

**ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DEL AIRE EN UNA SECADORA DE CAFÉ DE
LECHO FIJO**

YEISON LEONARDO TOBO PÉREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2019

**ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DEL AIRE EN UNA SECADORA DE CAFÉ DE
LECHO FIJO**

YEISON LEONARDO TOBO PÉREZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR

JULIAN ERNESTO JARAMILLO IBARRA

PHD. INGENIERÍA TÉRMICA

MSC. INGENIERÍA TERMOENERGÉTICA

INGENIERO MECÁNICO

CODIRECTOR

EDXON STIVEN MENESES CHACÓN

MSC. INGENIERÍA MECÁNICA

INGENIERO MECANICO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2019

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis padres y hermanos por ser los promotores principales de mis sueños, gracias a ellos por cada día confiar y creer en mí y en mis expectativas, al amor recibido, la dedicación y la paciencia por las que cada día se preocupan por mí, por sus palabras, sus ayudas, sus consejos que me siguen guiando durante mi vida. Este nuevo logro es en gran parte gracias a ustedes.

Gracias al acompañamiento y prestamos de recursos de la UIS, de GUANE, de la oficina y computadoras de maestría y la motivación de personas que se convirtieron en parte importante de esto, mis profesores, mis compañeros de pregrado, de maestría, mis amigos y sobre todo mi codirector de proyecto a los largos y agotadores días de acompañamiento y estudio, a sus palabras y ejemplo a seguir.

Quisiera dedicar mi tesis a ustedes, mi familia, mi madre, por estar dispuesta a acompañarme, luchando pese a cualquier adversidad y a personas especiales que no podría olvidar mencionar, que han hecho posible concluir con éxito un proyecto que podría parecer una tarea titánica e interminable, que, aunque no fue sencillo el camino hasta ahora, alumbraron el camino arduo del rigor de la vida.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS	18
1.1 OBJETIVO GENERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	19
2.1 SECADORES DE CAFÉ	19
2.2 FLUIDIZACIÓN	22
2.2.1 Tipos de lechos	23
2.3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	25
3. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	29
3.1 MODELAMIENTOS MATEMÁTICOS Y FÍSICOS	31
3.1.1 Ecuación de conservación de masa:	32
3.1.2 Ecuación de conservación de cantidad de movimiento	33
3.1.3 Ecuaciones de Navier- Stokes.	34
3.1.4 Modelamiento de medios porosos	38
3.2 MODELAMIENTO DE LA TURBULENCIA	42
3.2.1 Escalas de la turbulencia	43
3.2.2 Comportamiento cerca de las paredes	50
3.3 MÉTODOS NUMÉRICOS	52
3.4 MALLADO	53
3.4.1 Estructuradas	54
3.4.2 No estructuradas	55
3.4.3 Parámetros de calidad de malla	57
3.5 VENTAJAS E INCONVENIENTES	61
3.6 OPENFOAM	62

3.6.1 Directorios OpenFOAM.....	63
3.6.2 Solver PorousSimpleFoam.....	65
4. CASO BENCHMARK.....	76
4.1 SMITH & HUTTON.....	76
4.1.1 Análisis de resultados Smith & Hutton	82
4.2 BENCHMARK DE VALIDACIÓN POROUSSIMPLEFOAM.....	84
4.2.1 Descripción del caso.....	85
4.3.2 Pre-proceso del caso.....	86
4.2.3 Pos-proceso del caso.....	87
5. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO DE AIRE EN UNA MÁQUINA SECADORA DE CAFÉ	91
5.1 PREPROCESO.....	91
5.1.1 Geometría dada	91
5.1.2 Condiciones de frontera	92
5.1.3 Malla del caso	96
5.2 POSTPROCESO	97
5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	100
5.4 PROPUESTA DE MEJORA	103
5.4.1 Propuesta 1.....	104
5.4.2 Propuesta 2.....	108
5.4.3 Propuesta 3.....	110
5.4.4 Propuesta 4.....	112
6. CONCLUSIONES	114
BIBLIOGRAFÍA.....	116

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Esquemas termino divergente	72
Tabla 2. Dimensiones OpenFOAM	74
Tabla 3. Datos experimentales en la salida para diferentes ρ/Γ	82
Tabla 4. Número de elementos por cada malla utilizada	97
Tabla 5. Características de malla utilizada para geometría de mejora	105
Tabla 6. Desviaciones obtenidas de cada propuesta.....	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una torre de secado de granos	20
Figura 2. Equipo utilizado para secar café tipo bombo o Guardiola	21
Figura 3. Silo de secado	21
Figura 4. Estados de lecho	23
Figura 5. Evolución de la pérdida de carga en el lecho por fluctuaciones de presión Δp con respecto de la velocidad superficial del gas U	24
Figura 6. Diagrama de flujo de una aplicación CFD típica.	30
Figura 7. Permeámetro de carga constante.....	39
Figura 8. Fluido en un medio poroso	40
Figura 9. Aproximaciones de la turbulencia	42
Figura 10. Escalas de turbulencia y proceso de cascada de energía (Esquema conceptual de Richardson)	44
Figura 11. Terminología de malla.	54
Figura 12. Malla estructurada	55
Figura 13. Malla no estructurada	56
Figura 14. Ejemplo gráfico del indicador skewness para diversas geometrías 2D ..	57
Figura 15. Sesgo equiangular normalizado	58
Figura 16. Definición Gráfica skewness.....	59
Figura 17. Parámetros del sesgo ortogonal	60
Figura 18. Estructura de caso OpenFoam, para simular un problema.....	64
Figura 19. Librerías utilizadas por el solver porousSimpleFoam	65

Figura 20. Archivo de porosityProperties	66
Figura 21. Archivo de topoSet.....	68
Figura 22. Archivo fvSchemes	71
Figura 23. Esquemas para describir efecto convectivo tabla 2	72
Figura 24. Esquema general del problema propuesto.	77
Figura 25. Condiciones flujo de entrada.	79
Figura 26. Geometría Smith-Hutton.	80
Figura 27. Línea de comando velocidad funkiSetFields.....	81
Figura 28. Resultados Smith-Hutton	82
Figura 29. Comparación malla CDS Smith-Hutton.....	83
Figura 30. Dominio computacional Benchmark.....	85
Figura 31. Identificación de longitudes en esquema del convertidor catalítico típico:	87
Figura 32. Malla utilizada	88
Figura 33. Resultados Independencia de la malla	89
Figura 34: Visualización de resultados (a), parámetros de flujo (b)	90
Figura 35. Procesamiento previo y ejecución de los casos de OpenFOAM	91
Figura 36. Isométrico del modelo.....	92
Figura 37. Condiciones iniciales	93
Figura 38. Niveles de porosidad	93
Figura 39. Características físicas del café	94
Figura 40. Malla utilizada en la geometría simulada	97

Figura 41. Independencia de la malla	98
Figura 42. Residuales obtenidos máquina actual	99
Figura 43. Resultados de velocidad y presión dentro de la máquina real.....	100
Figura 44. Resultados de velocidad en entradas y salidas en los niveles de secado geometría actual	101
Figura 45. Flujo niveles de secado	102
Figura 46. Vistas de las líneas de corriente geometría actual: (a) Vista Lateral izquierda, (b) Vista Frontal, (c) Vista inferior	103
Figura 47. Nomenclatura de comparación	104
Figura 48. Geometría propuesta de mejora	104
Figura 49. Independencia de la malla	105
Figura 50. Comparación máquina real, con modificación en el ángulo.....	106
Figura 51. Resultados de velocidad en entradas y salidas en los niveles de secado propuesta 1	107
Figura 52. Comparación de la desviación estándar de la geometría actual con la propuesta 1	108
Figura 53. Comparación máquina real, con modificación entrada	109
Figura 54. Comparación de la desviación estándar de la geometría actual con la propuesta 2.....	110
Figura 55. Comparación máquina real, con aumento del ventilador	111
Figura 56. Comparación modificación anterior, con recorte de geometría.....	112

Figura 57. Comparación de la desviación estándar de la geometría actual con la propuesta 4.....	113
---	-----

LISTA DE ANEXOS

(ver anexos adjuntos en el CD, pueden visualizarlos en la base de datos de la Biblioteca UIS)

Anexo A: Smith & Hutton

Anexo B: Cubo

Anexo C: Resultados simulaciones de mejora

Anexo D: Descripción de archivos y librerías OpenFoam utilizadas en el solver porousSimpleFoam

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO DEL AIRE EN UNA SECADORA DE CAFÉ DE LECHO FIJO

AUTOR: YEISON LEONARDO TOBO PEREZ

PALABRAS CLAVE: CFD, OpenFoam, medio poroso, fluidos, secadora, café

En Colombia, la industria de maquinaria agrícola fabrica diferentes modelos de sistemas mecánicos que permiten el secado de café. Los secadores mecánicos más usados son los de capa estática o lecho fijo, en los cuales el aire caliente es forzado a pasar por cada uno de los lechos donde se encuentra almacenado el café. Sin embargo, se han presentado problemas debido a la no uniformidad de secado que presentan estos sistemas.

Por esta razón, este trabajo busca mediante herramientas computacionales (CFD), caracterizar fluido-dinámicamente el aire que pasa a través del café en una secadora o silo de varios niveles, con el fin de predecir y visualizar la no uniformidad en el sistema. Se obtienen aproximaciones numéricas que predicen el comportamiento de flujo real en la geometría actual y en propuestas dadas, visualizando las secciones del sistema donde el flujo no hace contacto con el lecho poroso, se logra aumentar la uniformidad en un 55% que permite un mayor contacto del gas con el grano dentro del sistema, se ahorra en procesos experimentales costosos y se obtienen recomendación de diseño.

Otro aspecto importante es la utilización de software libre; se usa Salome para la construcción de la malla; OpenFOAM, para la solución de los modelos matemáticos, y paraWiev para la visualización de los resultados. El modelo matemático resuelve las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento junto con la ecuación de Darcy-Forchheimer de medios porosos, además de dos ecuaciones adicionales para modelar el fenómeno turbulento. La validación se realizó a través de un estudio de referencia (caso Benchmark).

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE MOVEMENT OF AIR IN A COFFEE DRYER OF FIXED BED

AUTHOR: YEISON LEONARDO TOBO PEREZ

KEYWORDS: CFD, OpenFoam, porous media, fluids, coffee dryer

In Colombia, the agricultural machine industry manufactures different models of mechanical systems that allow the drying of coffee. The commonly used mechanical dryers are those of static layer or fixed bed, in which the hot air is forced to pass through each of the beds, where the coffee is stored. However, problems occurred due to the non-uniformity of drying presented by these systems.

Therefore, this investigation characterizes fluid-dynamically the air that passes through the coffee in a dryer or silo of several levels, in order to predict and visualize the non-uniformity in the system through computational tools (CFD). Numerical approximations are obtained, which predict the behavior of real flow in the current geometry and applied improvements, visualizing the sections of the system, where the flow does not make contact with the porous bed. The uniformity is increased by 55%, which allows a greater contact of gas and grain within the system. Expensive experimental processes are avoided and design recommendations obtained.

Another important aspect is the use of free software. Salome is used for the construction of the mesh; OpenFOAM is used for the solution of the mathematical models, and paraView for the visualization of the results. The mathematical model solves the continuity and momentum equations with the Darcy-Forchheimer equation of porous media, apart from two additional equations to model the turbulent phenomenon. A validation was carried out by Benchmark study.

*Bachelor Thesis

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Julian Ernesto Jaramillo Ibarra

INTRODUCCIÓN

En su resolución N°407 de enero del 2002, la Organización Internacional del Café (OIC) solicitó a sus países miembros no comercializar café cuyo contenido de humedad se halle fuera del rango del 8% al 12%¹, para que pueda ser almacenado en las condiciones normales sin que se presente el deterioro por hongos y bacterias, en razón a que en esos porcentajes de humedad se reducen la actividad del agua y los procesos metabólicos por períodos de tiempo prolongados.

Existen gran variedad de sistemas de secado donde se alcanza el rango de humedad, pero no de manera uniforme. Los secadores mecánicos más usados son los de capa estática o lecho fijo, en los cuales el aire es forzado a pasar por un intercambiador de calor o resistencia térmica por la cámara de secado, y posteriormente a través de las capas de café. Al pasar por la resistencia térmica, el aire incrementa su temperatura prevaleciendo la convección como forma de transferencia de energía, permitiendo bajar su humedad relativa y la presión de vapor, la cual es la que finalmente otorga al aire el potencial de secado².

Por esta razón, existen estudios de investigación donde se buscan propuestas de mejora de uniformidad, desarrollando nuevas configuraciones geométricas por medio de experimentos físicos costosos. Sin embargo, se ha demostrado que las prácticas experimentales de secado sin considerar la cinética del secado, puede afectar significativamente la eficiencia de los secadores, aumentar el costo de producción y reducir la calidad del producto secado.

¹ ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL CAFÉ. La Organización Internacional del Café: 50 años sirviendo a la comunidad cafetera mundial. Londres, 2013. p. 23.

² MARTINELLO, Miriam Alejandra. Modelado del secado de granos en lecho. Tesis de Doctorado, La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 2015, p. 29.

De aquí, nace la necesidad de utilizar herramientas computacionales para obtener un modelo simplificado del caso (Flujo en medio poroso), que permita analizar el comportamiento de aire a través de un sistema mecánico con geometría dada, y cambios geométricos que favorezcan la uniformidad y distribución de aire a lo largo del sistema.

El estudio se desarrolló en 6 capítulos que comprenden: El análisis de la información previa (cap. 2), donde se observa la teoría del secado, los sistemas y procesos actuales. Luego se estudian las teorías de dinámica de fluidos, se analizan los modelos matemáticos y físicos, volúmenes finitos y técnicas CFD utilizadas para la solución de estos casos (cap 3). En el siguiente capítulo (cap 4), se prueba la capacidad del código, junto con la exactitud numérica de los modelos implementados en el software OpenFOAM y así obtener la validación. En el capítulo 5 se simula el sistema actual del código, para finalmente realizar la propuesta de mejora (cap 5) y las conclusiones (cap 6).

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir a la misión de la universidad industrial de Santander con generación y adecuación de conocimiento; mediante fortalecimiento de la relación industria-academia, utilizando herramientas computacionales, para determinar el campo de flujo del aire en una secadora de café de la empresa Penagos Hermanos & Cía. S.A.S.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar validaciones con caso benchmark de geometría simplificada, encontradas en la literatura.
- Simular la geometría real y determinar los patrones de flujo en la secadora de café de la empresa Penagos hermanos & CIA. S.A.S.
- Proponer alternativa para mejorar la distribución de aire en el café dentro de la máquina, en caso de que la distribución actual no sea homogénea.

2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para llevar a cabo una simulación CFD es necesario en primer lugar entender los modelos matemáticos - físicos que el caso involucra, para luego utilizar un método de discretización que permita resolver las ecuaciones diferenciales planteadas; a continuación, se menciona cómo estas ecuaciones y métodos han sido resueltos por algunos autores para sistemas de secado.

2.1 SECADORES DE CAFÉ

El secado del café se realiza básicamente por dos métodos: natural o mediante equipos especialmente diseñados para este propósito. El secado al sol se realiza en patios de cemento, sobre lonas, en camas o parihuelas*, en túneles o en elbas**. El secado natural, se extiende los granos en patios de cemento o sobre lonas, este es el método más antiguo usado por los caficultores.

El secado al sol presenta inconvenientes por contaminación por polvos o residuos extraños, e infestación por insectos, animal y humana, además secados incompletos, riesgos de lluvias y mayor tiempo de secado, estos cambios en las condiciones evidencian la necesidad del secado por otras técnicas³.

Los equipos utilizados en Colombia para secar el café son: las torres, los bombos o guardiolas, de secado y los silos. El resultado es un café seco que posteriormente

* Parihuelas: Bandejas, generalmente fabricadas de madera, con mallas donde se almacena el café para su respectivo secado mediante la exposición al sol.

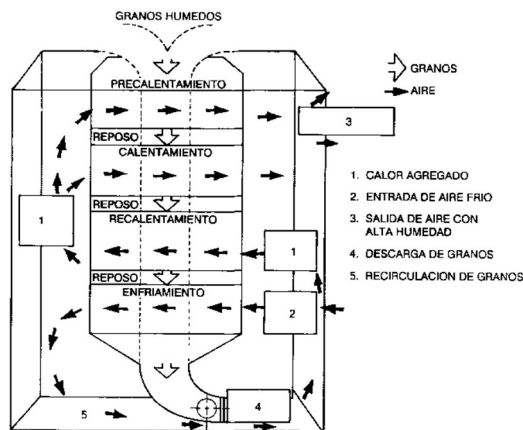
** Elbas: Cajones con piso de cemento y techos plegables que permiten exponer café al sol

³ GONZÁLEZ SUSATAMA, Luis Carlos. Construcción de una planta piloto para secado de café por lecho fluidizado. Tesis de maestría Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia, 2014.

es transportado a los puntos de compra o las cooperativas donde continúa con las siguientes fases del proceso de comercialización y cadena de valor.

- **Torres de secado:** Son una serie de bandejas dispuestas unas encima de otras sobre un eje central rotatorio. La alimentación de sólidos es sobre la bandeja superior la cual está expuesta a una corriente de aire o gas caliente que pasa sobre las bandejas. El sólido es descargado por medio de un raspador y pasa a la bandeja inmediatamente inferior (Figura 2).

Figura 1. Esquema de una torre de secado de granos



Fuente: DALPASCUALE, Valdecir Antoninho, et al.⁴

- **Bombos o guardiolas:** Son grandes tambores rotatorios en los que se carga el café, estos pueden ser directos o indirectos los cuales aseguran la homogeneidad de secado, menor tiempo de secado con mayores caudales de aire (Figura 1).

⁴ DALPASCUALE, Valdecir Antoninho, *et al.* Secado de granos a altas temperaturas. [En línea]. Oficina regional de la FAO para América Latina y el Caribe, 1991. Disponible en: http://www.fao.org/docrep/x5059S/x5059S04.htm?fbclid=IwAR0r3_FenY6Beux2m9uiDWzGiaL6EtqZomalU18sUtzuKy-6ldMmzrLNpQ.

Figura 2. Equipo utilizado para secar café tipo bombo o Guardiola



Fuente: PENAGOS⁵

- **Silo de secado:** Son recipientes de gran tamaño en los cuales el producto se almacena y circula un gas caliente para retirar la humedad, del producto generalmente dispuesto en capas o un ducto en la zona central donde pasa el fluido (Figura 3).

Figura 3. Silo de secado



Fuente: Penagos⁶.

⁵ PENAGOS. [En línea]. [Recuperado en Noviembre 2018]. Disponible en: <http://www.penagos.com/eng/product/coffee-rotative-dryer-sg-2/>.

⁶ PENAGOS. Peabirus. [En línea]. Rede Social do café, 2018. [Recuperado en Noviembre 2018]. Disponible en: http://www.redepeabirus.com.br/redes/form/post?topico_id=67838&fbclid=IwAR1HJ3ScwhtX13GhNtDKZEeRRWNJzWAXroPr2TTTLGLq_G65k5Ily1agy3Q.

En los equipos de secado de café la temperatura máxima es de 60°C y generalmente el movimiento mejora el proceso de transferencia de masa y temperatura para la homogeneidad del secado final, para asegurar un contenido de humedad entre 8%–12% en los granos de café⁷.

En el secado en silo el sólido está estacionario, conformando un lecho profundo (“deep bed”) ó lecho fijo (“fixed bed”) de partículas, y el aire circula a través de los huecos intergranulares desde el fondo hasta el tope del lecho, impulsado por un ventilador. No obstante, el intercambio de humedad desde el grano hacia el aire, tiene lugar en una zona de espesor relativamente estrecho, denominada zona de secado, cuyo límite superior es una línea conocida como frente de secado.

2.2 FLUIDIZACIÓN

El sistema empleado en este trabajo es secador tipo silo, el cual como se explicó, el flujo pasa mediante una resistencia térmica calentado el aire impulsado por los ventiladores, luego se transporta y se expande a través de la geometría de la máquina, haciendo contacto con cada uno de los niveles de almacenamiento o lechos donde se encuentra el café, este comportamiento es denominado comúnmente como fluidización y permite predecir físicamente el contacto que se realiza del aire con el café, mediante modelos matemáticos considerando las velocidades y otros parámetros físicos, que se van estudiando a través de este trabajo.

La velocidad del fluido es el factor que determina el estado del lecho. Cuando éste es insuficiente para mover las partículas el lecho es estacionario (lecho fijo). Si la

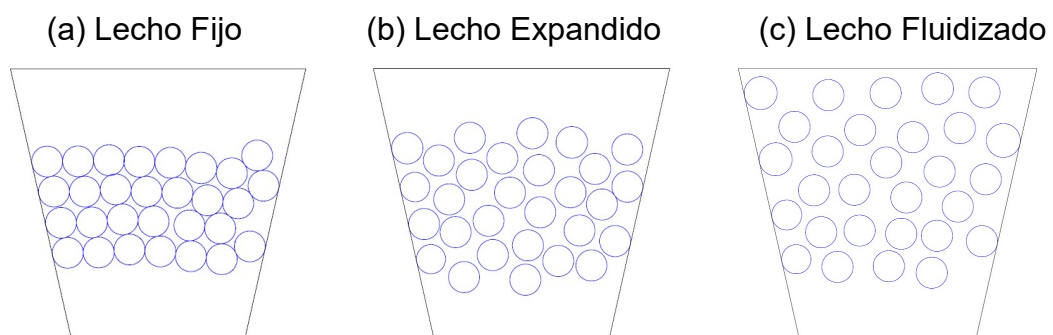
⁷ GONZÁLEZ SUSATAMA. Op. cit., pp. 7-8.

velocidad aumenta en una proporción adecuada se logra separar las partículas y mantener el lecho expandido, la fluidización se alcanza cuando el movimiento de las partículas se asemeja al de un fluido³.

La fluidización ha sido objeto de estudio por parte de varios investigadores quienes clasifican los lechos por su comportamiento, generando teorías y correlaciones matemáticas teniendo en cuenta sus particularidades.

2.2.1 Tipos de lechos: El flujo que se presenta en el sistema de estudio es de lecho fijo, lo cual se presenta cuando la velocidad es mínima, las partículas permiten el paso del fluido sin separarse, por lo que la altura del lecho y la fracción de vacío se mantienen constantes. Sin embargo, para una sección transversal constante, a medida que aumenta la velocidad del fluido, es posible identificar diferentes estados de los lechos, como se observa en la Figura 4.

Figura 4. Estados de lecho

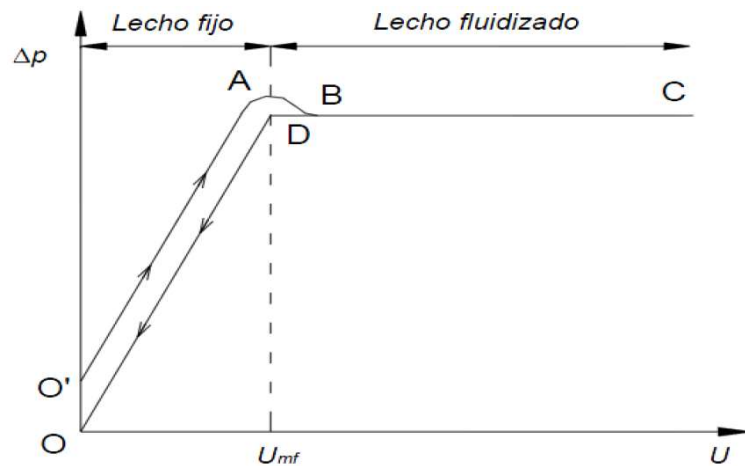


Cuando se experimenta una caída de presión elevada y el movimiento de las partículas se limita a pequeñas vibraciones (figura 4.a), se obtiene lecho fijo. Si se aumentara la velocidad superficial del aire, la pérdida de carga en el lecho aumentaría hasta un punto donde se mantiene constante (ver figura 5), en la cual

se expande el lecho y se alcanza el estado de movilidad y mezcla sostenida de las partículas (figura 4.b). En este punto el empuje ejercido por el gas sobre las partículas iguala y alcanza a superar el peso aparente del lecho, de forma que las partículas se encuentran suspendidas en el gas, y su movilidad permite la mezcla de las partículas, obteniendo un lecho fluidizado (Figura 4.c)⁸.

Los tramos O'A/OD de la Figura 5 corresponden al lecho fijo, donde el movimiento relativo entre las partículas es nulo y su separación permanece constante. En este espacio, la relación entre la pérdida de carga y la velocidad del gas se determina mediante la expresión propuesta por Ergun⁹. La aproximación de estas relaciones se obtiene asumiendo el flujo de gas alrededor de una esfera.

Figura 5. Evolución de la pérdida de carga en el lecho por fluctuaciones de presión Δp con respecto de la velocidad superficial del gas U .



Fuente: GONZÁLEZ S. Luis C.⁸

⁸ *Ibíd.*, p. 15.

⁹ *Ibíd.*, pp. 15-16.

2.3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Las dificultades y limitaciones inherentes al secado al sol pronto avivaron la imaginación del hombre primitivo a utilizar técnicas más poderosas y seguras. Así en la edad de hierro ya se construían en las zonas del Norte de Europa los primeros hornos para el secado de trigo recién cosechado. Estas técnicas no sufrieron cambios importantes hasta la revolución industrial. Diderot (1751) describe muchos de los procedimientos de secado de alimentos como se hacía antes de la revolución, un siglo más tarde Tomlinson (1854) describe algunas de las técnicas utilizadas en la deshidratación de papel, fibras naturales y algunos alimentos. Donde unos años antes (1851) se presentaron muestras de leche en polvo preparada mediante la eliminación acuosa durante un suave calentamiento, lo que hizo avanzar en la posibilidad de deshidratar vegetales en hornos de secado mediante un procedimiento similar¹⁰.

