas; análisis de cámara de combustión y quemador, análisis de manifold y análisis en zona de secado para los cuales se encontraron las siguientes conclusiones:

### Sección 1: Cámara de combustión y quemador

- Al evaluar la modificación realizada en la cámara de combustión se encuentra que esta contribuye con la eficiencia energética del sistema, pues ocasiona que la energía disponible para realizar el proceso de secado a la salida de la cámara de combustión incremente, por lo

cual es posible reducir el consumo de gas natural buscando igualar nuevamente la energía disponible para el secado. Con base a esto se encuentra una reducción del suministro de gas natural de 49 Kg/hr a 46.6 kg/hr, lo que se traduce en un ahorro anual de 19 Ton de gas natural, o lo que es un ahorro de \$23 Millones COP y una reducción de 52 Ton de CO<sub>2</sub> Equivalente. El incremento en eficiencia respecto al gas natural pasa de un valor de 77.1% a 80.1%.

- Al determinar el NO<sub>x</sub> mediante el post procesamiento de fluent para la cámara de combustión, y compararlo con las mediciones reales que se tienen, se encuentran resultados altamente favorables considerando los órdenes de magnitud (ppm), lo que hace que la simulación realizada sea bastante ajustada con la realidad. Ahora bien, de acuerdo con los resultados es claro que la llevar a cabo la modificación en la cámara de combustión, provocará un incremento en el NO<sub>x</sub>, el cual es explicado por el mecanismo de Zeldovich, el cual describe que las altas temperaturas promueven la producción de NO<sub>x</sub>.
- Respecto al efecto que tiene la radiación dentro de la cámara de combustión, se encuentra un efecto leve que contribuye principalmente a las pérdidas energéticas del sistema, es decir en el caso en el que no se considera la radiación la energía disponible y temperatura de salida de la cámara de combustión aumentan.

### **Sección 2: Manifold**

- Al evaluar el desempeño del Manifold original se encuentra que la concepción del diseño ocasiona que el flujo de aire caliente por la boquilla 2 sea bastante bajo en comparación con el que pasa a través de las demás boquillas, lo que ocasiona que la eficiencia de secado sea menor que la deseada pues como se vio en el análisis de la zona de secado, las primeras tres boquillas son las que más contribuyen al secado instantáneo.
- En la evaluación del manifold original también es posible evidenciar como en la zona de la segunda boquilla se forma una zona de concentración de energía que termina ocasionando una pérdida excesiva de energía disponible (ver Figura 38), con lo que se encuentra que la fluidodinámica del sistema juega un papel fundamental y está directamente asociada a la eficiencia energética del sistema, pues esta contribuye a que las pérdidas se minimicen o se magnifiquen.
- Al realizar una comparación entre la estadística de datos recopilados por las termocuplas del sistema real y el valor promediado de la temperatura obtenida de la simulación en la zona de comparación, se encuentran resultados similares, con lo que es posible concluir que las simplificaciones, suposiciones y métodos utilizados para el modelado de la cámara de combustión y Manifold, fueron los adecuados y permiten tener una simulación CFD que refleja el comportamiento real del equipo.
- Para el caso del manifold, se tiene que el efecto de la radiación no es tan marcado, incluso se tienen mínimas diferencias dentro del perfil de temperatura, lo cual corresponde con el efecto de la radiación se magnifica a mayores temperaturas, dada su dependencia de la temperatura absoluta a la cuarta potencia ( $T^4$ ), como en el caso de la cámara de combustión. Por lo que en este caso de estudio domina la transferencia de calor por convección.
- Respecto a la eficiencia de secado calculada para el manifold (Ver ecuación 1) se obtiene que esta se encuentra dentro del rango de eficiencias (80 – 85%) reportadas en la literatura para este tipo de sistemas y para los sistemas de secado convencional en general, sin embargo, la trabajada en este trabajo de investigación no es la más eficiente.
- Respecto a la fluidodinámica del manifold se concluye que esta, está afectando negativamente la eficiencia del sistema por lo que se debe plantear una modificación de la

misma o un refuerzo en las chaquetas aislantes de forma que no se permita una pérdida excesiva de energía en las zonas en las que esta se está concentrando.

