

Modelo de simulación de colector térmico solar con cámara de secado usando dinámica de fluido
computacional (CFD)

David Alejandro González Corredor y Yibelly Viviana Rojas Toloza

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Director

Hernando Guerrero Amaya

Doctor en Electroquímica, Ciencia y Tecnología

Tutor

Helver Crispiniano Álvarez Castro

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

A DIOS por llenarme de bendiciones y guiarme en este camino que llamamos vida, por ayudarme y permitirme culminar con éxito esta carrera.

A mis padres Héctor González y Yaniz Corredor, quien fueron los promotores y todo mi apoyo para poder cumplir este sueño de convertirme en un profesional, por brindarme cada concejo y lección de vida para formar la persona que soy ahora, por cada palabra de aliento en los momentos difíciles y llenarme de mucho amor y fortaleza para seguir adelante, este logro es para ustedes.

A mi hermano del alma Julián González, quien siempre estuvo para apoyarme y aconsejarme en cada situación que se me presentaba, gracias por darme tanta felicidad y compartir tantos momentos juntos, este logro también es para ti pedrete.

A mi amada Keinny Fuentes por estar en mi vida, ser mi apoyo incondicional y brindarme todo su amor y cariño, por cada concejo y palabras de aliento que me motivaron para culminar con este proceso.

A Don Wladimir y Doña Mary por tanta ayuda durante esta última etapa de mi carrera, por permitirme entrar en su hogar y convertirse en mi segunda familia.

A Doña Marce, Juli, Stevan y Camilo por darme ese calor de hogar mientras estaba lejos de mi familia y crear tantos buenos recuerdos, siempre los llevaré en mi corazón.

A mi compañera de estudio y trabajo de grado Viviana Rojas, gracias por todo.

A mis amigos Michael y Tatiana quienes me ayudaron a que este paso por la universidad fuera más llevadero, gracias por su amistad.

A mi entrenador Juan Pablo y compañeros de selección de Tenis de Mesa, por cada enseñanza y aprendizaje, por cada triunfo y derrota, por cada momento compartido.

David Alejandro González Corredor

Dedicatoria

A mi familia, en primer lugar, a mis padres por ser mi mayor motivación, por su gran dedicación, por el ejemplo que siempre han sido en mi vida, por enseñarme que siempre hay que hacer las cosas con dedicación y amor y por su constante consejo y guía; A mi hermana por su colaboración y ayuda constante, por las palabras de aliento cuando las necesite y por hacer siempre las cosas más fáciles.

A mi compañero de trabajo David González por su constante apoyo y dedicación, a mis compañeros de universidad que fueron importantes en el desarrollo de mi carrera como profesional y con los que disfruté por su paso, Tatiana, Adela, Paula, Jorge, Keinny, Lorena, Edwin, Gustavo, Alejandro, entre muchas otras personas que formaron parte importante de mi vida y con los que compartí momentos inolvidables.

Al Ing. Jhon Jaimes por su compañía y por ser siempre mi apoyo incondicional. A Yuli por estar siempre en los buenos y malos momentos y por enseñarme a ser más fuerte. A Ingrid por su complicidad y compañía y por su maravillosa amistad y a Carolina por imprimirle siempre buen humor a mis días.

A los profesores y administrativos como el Ing. Julio, el Ing. Benavidez, la Ing. Diana, la Ing. María Otilia, personas que me ayudaron a formarme más que como profesional como ser humano.

Este trabajo se lo dedico a mis Padres, Diana Patricia Toloza Vargas y Edgardo Rojas Toloza Vargas, a mi hermana Marcela Rojas Toloza, a mis abuelas Sofía, Olga y Blanca, mujeres que han luchado toda su vida para lograr una mejor vida para sus familias y a la memoria de mis abuelos Alcides Toloza y Ariolfo Rojas, gracias por ser los ángeles de mi vida.

Yibelly Viviana Rojas Toloza

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander por aceptarnos y ser nuestra alma mater, por los espacios y herramientas brindadas que nos permitieron convertirnos en profesionales.