Para diferentes autores como Maupoey. *et al.*¹⁰, consideran a Hausbrand como el primer intento serio de aplicación de los métodos de ingeniería al cálculo de deshidratadores debido a su publicación “Drying of air and steam”¹¹, realizada en 1912, donde se dio un punto de partida para generar producción científica sobre el secado. Thompson T. L. Quien, en diferentes artículos¹², como los de 1968 y 1972 planteó simulaciones matemáticas de secado del maíz. Luego Sharp J.R. en 1984¹³ publicó en la revista de ciencias agrícolas de Cambridge, donde estudió los efectos del diseño, control y clima en el rendimiento de baja temperatura en

¹⁰ MAUPOEY, Pedro Fito, *et al.* Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Universitat Politècnica de València, 2016, nº 2, p. 9.

¹¹ HAUSBRAND, E. Drying by means of air and steam. D. Van Nostrand Company, 1912.

¹² THOMPSON, T.L; PEART, R.M y FOSTER, G. H. Mathematical Simulation of Corn Drying - A New Model. Transaction of the ASAE, 1968.

¹³ SHARP J, R. Design and Management of Flow Temperature Grain Driers in England. J. agric. Engng Cambridge, 1984.

secadores de granos. Por la parte de diseño construyó secador de grano utilizando un modelo de simulación por ordenador del secado de un lecho profundo de trigo. Además de estudiar el flujo de aire mínimo para un secado seguro y el consumo de energía correspondiente. Por último, dio las mejores ubicaciones para realizar el secado en Inglaterra estudiando datos meteorológicos tomados durante 20 años.

Como se observa desde el siglo pasado los estudios, análisis experimentales y teóricos del secado de sólidos porosos húmedos, han sido objeto de numerosas investigaciones. Existen diferentes artículos y libros¹⁴ dedicados exclusivamente al secado que incluyen simulaciones con procesos matemáticos iterativos o metodologías CFD en máquinas reales, como lo hizo Luis C. González Susatama⁹, de la Universidad Nacional de Colombia en su trabajo realizado en el año 2014, construyó un sistema para secado de café por lecho fluidizado, donde se realizó el diseño y construcción de una planta piloto para secado de café a escala laboratorio, en la cual se evaluaron las condiciones de operación (velocidad mínima de fluidización, contenido de agua y temperatura del aire), las propiedades del café y las de la planta construida. A través de medidas experimentales de secado del café en lecho fluidizado, se obtuvieron los datos para validar el modelo cfd utilizando AnsysFluent. La flexibilidad del equipo permite su utilización en prácticas de docencia e investigación en los campos de fluidización y secado, con la posibilidad de aproximarse al escalamiento en términos de tiempo y recursos de la operación bajo estudio.

Luego Miriam Alejandra Martinello¹⁵, en junio de 2015 en su tesis de doctorado estudió el proceso de secado de maíz a bajas temperaturas para proponer un método más ecológico que condujo a granos de mayor calidad y valor. Se abordó

¹⁴ DELGADO, J. M. P. Q. y BARBOSA, A.G. Transport Phenomena and Drying of Solids and Particulate Materials. Advanced Structured Materials, vol. 48, B. d. L. Editors, Ed., New York, Springer International Publishing Switzerland, 2014.

¹⁵ MARTINELLO, Op. cit.

el modelado matemático de la transferencia de calor y su implementación numérica, considerando los efectos del caudal volumétrico específico de aire, temperatura del aire, humedad relativa del aire, humedad inicial de los granos y espesor del lecho, además de estudiar tres métodos numéricos para la resolución: diferencias finitas explícito, diferencias finitas implícito y método de las líneas. Concluyó que el modelo no estacionario de no equilibrio representa mejor el proceso, siendo el método de las líneas el esquema numérico apropiado para la resolución. El uso del ventilador por soplado precalienta y baja la humedad relativa del aire, conduciendo a menores tiempos de secado y reducciones en el consumo de energía.

El trabajo más reciente a la fecha es el realizado por Díaz O. Christian y Gamiño María junto a sus colaboradores¹⁶ publicado en revista hispana en enero de 2018, en el cual se estudia el procesamiento de leche, en secadores por aspersión, ya que se corre el riesgo de contaminación y de explosión debido a la formación de costra en las paredes. El análisis fue desarrollado bajo la estrategia de dinámica computacional de fluidos usando el software FLUENT de ANSYS. Las simulaciones permitieron la selección de un adecuado separador ciclónico en base al área mojada de las paredes internas del secador. Los resultados indicaron que el tipo de separador ciclónico afecta las zonas mojadas en las paredes del secador.

La máquina actual utilizada en este estudio posee tres niveles de secado. Se postulan varias hipótesis, que ayudan a predecir el comportamiento real del fluido e igualmente reducir el costo computacional generado, para ello, se hacen las siguientes aclaraciones:

- El flujo es incompresible.
- Hay tres niveles de secado, (a menudo se llaman lecho poroso).

¹⁶ OVALLE, Christian Diaz, et al. Análisis del efecto geométrico de ciclones en el secado. Avances en Ciencias e Ingeniería, 2018, p. 14.

- Se considera enfoque macroscópico mediante teorías de porosidad y lechos fijos, aunque se conduce a una pérdida de información en nivel micro, proporciona una buena información sobre los patrones de flujo a nivel macroscópico que son necesarios para la comprensión completa de la operación de secado, reduciendo el costo computacional.
- Se desprecian los efectos de transferencia de calor y masa producto del intercambio energético que se produce.
- Se hace simetría a lo largo de la geometría para reducir el costo computacional.

3. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Este acrónimo adoptado directamente del Inglés, hace referencia a la rama de la mecánica de fluidos denominada (Computational Fluid Dynamics), traducida normalmente al castellano como Fluidodinámica Computacional o DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL, y que consiste en el empleo de computadores y de técnicas numéricas para resolver todos aquellos problemas físicos que están relacionados con el movimiento de los fluidos y, en ocasiones, de otros fenómenos asociados como la transferencia de calor, las reacciones químicas, el arrastre de sólidos, etc.

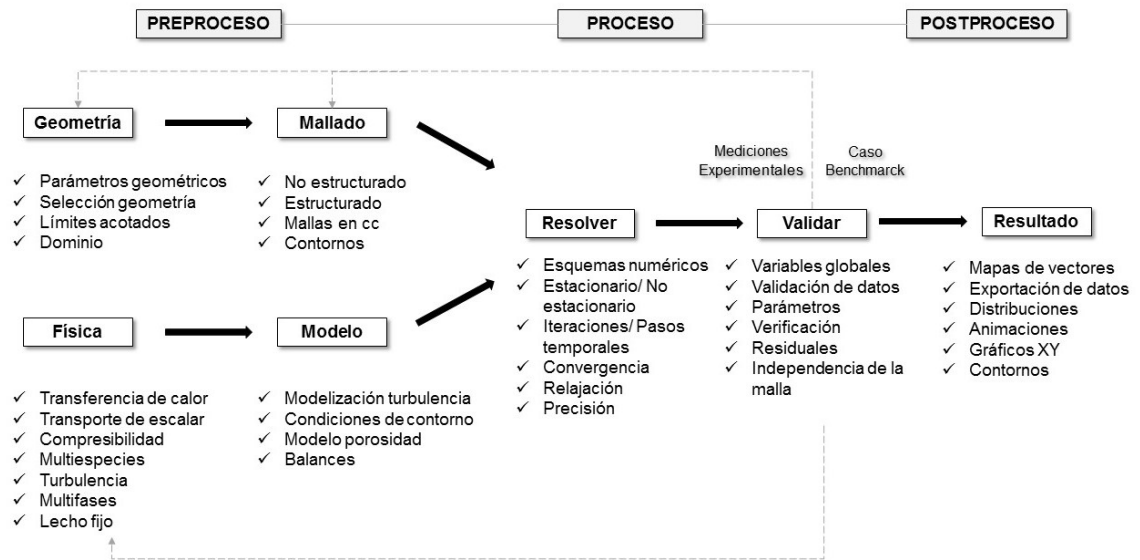
Las técnicas CFD son ya hoy, un complemento más dentro de la ingeniería asistida por computadora (CAE), utilizada universalmente en la industria. Sus posibilidades para simular todo tipo de fenómenos y flujos permiten a los diseñadores y a los analistas disponer de un túnel de viento virtual en sus centros de computación. Así mismo el software CFD ha evolucionado, convirtiéndose en una parte indispensable en el proceso de diseño aerodinámico e hidrodinámico. El CFD comprende un amplio abanico de disciplinas científicas, que deben aunarse para dar lugar el desarrollo de un código que sea capaz de resolver las ecuaciones del flujo de manera satisfactoria, con el fin de crear o utilizar un software que proporcione el cálculo detallado del movimiento de los fluidos por medio del empleo del ordenador¹⁷.

Todos los códigos presentan la siguiente estructura: Un módulo de preproceso, otro módulo de solución y un módulo final de postproceso. A continuación, se estudia el

¹⁷ FERNANDEZ ORO, Jesús Manuel. Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos. Barcelona, España: Reverté, 2012, p. 17.

comportamiento de esta herramienta computacional, y como logra dar una aproximación numérica a los flujos reales.

Figura 6. Diagrama de flujo de una aplicación CFD típica.



Fuente: Adaptado de FERNANDEZ ORO, Jesús Manuel¹⁷

Para simular correctamente una topología de flujo (ver figura 6), el (CFD) parte de estudios posteriores como la dinámica de fluidos que se compacta con la identificación de los fenómenos físicos y químicos que pretendan modelarse; se define la geometría y el dominio computacional para dividirlo generando el proceso de mallado, se hace la especificación de las condiciones iniciales y de contorno del problema. Luego de haber culminado con la fase anterior se realizan los cálculos mediante procesos iterativos para finalmente analizar y visualizar los resultados mediante la utilización de gráficas, mapas de contorno, animaciones, entre otros.

3.1 MODELAMIENTOS MATEMÁTICOS Y FÍSICOS

La mecánica de fluidos se define como la ciencia que estudia el comportamiento de los fluidos en reposo (estática de fluidos) o en movimiento (dinámica de fluidos) y la interacción de estos con sólidos o con otros en las fronteras.

Las ecuaciones fundamentales que gobiernan la dinámica de fluidos se basan en tres principios físicos básicos:

- **La masa se conserva:** Es decir la cantidad de materia antes y después de una transformación es siempre la misma.
- **La segunda ley de Newton:** donde la tasa de cambio de cantidad de movimiento es igual a la suma de las fuerzas externas que actúan sobre una partícula de fluido. También se incluyen las leyes constitutivas.
- **La energía se conserva,** (primera ley de la termodinámica): La energía total de un sistema aislado ni se crea ni se destruye permaneciendo constante, sólo se transforma de un tipo a otro.

Hay dos enfoques utilizados para la caracterización del flujo de un fluido: el primero es el enfoque Lagrangiano, que tiene en cuenta la trayectoria y comportamiento de cada partícula, es decir, se sigue una masa fija. El otro enfoque es el Euleriano, que se centra en la presión, la velocidad, la aceleración, etc. de cualquier lugar fijo donde pasen las partículas. En esta descripción del flujo de fluidos, se define un volumen finito, llamado dominio del flujo o volumen de control, a través del cual un fluido fluye hacia dentro y hacia fuera. No es necesario seguir el rastro de la posición y la

velocidad de una masa fija de partículas de fluido. En lugar de ello, se definen variables de campo, funciones del espacio y el tiempo¹⁸.

3.1.1 Ecuación de conservación de masa: El principio de conservación de la masa o ecuación de continuidad, establece en forma general que la masa de un sistema permanece constante. Es decir, el incremento de masa en el interior de un elemento de fluido es consecuencia del flujo neto de masa hacia dicho elemento. Se debe considerar el balance de masas para el elemento de fluido, así:

$$\text{masa total que entr} - \text{masa total que sale} = \text{Cambi} \quad \text{neto durante } \Delta t \text{ en la} \\ \text{en el } V_c \text{ durante } \Delta t \quad \text{del } V_c \text{ durante } \Delta t \quad \text{masa que este dentro del } V_c$$

Esta ecuación establece de forma general que el incremento de masa en el interior de un elemento fluido es consecuencia del flujo neto de masa hacia dicho elemento. Puesto que en general no puede crearse ni destruirse masa, salvo en reacciones nucleares¹⁹.

Con los términos resultantes, se obtiene la ecuación de conservación de masa. La expresión no estacionaria, tridimensional, en un punto, para un fluido en general es

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

¹⁸ CENGEL, Yunus A; CIMBALA, John M. Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones, México, D.F.: McGraw-Hill, 2006, p. 122.

¹⁹ MENESES CHACÓN, Edxon Stiven. Evaluación térmica por métodos computacionales de un modelo de hormilla panelera. Tesis de maestría Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2018, p. 19.

Donde ρ es la densidad de masa, t es el tiempo, $\vec{U}$ el vector de velocidad y el símbolo ∇ es el operador nabra (operador de gradiente), Cabe aclarar que el primer término del lado izquierdo de la ecuación anterior representa la tasa de cambio en el tiempo de la densidad (masa por unidad de volumen), y el segundo término describe el flujo neto de masa hacia afuera del elemento a través de sus fronteras, conocido como divergencia.

Para un fluido incompresible, es decir, un líquido con densidad ρ constante, la ecuación anterior (1) se simplifica así:

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (2)$$

Donde el primer término se denomina la divergencia del vector velocidad y representa el producto punto entre el operador nabra y el vector velocidad, obteniendo la notación no abreviada²⁰:

$$\nabla \cdot \vec{U} = \left(\frac{\partial}{\partial x} i + \frac{\partial}{\partial y} j + \frac{\partial}{\partial z} k \right) \cdot (ui + vj + wk) = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

3.1.2 Ecuación de conservación de cantidad de movimiento: La ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, es una aplicación de la segunda ley de Newton, la cual establece que la fuerza resultante que actúa sobre una partícula de fluido es igual a la velocidad de cambio de la cantidad de movimiento de la partícula.

²⁰ HERNÁNDEZ VILLAMIZAR, Alexander. Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de flujo a superficie libre en un canal horizontal, Tesis de maestría Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia, 2014, p. 12.

Teniendo en cuenta lo anterior, las ecuaciones de cantidad de movimiento se obtienen igualando la tasa de cambio de la cantidad de movimiento en cada dirección (x, y y z) a las fuerzas actuantes en cada dirección:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + S_x \quad (4)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial x} + S_y \quad (5)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial x} + S_z \quad (6)$$

Donde p es la presión, D/Dt es la derivada sustancial o material y para este caso representa el vector aceleración, σ_{xx} , σ_{yy} y σ_{zz} representan los esfuerzos normales, que son esfuerzos que actúan perpendicular a una cara del elemento de fluido, σ_{xy} , σ_{yx} , σ_{xz} , σ_{zx} , σ_{yz} y σ_{zy} son los esfuerzos cortantes, es decir los esfuerzos que actúan tangencialmente a una cara del elemento de fluido; por último, S_x , S_y y S_z son los términos fuentes que incluyen las contribuciones debidas a las fuerzas de cuerpo²¹.

3.1.3 Ecuaciones de Navier- Stokes: Para flujo incompresible existen 4 incógnitas, las componentes del vector de velocidad (u, v, w), la componente de la presión que es un escalar, y cuatro ecuaciones: conservación de la masa, (escalar) y tres que se deducen de la segunda ley de newton, (vectorial).

²¹ Ibíd., p. 14.

Estas ecuaciones están acopladas (ver ecuación 16), lo que significa que algunas de las variables, aparecen en las cuatro ecuaciones; por lo tanto, el conjunto de ecuaciones diferenciales se debe resolver para las cuatro incógnitas. Además, se debe especificar las condiciones de contorno para las variables en todas las fronteras del dominio de flujo, entradas, salidas y paredes²².

Con la aplicación del teorema del transporte de Reynolds, se tiene la expresión general para la conservación de la cantidad de movimiento lineal como se aplica a un volumen de control:

$$\sum \vec{F} = \int \rho * \vec{g} * dV + \int \sigma_{ij} * \vec{n} * dA = \int \frac{\partial}{\partial t} (\vec{V}) dV + \int (\rho \vec{V}) \vec{V} * \vec{n} * dA \quad (7)$$

Donde σ_{ij} es el TENSOR DE ESFUERZOS:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{bmatrix}$$

La manera más directa (y más elegante) de deducir la forma diferencial de la conservación de la cantidad de movimiento es aplicando el teorema de la divergencia, que no se aplica solo a vectores sino también a otras cantidades, como los tensores, aplicando este teorema a la expresión general de la conservación de la cantidad de movimiento lineal se obtiene las ecuaciones de Cauchy.

²² CENGEL. Op. cit., p. 400.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \rho * \vec{g} + \vec{\nabla} * \sigma_{ij} \quad (8)$$

Estas se pueden deducir utilizando un volumen de control tridimensional, o con la segunda ley de Newton. En coordenadas cartesianas, las tres componentes de la ecuación de Cauchy son:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \quad (8.1)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho g_y + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \quad (8.2)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho g_z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \quad (8.3)$$

La ecuación de Cauchy no es muy útil, porque el tensor de esfuerzos σ_{ij} contiene nueve componentes, seis de los cuales son independientes por simetría. Además de la densidad y las tres componentes de la velocidad, existen seis incógnitas adicionales, para un total de 10 incógnitas ($\rho, u, v, w, \sigma_{xx}, \sigma_{xy}, \sigma_{yy}, \sigma_{yz}$ y σ_{zz}). Pero hasta el momento solo se ha comentado cuatro ecuaciones: una ecuación de continuidad y tres ecuaciones de Cauchy. Desde luego para que sean matemáticamente solucionables, el número de ecuaciones debe ser igual al número de incógnitas y por lo tanto se necesitan seis ecuaciones más. Dichas ecuaciones se llaman ecuaciones constructivas y permiten escribir las componentes del tensor de esfuerzo en términos del campo de velocidades y del campo de presión.

Ahora, el tensor de esfuerzos viscosos para un fluido newtoniano incompresible con propiedades constantes es:

$$\tau_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \tau_{ij} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 2\mu * \frac{\partial u}{\partial x} & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & 2\mu * \frac{\partial v}{\partial y} & \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & 2\mu * \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \\ \sigma_{ij} = \begin{bmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{bmatrix} &+ \begin{bmatrix} 2\mu * \frac{\partial u}{\partial x} & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & 2\mu * \frac{\partial v}{\partial y} & \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & 2\mu * \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Luego se sustituye esta ecuación en las tres componentes de la ecuación de Cauchy (8) y haciendo reordenamientos matemáticos se convierte en:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (10)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (11)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left[\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (12)$$

Reorganizando para flujo incompresible, las tres componentes cartesianas en la ecuación de cantidad de movimiento quedan:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \nabla^2 u \quad (13)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \nabla^2 v \quad (14)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \nabla^2 w \quad (15)$$

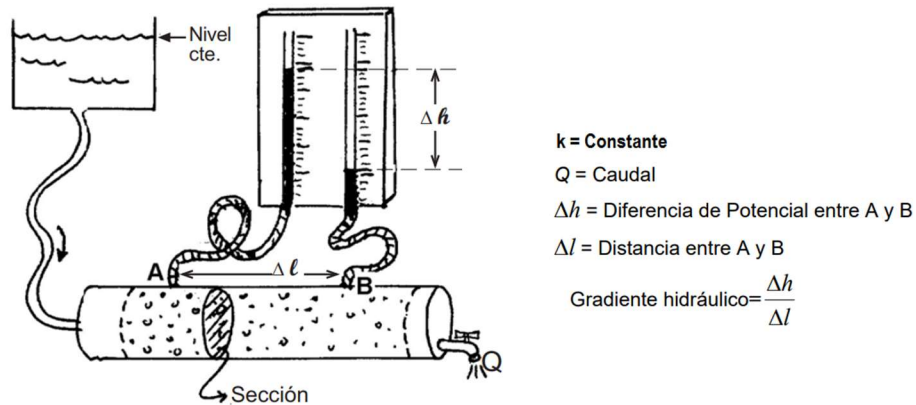
Por último, se combinan las tres componentes en una ecuación vectorial; el resultado es la ecuación de Navier-Stokes (ecuación de transporte), para flujo incompresible con viscosidad constante:

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{derivada temporal}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho\phi\vec{U})}_{\text{término convectivo}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi)}_{\text{término difusivo}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{término difusivo}} \quad (16)$$

3.1.4 Modelamiento de medios porosos: En 1856, en la ciudad francesa de Dijon, el ingeniero Henry Darcy fue encargado del estudio de la red de abastecimiento a la ciudad. Parece que también debía diseñar filtros de arena para purificar el agua (ver Figura 7), así que se interesó por los factores que influían en el flujo del agua a través de los materiales arenosos, y presentó el resultado de sus trabajos como un apéndice a su informe de la red de distribución. Ese pequeño apéndice ha sido la base de todos los estudios físico- matemáticos posteriores sobre el flujo del agua subterránea.

La investigación fundamental y aplicada de flujo, transferencia de calor y masa en medios porosos ha generado un interés creciente en las últimas tres décadas debido a la importancia de los medios porosos en muchas aplicaciones de ingeniería. Se ha estudiado los efectos de Darcy de inercia, transporte de energía en medio poroso para varias configuraciones geométricas y condiciones de contorno, la mayoría de los estudios utilizaron lo que se conoce comúnmente como el modelo generalizado de Darcy.

Figura 7. Permeámetro de carga constante



Fuente: SANCHEZ, Javier²³

Darcy encontró que el caudal que atravesaba el permeámetro* era linealmente proporcional a la sección y al gradiente hidráulico, y que la constante de proporcionalidad era característica del material, es decir: variando el caudal con un grifo y/o moviendo el depósito elevado, los niveles del agua en los tubos varían. Repitió el experimento de la figura 7 con varios materiales porosos cambiando las variables (caudal Q y altura ΔH)²³. Pues bien, realizando estos cambios, siempre que utilicemos la misma arena, se cumple que:

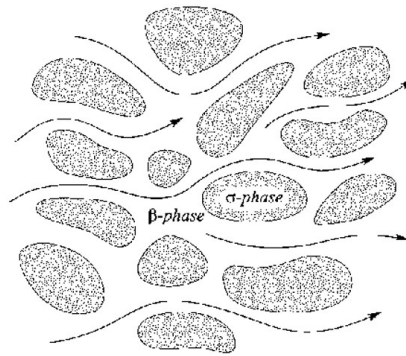
$$Q = K * Seccion * \frac{\Delta H}{\Delta L} \quad (17)$$

²³ SANCHEZ, Javier. Ley de Darcy, conductividad hidráulica. [En línea]. 2016. [Recuperado en Agosto 2017]. Disponible en: http://hidrologia.usal.es/temas/Ley_Darcy.pdf.

* Permeámetro: Básicamente un permeámetro, es un recipiente de sección constante por el que se hace circular agua conectado a uno de sus extremos un depósito elevado de nivel constante. En el otro extremo se regula el caudal de salida mediante un grifo. Finalmente se mide la altura de la columna de agua en varios puntos.

En el estudio de transporte en medios porosos, consideramos el sistema ilustrado en la Figura 8 donde σ representa la parte rígida o el sólido impermeable y la β representa el fluido newtoniano.

Figura 8. Fluido en un medio poroso



Fuente: VAFAI, Kambiz²⁴

La porosidad $\emptyset$ de un medio poroso es la fracción volumétrica de su espacio poroso. Se expresa como:

$$\emptyset = \frac{V_p}{V_b} \quad (18)$$

Donde V_p es el volumen aparente del medio poroso (volumen de los huecos) y V_b es el Volumen del poro (volumen del lecho, o volumen global de la muestra).

Los métodos experimentales comúnmente usados para determinar la porosidad de una muestra porosa incluyen:

- ✓ Método de imbibición

²⁴ VAFAI, Kambiz. Handbbook of porous media, New York, The Ohio State University Columbus: Marcel Dekker, 2000, p. 4.

- ✓ Método de inyección de mercurio
- ✓ Método de la extensión del gas
- ✓ Método de densidad

Estos modelos experimentales, sirvieron a varios investigadores que desarrollaron modelos matemáticos que permiten predecir estos fenómenos. Los medios porosos se modelan suavizando la derivada temporal agregando un término fuente a las ecuaciones de Navier-Stokes (16):

$$\frac{\partial(\phi \rho u_i)}{\partial t} + u_j \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + S_i \quad (19)$$

Donde ϕ es la porosidad (18) y se encuentra entre 0 y 1. El termino fuente S_i , se compone de dos partes, un término de pérdida viscosa y un término de pérdida inercial, que crea una caída de presión²⁵.

$$S_i = \left(-\mu D_{ij} + \frac{1}{2} \rho u_{kk} F_{ij} \right) u_i \quad (20)$$

Esta ecuación se conoce como la ecuación de DARCY-FORCHEIMER, Donde D_{ij} y F_{ij} se representan como los escalares D y F . En el caso de medios homogéneos simples se convierte en:

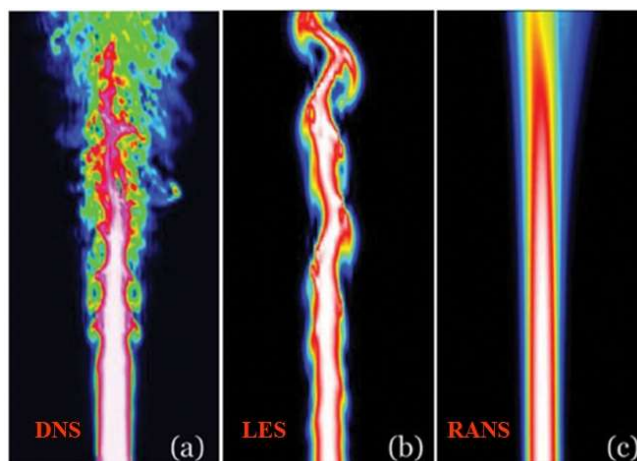
$$S_i = - \left(\mu D + \frac{1}{2} \rho u_{kk} F \right) u_i \quad (21)$$

²⁵ HAFSTEINSSON, Haukur Elvar. Porous Media in OpenFOAM. Chalmers Spring, 2009, p. 2.