- Al evaluar la modificación planteada para el manifold y las diferentes configuraciones cámara de combustión – manifold, se encuentra que la modificación planteada en la cámara de combustión tiene un efecto positivo para ambas zonas, mientras que la modificación en el manifold no presenta una mejora relevante, ni cambio significativo de forma general; bajo esto para próximas investigaciones se recomienda evaluar el efecto que tiene una reducción más extrema de la sección evaluada y realizar cambios en las boquillas del sistema, buscando una mejor distribución de cargas por cada boquilla y una presión constante en la zona de ingreso a cada una de las boquillas.

### **Sección 3: Zona de secado**

- Al evaluar la zona de secado se encuentra una adecuada fluidodinámica para el sistema que corresponde con la seguida por el sistema real, frente a los parámetros a considerar en el sistema se encuentra una importante dependencia de la presión de succión a la salida del secador, pues esta modifica directamente el tiempo de residencia medio y por lo tanto la humedad final del proceso.
- Se encuentra que el proceso de secado instantáneo ocurre entre las 3 primeras boquillas de ingreso de aire caliente, lo que genera nuevamente la necesidad de corregir el diseño del manifold y mejorar aún más la eficiencia energética.
- Frente a la comparativa de resultados con valores medidos para la temperatura y humedad final del producto se encuentra que la simulación CFD difiere considerablemente de los resultados del sistema real, lo que como se vio es influenciado por el tiempo de residencia en el equipo, ya que esto no está permitiendo que se termine de dar la transferencia de calor requerida por el sistema que permita alcanzar valores más cercanos a las condiciones reales, lo que hace necesario el replanteamiento de los modelos utilizados para esta zona específica.

Ahora bien, de forma general para la combinación del sistema es posible concluir que:

- La tecnología de mallado Mosaic de Ansys es una herramienta bastante robusta que permite realizar el mallado de geometrías complejas rápidamente y que adicionalmente produce menores tiempos de simulación y menores costos computacionales; esto se evidencia de forma general a lo largo de este trabajo de investigación.
- En este trabajo de investigación se presenta de forma general como cada parte del sistema influye en el otro pues ganancias o mejoras que se puedan realizar quedan supeditadas al comportamiento de las demás, por lo que realizar este tipo de análisis de forma integral es bastante beneficioso para el sistema de interés
- Este trabajo de investigación muestra la importancia de realizar un adecuado diseño de las componentes del sistema de secado, pues están pueden ocasionar una mejora energética del sistema o un incremento de las ineficiencias del sistema, así mismo muestra como mediante simulación CFD se pueden obtener resultados interesantes de los sistemas reales y mediante los cuales sea posible la optimización o modificaciones del sistema de forma bastante acertada.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Y. Martinez, “Carbonato de calcio: un mineral polifuncional > Cuba > Granma - Órgano oficial del PCC,” Nov. 02, 2014. <http://www.granma.cu/cuba/2014-11-02/carbonato-de-calcio-un-mineral-polifuncional> (accessed Apr. 13, 2020).
- [2] “El consumo mundial de carbonatos de calcio (GCC) y carbonatos de calcio precipitados (PCC) || Cales de Llierca.” <https://www.calesdellierca.com/es/el-consumo-mundial-de-carbonatos-de-calcio-gcc-y-carbonatos-de-calcio-precipitados-pcc/> (accessed Apr. 13, 2020).
- [3] Agencia Nacional de Minería, “Calizas,” 2017, [Online]. Available: <http://www.anm.gov.co/?q=regalias-contraprestaciones-economicas>.
- [4] Fuente: ANSYS, Inc. ANSYS Fluent Mosaic Technology Automatically Combines Disparate Meshes with Polyhedral Elements for Fast, Accurate Flow Resolution. 2018
- [5] S. C. Chelgani, M. Parian, P. S. Parapari, Y. Ghorbani, and J. Rosenkranz, “A comparative study on the effects of dry and wetgrinding on mineral flotation separation-a review,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 5004–5011, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.07.053.
- [6] Z. H. Wu, Y. J. Hu, D. J. Lee, A. S. Mujumdar, and Z. Y. Li, “Dewatering and drying in mineral processing industry: Potential for innovation,” *Dry. Technol.*, vol. 28, no. 7, pp. 834–842, 2010, doi: 10.1080/07373937.2010.490485.
- [7] T. Tunçal and O. Uslu, “A Review of Dehydration of Various Industrial Sludges,” *Dry. Technol.*, vol. 32, no. 14, pp. 1642–1654, 2014, doi: 10.1080/07373937.2014.909846.
- [8] D. E. Alnak, Y. Varol, H. F. Oztop, and K. Al-Salem, “Simulation of jet drying of a moist cylinder at low reynolds number,” *Dry. Technol.*, vol. 30, no. 6, pp. 631–640, 2012, doi: 10.1080/07373937.2012.654875.
- [9] I. Fulga and E. Străjescu, “Contributions to Fluid Dynamics in jetmills by a new aerodynamic model of supersonic flow,” *UPB Sci. Bull. Ser. D Mech. Eng.*, vol. 71, no. 4, pp. 191–206, 2009.
- [10] “THERMAJET™ Operating Principle | Fluid Energy.” <https://www.fluidenergype.com/thermajet-flash-drying-calcining-deagglomeration-systems-operating-principle/> (accessed Apr. 13, 2020).
- [11] N. Hayashi and S. Shimada, “Study on drying organic sludges by thermal jet dryer - Part 1: Drying performance of thermal jet dryer,” *Dry. Technol.*, vol. 24, no. 12, pp. 1601–1607, 2006, doi: 10.1080/07373930601030986.
- [12] F. Cheng, X. Zhou, Y. Liu, “Methods for Improvement of the Thermal Efficiency during Spray Drying”, *E3S Web of Conferences* 53, 01031, 2018, doi: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20185301031>
- [13] R. Wijaya, B. Hariono, “The Mathematical Analysis of the Drying of Cassava Grater by Using Pneumatic (flash) Dryer with Heat Recirculation Method”, *Journal of Physics.*, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1569/4/042061
- [14] Y. Nam Chun, M. Sup Lim, “Development of a high-efficiency rotary dryer for sewage sludge”, *J Master Cycles Waste Manag*, Vol. 14, pp. 65 – 73, 2012, doi: 10.1007/s10163-012-0040-6