A la empresa AC Ingeniería Virtual, por aceptarnos y permitirnos desarrollar junto con ustedes nuestro proyecto de grado y contribuir en nuestra formación y desarrollo como profesionales.

Al profesor Hernando Guerrero Amaya de la Universidad Industrial de Santander y al ingeniero Helver Crispiniano Álvarez Castro de AC Ingeniería Virtual, por su constante apoyo en el desarrollo del presente trabajo.

A linitia por su amabilidad y por brindarnos toda su ayuda en los procesos administrativos para la entrega del presente trabajo de grado.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Química por su dedicación y esfuerzo quienes contribuyeron en la formación integral de nuestro desarrollo como profesionales.

David González y Viviana Rojas.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo general	15
1.2 Objetivos específicos	15
2. Descripción de la empresa	16
3. Marco teórico	16
3.1 Secado solar tradicional	16
3.2 Secador solar indirecto.....	17
3.3 Mecanismos de transferencia de calor	19
3.3.1. Transferencia de calor por radiación.....	20
3.3.2 Transferencia de calor por conducción	20
3.3.3 Transferencia de calor por convección	20
3.4 Números adimensionales empleados en convección	21
3.4.1 Número de Nusselt.....	21
3.4.2 Número de Prandtl	21
3.4.3 Número de Grashof	22
3.4.4 Número de Rayleigh	22

3.4.5 Número de Reynolds.....	22
3.5 Dinámica de fluidos computacional (CFD)	23
3.5.1 Generalidades.....	23
3.5.2 ANSYS Fluent	24
3.6 Modelo matemático	24
3.6.1 Ecuaciones de conservación	25
3.6.1.1 Ecuación de conservación de masa.....	25
3.6.1.2 Ecuación de cantidad de movimiento.	25
3.6.1.3 Ecuación de la Energía.....	25
3.6.2 Modelos de turbulencia.....	27
3.6.2.1 RANS: Reynolds Averaged Navier Stokes.....	27
3.6.2.2 Shear Stress Transport.	28
4. Descripción metodológica	30
4.1 Simulación computacional.....	33
4.1.1 Geometría.....	33
4.1.2 Malla	35
4.1.3 Condiciones de frontera	37
4.1.4 Procesamiento de datos de convergencia.....	39
5. Resultados	39
5.1 Comportamiento térmico del secador solar	40

5.2 Comportamiento fluidodinámico del secador solar	43
6. Conclusiones	48
7. Recomendaciones	49
Referencias Bibliográficas	50
Apéndices.....	54

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1.Cuadro de tareas y funciones desarrolladas durante la práctica empresarial.....	30
Tabla 2.Prueba de calidad de la malla	36
Tabla 3.Parámetros de calidad de malla	37
Tabla 4.Condiciones de frontera	38
Tabla 5.Comparación de los resultados obtenidos por Brasil et al. (2012) y los obtenidos en ANSYS 2020 R2.....	39
Tabla 6.Temperatura media en las bandejas de los casos B1, B2 y B3	43

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Elementos que componen un secador solar indirecto.....	19
Figura 2. Esquema metodológico de la práctica empresarial	32
Figura 3. Geometría 3D del secador solar	34
Figura 4. Geometría de las bandejas dispuestas en la cámara de secado B1, B2 y B3.....	35
Figura 5. Malla con elementos tetraédricos	36
Figura 6. Temperatura media de salida del flujo de aire de los casos A, S, B1, B2 y B3.	41
Figura 7. Distribución de temperatura dentro del secador solar de los casos B1, B2 y B3.....	42
Figura 8. Distribución de temperatura dentro de la cámara de secado de los casos B1, B2 y B3.43	43
Figura 9. Velocidad media de salida del flujo de aire de los casos A, S, B1, B2 y B3.	44
Figura 10. Distribución de velocidad dentro del secador de los casos B1, B2 y B3.	45
Figura 11. Distribución de velocidad dentro de la cámara de secado de los casos B1, B2 y B3..	45
Figura 12. Líneas de flujo dentro del secador solar de los casos B1, B2 y B3.....	47