3.2 MODELAMIENTO DE LA TURBULENCIA

La diferencia entre flujo laminar y flujo turbulento fue establecida en 1883 por el científico y matemático británico Osborne Reynolds mediante un sencillo dispositivo que le permitió visualizar los dos tipos de flujo. En su experimento, inyectó un colorante en el seno de un líquido que circulaba por un largo tubo de sección circular constante. Este experimento le permitió a Reynolds observar las tres características que son las que se denominan *flujo laminar*, *flujo de transición* y *flujo turbulento*.

Figura 9. Aproximaciones de la turbulencia



Fuente: Super Computing Science Consortium²⁶.

La turbulencia es una característica de los flujos, no de los fluidos. Su aparición exige de la existencia de un fluido en movimiento, en el que los fenómenos de convección (inerciales) asociados a la velocidad sean varios órdenes de magnitud superiores a los efectos difusos (disipativos) relacionados con la viscosidad de fluido.

²⁶ The Super Computing Science Consortium. [En línea]. 2008. [Recuperado en Marzo 2018]. Disponible en: <https://www.psc.edu/science/2008/sc2/>.

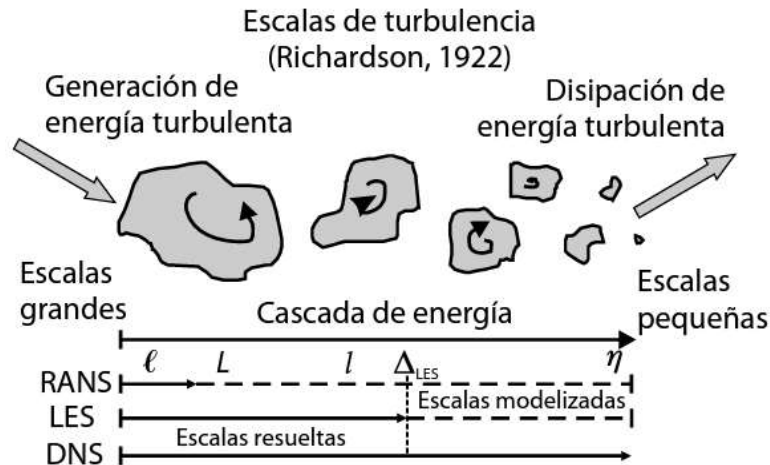
Por tanto, como se aprecia en la Figura 9 la turbulencia es un fenómeno muy complejo con escalas muy dispares que van desde el tamaño característico del flujo, hasta escalas disipativas pequeñas, aunque estén lejos de las escalas de longitud molecular por lo que aún se pueden emplear las ecuaciones de la Mecánica de fluidos para medio continuo. La solución numérica para flujos turbulentos puede abordarse desde distintos niveles de aproximación, proporcionando así descripciones de flujo con mayor o menor detalle. Esto se consigue en función del número de escalas de la turbulencia que se quieran resolver en la simulación.

En general se conocen tres aproximaciones diferentes como se muestra en la Figura 10: La *simulación numérica directa (DNS)*, en la que usa una malla extremadamente fina para poder resolver todas las escalas de la turbulencia (desde las integrales hasta las disipativas); la *simulación de vórtices grandes (LES)*, con mallas menos finas que permiten resolver sólo los torbellinos grandes que transportan entre el 50 y el 80% de toda la energía cinética turbulenta; y finalmente a la *simulación RANS*, (ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds), en la que todas las escalas se determinan mediante el uso de modelos de turbulencia²⁷.

3.2.1 Escalas de la turbulencia: Richardson (1922) fue el primero en introducir el concepto de cascada de energía para describir el proceso por el cual los vórtices más grandes de la turbulencia se dividen en estructuras más pequeñas a las cuales pasan energía (ver Figura 10), así sucesivamente hasta llegar a las escalas puramente disipativas.

²⁷ FERNANDEZ ORO. Op. cit., p. 265.

Figura 10. Escalas de turbulencia y proceso de cascada de energía (Esquema conceptual de Richardson)



Fuente: FERNANDEZ ORO, Jesús Manuel²⁸.

Este proceso de división se produce en cascada, por lo que en un movimiento turbulento coexisten una gran variedad de escalas, correspondientes a los distintos tamaños de vórtices, los cuales son arrastrados y estirados por la acción de los gradientes de flujo promedio dominante y con su interacción con los demás vórtices.

- **Simulaciones directas (DNS):** La resolución directa de las ecuaciones de Navier-Stokes, o DNS ('Direct Numerical Simulation') es la manera más evidente y precisa de predecir un flujo turbulento, diversos autores afirman que no se trata de un modelo de turbulencia en sí mismo, sino de la solución completa de las ecuaciones de Navier-Stokes. Se resuelven todas las escalas espaciales y temporales del flujo turbulento sin promediados o aproximaciones ya que sería preciso resolver todas las escalas del movimiento (desde la dimensión característica del problema hasta la escala de *Kolmogorov* o de pequeños

²⁸ Ibid., p. 260.

torbellinos); los únicos errores provienen de las discretizaciones numéricas. La idea es tan sencilla como difícil de llevar a la práctica, por lo que requiere un alto costo computacional. Sin embargo, su utilización práctica queda limitada a geometrías sencillas con Reynolds bajos²⁹.

- **Modelo (LES):** La técnica LES (*Large-Eddy simulation*) es una técnica intermedia entre DNS y RANS, en la que las contribuciones de las escalas grandes, portadoras de energía, y responsables de las estructuras de transferencia energética y de momento, se resuelven en el sistema de ecuaciones, basándose en un filtrado especial de las ecuaciones de gobierno del fluido de tal manera que se resuelven computándose las grandes escalas mientras que el efecto de las escalas más pequeñas se asume un modelo que permita considerar de forma aproximada su influencia en la variación general de los parámetros de flujo (Figura 10). Puesto que las escalas más pequeñas tienden a ser más isotrópicas, homogéneas y universales, y menos afectadas por condiciones de contorno que las macro-escalas, es de esperar que los modelos introducidos para esos pequeños torbellinos sean más generales y apenas requieran reajustes al cambiar de flujo³⁰.

La aproximación LES es similar a la DNS por cuanto proporciona siempre una solución tridimensional y dependiente del tiempo de las ecuaciones de Navier-Stokes. Por lo tanto, requiere también de la utilización de mallados muy finos, aunque sin llegar a las necesidades prácticas inviables del DNS. Por lo tanto, se pueden emplear para resolver flujos industriales a altos números de Reynolds, ya que su costo computacional es independiente del número de Reynolds (de

²⁹ *Ibíd.*, pp. 266-267.

³⁰ CAPOTE, J.A, et al. Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización especial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios. *Revista Internacional de Métodos numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 2008, p. 231.

forma ideal, siempre y cuando las escalas intermedias obedezcan la dinámica del sub-rango inercial)³¹.

- **Modelo (RANS):** De entre todas las aproximaciones posibles, el método más utilizado para introducir la simulación de la turbulencia en la metodología numérica es el del promedio de Reynolds de las ecuaciones constitutivas (RANS, o Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Este método utiliza la idea de promediado:

$$\langle f \rangle = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(t) dt \quad (22)$$

De modo que el operador que se emplea para buscar el comportamiento estadístico de las variables del flujo es un promedio temporal sobre las ecuaciones de transporte. Aquí, T corresponde con un intervalo de tiempo mucho mayor que las escalas integrales de flujo turbulento. El promedio definido en la anterior ecuación permite descomponer cualquier variable en su valor medio y su parte fluctuante como: $f' = f - \langle f \rangle$. Cuando este operador se aplica sobre las ecuaciones de flujo, se obtiene las ecuaciones de RANS que describen la evolución de las variables promediadas. El efecto de las fluctuaciones turbulentas aparece en un término adicional, denominado de las *tensiones de Reynolds*, y que debe ser modelada para cerrar el sistema de ecuaciones³². La forma completa de la ecuación RANS U-Momentum es:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta \bar{P}}{\delta x} + \bar{g} + \nu \nabla^2 \bar{u} + \nabla \cdot \overline{\mathbf{u}' \mathbf{u}'} \quad (23)$$

³¹ FERNANDEZ ORO. Op. cit., p 269.

³² Ibíd., p. 268.

Este resultado se puede completar en 3D para formar la ecuación generalizada de RANS:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \\ \bar{w} \end{pmatrix} + (\bar{u} \cdot \nabla) \begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \\ \bar{w} \end{pmatrix} = -\frac{\nabla \bar{P}}{\rho} + \bar{g} + \nu \nabla^2 \begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \\ \bar{w} \end{pmatrix} + \nabla \cdot \begin{pmatrix} -\overline{u'u'} & -\overline{u'v'} & -\overline{u'w'} \\ -\overline{v'u'} & \overline{v'v'} & -\overline{w'w'} \\ -\overline{w'u'} & -\overline{w'v'} & -\overline{w'w'} \end{pmatrix} \quad (24)$$

El último término de esta ecuación es el tensor de esfuerzos de Reynolds, escrito de esta forma ilustra cada una de las ecuaciones de momento. Ahora con la ecuación de continuidad promediada obtenemos:

$$\nabla \cdot (\bar{u} + u') = 0 \quad (25)$$

Tanto la media como la fluctuación de la velocidad satisfacen individualmente la continuidad:

$$\nabla \cdot (\bar{u}) = 0 \quad (26)$$

$$\nabla \cdot (u') = 0 \quad (27)$$

La ventaja de este enfoque es un relativo bajo costo computacional asociado al cálculo de la viscosidad turbulenta. En el caso del modelo Spalart-Allmaras, sólo una ecuación adicional es resulta, sin embargo, existen otros modelos que igualmente que el S-A resuelven tan solo una ecuación. En el caso de los k- ϵ y k- ω , dos ecuaciones de transporte son resueltas (una para la energía cinética turbulenta, k, y otra ya sea para la disipación turbulenta, ϵ , o la disipación específica, ω).

- **MODELO k- ϵ psilón:** El método más simple para simular la turbulencia es el que se basa en un modelo de dos ecuaciones, ya que permite la solución de las velocidades turbulentas y de las escalas de longitud de forma independiente. De entre toda la familia de modelo de dos ecuaciones, el modelo k- ϵ es el que más aceptación y utilización ha tenido. Su robustez, economía y razonable precisión

para resolver un gran número de flujos turbulentos explican su popularidad para simular flujos industriales y aplicaciones en transferencia de calor.

Por otra parte, la descomposición de la tasa de deformación de un elemento de fluido en un flujo turbulento se da entre un componente promedio y uno fluctuante, así:

$$E_{ij}(t) = \overline{E_{ij}} + e'_{ij} \quad (28)$$

Para obtener las ecuaciones del modelo k- ϵ estándar, en primera medida se debe considerar la suposición de Boussinesq (propuesta en el 1877), donde el tensor de Reynolds podría ser proporcional a las tasas medias de deformación:

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (29)$$

Donde δ_{ij} es el delta de Kronecker (cuyo valor de $\delta_{ij} = 1$ si $i=j$ y $\delta_{ij} = 0$ si $i \neq j$), μ_t es la viscosidad de remolino o turbulenta (con dimensiones Pa x s), k es la energía cinética turbulenta por unidad de masa definida como:

$$\text{Viscosidad de la turbulencia} \quad \mu_t = \left(\frac{C_\mu * k^2}{\epsilon} \right) \quad (30)$$

$$\text{Energía cinética } k = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad (31)$$

Donde C_μ es una constante empírica y ϵ es la tasa de disipación turbulenta, con las herramientas descritas anteriormente y otros tratamientos algebraicos, se procede a obtener las ecuaciones del modelo k- ϵ que resuelve la ecuación de

transporte para la energía cinética turbulenta k y para la tasa específica de disipación viscosa ε .

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (k \bar{U}) = \nabla \cdot \left[\frac{\rho v_t}{\sigma_k} \nabla k \right] + 2\rho v_t \overline{E_{ij}} \cdot \overline{E_{ij}} - \rho \varepsilon \quad (32)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\varepsilon \bar{U}) = \nabla \cdot \left[\frac{\rho v_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} 2\rho v_t \overline{E_{ij}} \cdot \overline{E_{ij}} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (33)$$

Con constantes empíricamente determinadas:

$$C_\mu = 0.09 \quad C_1 = 1.44 \quad C_2 = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3$$

La interpretación de las ecuaciones (32) y (33), es la siguiente:

$$\begin{array}{c} \text{Tasa de variación} \\ \text{de } k \text{ o } \varepsilon \end{array} + \begin{array}{c} \text{Transporte de } k \text{ o } \varepsilon \\ \text{por convección} \end{array} = \begin{array}{c} \text{Transporte de } k \text{ o } \varepsilon \\ \text{por difusión} \end{array} + \begin{array}{c} \text{Tasa de} \\ \text{producción de } k \text{ o } \varepsilon \end{array} - \begin{array}{c} \text{Tasa de destrucción} \\ \text{de } k \text{ o } \varepsilon \end{array}$$

Por último, para establecer los datos iniciales y límites en una simulación, se necesita especificar, la intensidad de la turbulencia, que es la relación de la magnitud de las fluctuaciones turbulentas a la magnitud de la velocidad media característica.

$$I = \frac{\sqrt{\frac{1}{3} * (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})}}{U_{ref}} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} k}}{U_{ref}} \rightarrow k = \frac{3}{2} (U_{ref} I)^2 \quad (34)$$

I es una cantidad adimensional y su valor normalmente tiene un valor que va desde [0,20]. $I \in [0,1]$ se considera de baja intensidad, $I \in [1,5]$ es de intensidad

media y [5,20] se considera de alta intensidad de turbulencia³³. Normalmente se utiliza la relación:

$$I = 0.16 * R_E^{-0.125} \quad (35)$$

Como condición límite para épsilon se puede utilizar

$$\varepsilon = \frac{(0.09)^{0.75} k^{1.5}}{0.07 * Lc} \quad (36)$$

Para el modelo k-Omega se calcula mediante:

$$\omega = \frac{\varepsilon}{k} \quad (37)$$

3.2.2 Comportamiento cerca de las paredes: Los modelos turbulentos RAS nombrados anteriormente se denominan High Reynolds (excepto los modelos k- ω), estos utilizan ecuaciones que sólo se pueden aplicar en condiciones completamente turbulentas. Al emplearlos, no se toman en cuenta los efectos en zonas de bajo número de Reynolds como la capa límite, por ejemplo. A continuación, se explican dos maneras de abordar este problema.

- Funciones de pared:

En este caso los efectos de bajo número de Reynolds no se calculan. Una celda en el límite de la pared se toma lo suficientemente gruesa como para asegurar que pueda asumir plenamente desarrolladas las condiciones de la capa límite turbulenta ($30 < y^+ < 200$ para el primer nodo). Este primer nodo de la malla se conoce como “punto de coincidencia” y utiliza la ley de pared con un valor adecuado de C para

³³ EINARSVE, M. CFDwOpenFoam. (En línea). 2016. [Recuperado en enero 2018]. Disponible en: <https://github.com/meinarsve/CFDwOpenFoam>.

relacionar el campo de velocidad a la tensión de cizallamiento y la superficie para lograr una correspondencia adecuada entre la viscosidad y los perfiles de velocidad logarítmicas.

$$U^+ = y^+$$

$$U^+ = \frac{1}{k} \ln|y^+| + c \quad (38)$$

Los parámetros adimensionales U^+ y y^+ se definen como U/u_T y $u_T y/\nu$ respectivamente. Una vez que se calcule la velocidad de fricción u_T se utilizan las funciones de pared para calcular los valores de k o ω .

$$U_T = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (39)$$

$$k = \frac{u_T^2}{\sqrt{\beta^*}} \quad (40)$$

$$\omega = \frac{k^{0.5}}{\beta^{*1/4} k y} \quad (41)$$

$$\varepsilon = \beta^{*3/4} \frac{k^{3/2}}{k y} \quad (42)$$

Donde τ_w es el esfuerzo de corte de pared, β^* es una constante y k la constante de Von Karman.

Este procedimiento sólo se aplica a la primera celda cerca de la pared. Los valores calculados de ϵ u ω se utilizan como condiciones de contorno. Las funciones de pared son una aproximación, las cuales funcionan bastante bien simulando flujo interno pero los resultados pierden precisión si se aplican a flujos externos o cálculos de transferencia de calor. Además, son muy sensibles a la ubicación del primer nodo de la malla cerca de la pared como se puede ver en la dependencia inversa en la coordenada y en las ecuaciones anteriores.

- **Bajo número de Reynolds:** Con el uso de estos modelos se resuelven los efectos de bajo número de Reynolds. Este enfoque se basa en la inserción un número suficiente de líneas de la malla cerca de la pared ($y^+ < 1$ para el primer nodo), de modo que la capa límite puede ser resuelta adecuadamente. Para ello, se realizan algunas modificaciones en las ecuaciones³⁴.

3.3 MÉTODOS NUMÉRICOS

Los modelos matemáticos descritos en capítulos previos, son modelados mediante sistemas de ecuaciones diferenciales que deben ser resueltas. Existen dos clases principales de métodos para resolver ecuaciones diferenciales parciales (EDP's): analíticos y numéricos. Los métodos analíticos están restringidos a problemas relativamente simples y no pueden aplicarse a un caso general. Esto es debido al hecho de que en algunos casos no es factible expresar en forma analítica la distribución de las variables de campo en función del tiempo y del espacio.

Los *métodos analíticos* son útiles, bajo ciertas suposiciones que simplifican el problema, para el entendimiento general de procesos de la dinámica de fluidos, estas soluciones son usualmente utilizadas como referencia en los *códigos*

³⁴ WILCOX, D. Turbulence modeling for CFD. DCW Industries, 1998.

numéricos, que son universales y permiten resolver EDP's, además de aplicarse a distribuciones de variables de campo continuas y discontinuas. Los siguientes grupos de métodos numéricos son los usualmente utilizados: métodos de diferencias finitas (MDF), métodos de volúmenes finitos (MVF), métodos de elementos finitos (MEF) y los métodos espectrales³⁵.

La ventaja principal del método de volúmenes finitos es que la discretización espacial se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema. Por lo tanto, no hay problemas con la transformación entre sistemas de coordenadas, como ocurre en el método de las diferencias finitas. Comparado con el método de las diferencias finitas, este método es muchísimo más flexible (puede implementarse en mallas estructuradas y no estructuradas); por este motivo, el método de los volúmenes finitos es el más empleado para la solución de flujos con geometrías complejas.

Por su parte, el método de los elementos finitos tiene una base matemática muy rígida, sin embargo, en ciertos casos el método es matemáticamente equivalente al método de los volúmenes finitos, siendo el esfuerzo matemático mucho mayor.

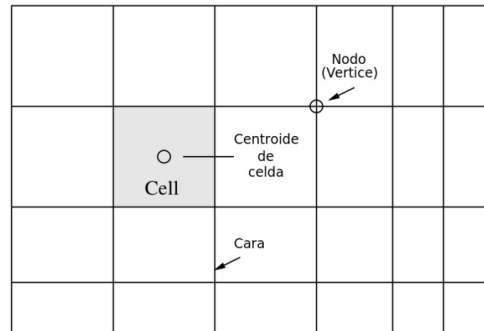
3.4 MALLADO

La generación de la malla es la parte más importante en la preparación de un modelo para simulación por volúmenes finitos. Ninguna simulación puede realizarse sin haber definido previamente una malla con una distribución de puntos (celdas) apropiada. Se han desarrollado un gran número de métodos para ayudar al usuario

³⁵ SEPULVEDA VILLARROEL, Victor Andres. Simulación de la cinética del secado a baja temperatura de eucalyptus nitens. Universidad del Bío-Bío, septiembre 2014, p. 32.

a realizar una malla óptima. Ha de tenerse en cuenta que la importancia de las propiedades de la malla es esencial, por cuanto la precisión y la bondad de los resultados finales estarán extremadamente condicionadas por la calidad de la malla utilizada.

Figura 11. Terminología de malla.



Fuente: Meshing for Numerical Simulations: A Generic Approach³⁶

Toda malla empleada en el método de volúmenes finitos discretiza el dominio físico en un número finito de celdas, siendo la celda la unidad fundamental del mallado. Cada celda está relacionada con un centroide, y también está limitada por un número de superficies o caras, que a su vez están ancladas a una serie de nodos o vértices (Ver figura 11). El tipo de conectividad existente entre los diferentes puntos (celdas) de la malla permite clasificar los mallados en dos categorías básicas:

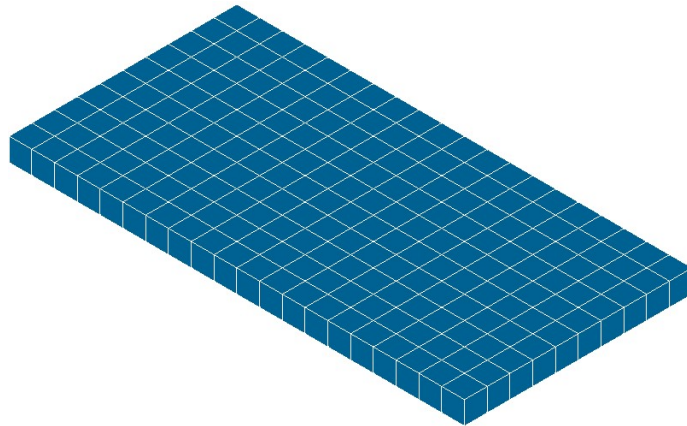
- Mallas estructuradas
- Mallas no estructuradas

3.4.1 Estructuradas: Los mallados estructurados son, del algún modo, la elección “natural” para resolver un flujo determinado, pues éste estará generalmente alineado con las direcciones principales de la malla. En cierto sentido, las líneas de

³⁶ MESHING FOR NUMERICAL SIMULATIONS: A GENERIC APPROACH. [Anónimo]. (En línea). [Recuperado en enero 2018]. Disponible en: <http://www.cfdyna.com/CFDHT/MeshGen.pdf>.

la malla siguen a las líneas de corriente, las cuales se alinean con los contornos sólidos del dominio como se observa en la siguiente figura:

Figura 12. Malla estructurada

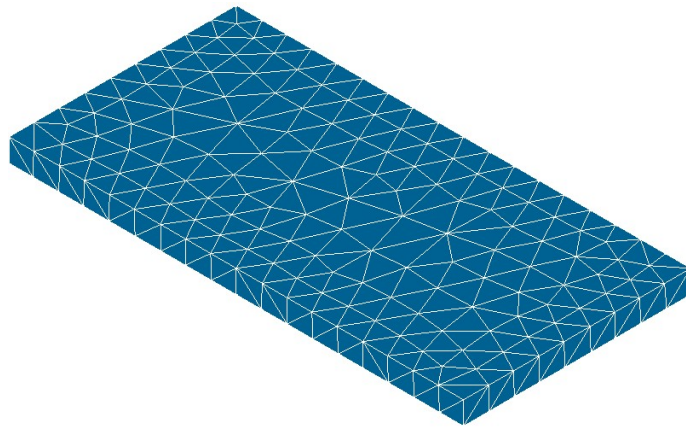


Es importante destacar que las mallas estructuradas (figura 12) tienen mejores precisiones, mejor tiempo de cálculo, además de menor consumo de memoria computacional en comparación con las no estructuradas. Por último, su morfología es ideal para la extensión a dominios tridimensionales, porque se economiza el número de celdas y porque pueden ser extruidos según una dirección preferente, permitiendo un mallado completamente regular en todas las direcciones.

3.4.2 No estructurada: La red no sigue ningún tipo de dirección preferente (Figura 13). El desarrollo de las mallas no estructuradas ha sido consecuencia de la necesidad de desarrollar geometrías cada vez más complejas en las que no es fácil poder adecuar bloques paralelepípedicos con mallas ortogonales. El empleo de este tipo de mallas consigue reducir significativamente los tiempos de construcción de los modelos, pero, lógicamente existe una penalización, tanto en términos de

precisión como en costo computacional, en comparación con las mallas no estructuradas.

Figura 13. Malla no estructurada



Las mallas no estructuradas se han ido convirtiendo en el estándar para el CFD de uso industrial debido a la imposibilidad de generar mallas estructuradas de forma completamente automática sobre geometrías arbitrarias.

Las mallas no estructuradas permiten, gracias a diversos algoritmos de generación (técnicas de avance frontal y de triangulación de Delaney), cubrir con celdas tetraédricas cualquier dominio tridimensional sin necesidad de conocer a priori las topologías constitutivas del mismo.

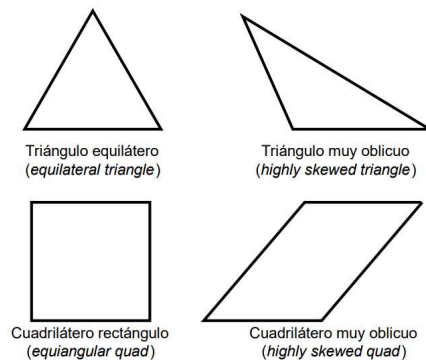
Una de las grandes ventajas de este tipo de mallas es la posibilidad de efectuar un refinamiento local sin afectar la distribución de celdas fuera de esta zona. Esto permite introducir estrategias de *adaptación de la malla*, bien para refinar localmente o bien para reducir el número de celdas. Por tanto, la adaptación de la malla se usa para incrementar o reducir el número de puntos de la malla de forma que se incremente la precisión en aquellas regiones con fuertes gradientes de flujo y se ahorre el gasto

computacional en aquellas zonas donde se ha alcanzado un nivel aceptable de precisión.

3.4.3 Parámetros de calidad de malla: La mejor manera de determinar la calidad de la malla es observando diversos parámetros como el máximo skewness (oblicuidad o asimetría), aunque es necesario también realizar una inspección visual. Una buena malla garantiza los mejores resultados para el análisis, minimiza las necesidades de otros análisis y mejora las capacidades predictivas. La malla debe ser suficientemente fina para capturar los fenómenos de interés. En mallas de calidad, la variación del tamaño de una cara o celda a la contigua es mínima.