- [15] Y. Park, Y. Chang, J. Park, “Energy Efficiency of Fluidized Bed Drying for Wood Particles”, *J. Korean Wood Sci.* Vol. 44, no. 6, pp. 821 – 827, 2016, doi: <http://dx.doi.org/DOI:10.5658/WOOD.2016.44.6.821>
- [16] A. M. Rahmatika et al., “CFD simulation of pulse combustion’s performance,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1712, no. February 2016, 2016, doi: 10.1063/1.4941883.
- [17] P. Gaikwad and S. Sreedhara, “OpenFOAM based conditional moment closure (CMC) model for solving non-premixed turbulent combustion: Integration and validation,” *Comput. Fluids*, vol. 190, pp. 362–373, 2019, doi: 10.1016/j.compfluid.2019.06.029.
- [18] S.-K. Kim, S.-M. KANG, and Y.-M. KIM, “Flamelet modeling for combustion processes and NO<sub>x</sub> formation in the turbulent nonpremixed CO/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> jet flames,” *Combust. Sci. Technol. - COMBUST SCI TECHNOL*, vol. 168, pp. 47–83, Jul. 2001, doi: 10.1080/00102200108907831.
- [19] G. Kim, S. Kang, Y. Kim, R. Bilger, and M. Cleary, “Conditional moment closure and transient flamelet modelling for detailed structure and NO<sub>x</sub> formation characteristics of turbulent nonpremixed jet and recirculating flames,” *Combust. Theory Model.*, vol. 11, Jun. 2007, doi: 10.1080/13647830600985297.
- [20] E. Giacomazzi, F. R. Picchia, N. Arcidiacono, D. Cecere, F. Donato, and B. Favini, “Unsteady simulation of a CO/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/air turbulent non-premixed flame,” *Combust. Theory Model.*, vol. 12, no. 6, pp. 1125–1152, Nov. 2008, doi: 10.1080/13647830802276131.
- [21] X. Zhao, D. Haworth, and E. Huckaby, “Transported PDF Modeling of Nonpremixed Turbulent CO/H<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> Jet Flames,” *Combust. Sci. Technol. - COMBUST SCI TECHNOL*, vol. 184, pp. 676–693, May 2012, doi: 10.1080/00102202.2012.660223.
- [22] D. a. Lysenko *et al.*, “Numerical simulation of turbulent flames using the Eddy Dissipation Concept with detailed chemistry,” *Comput. Mech. Trondheim*, vol. 178, pp. 159–178, 2013.
- [23] B. A. H. Múnera, A. A. A. Arrieta, and F. J. C. Sierra, “Modelos para el estudio fenomenológico de la combustión sin llama con simulación numérica,” *Ing. e Investig.*, vol. 29, no. 2, pp. 70–76, 2009.
- [24] E. Khodabandeh *et al.*, “CFD study of non-premixed swirling burners: Effect of turbulence models,” *Chinese J. Chem. Eng.*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.cjche.2020.02.016.
- [25] M. Y. A. Jamalabadi and S. Dousti, “Effect of thermal radiation on non-premixed combustion of air/methane mixture in vertical porous cylinder,” *Int. J. Recent Res. Appl. Stud.*, vol. 25, no. 3, pp. 55–63, 2015, [Online]. Available: <http://heattransfer.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1438497>.
- [26] S. Thakur, P. Gaikwad, and S. Sreedhara, *EVALUATION OF TURBULENCE AND RADIATION MODELS IN MODELING OF NON-PREMIXED METHANE FLAME*. 2017.
- [27] J. Epinette and K. Sutton, “User ’ s Guide,” no. November, pp. 1–44, 2003.
- [28] S. Kim, K. Huh, and B. Dally, “Conditional moment closure modeling of turbulent nonpremixed combustion in diluted hot coflow,” *Proc. Combust. Inst. - PROC COMBUST INST*, vol. 30, pp. 751–757, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.proci.2004.08.161.
- [29] H. Wang and Y. Chen, “PDF modelling of turbulent non-premixed combustion with detailed chemistry,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 59, no. 16, pp. 3477–3490, 2004, doi: 10.1016/j.ces.2004.05.015.