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Prototipo del secador solar construido por Brasil et al. (2012)	54
Apéndice B. Propiedades de los materiales utilizados en la simulación computacional.....	55
Apéndice C. Distribución de temperatura y velocidad dentro del secador solar	56
Apéndice D. Línea de flujo dentro del secador solar.....	58

Resumen

Título: Modelo de simulación de colector térmico solar con cámara de secado usando dinámica de fluidos computacional (CFD)*

Autores: David Alejandro González Corredor, Yibelly Viviana Rojas Toloza**

Palabras Clave: Colector térmico solar, CFD, Cámara de secado

Descripción:

AC Ingeniería Virtual es una empresa experta en ingeniería 4.0, cuya actividad principal está enfocada en la simulación computacional, el desarrollo de productos tecnológicos e inteligencia artificial, por ende, ofrece a sus estudiantes durante la práctica empresarial el desarrollo de destrezas y habilidades para realizar modelos de simulación aplicados a la ingeniería química mediante la técnica CFD, con el fin de dar solución o plantear mejoras a procesos. Una de las problemáticas más antiguas a nivel mundial es la pérdida de alimentos, puesto que, hasta una tercera parte de la producción se desecha debido a malos hábitos de conservación. Los secadores solares, pueden ser implementados para contribuir con la disminución de los altos índices de pérdida, para ello se deben realizar proyectos de investigación con el fin de llegar a sistemas óptimos para los procesos de secado. El presente trabajo enmarcado en la práctica empresarial desarrolla un modelo de simulación de colector térmico solar con cámara de secado, usando dinámica de fluidos computacional CFD. El modelo de simulación es validado mediante la comparación de resultados con los reportados en la literatura. Posteriormente se implementa 3 distribuciones de bandejas, en la cámara de secado para analizar el comportamiento térmico y fluidodinámico del secador solar donde se logró establecer que la distribución de las bandejas en la cámara de secado influye en la trayectoria del flujo del aire, por lo tanto, modifica la distribución de temperatura y velocidad dentro del secador solar haciendo que el proceso de secado pueda verse afectado.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Hernando Guerrero Amaya, Ph.D. Tutor: Helver Crispiniano Álvarez Castro, Ph.D.

Abstract

Title: Simulation model of solar thermal collector with drying chamber using Computational Fluid Dynamics (CFD)*

Authors: David Alejandro González Corredor, Yibelly Viviana Rojas Toloza**

Key Words: Solar thermal collector, CFD, Drying chamber

Description:

AC Ingeniería Virtual is an expert company in Engineering 4.0, whose main activity is centered on numerical simulation, technological product development and artificial intelligence. therefore, offers its students during their business practice the development of skills and abilities to perform simulation models applied to chemical engineering using CFD technique, to provide solutions or propose process improvements. One of the oldest problems in the world is food waste, since up to one third of the production is discarded due to poor conservation habits. Solar dryers can be implemented to help reduce the high rates of waste, for which research projects should be carried out to achieve optimal systems for drying processes. The present work, framed in business practice, develops a simulation model of a solar thermal collector with a drying chamber, using computational fluid dynamics CFD. The simulation model is validated by comparing results with those reported in the literature. Subsequently, 3 tray distributions are implemented in the drying chamber to analyze the thermal behavior and fluid dynamics of the solar dryer, where it has been established that the tray distribution in the drying chamber influences the airflow path, thus modifying the temperature and velocity distribution inside the solar dryer, which can affect the drying process.

* Undergraduate Project

** Physical and Chemical Engineering's Faculty. School of Chemical Engineering. Director. Hernando Guerrero Amaya Ph.D. Tutor: Helver Crispiniano Álvarez Castro, Ph.D.