El skewness es probablemente el indicador de calidad de malla más importante. Determina que tan próximo a una celda ideal es cada una de las celdas de la malla obtenida (ver Figura 14). Se entiende como celdilla ideal aquella que es equilátera, (todos los lados iguales entre sí).

Figura 14. Ejemplo gráfico del indicador skewness para diversas geometrías 2D



Fuente: Alcázar Vargas, Manuel G³⁷.

³⁷ ALCÁZAR VARGAS, Manuel Gonzalo. Influencia de la calidad de malla y MDE en la simulación multifásica 3D del flujo del río Guadalquivir. Escuela Politécnica superior de Jaén, 2017, pp. 42-44.

De acuerdo con la definición de skewness, un valor de 0 indica que la celda es equilátera (la mejor) y un valor de 1 indica que está completamente declinadas. Las celdas declinadas (astillas, sliver en inglés) se caracterizan porque sus nodos son casi coplanarios. Celdas con valor de skewness superior a la unidad son inválidas. Las caras y celdas muy oblicuas deben evitarse debido a que tienden a producir resultados mucho menos precisos que cuando las celdas son relativamente equiláteras. Existen dos métodos para medir la oblicuidad de una celda:

- Basados en la desviación de los ángulos. Se aplica a celdas y caras, como pueden ser pirámides y prismas, la asimetría se define mediante:

$$Skwns = \max \left[\frac{\theta_{max} - \theta_e}{180^\circ - \theta_e}; \frac{\theta_e - \theta_{min}}{\theta_e} \right] \quad (43)$$

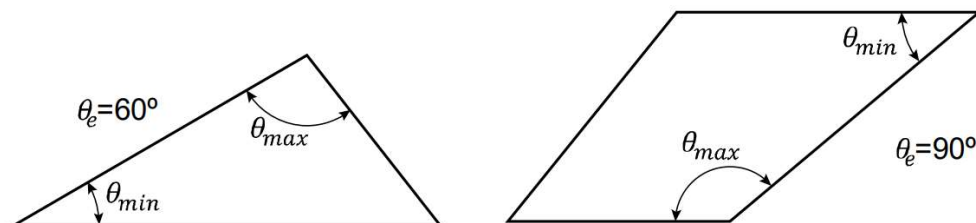
Donde:

θ_{max} : Es el ángulo mayor de la cara

θ_{min} : Es el ángulo menor de la cara

θ_e : Es el ángulo óptimo de la cara (60° triángulos, 90° cuadriláteros)

Figura 15. Sesgo equiangular normalizado



Fuente: Alcázar Vargas, Manuel G³⁷.

La oblicuidad de una celda será la máxima calculada para cada cara. Por ejemplo, una pirámide ideal (skewness =0) será aquella constituida por cuatro caras triangulares que sean equiláteras 60° y la base cuadrada 90°.

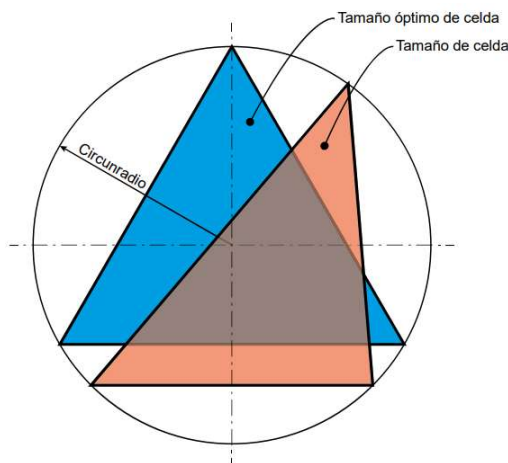
- Basados en el volumen equilátero (únicamente aplicables a tetraedros)

Se define oblicuidad basada en el volumen equilátero (Equilateral-VolumeBased Skewness) según la expresión:

$$Skwns = \frac{\text{Tamaño de celda óptimo} - \text{Tamaño de celda}}{\text{Tamaño de celda óptimo}} \quad (44)$$

Donde el tamaño de celda óptimo es el tamaño de una celda equilátera con el mismo circunradio como se muestra en la siguiente figura:

Figura 16. Definición Grafica skewness



Fuente: Alcázar Vargas, Manuel G³⁷.

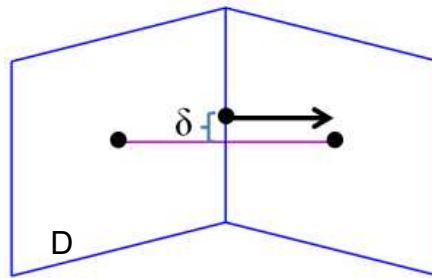
Otros aspectos importantes a tener en cuenta, en la calidad de la malla es el *sesgo ortogonal* en cada celda que se calcula utilizando el vector normal a la cara, el vector desde la celda hasta el centroide de cada una de las celdas adyacentes y el vector desde el centroide de la celda hasta cada una de las caras (ver Figura 16), obteniendo:

$$\text{Sesgo Ortogonal } \xi = \frac{\delta}{D} \quad (45)$$

Cuanto mayor sea ξ , mayor será el error introducido por la asimetría de la cuadrícula.

El efecto de la asimetría se demuestra al comparar dos mallas triangulares generado con diferentes algoritmos: Delaunay* y avance frontal.

Figura 17. Parámetros del sesgo ortogonal



Fuente: J. Rhoads³⁸

Sea cual sea el tipo de malla que el usuario CFD vaya a emplear, es esencial satisfacer una serie de requisitos básicos para conseguir una buena discretización. Entre ellas es preciso destacar las siguientes:

* Delaunay: es una red de triángulos que cumple la siguiente condición: La circunferencia circunscrita de cada triángulo de la red no debe contener ningún vértice de otro triángulo.

³⁸ RHOADS, J. Effects of grid quality on solution accuracy. OpenFOAM WorkShop, Julio 2014.

- La malla debe ser generada con cierta previsión en función del tipo de flujo que se espera resolver.
- Es necesaria una mayor resolución en aquellas zonas donde el flujo presente importantes gradientes.
- La resolución en las zonas donde se establezca una capa límite debe estar en consonancia con el modelo de turbulencia y de pared que luego vaya a utilizarse.
- Deben evitarse elementos singulares, muy deformados.
- Es interesante que el mallado sea capaz de adaptarse de forma dinámica a las variaciones de las variables en la solución del flujo.
- El tamaño global de la malla debe ajustarse a las posibilidades y potencia de cálculo de los equipos en los que vaya a resolver el problema

3.5 VENTAJAS E INCONVENIENTES

El uso de las técnicas CFD permite reducir tiempo y costos en fases de diseño, y además proporciona un número casi ilimitado de información: cada una de las celdas que componen el dominio de simulación, equivale a un pequeño sensor que nos mide cada una de las variables de flujo. Además, en aquellas situaciones en las que la experimentación no es segura, no es abordable por una empresa o simplemente no es viable, el CFD permite obtener información muy valiosa.

Sin embargo, las técnicas CFD no son gratuitas y aunque reducen notablemente los costos derivados de la experimentación, se necesitan máquinas muy potentes y las licencias para varios códigos, lo que encarecen mucho el precio final. Al mismo tiempo, es necesario contar con personal calificado, que sepa interpretar el sentido físico de los resultados que arroja el software de cálculo, que domine el programa y

la gestión de los resultados. En caso contrario, se pueden dar por buenos resultados erróneos o incoherentes³⁹.

La utilización del CFD tiene una doble vertiente. Por un lado, se puede utilizar un programa comercial en forma de caja negra (*a nivel de usuario*) de manera que, introduciéndole datos de entrada, el solver del programa nos devuelva la solución final que pasaríamos directamente a analizar. En este caso, no sabemos qué hace el programa internamente, pero obtenemos una solución a nuestro problema.

Por otro lado, se puede desarrollar un código propio y ejecutarlo. Lógicamente dispondríamos del control total de lo que estamos haciendo, pero se estaría agregando mayor dificultad al problema que se desea solucionar. Es interesante disponer de ambas perspectivas. “Aunque no seamos capaces de desarrollar por nuestra cuenta un código de propósito general capaz de resolver cualquier flujo, es interesante conocer los algoritmos y el proceso fundamental de resolución”¹⁷.

3.6 OPENFOAM

FOAM fue desarrollado a finales de la década de 1980 por Henry Weller y otros estudiantes en base c++ en el Imperial College of London. Durante algunos años FOAM se vendía como un código comercial por la empresa Nabla Ltd. Sin embargo, en 2004 FOAM fue liberado mediante GPL (GNU General Public License) y cambió su nombre a OpenFOAM. Actualmente OpenFOAM se distribuye por OpenCFD Ltd y OpenFOAM Foundation, que además tiene una gran base de usuarios en la mayoría de áreas de la ingeniería y la ciencia, tanto de las organizaciones comerciales y académicas.

³⁹ FERNANDEZ ORO. Op. cit., p. 15.

Open Field of Operation and Manipulation, abreviado como OpenFOAM, es un código CFD de open-source (código abierto) y con propósito general. OpenFOAM está escrito en C++ y utiliza un enfoque orientado a objetos haciéndose fácil de extender. El paquete incluye una amplia gama de características para resolver cualquier flujo de fluidos complejo que implican desde reacciones químicas, turbulencia y la transferencia de calor, hasta acústica, mecánica de sólidos y electromagnetismo⁴⁰.

3.6.1 Directorios OpenFOAM: Los valores numéricos implementados en OpenFOAM utilizan el Método de Volúmenes Finitos en mallas no estructuradas y métodos de corrección de presión⁴¹. Para solucionar un caso en OpenFoam se requieren tres directorios o carpetas (Ver Figura 18): “constant”, “system” y una carpeta time “0”, donde esta última corresponde al tiempo generalmente, pero también puede ser parte de un proceso de simulación después de cierto tiempo. Dichos directorios son los que contienen la información necesaria para ejecutar una simulación.

El directorio “constant” contiene dos subdirectorios indispensables:

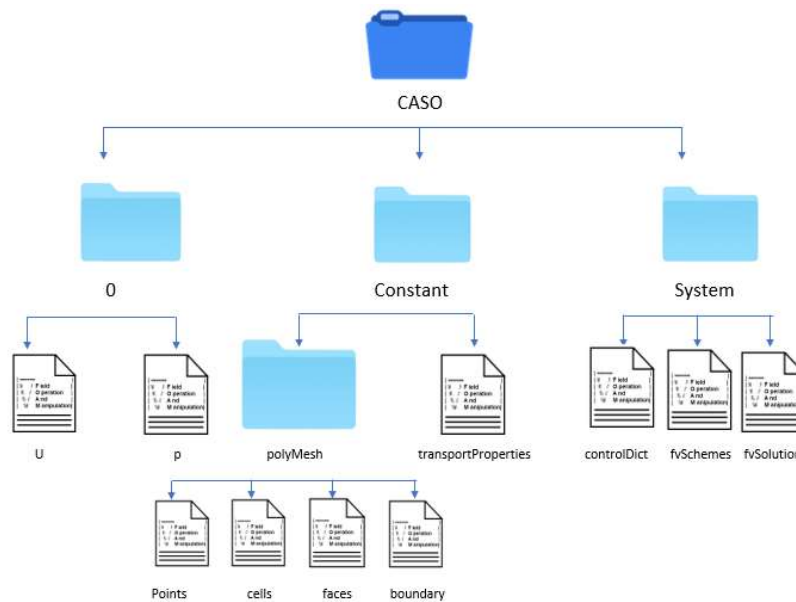
- 1) La carpeta “polyMesh”, encontrando toda la información de la malla, definida en varios archivos (boundary, faces, neighbor, owner, points22, entre otros).
- 2) Un archivo, como mínimo, que contiene las propiedades físicas del sistema, siendo generalmente el archivo transportProperties. Archivos adicionales pueden estar presentes, como: propiedades termodinámicas, propiedades de

⁴⁰ OPENFOAM. The open source CFD toolbox. (En línea). [Recuperado en junio 2017]. Disponible en: www.openfoam.com.

⁴¹ CHEN, F.HPC User Services LSU HPC & LONI. Introduction to OpenFoam. LSU, Information technology services, Louisiana State University, EE.UU., 24 Junio 2015.

modelos de turbulencia, parámetros de rotación, de porosidad entre otras constantes iniciales que el usuario desee especificar.

Figura 18. Estructura de caso OpenFoam, para simular un problema



Fuente: Adaptado de GOMEZ T, A.⁴²

Los directorios “time” contienen los archivos de datos para determinados campos de interés. Estos datos pueden ser las condiciones iniciales y de frontera especificados por el usuario (en el tiempo de la carpeta 0), o datos escritos conforme progresa la solución, (ver anexos D).

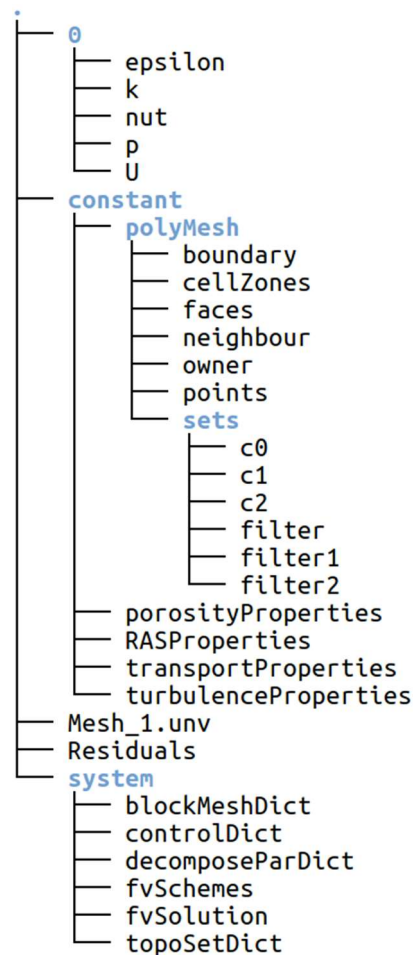
Un directorio “system” se compone de archivos que controlan el procedimiento de solución. Este directorio incluye los archivos: controlDict, donde se establece el tiempo inicial y final de la ejecución, intervalos de tiempo y parámetros de salida de

⁴² GOMEZ TORRES, Armando Miguel. CFD analysis for the transport of hydrogen in a simple geometry. Congress on Alternative Energies, Octubre 2013. p. 4, 15-18.

datos, como coeficientes aerodinámicos; fvSchemes que contiene los esquemas de discretización; y fvSolution, determinando el esquema del solucionador de ecuaciones a utilizar para cada variable a calcular, controles de paralelización, tolerancias y otros controles de algoritmos.

3.6.2 Solver PorousSimpleFoam

Figura 19. Librerías utilizadas por el solver porousSimpleFoam



En la figura 19 se muestra el código modelo e implementado para la solución de este trabajo, es necesario hacer las modificaciones (como, por ejemplo, dar las

Carpeta constant

```

/*-----* C++ -*-----*/
=====
\\      / F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
\\      / O peration  | Version: 2.4.0
\\      / A nd         | Web: www.OpenFOAM.org
\\      / M anipulation|
/*-----*-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant";
    object       porosityProperties;
}
// *****

porosity1
{
    type          DarcyForchheimer;           // Tipo o modelo matemático
    active        yes;
    cellZone      filter;                     // Nombre de las celdas

    DarcyForchheimerCoeffs    //Definición de las constantes D y F (Ver sección 5.1.2)
    {
        d  d [0 -2 0 0 0 0 0] (6.63e6 6.63e6 6.63e6); // Constante D ecuación de Ergun
        f  f [0 -1 0 0 0 0 0] (0 0 0);                // Constante F ecuación de Ergun

        coordinateSystem           // Se establecen las coordenadas
        {
            type      cartesian;           // Tipos de coordenadas
            origin    (0 0 0);
            coordinateRotation           // Coordenadas de giro de flujo circulante
            {
                type      axesRotation;    // a través del lecho poroso
                e1         (1 0 0);
                e2         (0 0 1);
            }
        }
    }
}

// *****

```

La principal diferencia entre este solucionador (solver) y otros, se encuentra en la carpeta /constant/porosityProperties. Que utiliza el modelo de DarcyForchheimer en el cual se tienen la constante D y F que permite simular el modelo de porosidad (se define en la sección 5.1.2). A continuación, se muestra la modificación de esta librería para un nivel de porosidad:

la misma cantidad de los niveles de porosidad que se controlan en toposet, es decir, en el trabajo presentado sería filter, filter1 y filter 2, estableciendo las características de cada nivel, como se determina anteriormente, ver anexos D.

Carpeta system

Para indicarle al software los parámetros pertenecientes a la simulación, es necesario modificar la carpeta system, en ella encontramos los archivos necesarios para desarrollar la simulación.

Para asignar a la geometría cada nivel de porosidad con junto a sus parámetros y forma del medio poroso, se cuenta con la librería topoSet:

Figura 21. Archivo de topoSet

```

/*-----*- C++ -*-----*/
//=====
// \ \ / / F i e l d      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
//  \ \ / / O peration   | Website:  https://openfoam.org
//   \ \ / / A n d       | Version:   6
//    \ \ / / M anipulation |
//-----*/

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       topoSetDict;
}

// *****

actions
(
    {
        name      c0;                      // Primer nivel de porosidad
        type      cellSet;
        action     new;
        source     cylinderToCell;
        sourceInfo
        {
            p1 (0 0.83 0);
            p2 (0 1.18 0);
            radius 1.27;
        }
    }

    {
        name      filter;
        type      cellZoneSet;
        action     new;
        source     setToCellZone;
        sourceInfo
        {
            set      c0;
            option   any;
        }
    }

    {
        name      c1;                      // Segundo nivel de porosidad

        type      cellSet;
        action     new;
        source     cylinderToCell;
        sourceInfo
        {
            p1 (0 1.54 0);
            p2 (0 1.89 0);
            radius 1.27;
        }
    }

    {
        name      c2;                      // Tercer nivel de porosidad
        type      cellSet;
        action     new;
        source     cylinderToCell;
        sourceInfo
        {
            p1 (0 2.25 0);
            p2 (0 2.6 0);
            radius 1.27;
        }
    }

);

// *****

```

A continuación, se hace una pequeña descripción del script y las herramientas que posee.

```

/*-----*- C++ -*-----*/
|=====|
| \ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open sources CFD Toolbox |
| \ \ / O p e r a t i o n | Version: 2.3.0 |
| \ \ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \ \ M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*/

FoamFile // Archivo Foam
    version 2.0 ;
    format ascii;

// *****

actions // Lista de acciones. Cada acción es un diccionario
name c0; // Nombre del conjunto
type: cellSet; // pointSet/faceSet/faceZoneSet/cellZoneSet
// Tipo: conjunto de puntos/conjunto de caras/conjunto de celdas/conjunto de zonas
action new; // Acción a realizar, (Requiere o no requiere fuente)
// no requiere fuente: limpiar/invertir/retirar

// // clear Borrar el conjunto de zonas
// // invert Seleccionar todos los elementos actuales no seleccionados
// // remove Eliminar conjuntos de zonas

// requiere fuente: nuevo/añadir/borrar/subconjunto
// // -require source: new/add/delete/subset

// // new Crear nuevo conjunto o zona desde la fuente
// // add Agregar fuente a los contenidos
// // delete Eliminar la fuente de los contenidos
// // subset Mantiene elementos tanto en contenido como del origen

source cylinderToCell; Entrada de fuente

```

```

//La entrada de fuente varía según el tipo de conjunto:
faceToCell          // // Celdas con centro de celda dentro de una cara
boxToCell           // // Celdas con centro de celda dentro de una caja o cuadro
cylinderToCell     // // Celdas con centro de celda dentro de un cilindro
sphereToCell        // // Celdas con centro de celda dentro de una esfera
nearestToCell       // // Celdas con centro de celda con centro cercano a una coordenada
surfaceToCell       // // Celdas seleccionadas basada en la superficie

sourceInfo:       // // Información de la fuente según la seleccionada anteriormente.
{
  P1  (x y z) ;    // // coordenada inferior del cilindro
  P2  (x y z);     // // coordenada superior del cilindro
  Radius  r;      // // radio del cilindro
}

```

En la carpeta system también se encuentra el archivo fvSchemes que ajusta los esquemas numéricos para los términos, tales como las derivadas de las ecuaciones, que son calculadas durante la simulación. El conjunto de términos, para el cual se deben especificar los esquemas numéricos, pueden ser divididos en las siguientes categorías:

- timeScheme: Primeras y segundas derivadas de tiempo ($\partial/\partial t$, $(\partial^2/\partial^2 t)$).
- gradScheme: Gradiente ∇ .
- divSchemes: Divergencia ∇ .
- laplacianSchemes: Laplaciano ∇^2
- interpolationSchemes: Interpolación de los valores entre la celda y cara.
- snGradSchemes: Componente del gradiente normal a la cara.
- fluxRequired: Campos que necesitan la generación de un flujo.

Si alguna de las categorías se especifica como default, este valor sería asignado a los términos pertenecientes a la misma. Si el usuario no desea usar para todos los términos el valor ajustado en default, puede establecer individualmente el esquema que desea usar, éste sobre escribe el valor de default. Por otro lado, el usuario tiene la opción de especificar a default con un valor de none, de esta manera se debe especificar para cada término su tipo de discretización. Por ejemplo, en el subdirectorio divSchemes:

Figura 22. Archivo fvSchemes

```

/*----- C++ -----*/
=====
V F i e l d      OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
  O p e r a t i o n   Version:  2.4.0
  A n d               Web:      www.OpenFOAM.org
  M a n i p u l a t i o n
/*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       fvSchemes;
}
// ***** //

ddtSchemes
{
    default      steadyState;
}

gradSchemes
{
    default      Gauss linear;
}

divSchemes
{
    default      none;

    div(phi,U)      bounded Gauss upwind;
    div((nuEff*dev(T(grad(U)))) Gauss linear;
    div(phi,epsilon) bounded Gauss upwind;
    div(phi,k)       bounded Gauss upwind;
}

laplacianSchemes
{
    default      Gauss linear corrected;
}

interpolationSchemes
{
    default      linear;
}

snGradSchemes
{
    default      corrected;
}

fluxRequired
{
    default      no;
    p            ;
}

// ***** //

```

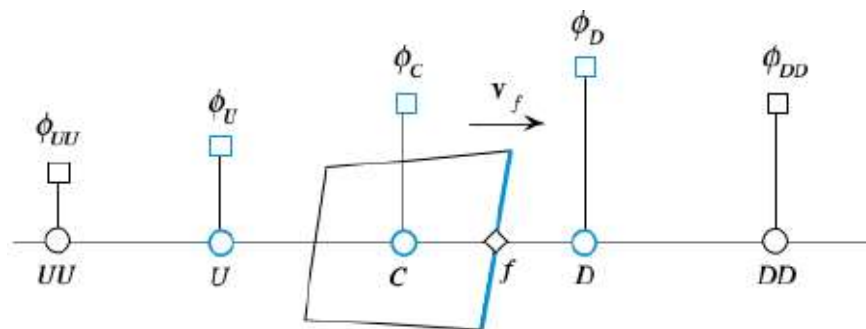
se puede ver que el valor de default es none, lo que obliga a definir cada término por separado.

En el archivo fvScheme se controla los esquemas de interpolación como los esquemas de la superficie, esquema del término temporal y el esquema del término divergente. Para el caso del esquema de superficie y del término temporal se dejan los que OpenFOAM trae por defecto; para el esquema convectivo de la ecuación de transporte $\nabla(\rho U)$ en OpenFOAM se identifica como $\text{div}(\phi, U)$, donde ϕ hace referencia al flujo $\phi = \rho U$. El esquema de Gauss es la única opción en OpenFOAM de discretización y requiere la selección de un esquema de interpolación para el campo dependiente. Gauss < esquema de interpolación>. Los esquemas de interpolación más utilizados en OpenFOAM se ven en la siguiente tabla:

Tabla 1. Esquemas termino divergente

Esquema	Comportamiento Numérico	Comportamiento Matemático
Upwind	Primer orden, limitado	$\phi_f = \phi_c$
Diferencias centradas	Segundo orden, limitado	$\phi_f = 0,5(\phi_c + \phi_D)$
Segundo orden Upwind	Segundo orden, limitado	$\phi_f = 1,5\phi_c + 0,5\phi_U$
Quick	Primer/segundo orden, limitado	$\phi_f = 0,375\phi_D + 0,75\phi_c + 0,125\phi_U$

Figura 23. Esquemas para describir efecto convectivo tabla 2



Fuente: MENESES E.⁴³

⁴³ MENESES CHACÓN. Op. cit., p. 82.

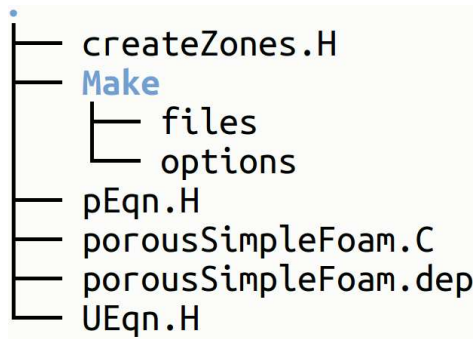
Las demás librerías que trae un caso OpenFOAM, se encuentran en los anexos, acá se limita a describir las más importantes, en la página de OpenFOAM⁴⁰ se puede observar la descripción de estas, más detalladamente.

Por último, se observan dos archivos llamados Mesh.unv y Residual, el primero es la geometría con su respectiva malla que ha sido exportada desde el programa SALOMÉ. El segundo, es el script que permite ver, el error producto de las simulaciones (Residuals), el cual se expone a continuación:

```
set logscale y
set title "Residuals"
set ylabel 'Residual'
set xlabel 'Iteration'
plot "< cat log | grep 'Solving for epsilon' | cut -d ' ' -f9 | tr -d ','" title 'epsilon' with
lines,\
"< cat log | grep 'Solving for Uy' | cut -d ' ' -f9 | tr -d ','" title 'Uy' with lines,\
"< cat log | grep 'Solving for k' | cut -d ' ' -f9 | tr -d ','" title 'k' with lines,\
"< cat log | grep 'Solving for Ux' | cut -d ' ' -f9 | tr -d ','" title 'Ux' with lines
pause 1
reread
```

Para observar el comportamiento de la simulación, es importante tener este archivo dentro de la carpeta del caso, y digitar las variables que se quiera visualizar, para su ejecución es necesario poner en la terminal gnuplot Residuals.