- [30] C. Li, Q. S. Li, Y. Q. Xiao, and J. P. Ou, "A revised empirical model and CFD simulations for 3D axisymmetric steady-state flows of downbursts and impinging jets," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 102, pp. 48–60, 2012, doi: 10.1016/j.jweia.2011.12.004.
- [31] David C. Wilcox, "Turbulence Modelling CFD Wilcox." p. 460, 1994.
- [32] Q. Chen, "COMPARISON OF DIFFERENT k- $\epsilon$  MODELS FOR INDOOR AIR FLOW COMPUTATIONS," *Numer. Heat Transf. Part B Fundam.*, vol. 28, no. 3, pp. 353–369, Oct. 1995, doi: 10.1080/10407799508928838.
- [33] M. Mason, G. S. Wood, and D. Fletcher, "Impinging jet simulation of stationary downburst flow over topography," *Wind Struct.*, vol. 10, Oct. 2007, doi: 10.12989/was.2007.10.5.437.
- [34] A. Sengupta and P. Sarkar, "Experimental measurement and numerical simulation of an impinging jet with application to thunderstorm microburst winds," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 96, pp. 345–365, Mar. 2008, doi: 10.1016/j.jweia.2007.09.001.
- [35] J. P. Li, C., Xiao, Y.Q., Li, Q.S., Ou, "CFD simulation of impinging jet with application to stationary downburst," in *Proceedings of the Symposium of the 14th National Wind Engineering Conference*, 2009.
- [36] N. Hayashi and S. Shimada, "Study on drying organic sludges by thermal jet dryer - Part 2: Characteristics of air-particle multiphase flow in thermal jet dryer," *Dry. Technol.*, vol. 25, no. 12, pp. 1935–1947, 2007, doi: 10.1080/07373930701727242.
- [37] C. Crowe, J. Schwarzkopf, M. Sommerfeld, and Y. Tsuji, *Multiphase flows with droplets and particles*. 2011.
- [38] M. A. Rendon, "ESTUDIO NUMÉRICO Y EXPERIMENTAL DEL EFECTO DEL CAMBIO DE TECNOLOGÍA DE QUEMADOR Y RÉGIMEN DE TRANSFERENCIA DE CALOR SOBRE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN UN SECADOR ROTATIVO DE FERTILIZANTE," Universidad de Antioquía, 2018.
- [39] R. Kuriakose and A. Chinnaswamy, "Computational Fluid Dynamics Applications in Spray Drying of Food Products," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 21, pp. 383–398, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.tifs.2010.04.009.
- [40] L. Oshinowo, A. Bakker, and E. Marshall, "Computational fluid dynamics: Simulating mixing time," vol. 37, pp. 75–77, Jul. 2002.
- [41] T. Han, H. Kalman, and A. Levy, "DEM simulation of particle comminution in jet milling," *Part. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 4, pp. 325–340, 2002, doi: 10.1080/02726350216184.
- [42] T. Brosh, H. Kalman, A. Levy, I. Peyron, and F. Ricard, "DEM-CFD simulation of particle comminution in jet-mill," *Powder Technol.*, vol. 257, pp. 104–112, 2014, doi: 10.1016/j.powtec.2014.02.043.
- [43] A. Hobbs, "Simulation of an aggregate dryer using coupled CFD and DEM methods," *Int. J. Comput. Fluid Dyn.*, vol. 23, no. 2, pp. 199–207, 2009, doi: 10.1080/10618560802680971.
- [44] C. Octau *et al.*, "Liquid-solid two-phase jet in a turbulent cross flow: Experiments and simulations," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 155, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.cherd.2020.01.004.
- [45] P. Breuninger, D. Weis, I. Behrendt, P. Grohn, F. Krull, and S. Antonyuk, "CFD-DEM simulation of fine particles in a spouted bed apparatus with a Wurster tube," *Particuology*, vol. 42, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.partic.2018.03.015.

- [46] R. P. Ramachandran, M. Akbarzadeh, J. Paliwal, and S. Cenkowski, "Computational Fluid Dynamics in Drying Process Modelling—a Technical Review," *Food Bioprocess Technol.*, vol. 11, no. 2, pp. 271–292, 2018, doi: 10.1007/s11947-017-2040-y.
- [47] D. S. Jurumenha and L. Sphaier, "Suitability analysis of lumped-capacitance formulations for adsorbed gas storage," *Appl. Therm. Eng. - APPL THERM ENG*, vol. 31, pp. 2458–2463, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.04.011.
- [48] J. G. Wang, N.; Brennan, "Effect of water binding on the drying behaviour of potato," *Dry. &apos;*, vol. 92 Proceed, pp. 1350–1359, Jan. 1992, [Online]. Available: <https://eurekamag.com/research/002/361/002361693.php>.
- [49] ANSYS, Inc. ANSYS Fluent Mosaic Technology Automatically Combines Disparate Meshes with Polyhedral Elements for Fast, Accurate Flow Resolution. 2018