Introducción

Según datos reportados por el Departamento Nacional de Planeación (DPN, 2016) en Colombia se pierden y desperdician anualmente 9,76 millones de toneladas de alimento de los cuales el 62% de las pérdidas se registran en la cadena de frutas y vegetales y el 25% en raíces y tubérculo. Las pérdidas se presentan como consecuencia de someter estos alimentos con altos contenidos de humedad a procesos de transporte prolongado y altas temperaturas de almacenamiento, generando condiciones que ocasionan la descomposición y el deterioro de la calidad e inocuidad del producto (Puerta, 2008; CSA, 2014; Sharma, Chen y Vu Lan, 2009). Por ende, la conservación de alimentos mediante el proceso de secado solar ha sido una de las técnicas más antiguas que se ha venido adaptando. Este proceso permite la reducción del peso y tamaño de los productos, lo que facilita el transporte y almacenamiento (El-Sebaili y Shalaby, 2012; Biescas, 2015; Moghimi, Rahimzadeh, Ahmadpour, 2021). Los avances en el proceso de secado tradicional han sido completamente empíricos, por lo que presenta limitaciones como tiempos prolongados, procesos de secado heterogéneos y contaminación de los productos, lo que provoca grandes pérdidas en la cantidad y calidad del producto seco (El-Sebaili y Shalaby, 2012; González, Borrajo y Kolibaly, 2017; Kumar y Singh, 2020; Rodríguez, 2008; Puerta, 2008). Por lo tanto, se considera que la inclusión de secadores solares puede reducir las pérdidas de cultivos y aumentar significativamente la calidad de los productos, pero a pesar de ser una buena alternativa, es un proceso que requiere mejoras. En el marco de la investigación se han abordado trabajos a partir de las modificaciones en la geometría externa del prototipo y la optimización de la absorción de radiación, entre otros (Fudholi, Sopian, Ruslan y Othman, 2013; Güler et al., 2020; Cerón, 2012;

Martínez, 2012; Roche, Hernández y García, 2017), pero se registra poca investigación sobre el diseño interno en la cámara de secado, como por ejemplo la distribución de las bandejas dentro de la cámara y su influencia en los procesos de secado.

La investigación siempre está en busca de la mejora de procesos o equipos, pero generalmente requiere de una gran inversión en tiempo y un alto costo. La empresa AC Ingeniería virtual es una empresa de base tecnológica que se dedica a generar soluciones abordadas desde el ámbito digital, por lo que les permite disminuir el tiempo y costos que acarrea el desarrollo de pruebas a escalas piloto y análisis experimental de dichos procesos.

Con base en lo anterior, en el presente trabajo se desarrolla un modelo de simulación de colector solar térmico con cámara de secado, a partir del paquete de simulación ANSYS 2020 R2 en su versión académica, el cual se valida mediante la comparación de resultados reportados en el trabajo de investigación por Brasil, Guimarães, Cabezas, de Moraes y de Oliveira (2012). Posteriormente se realizan nuevas simulaciones en el que se incluyen 3 configuraciones de bandejas (B1, B2 y B3), con el fin de evaluar el comportamiento térmico y fluidodinámico del secador solar.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo de simulación de un colector térmico solar con cámara de secado mediante la técnica CFD, usando ANSYS como herramienta de cálculo.

1.2 Objetivos específicos

Adquirir destrezas en el uso de la técnica CFD para desarrollar modelos de simulación aplicados a ingeniería química

Estudiar el comportamiento térmico y fluidodinámico de un colector térmico acoplado a una cámara de secado mediante la técnica CFD

Generar un análisis de resultados con los parámetros de post procesamiento más relevantes en la simulación

Validar la simulación a través de resultados reportados en la literatura.

2. Descripción de la empresa

AC INGENIERÍA VIRTUAL, es una empresa colombiana ubicada en el departamento de Santander, Bucaramanga en la calle 11 N° 29-47 Apartamento 201 en el barrio Universidad. Es una empresa desarrollada en el ámbito de la generación de soluciones de problemáticas a nivel industrial. La actividad principal de la empresa es la Ingeniería Computacional aplicada al desarrollo de software, modelamiento y simulación numérica, simulación de movimiento, automatización, Big and Smart Data e Inteligencia artificial, con el cual, buscan abarcar necesidades a nivel industrial como el desarrollo y optimización de equipos y procesos industriales, la modernización de la industria, entre otras.