Solucionador medio poroso: El solver de porousSimpleFoam se encuentra en: OpenFoam/applications/solvers/incompresible/simpleFoam/porousSimpleFoam y el árbol completo es:



Como muestra, incluye el código principal que es porousSimpleFoam.C y en la parte principal de este código incluye:

UEqn.H es como sigue:

```

// Construct the Momentum equation
tmp<fvVectorMatrix> UEqn
(
    fvm::div(phi, U)
    + turbulence->divDevReff(U)
    ==
    fvOptions(U)
);
mrfZones.addCoriolis(UEqn());
UEqn().relax();
  
```

Que es el modelo que permite solucionar la ecuación de momento al incluir la resistencia de los medios porosos, en forma implícita o en forma explícita. El modelo poroso se agrega en pZones.addResistance (UEqn ()), pZones, que es la zona de porosidad, construida en el blockMesh, a través de topoSet. se encuentran en: OpenFOAM/src/finiteVolume/cfdtools/general/porosityModels.

Por último, no olvidar la nomenclatura que utiliza OpenFoam para cada variable física, estas se dan a continuación:

Tabla 2. Dimensiones OpenFOAM

Posición	1	2	3	4	5	6	7
Propiedad	Massa	Lenght	Time	Temperatua	Cantidad se sustancia	Corriente	Intensidad Luminosa
Unidades	Kilogramo (kg)	Metro (m)	Segundo (s)	kelvin (K)	Mol (mol)	Ampere (A)	Candela (cd)

Las dimensiones se dan entre corchetes, por ejemplo:

- dimensions [0 1 -1 0 0 0 0];
- d d [0 -2 0 0 0 0 0];

Se observa que las dimensiones del primer ejemplo serian:

$$m * s^{-1} = \frac{m}{s}$$

Que son dimensiones de velocidad.

4. CASO BENCHMARK

Antes de tratar el tema principal de la simulación de la secadora industrial de café, se presenta esta sección donde se habla de algunos estudios previos, con el fin de fortalecer las competencias necesarias en CFD adquiriendo destrezas en el manejo de OpenFOAM, además se demuestra la capacidad del código junto con la exactitud numérica de los modelos implementados en el mismo. Se impuso como punto de partida una metodología de preparación en la cual se realizan estudios del modelo matemático (ecuaciones gobernantes), exploración del código de solución (OpenFOAM) y modelamiento de caso Benchmark similares al problema a resolver.

4.1 SMITH & HUTTON

En un artículo bien conocido publicado en 1982⁴⁴, Smith y Hutton presentaron los resultados de varios intentos de autores para resolver numéricamente un problema de prueba especialmente diseñado que involucra la curvatura aerodinámica típica de los flujos de re-circulación y las variaciones pronunciadas en el escalar transportado. La mayoría de los esquemas fueron capaces de manejar adecuadamente el régimen de número bajo de Peclet* optimizado por difusión; pero en el importante régimen de alta convección, Smith y Hutton concluyeron que el modelado de convección “sigue siendo el arte del compromiso entre los errores difusivos y oscilatorios”.

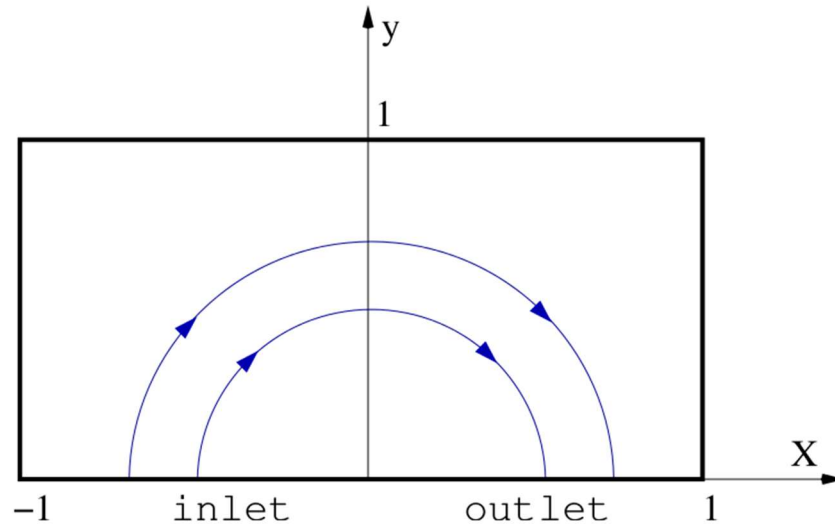
El problema propuesto por Smith Hutton es el más utilizado en estudios numéricos para evaluar esquemas de difusión-convección. El objetivo es hallar la solución de

⁴⁴ SMITH, R.M y HUTTON, A. G. The numerical treatment of advection: a performance comparison of current methods. Berkeley, Gloucestershire: Numerical Heat Transfer, 1982, p. 451.

* El número de Peclet permite estimar las proporciones relativas de calor transmitido por conducción y por convección. Es función de las características del flujo (caudal y geometría) y de la difusividad térmica

estado estable de la ecuación de difusión-convección en una región rectangular. La solución encontrada para la variable ϕ depende de la relación ρ/Γ , su valor indica que fenómeno influye más si el difusivo o el convectivo (donde ρ =Densidad y Γ =Conductividad térmica del fluido).

Figura 24. Esquema general del problema propuesto.



Fuente: SMITH, R.M & HUTTON, A.G⁴⁴

Se desea mediante el software OpenFoam simular el comportamiento de ϕ para al problema de Smith-Hutton (ver figura 24) y evaluar diferentes esquemas de solución en los problemas de convección- difusión, diferencias centradas de primer orden, esquemas Quick, esquemas Upwind de primer y segundo orden (ver tabla 2). A continuación, se da el campo de velocidades:

$$u(x, y) = -\frac{\partial \psi}{\partial y} = 2y(1 - x^2) \quad \text{Componente horizontal de la Velocidad}$$

$$u(x, y) = -\frac{\partial \psi}{\partial x} = 2x(1 - y^2) \text{ Componente vertical de la Velocidad}$$

Gran parte de las condiciones de frontera son de tipo Dirichlet, pero también se utilizan tipo Neuman, los valores son:

En la entrada (inlet)

$$\phi = 1 + \tanh(\alpha(2x + 1))$$

$$y = 0$$

$$x \in (-1, 0)$$

En la salida (outlet)

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0$$

$$y = 0$$

$$x \in (0, 1)$$

Y en las otras caras

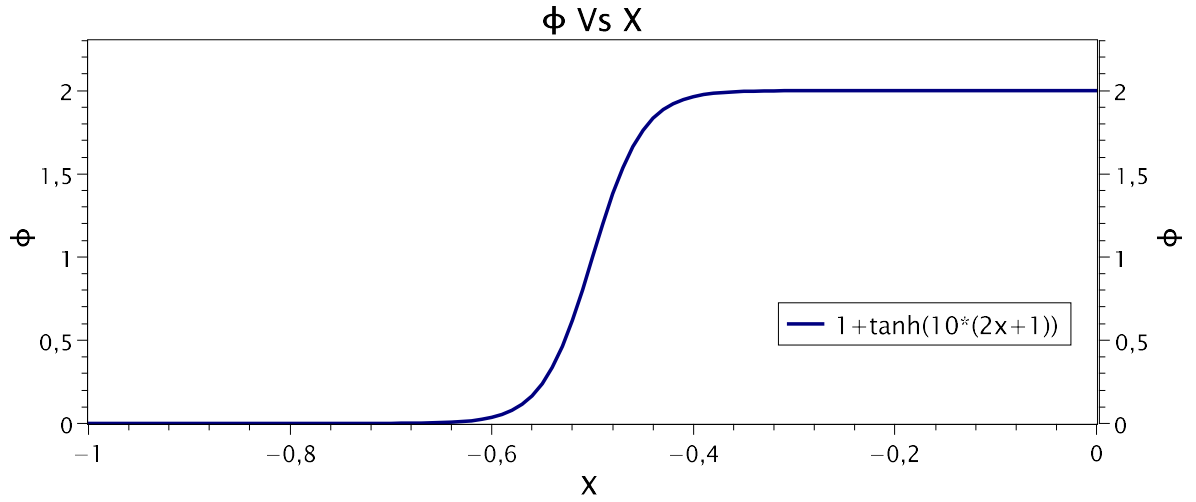
$$\phi = 1 - \tanh(\alpha)$$

$$\alpha = 10$$

Donde α es un parámetro ajustable que controla el perfil de la variable ϕ en la frontera de entrada. La solución encontrada para la variable ϕ depende de la relación ρ/Γ , su valor indica qué tan influyentes son el fenómeno difusivo y el convectivo.

La entrada se dividió en 2 (ver figura 26) ya que al graficar las condiciones de entrada $(1 + \tanh(10 \cdot (2x + 1)))$ se obtiene la figura 25 donde se observa que el comportamiento de la entrada ($x = -1$ a $x = 0$) es una función escalón entre 0 y 2

Figura 25. Condiciones flujo de entrada.



Para resolver los modelos matemáticos es necesario hacer hipótesis como considerar el flujo bidimensional, flujo incompresible, propiedades intrínsecamente constantes (densidad, conductividad), y paredes adiabáticas que finalmente permiten discretizar la ecuación de transporte al integrar cada término de la ecuación obteniendo:

Difusión:

$$D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y}{\partial x_e}; D_w = \frac{\Gamma_w \Delta y}{\partial x_w}; D_n = \frac{\Gamma_n \Delta x}{\partial y_n}; D_s = \frac{\Gamma_s \Delta y}{\partial y_s} \quad (46)$$

Convección

$$F_e = \rho * \Delta y * u_e; F_w = \rho * \Delta y * u_w; F_n = \rho * \Delta x * u_n; F_s = \rho * \Delta x * u_s \quad (47)$$

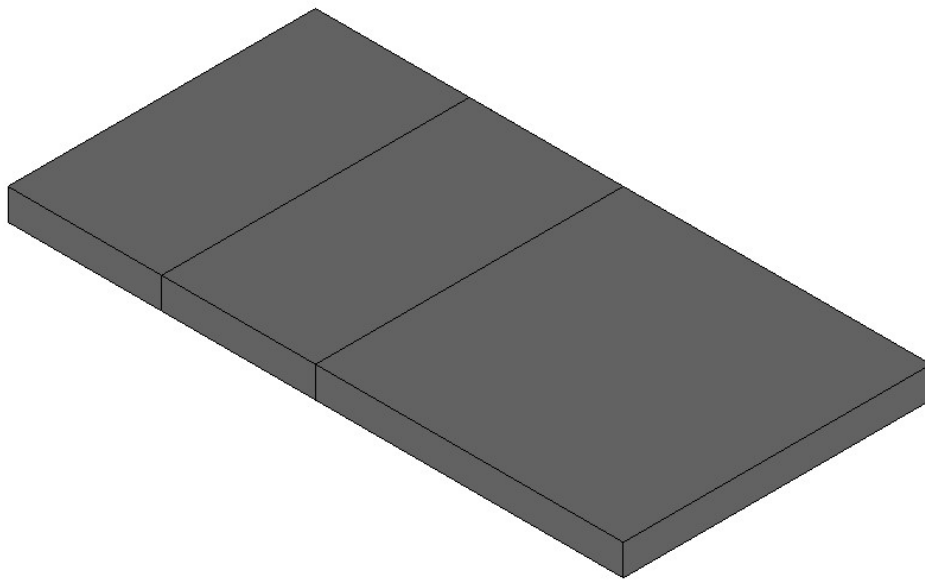
$$a_p^o = \frac{\rho \Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (48)$$

Reescribiendo la ecuación luego de varias interacciones matemáticas se obtiene:

$$a_p \phi_p = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \quad (49)$$

Ahora solo queda definir la propiedad ϕ en las paredes del volumen de control, ϕ_E , ϕ_W , ϕ_N , ϕ_S . Definir estos términos depende del esquema a utilizar, posterior a esto, se encuentran los valores de a_E , a_W , a_N , a_S y a_p . Para ver más detalladamente el tema ver MALALASEKERA⁴⁵.

Figura 26. Geometría Smith-Hutton.



La geometría (figura 26) y el mallado (figura 12) se diseñó en el software Salomé⁴⁶, luego de ello mediante la función `ideasUnvToFoam` se integraron sus parámetros y coordenadas al código de OpenFoam.

⁴⁵ W. MALALASEKERA y H. VERSTEEG, An introduction to computational fluids dynamics, 2 ed., Edinburgh: Pearson Prentice Hall, 2007, p. 116.

⁴⁶ SALOME. [En línea]. 2017. [Recuperado en mayo 2018]. Disponible en: <http://www.salome-platform.org>

Para resolver el problema de Smith-Hutton utilizando OpenFoam, es necesario utilizar el solver scalarTransportFoam, se extraen las carpetas system, 0 y constant, de los tutoriales que trae por defecto OpenFOAM, posteriormente con la ayuda del funkySetFields que es una utilidad que establece el valor de un campo escalar o vectorial en función de una expresión que se puede ingresar a través de la línea de comando o un diccionario; se escriben los gradientes de velocidad de la siguiente manera: funkySetFields -case . -field U -create -expression 'vector(2*pos().y*(1-pos().x*pos().x), -2*pos().x*(1-pos().y*pos().y),0)' -time 0

Figura 27. Línea de comando velocidad funkySetFields

```
leonardo@leonardo-X455LAB:~/smithHutton$ funkySetFields -case . -field U -create -expression 'vector( 2*pos().y*(1-pos().x*pos().x), -2*pos().x*(1-pos().y*pos().y),0 )' -time 0
/*
=====
| \\\  /  F ield      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
|  \\ /   O peration   | Version: 2.4.0
|   /    A nd          | Web: www.OpenFOAM.org
|  /     M anipulation  |
|=====|
*/
Build : 2.4.0-dcea1e13ff76
Exec   : funkySetFields -case . -field U -create -expression vector( 2*pos().y*(1-pos().x*pos().x), -2*pos().x*(1-pos().y*pos().y),0 ) -time 0
Date   : Nov 23 2018
Time   : 05:34:20
Host   : "leonardo-X455LAB"
PID    : 5862
Case   : /home/leonardo/smithHutton
nProcs : 1
sigFpe : Enabling floating point exception trapping (FOAM_SIGFPE).
fileModificationChecking : Monitoring run-time modified files using timeStampMaster
allowSystemOperations : Allowing user-supplied system call operations

// ***** //
```

Esto permite que se establezca el gradiente de velocidad deseado como establece la figura 25, obteniendo las coordenadas necesarias en la carpeta de velocidad: /0/U.

Para seleccionar cada uno de los esquemas de discretización se modifica div(phi,T) en /system/fvSchemes de OpenFoam teniendo en cuenta los siguientes códigos para cada esquema:

- Upwind primer orden: Upwind

- Upwind segundo orden: LinearUpwind
- Quick: Quick
- CDS: Linear

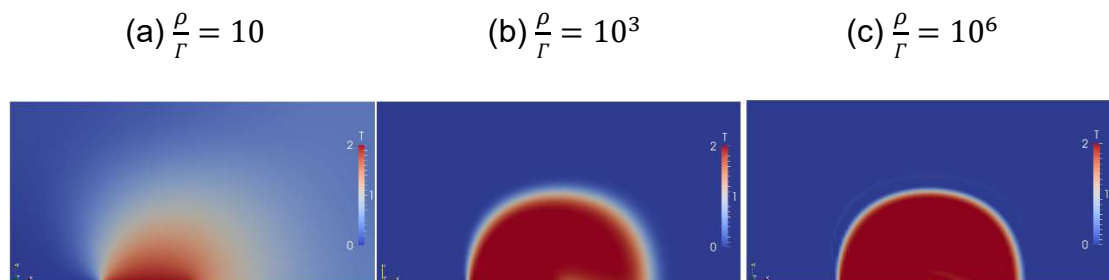
Tabla 3. Datos experimentales en la salida para diferentes ρ/Γ

x	$\frac{\rho}{\Gamma} = 10$	$\frac{\rho}{\Gamma} = 10^3$	$\frac{\rho}{\Gamma} = 10^6$
0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,1	0,1	0,1
0,2	0,2	0,2	0,2
0,3	0,3	0,3	0,3
0,4	0,4	0,4	0,4
0,5	0,5	0,5	0,5
0,6	0,6	0,6	0,6
0,7	0,7	0,7	0,7
0,8	0,8	0,8	0,8
0,9	0,9	0,9	0,9
1,0	1,0	1,0	1,0

Fuente: SMITH, R. M.; HUTTON, A. G⁴⁴.

4.1.1 Análisis de resultados Smith & Hutton

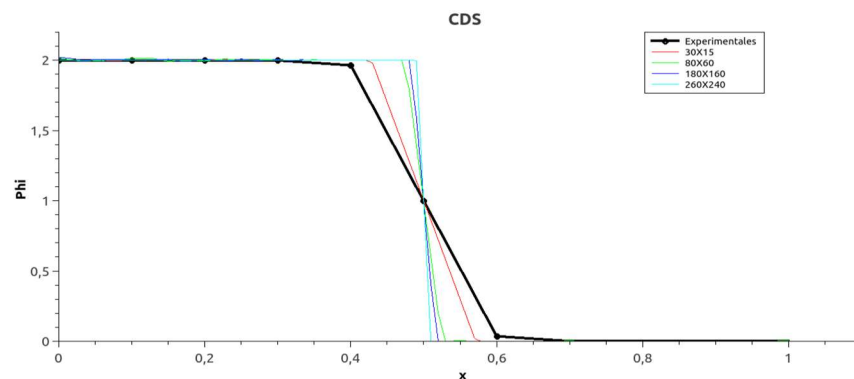
Figura 28. Resultados Smith-Hutton



Se pueden ver las gráficas de resultados en el anexo A, algunas de las conclusiones y enseñanzas que se dieron, tras la resolución de este ejercicio son:

- Por defecto se realizó la primera simulación con el esquema linearUpwind que trae la carpeta de scalarTransportFoam integrada, se observa que este esquema es uno de los que se aleja más de los resultados por las variaciones que se presentan.
- Se puede observar en las gráficas de resultados, una mejor aproximación en los esquemas Quick y CDS.
- El hecho de tener una malla fina no asegura en todos los casos el mejor resultado, además de tener un costo computacional alto innecesario; se obtienen resultados igualmente aproximados con mallas menos densas.

Figura 29. Comparación malla CDS Smith-Hutton



- Para decidir si las iteraciones han sido resueltas correctamente se plantea una comparativa entre la solución obtenida en la iteración actual y la solución de la iteración previa, normalmente denominado RESIDUAL. Se debe definir un valor previo lo suficientemente pequeño para que la gráfica lo alcance y se convierta en un permanente, cuando esto ocurre, se dice que la solución a convergido correctamente.

- La FALSA DIFUSIÓN de los resultados es acreditada básicamente a la mala estimación de las funciones de interpolación polinómicas de bajo orden (elevado error por truncamiento) y al intento de limitar el carácter espacial del dominio a una aproximación unidimensional, puede aumentar por una malla no adecuada o un número de Peclet demasiado elevado, donde parece que hay más difusión de la que realmente hay.
- Para realizar la simulación de un problema de CFD en OpenFOAM, se debe conocer y comprender la estructura de casos, donde un caso es definido como un conjunto de carpetas y archivos que especifican un problema ingenieril específico y la manera en que se quiere resolver. Por tanto, se requieren tres directorios o carpetas: “constant”, “system” y una carpeta time “0”, dichos directorios son los que contienen la información necesaria para ejecutar una simulación.
- Se destaca el uso de una herramienta (ToolBox) de OpenFOAM llamada SWAK4FOAM, la cual facilita el ingreso de un campo de velocidades en el dominio. Esta a su vez permite la aplicación de otros tipos de condiciones de frontera. Por otro lado, se estudia los términos que maneja OpenFOAM para referirse a: esquemas de interpolación, solvers, y control de convergencia.

4.2 BENCHMARK DE VALIDACIÓN POROUSSIMPLEFOAM

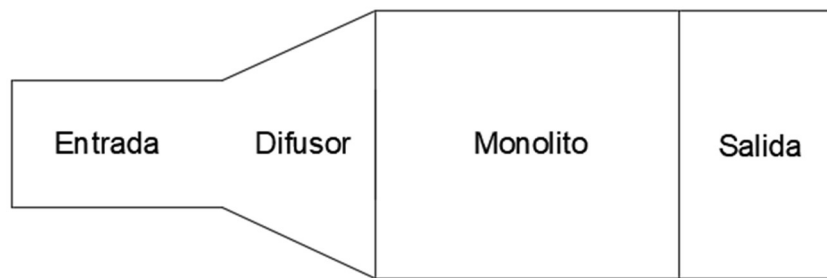
En esta sección se valida el solver (porousSimpleFoam) mediante caso benchmark (R.E. Hayes⁴⁷), donde se estudio una simulación computacional de un convertidor catalítico. Las simulaciones se validan contra datos experimentales obtenidos de la literatura⁴⁷, donde se incluye factores tales como la densidad de la malla, el ángulo del difusor y las condiciones de pared.

⁴⁷ HAYES, R. E, *et al.* CFD modelling of the automotive catalytic converter. Elsevier, 12 de Abril 2012, p. 94.

Se seleccionó la malla adecuada y se corrió con dos modelos de turbulencia (k-Omega y k-Epsilon), se corrió con un modelo más de turbulencia, donde no se observó cambios considerables en los resultados.

4.2.1 Descripción del caso: Los convertidores catalíticos se utilizan en la mayoría de los vehículos de pasajeros en Europa y América del Norte para cumplir con los requisitos de los límites de emisión obligatorios por el gobierno. El convertidor está compuesto por un sustrato tipo monolito, cuya superficie está recubierta con un delgado recubrimiento catalítico (Ver figura 30). El monolito recubierto está encerrado en la tubería interior, que se coloca apropiadamente en el sistema de escape.

Figura 30. Dominio computacional Benchmark



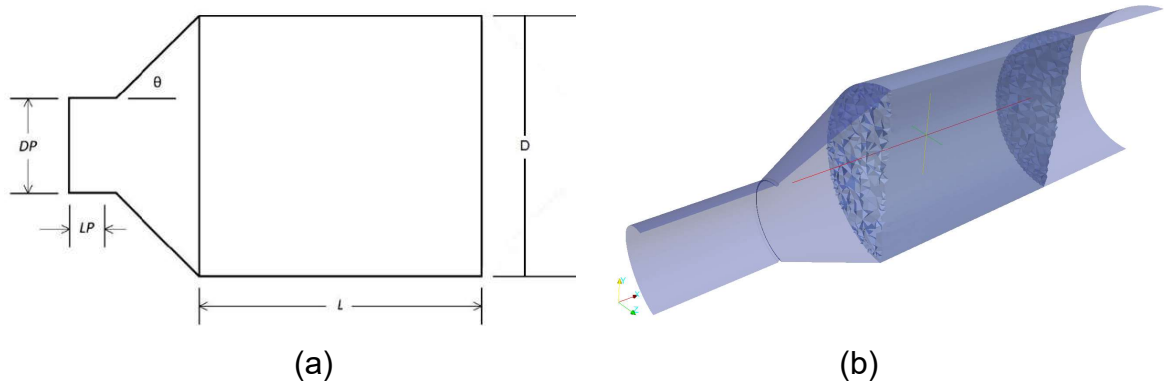
Los modelos de reactores monolíticos suelen modelar las fases fluida y sólida por separado, y a menudo el espacio físico real (es decir, un modelo discreto) se utiliza como dominio de solución, especialmente para los modelos bidimensionales y tridimensionales. Este nivel de discretización puede ofrecer información valiosa sobre los fenómenos físicos y químicos fundamentales que se producen. Sin embargo, para modelar el espacio físico real de un convertidor monolítico de tamaño completo, que incluso para unidades pequeñas contiene miles de canales, presentaría un problema extremadamente largo de resolver. Por lo tanto, la mayoría de los modelos de convertidores utilizan un proceso de promediado de volumen y

tratan el modelo como un medio poroso continuo. El uso de promedios de volumen conduce a una pérdida de información en el nivel micro, pero proporciona información sobre los patrones de flujo macroscópico, que son necesarios para la comprensión completa de la operación del convertidor.

El propósito de esta sección, es ilustrar la importancia de la validación, que desafortunadamente a menudo no se reconoce. Los resultados se presentan en términos de simulaciones de flujo en frío de estado estacionario, se hace simetría de la geometría y se selecciona la malla con menor número de elementos que suministre los datos más cercanos a los experimentales.

4.3.2 Pre-proceso del caso: Se usaron los resultados informados por⁴⁷, quienes utilizaron la anemometría Doppler Láser (LDA) para evaluar la distribución del flujo de salida desde un monolito cerámico de 400 celdas por pulgada cuadrada (CPSI), con un espesor de pared de 0.165 mm y un diámetro de 11.7 cm. El monolito se conectó a un tubo de entrada de 4,92 cm de diámetro a través de un difusor de 7 cm de longitud. La sección transversal del dominio de solución se muestra en la (Figura 31.b). Para el experimento que se muestra en la (Figura 31.a) de la referencia, se calculó que la velocidad de entrada promedio a la tubería era de 14 m/s que corresponde a un número de Reynolds de aproximadamente 43,000 en el tubo de entrada. Suponiendo un tamaño de canal de 1,1 mm, y una porosidad monolítica, ϕ de 0,75.