3. Marco teórico

3.1 Secado solar tradicional

El principio de funcionamiento del secado solar radica en la vaporización de la humedad contenida en el producto (Biescas, 2015), fenómeno que se presenta gracias al calor transferido procedente de una corriente caliente de aire con un menor contenido de humedad en busca de un equilibrio entre las partes. Este proceso involucra la transferencia de calor y masa entre el aire circundante y el producto, debido a gradientes de temperatura y humedad, a partir del cual se busca

obtener un proceso de secado óptimo, con altas velocidades y de forma eficiente, uniforme y sin alteraciones (Rodríguez, 2008).

El proceso de secado solar ha tenido su desarrollo de manera empírica y es llevado a cabo al aire libre, sobre cualquier superficie, bajo pocas condiciones de inocuidad e higiene (Rodríguez, 2008). En consecuencia, hay un alto índice de pérdidas en cantidades de producto debido a las bajas velocidades de secado, la contaminación de los productos por presencia de insectos y roedores y la falta de protección ante fenómenos atmosféricos como la lluvia, generando productos secos de baja calidad (Biescas, 2015; Rodríguez, 2008). Con base en lo anterior, se plantea que el uso de tecnologías como los secadores solares de tipo indirecto, reducen en un alto grado las limitaciones del proceso de secado tradicional, a continuación, se presenta la distribución y función de los elementos que componen un secador solar indirecto (Figura 1.)

3.2 Secador solar indirecto

El sistema secador solar de tipo indirecto está compuesto de 3 partes generales, el colector solar, la cámara de secado y la chimenea (Figura 1).

El **colector solar** es el elemento principal de una instalación de energía solar, este dispositivo presenta un absorbedor de metal, el cual, intercepta la radiación al interior del colector y se encarga de transformar la energía solar en energía térmica, una cubierta transparente (normalmente vidrio templado) que aísla el colector solar de las condiciones ambientales, una zona de aislamiento para reducir o evitar las pérdidas de calor al interior del colector, (entre el absorbedor y el exterior) normalmente formado por espumas sintéticas y por último una carcasa

cuya función es alojar los componentes del colector solar (Chan,2010; Biescas, 2015; González et al., 2017).

Generalmente, el colector solar para calentamiento de aire es utilizado en procesos de secado agrícola e industrial y pueden operar en régimen forzado o régimen de circulación natural. El principio de funcionamiento que permite el movimiento del aire a partir del régimen de circulación natural está dado como consecuencia de la flotación inducida por los gradientes de densidad, y en el caso del régimen de circulación forzada, el aire es obligado a circular con la ayuda de la fuerza ejercida por el ventilador (Rodríguez, 2008).

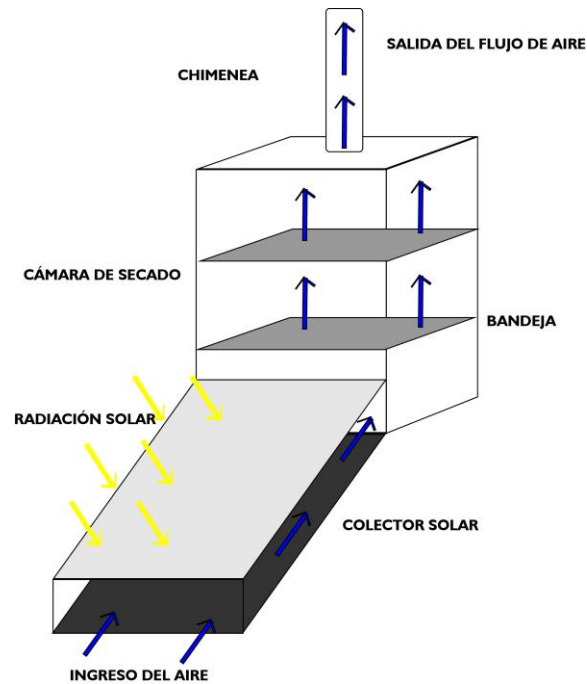
La **cámara de secado**, está ubicada entre el colector solar y la chimenea, por ende, al someter al aire por su paso sufre transformaciones, puesto que la cámara recibe aire caliente con bajo contenido de humedad y entrega aire con baja temperatura, pero con alto contenido de humedad (Rodríguez, 2008). En esta parte del secador se disponen las bandejas sobre las cuales se ubica el producto a secar (Eckertf y Carlson, 1961). En la literatura no se reporta especial atención acerca del diseño interior de las cámaras o de la ubicación que deben tener las bandejas para generar condiciones óptimas de secado (Rodríguez, 2008).