Figura 31. Identificación de longitudes en esquema del convertidor catalítico típico:

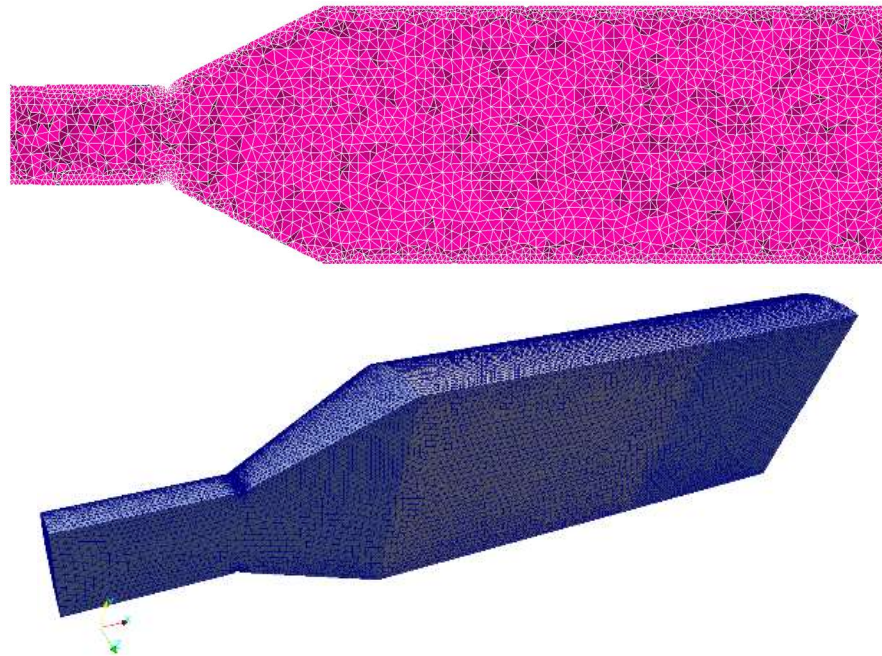


Fuente: (a) Estudio previo⁴⁷, (b) Software Salome autor

4.2.3 Pos-proceso del caso: Se siguieron las recomendaciones dadas por autores, considerando la soldadura presente entre el canal de entrada y el difusor, este se aproxima mediante un canal a lo largo del diametro de la geometria. Teniendo esta geometria preparada se procede al proceso de mallado e independencia de la malla obteniendo:

Se refinaron las paredes (ver Figura 32) teniendo en cuenta que es de gran importancia para el calculo de las ecuaciones obteniendo mejores resultados cuando se lleva este proceso.

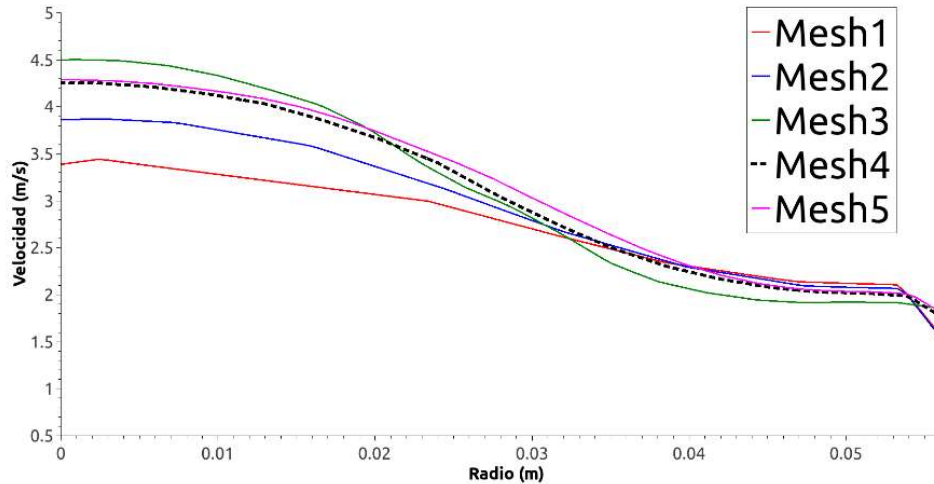
Figura 32. Malla utilizada



MALLA	Faces	Cells	Skewness
Mesh1	81043	38000	0.74985
Mesh2	102880	48279	0.68436
Mesh3	354516	168054	0.78606
Mesh4	478985	227115	0.87343
Mesh5	612859	292650	0.77032

Los resultados no varían comparando los productos de las últimas iteraciones (Figura 33). En este caso se selecciona la malla 4 (Línea negra punteada), como la más adecuada pensando que una malla más densa genera un costo computacional mayor.

Figura 33. Resultados Independencia de la malla

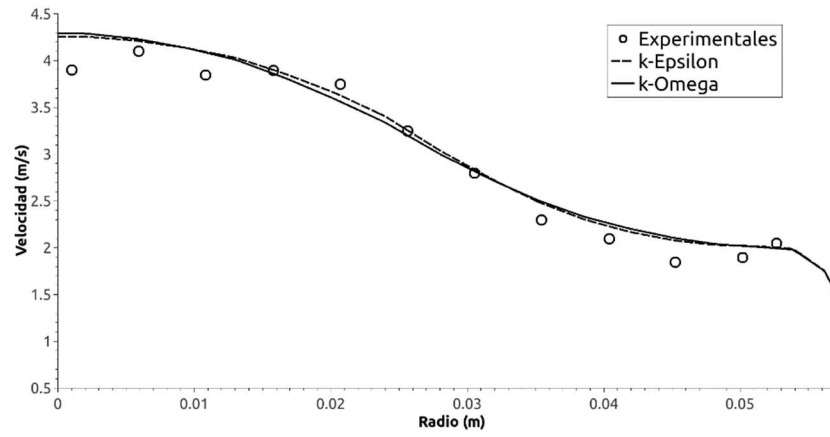


En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos como el efecto de la velocidad a lo largo de la geometría dada y la caída de presión a la salida del correspondiente al monolito con características dadas anteriormente. Estos resultados siguen y son coincidentes con los mostrados en estudios previos.

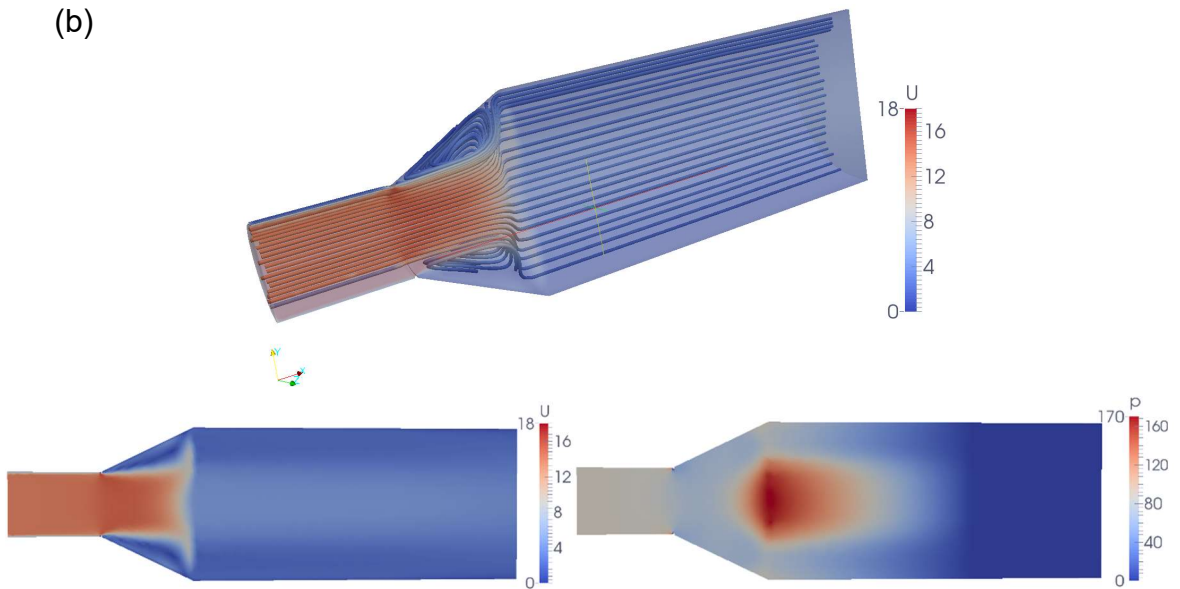
La caída de presión adicional resultante de los efectos del difusor es evidente y aumenta drásticamente a medida que aumenta la velocidad de flujo (ver Figura 34b). Finalmente, el perfil de velocidad radial se muestra con un modelo de turbulencia adicional (k-Omega) el cual no obtuvo efectos considerables respecto al modelo (k-epsilon) utilizado en el trabajo de referencia⁴⁷.

Figura 34: Visualización de resultados (a), parámetros de flujo (b)

(a)



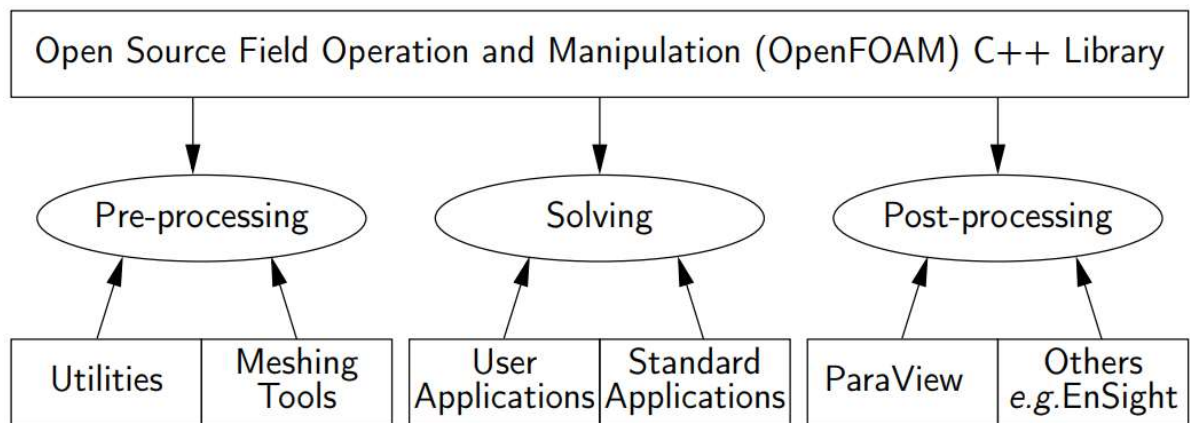
(b)



5. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO DE AIRE EN UNA MÁQUINA SECADORA DE CAFÉ

En la figura 35 se observa el proceso que se sigue para realizar el análisis del movimiento de aire dentro de una secadora de café de lecho fijo con geometría dada mediante metodología CFD de OpenFoam:

Figura 35. Procesamiento previo y ejecución de los casos de OpenFOAM



Fuente: GREENSHIELDS, Christopher J.⁴⁸

5.1 PREPROCESO

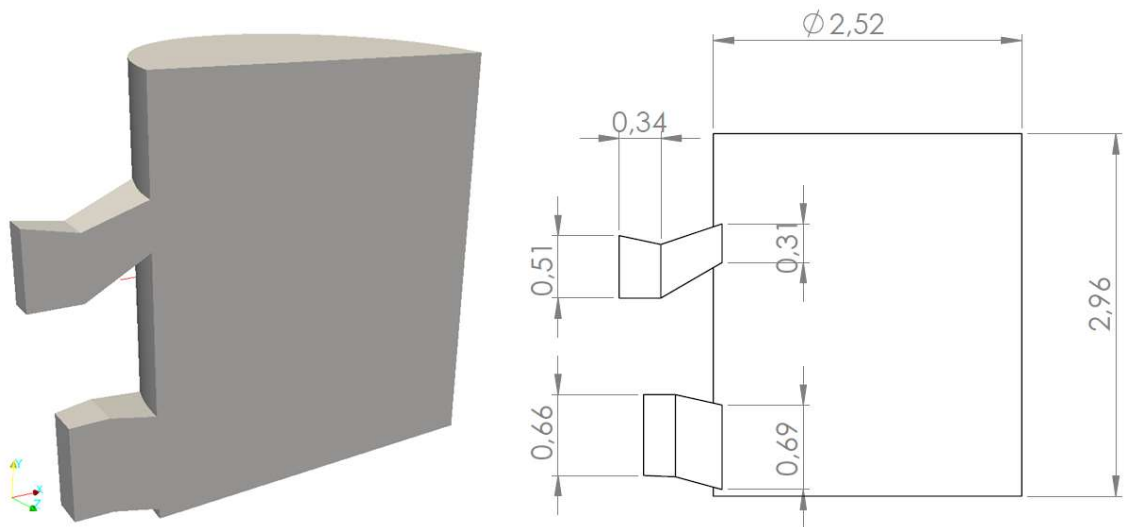
Esta etapa es caracterizada por tener herramientas para generar geometrías y mallas, establecer condiciones de frontera, condiciones iniciales y propiedades físicas.

5.1.1 Geometría dada: Un modelo de geometría simplificada se muestra en la figura 36, este paso centra su atención en disminuir el costo computacional, simplificando

⁴⁸ GREENSHIELDS, Christopher J. User guide of OpenFOAM, 6 ed., vol. 6, O. F. Ltd., Ed., 2018, p. 1.

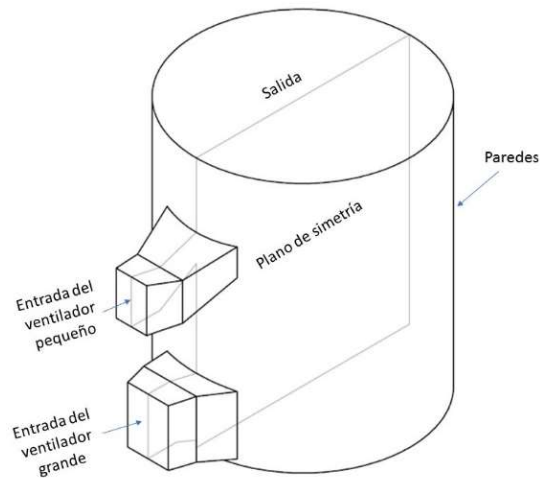
la geometría compleja real, aplicando simetría mediante un corte transversal en todo su centro, como se muestra a continuación:

Figura 36. Isométrico del modelo



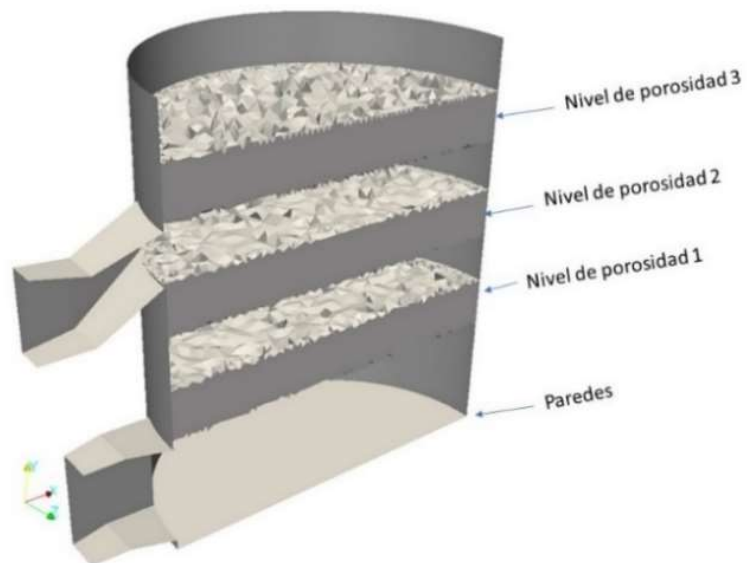
5.1.2 Condiciones de frontera Las dimensiones están basadas en una máquina comercial real suministrada por la industria, así, que por efectos de confidencialidad se evitan dar algunos parámetros, se muestran sus medidas en metros (Figura 36). La máquina cuenta con dos entradas de flujo que son generadas mediante dos ventiladores, en la entrada inferior se encuentra el ventilador grande con un aporte de velocidad de 11 m/s, en la entrada superior se encuentra un ventilador más pequeño, respecto al anterior con un impulso de aire de 9 m/s (ver figura 37).

Figura 37. Condiciones iniciales



La máquina de referencia cuenta igualmente con tres niveles de café, estos se modelan como flujos en lechos fijos, que son modelados y controlados con la librería topoSet de OpenFOAM, el script se describe en la sección 3.6.2

Figura 38. Niveles de porosidad



Para hallar los parámetros D y F que son los que finalmente se ingresan en el software (OpenFoam topoSet), es necesario conocer las propiedades físicas del café para ello se basó en investigación previa, mostrada en la figura 39, que estudió la hidrodinámica del café en lecho fluidizado.

Figura 39. Características físicas del café

Características físicas	Media	Desviación estándar
Largo x 10 ³ (m)	9.6	±0.7
Ancho x 10 ³ (m)	7.1	±0.5
Altura x 10 ³ (m)	4.0	± 0.5
Peso unitario x 10 ³ (kg)	0.16	±0.002
Volumen medio unitario x 10 ⁴ (m ³)	1.3	±0.03
Densidad aparente (kg/m ³)	1222.0	±0.04
Parámetros hidrodinámicos		
Densidad empacada (kg/m ³)	640.12	±10.61
Esfericidad	0.67	±0.04
Diámetro equivalente x 10 ³ (m)	6.4	±0.005
Porosidad del lecho empacado	0.51	±0.009
Porosidad en condiciones de mínima fluidización	0.63	±0.01
Velocidad mínima de fluidización teórica a 26°C (m/s)	2.10	±0.07
Velocidad mínima de fluidización teórica a 220°C (m/s)	2.70	±0.08
Velocidad mínima de fluidización experimental a 26°C (m/s)	2.0	±0.15

Fuente: SÁNCHEZ R, J, et.al.⁴⁹

Con la ecuación de Ergún se tiene que:

$$D = \frac{150 * (1 - \phi)^2}{d_p^2 * \phi^3} \quad (50)$$

Con el diámetro equivalente obtenido de la figura 39 y la ecuación de Ergun (50) se obtiene:

$$D = \frac{150 * (1 - 0.51)^2}{0.0064^2 * 0.51^3} = 6.63 \times 10^6$$

⁴⁹ SÁNCHEZ RAMÍREZ, J, et al. Estudio de la hidrodinámica del café tostado (*Coffea arabica* L.). Revista mexicana de ingeniería química, 2007, p. 188.

A continuación, se calculan los parámetros de turbulencia iniciales, para modelo k-
 épsilon:

Longitud Característica

$$L_c = \frac{4 * Area}{A_s} \quad (51)$$

Ventilador Pequeño	$L_c = \frac{4 * 0.0249}{2.26} = 0.44071$
--------------------	---

Ventilador grande	$L_c = \frac{4 * 0.5644}{3.02} = 0.74755$
-------------------	---

Reynolds:

$$Re = \frac{L_c * U}{\nu}$$

Ventilador Pequeño	$Re = \frac{0.44071 * 9}{0.00001602} = 247589.9$
--------------------	--

Ventilador grande	$Re = \frac{0.74755 * 11}{0.00001602} = 513299$
-------------------	---

Intensidad de la turbulencia (Ecuación 35)

$$I_t = 0.16 * Re^{-0.125}$$

Ventilador Pequeño	$I_t = 0.16 * 247589.9^{-0.125} = 0.033877$
--------------------	---

Ventilador grande	$I_t = 0.16 * 103830^{-0.125} = 0.031$
-------------------	--

Energía cinética turbulenta K (Ecuación 34)

$$k = \frac{3}{2} * (U * I_t)^2$$

Ventilador Pequeño	$k = \frac{3}{2} * (9 * 0.033877)^2 = 0.13944$
--------------------	--

Ventilador grande	$k = \frac{3}{2} * (11 * 0.031)^2 = 0.1744$
-------------------	---

Tasa de la turbulencia ε (Ecuación 36)

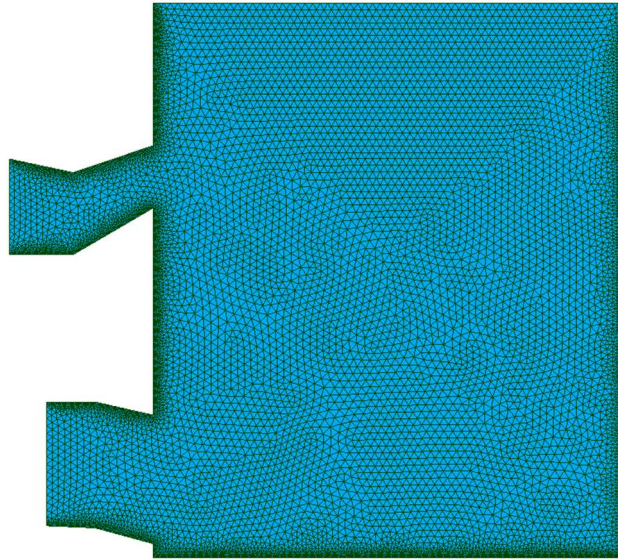
$$\varepsilon = (0.09)^{0.75} * \frac{k}{0.07 * Lc}$$

Ventilador Pequeño	$\varepsilon = (0.09)^{0.75} * \frac{0.13944^{1.5}}{0.07 * 0.44071} = 0.2734$
--------------------	---

Ventilador grande	$\varepsilon = (0.09)^{0.75} * \frac{0.1744^{1.5}}{0.07 * 0.74755} = 4.017$
-------------------	---

5.1.3 Malla del caso: Como se ha mencionado tras el transcurso de este trabajo se utiliza el software Salome para diseñar la geometría (CAD), este presenta diferentes herramientas para refinar la malla en las partes críticas de la geometría, la figura 40, muestra una aproximación de las mallas utilizadas.

Figura 40. Malla utilizada en la geometría simulada



5.2 POSTPROCESO

La forma geométrica de la secadora a simular junto con la generación de la malla, se obtiene después de varias pruebas mediante ensayo y error, comúnmente denominado *independencia de malla*, se verifica la calidad de la malla al ser importada del formato SALOME.unv al formato OpenFoam.foam con el comando (ideasUnvToFoam),

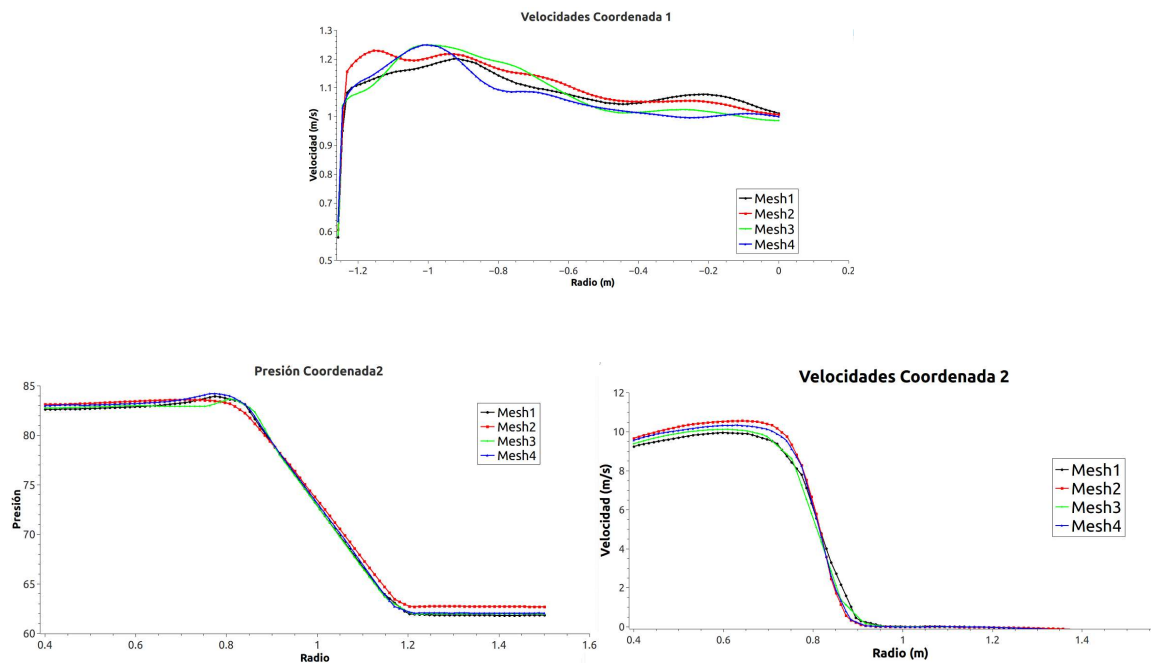
Tabla 4. Número de elementos por cada malla utilizada

Malla	Faces	Cells	Skewness
Mesh1	1109000	530000	0.769035
Mesh2	1928800	936000	0.754399
Mesh3	2625000	1247000	0.789586
Mesh4	3790000	1800000	0.84033

Previamente se desarrolla múltiples mallas para la geometría que representa la secadora, en este caso se hace necesario ejecutar 4 mallas con diferente cantidad de elementos (cell), las características y calidad de las mallas utilizadas en cada simulación se muestran en la Tabla 4.

Se evidencia que la calidad de la malla es aceptable, al no superar los valores máximos permitidos. Es necesario medir alguna variable en cierto punto o coordenada en todas las mallas, comparando el cambio de resultados en cada refinamiento. En este caso, como la geometría es compleja no se obtuvo una buena determinación a la hora de seleccionar la malla más óptima con la medición de una sola variable en un solo punto, así que se hizo necesario medir parámetros de velocidad y de presión en diferentes puntos, obteniendo los siguientes resultados:

Figura 41. Independencia de la malla



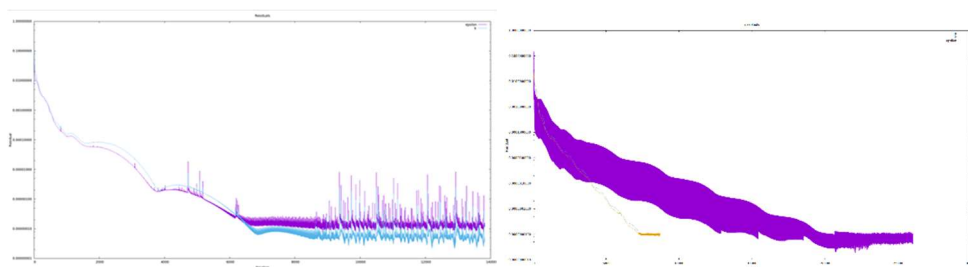
Las coordenadas de las líneas utilizadas para medir estos parámetros fueron:

- Coordenada 1: p1 (0 2.9 0); p2 (-1.27 2.9 0)
- Coordenada 2: p1 (0 0.4 0); p2 (0 1.5 0)

Los valores observados en la figura 41 son aproximados unos con otros, por eso se llega a la conclusión que la malla más adecuada es la de 1'247.000 elementos (Mesh 3), con mallas más finas, se obtiene un costo computacional innecesario, ya que se obtienen los mismos resultados.