Y el tercer y último componente es la **chimenea**, su uso es esencial, puesto que permite controlar el tiempo de permanencia del aire dentro del equipo, logrando incrementar las velocidades del aire y las tasas de remoción de humedad (Rodríguez, 2008). Según trabajos desarrollados por Eckertf y Carlson (1961), donde indican que el diseño de la chimenea debe estar influenciado por la temperatura y la presión, ya que debe garantizarse que las pérdidas por fricción sean menores que la cabeza de presión generada por fuerzas de flotación además de tener en cuenta que la temperatura dentro de la chimenea siempre debe ser mayor a la temperatura ambiente, pues

de lo contrario se puede generar estancamiento de fluido, o en un caso extremo, que el flujo se devuelva por la chimenea.

Figura 1.

Elementos que componen un secador solar indirecto.



3.3 Mecanismos de transferencia de calor

El principio de funcionamiento está regido en función de los mecanismos de transferencia de calor que se dan entre las paredes del equipo y las variaciones que sufra el fluido durante el paso por el prototipo. Existen 3 tipos de mecanismos, la transferencia de calor por radiación, transferencia de calor por conducción y la transferencia de calor por convección.

3.3.1. *Transferencia de calor por radiación*

La radiación es la energía emitida en forma de ondas electromagnéticas, como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas, que a diferencia de otros mecanismos de transferencia de calor no requiere de un medio de propagación (Yunus y Afshin, 2011). La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_S se expresa mediante la Ley de Stefan-Boltzmann como:

$$Q_{emitida,máx} = \sigma A_S T_S^4 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Constante de Stefan-Boltzman [W/m²].

3.3.2 *Transferencia de calor por conducción*

Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de su interacción. Se determina por la Ley de Fourier que establece que el intercambio térmico es proporcional y de sentido contrario al gradiente de temperatura en esa dirección (Yunus y Afshin, 2011).

$$q = -\frac{k}{e} \Delta T \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde k es conductividad térmica del fluido [W/m°C], e el espesor [m] y ΔT el gradiente de temperatura [K].

3.3.3 *Transferencia de calor por convección*

Es la transferencia de energía que se da entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento; según la rapidez del movimiento del fluido (natural o forzado) se presenta una mayor transferencia de calor (Yunus y Afshin, 2011).

$$q = h(T_S - T_\infty) \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde h es el coeficiente convectivo [w/m^2K], T_s la temperatura de la superficie [$^{\circ}C$] y T_{∞} la temperatura del fluido suficientemente lejos de la superficie [$^{\circ}C$].

3.4 Números adimensionales empleados en convección

3.4.1 Número de Nusselt

Representa el mejoramiento de la transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación con la conducción a través de la misma capa y se interpreta como el gradiente de temperatura adimensional en la superficie (Yunus y Afshin, 2011) y se define como:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde L_c es la longitud característica de la configuración geométrica [m].