En sistemas matriciales la solución aproximada se realiza de forma iterativa, reduciendo la ecuación mediante una sucesión de soluciones. Por lo tanto, entre más pequeño es el Residuo (en nuestro caso se establece en 1×10^{-8}), mejor será la aproximación de la solución numérica. Además, la tolerancia del método de solución del sistema matricial es considerada como el criterio que debe alcanzar el residual para que la solución sea convergente.

Figura 42. Residuales obtenidos máquina actual



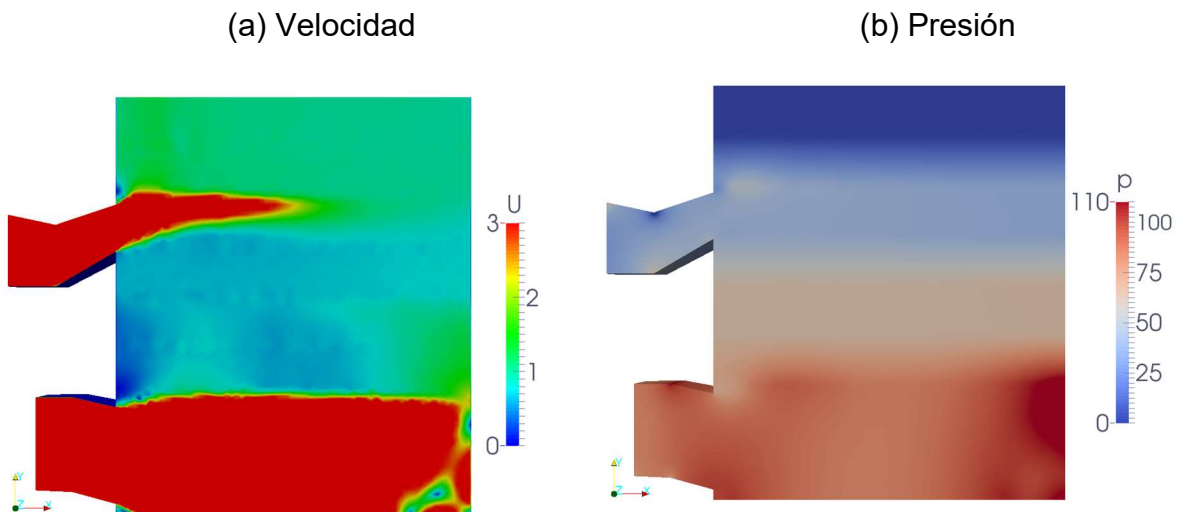
Alguna de las soluciones obtenidas de la ejecución de las simulaciones, es mostrada en la figura 42, donde se presenta los residuales para las variables k y épsilon, que permite inferir que luego de resolver los sistemas matriciales iterativamente, el residual disminuye considerablemente, indicando que la aproximación numérica de la solución es buena y converge claramente.

5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se hace evidente la importancia de la malla, refinando en las paredes y en ciertas partes dentro de la geometría, ya que en muchas ocasiones diverge en mallas que no superan el millón de elementos. Se observa que el skewness de cada malla esta justo en su límite permitido, se obtuvieron buenos resultados tanto para el caso actual como para los casos de geometría propuesta.

Se calcula el perfil de velocidad y presión con el modelo DarcyForchheimer y brinkmann. El postprocesamiento de la simulación se ha realizado mediante el programa, paraView⁵⁰. ParaView es una aplicación de visualización y análisis de datos de fuente abierta y multiplataforma. Los usuarios de ParaView pueden construir rápidamente visualizaciones para analizar sus datos utilizando técnicas cualitativas y cuantitativas. Para extraer el campo de presión y velocidad se establece el timeStep el último paso de la iteración calculada, y la dirección de visualización se ha establecido en (x,y) Ver anexo C.

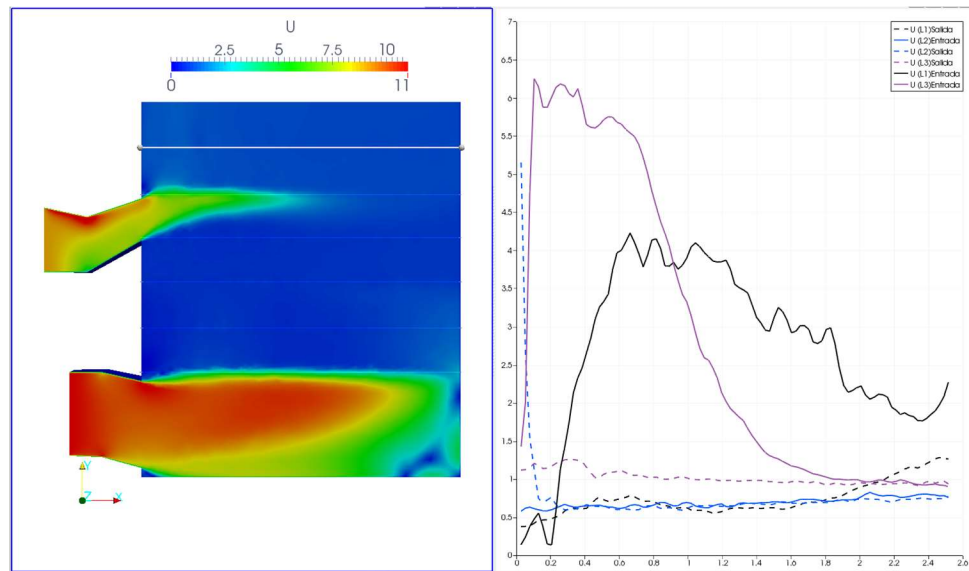
Figura 43. Resultados de velocidad y presión dentro de la máquina real



⁵⁰ NATIONAL TECHNOLOGY & ENGINEERING SOLUTIONS OF SANDIA. ParaView. Sandia National Laboratories, New Mexico. 2005-2007. [En línea]. Disponible en: <https://www.paraview.org/>

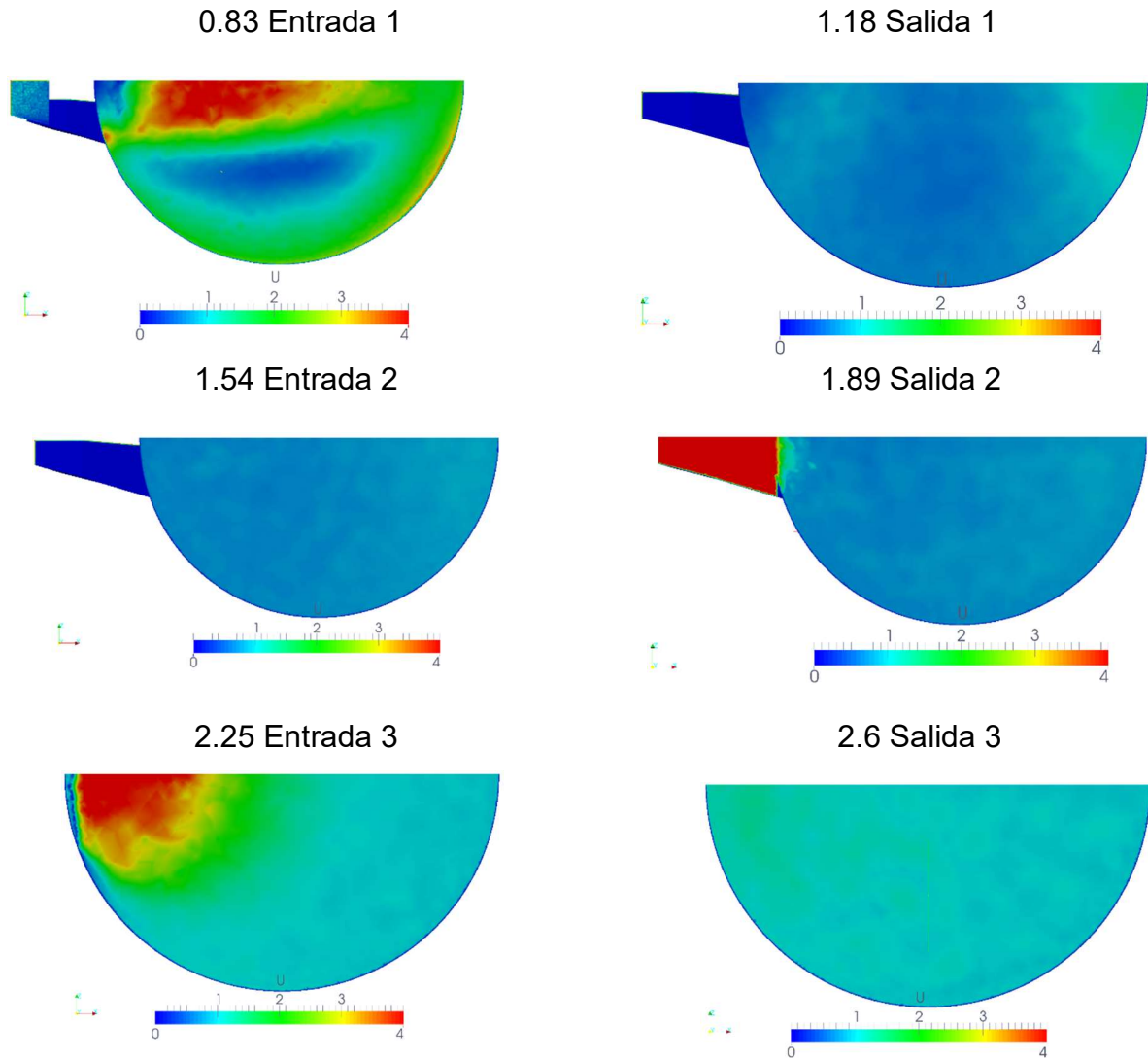
En la figura 43 se evalúa los campos de flujo y presión obtenidos en la simulación realizada, el cual se puede observar la caída de presión a la salida de los lechos fijos (Figura 43b), como predice la teoría, esto debido que el flujo no alcanza a mover las partículas, sin alterar sus estados inerciales. La Figura 43a registra velocidades mayores a lo largo de la entrada del primer nivel de secado, que se corrobora en la Figura 44 (línea negra) al igual que la entrada del tercer nivel de secado (línea púrpura) y bajas velocidades en la entrada del segundo nivel de secado o en las salidas de cada uno de los lechos de café.

Figura 44. Resultados de velocidad en entradas y salidas en los niveles de secado geometría actual



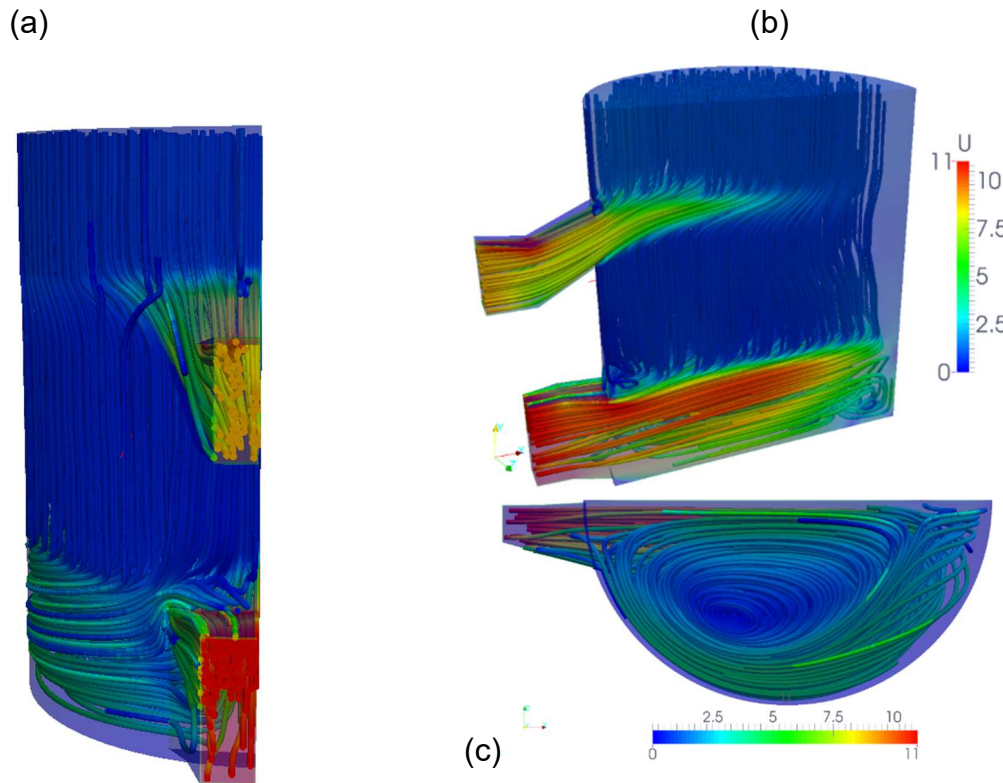
En la Figura 45 se muestra las áreas transversales de las secciones analizadas anteriormente (Figura 44), mejorando la visualización del comportamiento de flujo a través de cada uno de los niveles de secado, donde se observa concentraciones de flujo en algunas zonas de las áreas ocasionados por el impulso generado por los ventiladores.

Figura 45. Flujo niveles de secado



Se observa la vorticidad que se genera respecto a las entradas, en el nivel inferior de secado figura 46, el flujo entra con gran velocidad y caudal hasta chocar las paredes del dispositivo, redirige el flujo hacia las paredes del sistema (ver Figura 46c), ocasionando una zona central de baja velocidad que hace que el sistema pierda uniformidad en el área de secado.

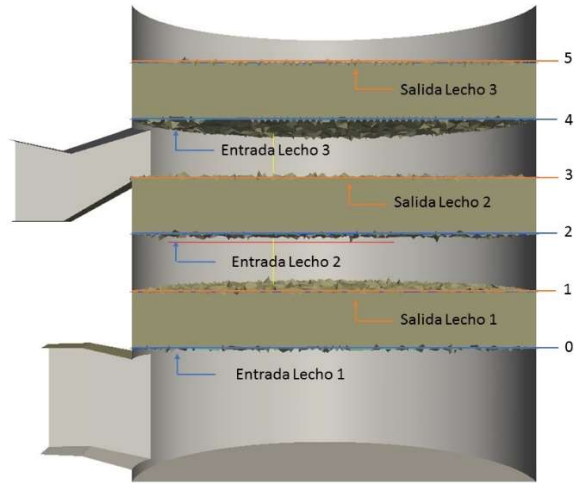
Figura 46. Vistas de las líneas de corriente geometría actual: (a) Vista Lateral izquierda, (b) Vista Frontal, (c) Vista inferior



5.4 PROPUESTA DE MEJORA

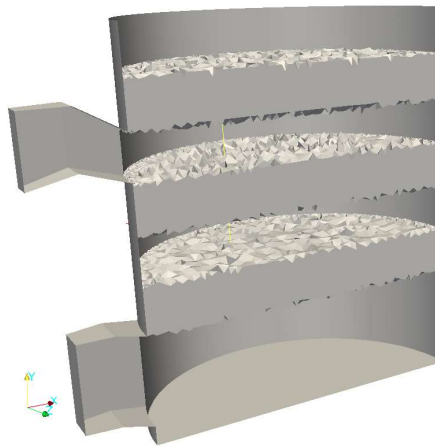
Como la distribución de aire no es uniforme en los niveles de secado, de la máquina actual se hace evidente la necesidad de plantear una geometría que mejore la distribución de aire en estos dos niveles, en este capítulo se realiza el análisis de varios cambios realizados. Se muestra la nomenclatura que se utiliza para hacer la comparación de desviaciones en cada una de las propuestas y los puntos seleccionados para llevar a cabo este análisis en la siguiente figura:

Figura 47. Nomenclatura de comparación



5.4.1 Propuesta 1: Como primera medida se postula un cambio del ángulo del ducto de entrada, como se observa en la figura 48.

Figura 48. Geometría propuesta de mejora



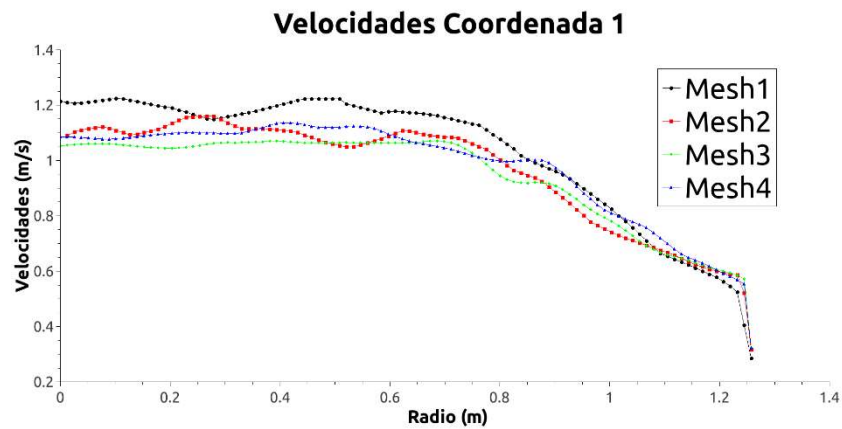
Aquí y en las simulaciones posteriores la independencia de la malla se realiza con 4 mallas con diferente cantidad de elementos (cell), las características y calidad de las mallas utilizadas en cada simulación se muestran en la tabla 5.

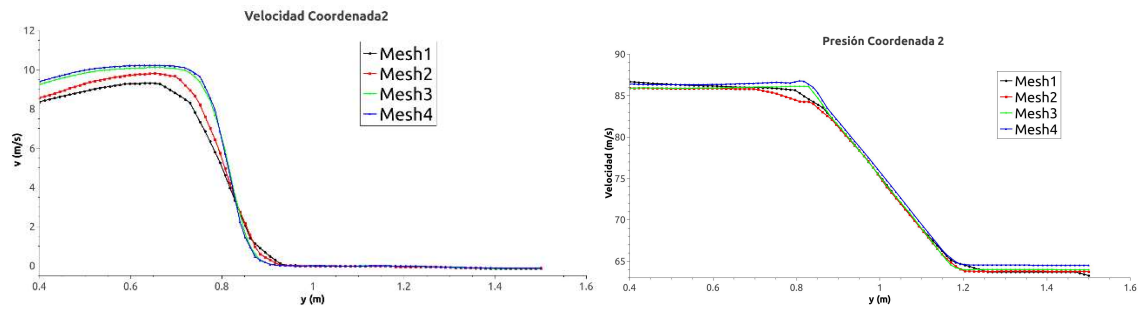
Tabla 5. Características de malla utilizada para geometría de mejora

Malla	Faces	Cells	Skewness
Mesh1	621000	299425	0.6961
Mesh2	1765000	840800	0.7247
Mesh3	2680000	1273000	0.7697
Mesh4	3770000	1810000	0.8198

Se evidencia que la calidad de la malla es aceptable en todos los parámetros, al no superar los valores máximos permitidos. Se miden variables en ciertos puntos o coordenada en todas las mallas, comparando el cambio de resultados en cada una de ellas:

Figura 49. Independencia de la malla

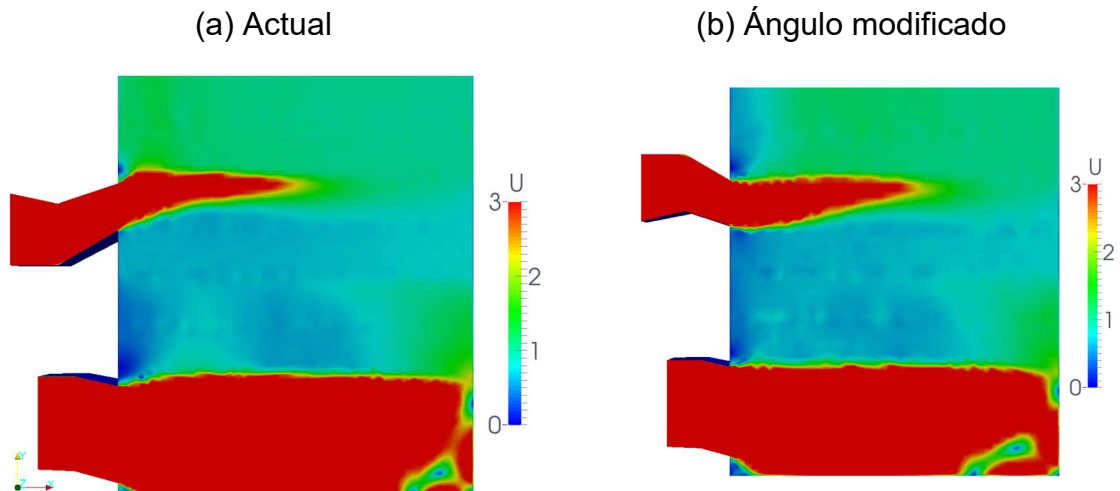




Las coordenadas utilizadas para medir estos parámetros fueron:

- Coordenada 1: p1 (0 2.7 0); p2 (-1.27 2.7 0)
- Coordenada 2: p1 (0 0.4 0); p2 (0 1.5 0)

Figura 50. Comparación máquina real, con modificación en el ángulo

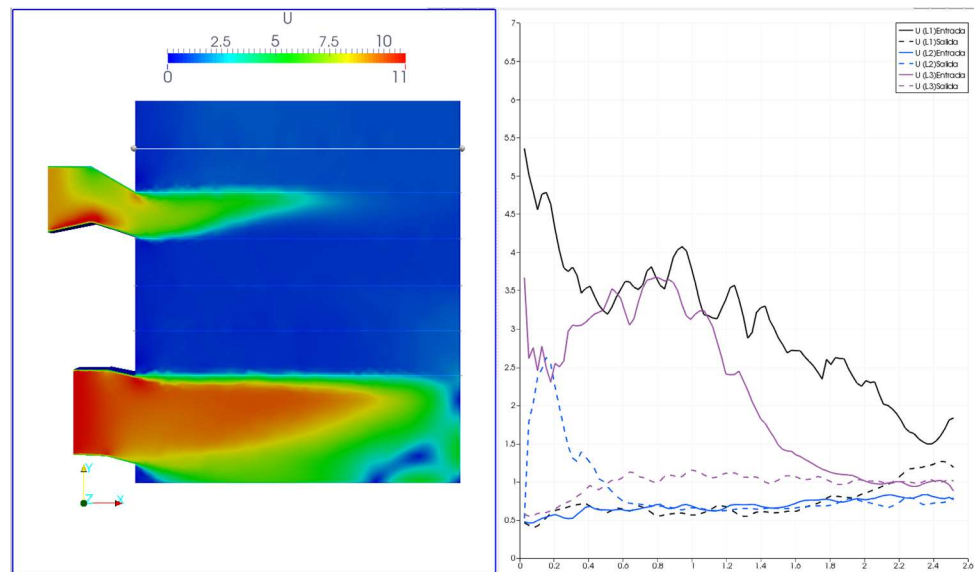


Como se observa en la figura 50 el cambio realizado, no tiene mayor efecto en la uniformidad del aire, se presenta un contacto adicional con el nivel dos de café, contacto que no se tiene en la máquina real. En las paredes superiores a la entrada de flujo, hay una pequeña disminución de contacto del flujo con esta zona.

Se extraen los valores obtenidos de la simulación mediante el programa paraView el cual mediante su función plotOverLine permite obtener los valores a lo largo de

una línea sobre los puntos más importantes de los niveles de secado como se muestra a continuación.

Figura 51. Resultados de velocidad en entradas y salidas en los niveles de secado propuesta 1



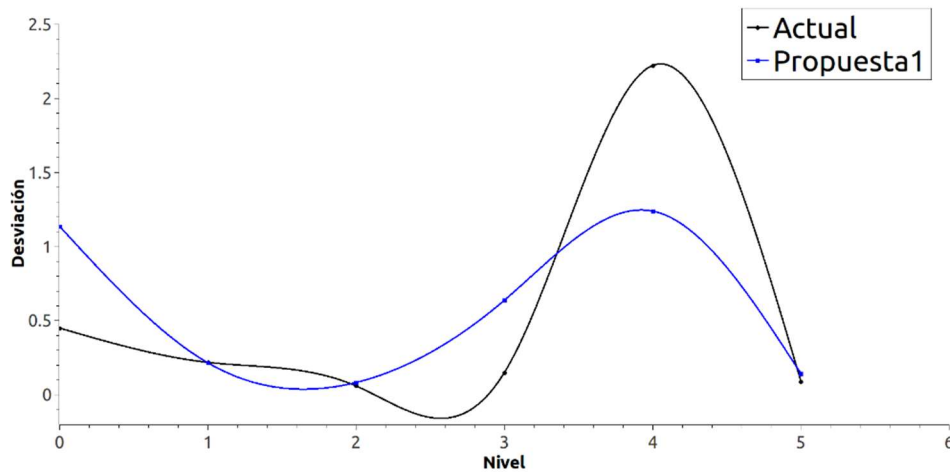
Con estos valores se corrobora numéricamente la uniformidad de las velocidades obtenidas a lo largo del sistema y con ello poder hacer una comparación entre la geometría de la máquina actual y las propuestas de mejora, es necesario hallar la desviación estándar de los puntos obtenidos hasta el momento (Figura 51), con el objetivo de tener una visión de los datos más acorde con la realidad a la hora de describirlos e interpretarlos para la toma de decisiones.

Comparación mediante desviación estándar: La desviación estándar es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio, esto quiere decir que entre menor sea la desviación mejor va a ser la uniformidad de contacto del fluido con el café. Por ejemplo: si en los tres lechos porosos se obtuvieran velocidades de (0, 0, 14, 14), (0 6 8 14) y (6, 6, 8, 8) cada uno tiene una media de 7; la desviación estándar poblacional de cada lecho sería 7, 5 y 1,

respectivamente. El tercer lecho tendría una desviación mucho menor que los otros dos porque sus valores están más cerca de 7, produciendo unos valores más acercados unos de otros y por ende presentando una mayor distribución.

La gráfica 52 muestra la comparación entre la desviación, de la geometría actual y la geometría propuesta 1. Aquí se usa la nomenclatura vista en la figura 47

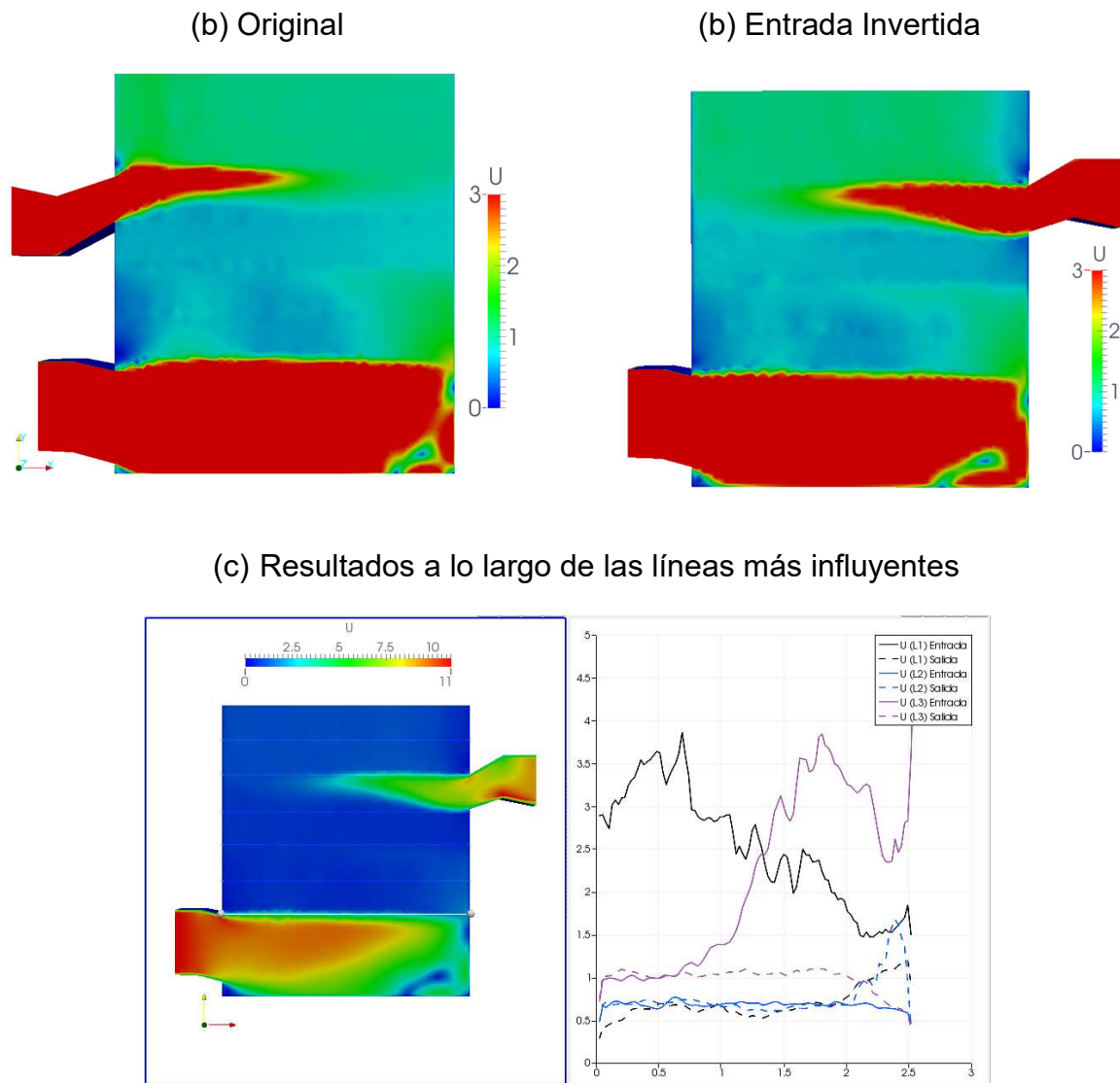
Figura 52. Comparación de la desviación estándar de la geometría actual con la propuesta 1



Se observa que hay una disminución de la desviación en la entrada del nivel 3 de secado, aumentando en esta zona la uniformidad de secado, pero aumenta en la salida del nivel 2 obteniendo menor uniformidad.

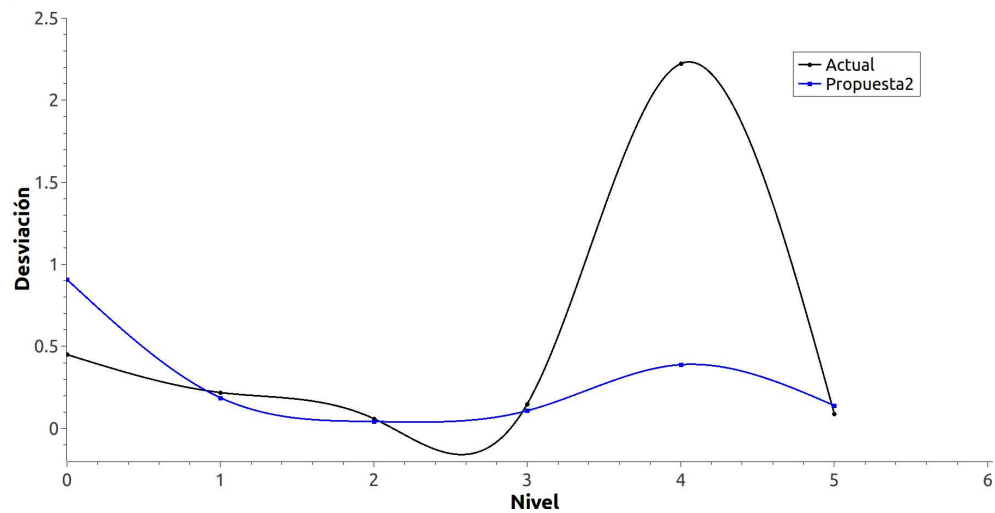
5.4.2 Propuesta 2: Para mejorar el nivel de secado se realiza otro cambio, al invertir la entrada superior buscando que se produzca un pequeño flujo cruzado y con ello mejore la uniformidad sin hacer mayores cambios a la máquina.

Figura 53. Comparación máquina real, con modificación entrada



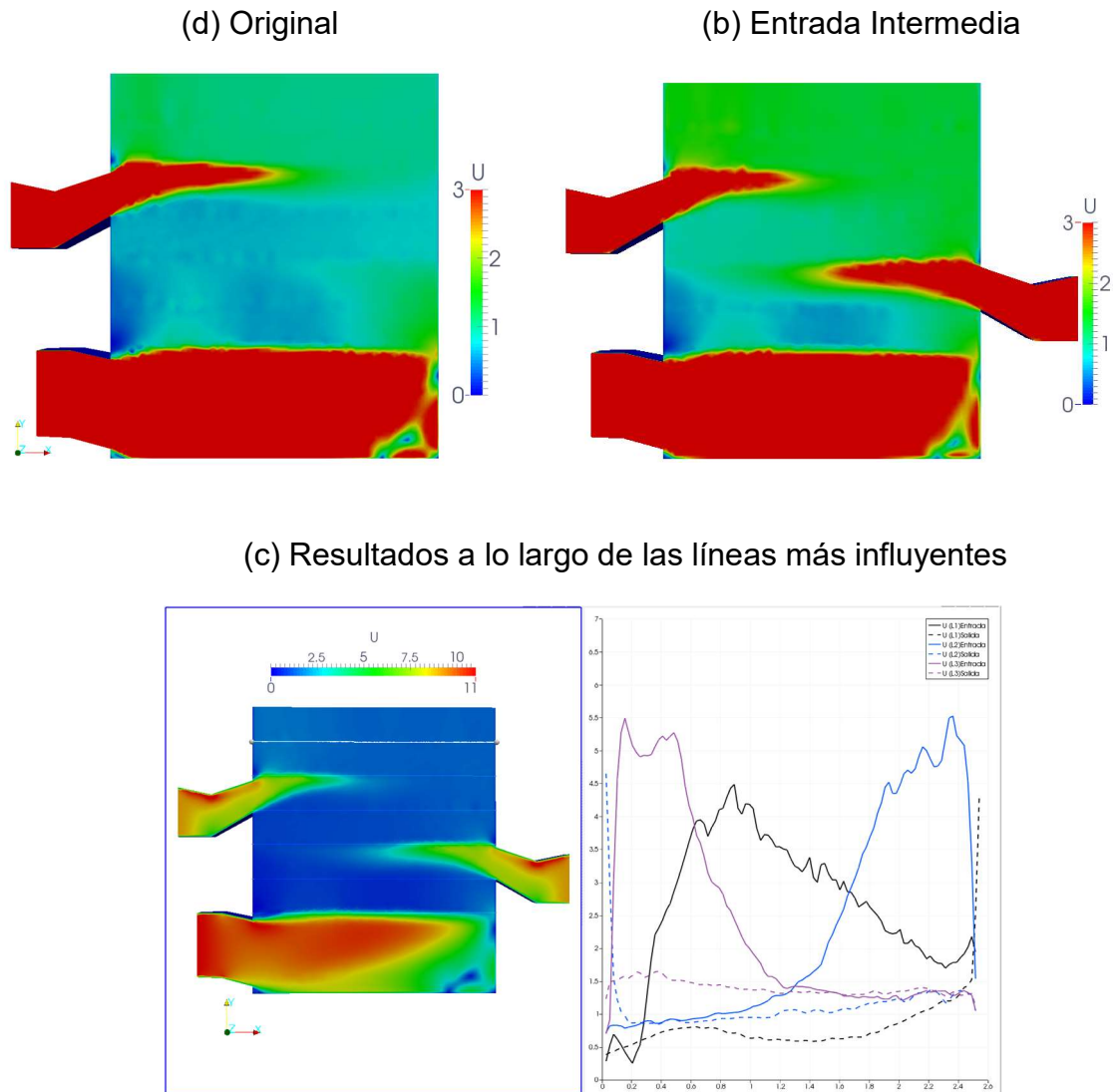
Se observa en la Figura 53 que las velocidades y las desviaciones bajan a lo largo del sistema, obteniendo una mejora considerable en cuanto a la uniformidad del fluido se trata comparado con los de la geometría actual.

Figura 54. Comparación de la desviación estándar de la geometría actual con la propuesta 2



5.4.3 Propuesta 3: Durante la propuesta anterior se observa una mejora significativa que concluiría con el objetivo de este trabajo, sin embargo, es importante para la industria el tiempo de secado que el sistema requiere para concluir su función ya que al obtener bajas velocidades los granos tardarían más tiempo en el proceso de secado. Con esta propuesta se estudia una alternativa de mejora del tiempo de secado, para ello se propone la adquisición de un nuevo ventilador en el nivel intermedio de secado, ya que se observa que en este nivel se generan las velocidades más bajas del sistema.

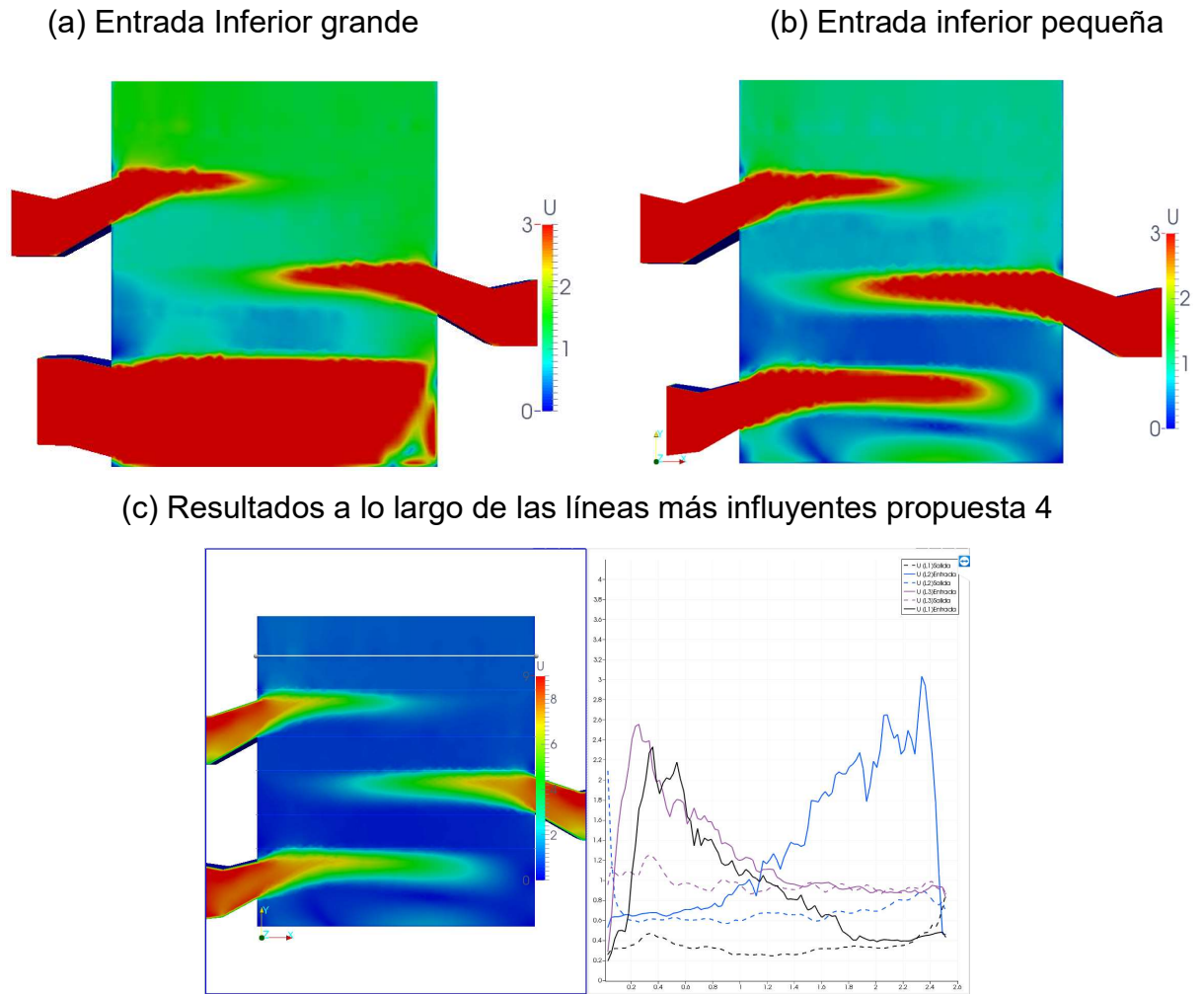
Figura 55. Comparación máquina real, con aumento del ventilador



Aparentemente se observa una distribución favorable con mayores velocidades en los niveles superiores, la desviación global se mantiene muy cercana al obtenido por la geometría actual, sin embargo, no se puede ignorar el aumento de consumo requerido por el nuevo ventilador incorporado,

5.4.4 Propuesta 4

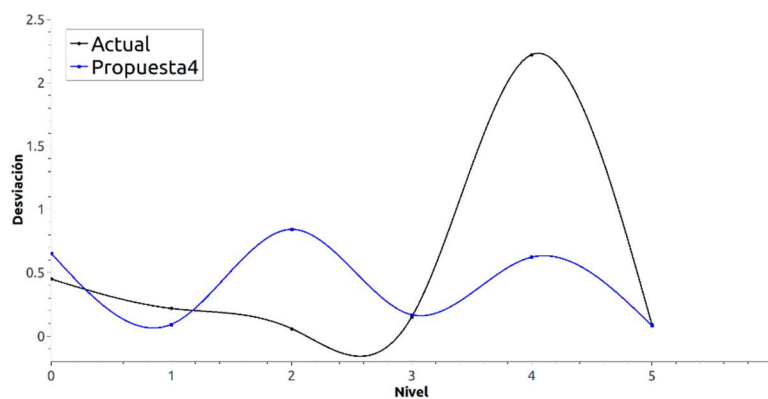
Figura 56. Comparación modificación anterior, con recorte de geometría



Durante la propuesta 3 se observa que se puede reducir el nivel de consumo del sistema. En la parte inferior se presen una cámara o sección innecesaria, produciendo mayor recorrido del fluido en esta sección, antes de presentarse el contacto con el lecho, por esta razón se procede a quitar una parte de la altura del sistema (15 cm) y con ello poder disponer de un ventilador de menor capacidad al utilizado (de 9 m/s), esto no repercute a la capacidad del sistema.

Como era de esperar, la velocidad baja respecto al caso anterior (ver Figura 56), representando menor consumo del sistema de ventilación. La distribución global aumenta considerablemente son respecto al caso anterior, esto se comprueba mediante el cálculo de desviaciones en los puntos que se vienen estudiando.

Figura 57. Comparación de la desviación estándar de la geometría actual con la propuesta 4



Se concluye que la opción de mejora propuesta por este estudio es la segunda opción (propuesta 2), ya que se presenta una desviación pequeña (ver Tabla 6), con respecto a la máquina actual, mejora considerablemente la uniformidad global del sistema, así como la de cada sección, mejorando la uniformidad en un **35,5%** respecto a la actual. Igualmente se deja la propuesta 4 como una opción, sin embargo, considerar esta opción depende de la viabilidad económica que otorgue la empresa y los requerimientos del caficultor.

Tabla 6. Desviaciones obtenidas de cada propuesta

Geometría	Entradas	Salidas	Total
Actual	1,524725	0,21649	1,113392
Propuesta1	1,334256	0,464883	1,135768
Propuesta2	0,435839	0,039668	0,718175
Propuesta3	1,54167	0,587766	1,112454
Propuesta4	0,73974	0,28017	0,563044

6. CONCLUSIONES

Se realizó validaciones con caso benchmark de geometría simplificada, encontradas en la literatura. OpenFOAM obtiene favorables resultados en los parámetros verificados y estudiados en este trabajo. Se ve la importancia con que estas técnicas innovadoras de ingeniería, que bien implementadas permiten obtener estudios aproximados y detallados de lo que ocurre dentro de cualquier sistema o máquina.

Se simuló la geometría real y se determinó los patrones de flujo en la secadora de café de la empresa Penagos hermanos & CIA. S.A.S. Comprobando que no genera una buena distribución de flujo a través de los lechos.

Se analiza alternativas para mejorar la distribución de aire en el café dentro de la máquina. De las cuales como se observa en la tabla 6, se concluye dos posibles mejoras: invirtiendo el ángulo y la dirección del ventilador superior y aumentando el número de entradas de ventilación. El primero (propuesta 2) arrojó una mejor distribución que ayuda con el aumento de la uniformidad del sistema en aproximadamente un 35,5%. El segundo igualmente presento mejor uniformidad (en un 50%), pero un pequeño aumento de consumo del sistema.

Se recomienda al fabricante, que, si se mantiene el diseño presente, se debe dar instrucciones al usuario de este equipó, para que se cambie la distribución de café en cada uno de los niveles de secado respecto a un tiempo determinado.

Estos cambios se hacen, como una propuesta preliminar, pero se ve la necesidad de seguir esta investigación con estudios CFD que incorporen efectos de temperatura y condiciones medioambientales. Es importante tomar en cuenta los

requisitos del fabricante, por ejemplo, si el objetivo es no aumentar el requerimiento energético del sistema, el nuevo ventilador no sería una buena alternativa, sin embargo, partiendo del gran aporte que se da en este proyecto, se entraría en un proceso de diseño conjunto a la experiencia que puede aportar la empresa.

BIBLIOGRAFÍA

ALCÁZAR VARGAS, Manuel Gonzalo. Influencia de la calidad de malla y MDE en la simulación multifásica 3D del flujo del río Guadalquivir. Escuela Politécnica superior de Jaén, pp. 42-44, 2017.

CAPOTE, J.A, et al. Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización especial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios. Revista Internacional de Métodos numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 2008, p. 231.

CENGEL, Yunus A; CIMBALA, John M. Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones, México, D.F.: McGraw-Hill, 2006.

CHEN, F.HPC User Services LSU HPC & LONI. Introduction to OpenFoam. LSU, Information technology services, Louisiana State University, EE.UU., 24 Junio 2015.

DALPASCUALE, Valdecir Antoninho, *et al.* Secado de granos a altas temperaturas. [En línea]. Oficina regional de la FAO para América Latina y el caribe, 1991. Disponible en: http://www.fao.org/docrep/x5059S/x5059S04.htm?fbclid=IwAR0r3_-FenY6Beux2m9uiDWzGiaL6EtqZomalU18sUtzKy-61dMmzrLNpQ.

EINARSVE, M. CFDwOpenFoam. (En línea). 2016. [Recuperado en enero 2018]. Disponible en: <https://github.com/meinarsve/CFDwOpenFoam>.

FERNANDEZ ORO, Jesús Manuel. Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos. Barcelona, España: Reverté, 2012, p. 265.

GONZÁLEZ SUSATAMA, Luis Carlos. Construcción de una planta piloto para secado de café por lecho fluidizado. Tesis de maestría Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia, 2014.

GOMEZ TORRES, Armando Miguel. CFD analysis for the transport of hydrogen in a simple geometry. Congress on Alternative Energies, Octubre 2013. p. 4, 15-18.

GREENSHIELDS, Christopher J. User guide of OpenFOAM, 6 ed., vol. 6, O. F. Ltd., Ed., 2018, p. 1.

HAFSTEINSSON, Haukur Elvar. Porous Media in OpenFOAM. Chalmers Spring, 2009.

HAUSBRAND, E. Drying by means of air and steam. D. Van Nostrand Company, 1912.

HAYES, R. E, *et al.* CFD modelling of the automotive catalytic converter. Elsevier, 12 de abril 2012, p. 94.

HERNÁNDEZ VILLAMIZAR, Alexander. Aplicación de un modelo turbulento bidimensional para la simulación de flujo a superficie libre en un canal horizontal, Tesis de maestría Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia, 2014.

MALALASEKERA y H. VERSTEEG, An introduction to computational fluids dynamics, 2 ed., Edinburgh: Pearson Prentice Hall, 2007, p. 116.

MARTINELLO, Miriam Alejandra. Modelado del secado de granos en lecho. Tesis de Doctorado, La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 2015.

MAUPOEY, Pedro Fito, *et al.* Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Universitat Politècnica de València, 2016, nº 2, p. 9.

MENESES CHACÓN, Edxon Stiven. Evaluación térmica por métodos computacionales de un modelo de hormilla panelera. Tesis de maestría Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2018.

MESHING FOR NUMERICAL SIMULATIONS: A GENERIC APPROACH. [Anónimo]. (En línea). [Recuperado en enero 2018]. Disponible en: <http://www.cfdyna.com/CFDHT/MeshGen.pdf>.

NATIONAL TECHNOLOGY & ENGINEERING SOLUTIONS OF SANDIA. ParaView. Sandia National Laboratories, New Mexico. 2005-2007. [En línea]. Disponible en: <https://www.paraview.org/>

OPENFOAM. The open source CFD toolbox. (En línea). [Recuperado en julio 2017]. Disponible en: www.openfoam.com.

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL CAFÉ. La Organización Internacional del Café: 50 años sirviendo a la comunidad cafetera mundial. Londres, 2013. p. 23.

OVALLE, Christian Diaz, *et al.* Análisis del efecto geométrico de ciclones en el secado. Avances en Ciencias e Ingeniería, 2018, p. 14.

PATANKAR Suhas V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Series in computational methods in mechanics and thermal sciences. McGrawHill Book Company, New York, 1980.

RHOADS, J. Effects of grid quality on solution accuracy. OpenFOAM WorkShop, Julio 2014.

R. M. SMITH y A. G. HUTTON, THE NUMERICAL TREATMENT OF ADVECTION: A PERFORMANCE COMPARISON OF CURRENT METHODS, Berkeley, Gloucestershire: Numerical Heat Transfer, 1982, p. 451.

SALOME. (En línea). 2017. [Recuperado en mayo 2018]. Disponible en:
<http://www.salome-platform.org>

SANCHEZ, Javier. Ley de Darcy, conductividad hidráulica. [En línea]. 2016. (Recuperado en Agosto 2017). Disponible:
http://hidrologia.usal.es/temas/Ley_Darcy.pdf.

SÁNCHEZ RAMÍREZ, J, *et al.* Estudio de la hidrodinámica del café tostado (*Coffea arabica* L.). Revista mexicana de ingeniería química, 2007, p. 188.

SEPULVEDA VILLARROEL, Victor Andres. Simulación de la cinética del secado a baja temperatura de *eucalyptus nitens*. Universidad del Bío-Bío, Septiembre 2014, p. 32.

SHARP J, R. Design and Management of flow Temperature Grai Driers in England. J. agric. Engng Cambridge, 1984.

THE SUPER COMPUTING SCIENCE CONSORTIUM. [En línea]. 2008. [Recuperado en Marzo 2018]. Disponible: <https://www.psc.edu/science/2008/sc2/>.

THOMPSON, T.L. (1972). Almacenamiento temporal de maíz con cáscara de alta humedad mediante aireación continua. Transacciones de la Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas, 15 (2), 333-337.

THOMPSON, T.L; PEART, R.M y FOSTER, G. H. Mathematical Simulation of Corn Drying - A New Model. Transaction of the ASAE, 1968. p 582-586.

VAFAI, Kambiz. Handbbook of porous media, New York, The Ohio State University Columbus: Marcel Dekker, 2000, p. 3.

WHITE Frank M. VISCOUS FLUID FLOW. University of Rhode Island, McGrawHill Third edition, 2006.

WILCOX, D. Turbulence modeling for CFD. DCW Industries, 1998.