3.4.2 Número de Prandtl

Proporciona la medida de la efectividad relativa del transporte del momento y energía por difusión de las capas límite de velocidad y térmica, se define como la relación entre la difusividad molecular de la cantidad de movimiento y la difusividad molecular de calor como se presenta a continuación (Yunus y Afshin, 2011).

$$Pr = \frac{\text{Difusividad molecular de la cantidad de movimiento}}{\text{Difusividad molecular del calor}} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde μ es la viscosidad dinámica del fluido [$kg/m s$] y C_p el calor específico del fluido [$J/kg^{\circ}C$].

3.4.3 Número de Grashof

Describe la relación entre la flotabilidad y la viscosidad dentro del fluido y representa los efectos de la convección natural (Yunus y Afshin, 2011).

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_C^3}{\nu^2} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde g es la aceleración gravitacional [m/s^2], β el coeficiente de expansión volumétrica [$1/\text{K}$], ν es la viscosidad cinemática del fluido [m^2/s].

3.4.4 Número de Rayleigh

Representa el producto de los números de Grashof y de Prandtl, el número de Rayleigh es considerado como la razón de las fuerzas de flotabilidad y los productos de las difusividades térmica y de cantidad de movimiento (Yunus y Afshin, 2011).

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_C^3}{\nu^2} Pr \quad (\text{Ec. 7})$$

3.4.5 Número de Reynolds

Hace referencia a un número adimensional que determina el régimen de flujo como la razón entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas del fluido. Descubierta en 1880 por Osborne Reynolds (Yunus y Afshin, 2011) y se expresa para el flujo externo como:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerza viscosas}} = \frac{V_f L_c}{\nu} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde V_f es la velocidad corriente superior [m/s]

3.5 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

3.5.1 Generalidades

Las diversas disciplinas científicas usan técnicas de estudio, que en ocasiones deben ser complementarias como es el caso de los métodos teóricos y experimentales, el análisis dimensional o el análisis matemático simplificado, herramientas a partir de las cuales se pueden realizar validaciones pero que acarrear consigo un importante aumento en el costo del proceso (Fernández, 2012). En el caso de los modelos matemáticos se presentan excepciones en las que a partir de los métodos convencionales no es posible obtener una solución. Específicamente en el área de la mecánica de fluidos donde se presenta un conjunto de leyes de conservación que no admite soluciones generales analíticas debido a su complejidad; es allí donde se genera una nueva técnica de análisis denominada estudio computacional de los flujos, comúnmente conocido como Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) (Fernández, 2012).

La Dinámica de Fluidos Computacional, es una disciplina que tiene lugar a partir de la combinación entre la mecánica de fluidos y el cálculo numérico (Maurad, 2017). Esta disciplina emplea herramientas computacionales y técnicas numéricas que, a partir de la simulación, permiten resolver todos aquellos problemas físicos relacionados con el movimiento de los fluidos, mediante la resolución de las ecuación de Navier Stokes, a partir de las cuales se lleva a cabo la descripción del proceso de intercambio de calor, masa y movimiento del flujo (Jiménez, 2015; Maurad, 2017), en ocasiones, se resuelven fenómenos asociados como reacciones químicas, el arrastre de sólidos y otros fenómenos relacionados (Fernández, 2012).

A continuación, se presenta la ecuación de Navier Stokes donde ϕ es la variable transportada y S_h es la fuente de ϕ (Jiménez, 2015).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\phi) = \nabla(\rho\nabla\phi) + S_h \quad (\text{Ec. 9})$$

El primer término de la ecuación representa el transporte transitorio de ϕ , el segundo término muestra el transporte por medio de la convección, el tercero representa el transporte de ϕ por medio de la difusión, y el cuarto término la fuente de ϕ .

El método más común para la resolución de estas ecuaciones es el de volúmenes finitos, en el que las regiones son divididas en pequeños volúmenes de control y de esta forma se obtienen los valores para cada una de las variables del dominio (Álvarez, Matos, Mori, Martignoni y Ocone, 2015).

3.5.2 ANSYS Fluent

ANSYS Fluent, es un paquete comercial que permite la resolución de las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía que gobiernan el movimiento del fluido, discretizando el dominio con el método de volúmenes finitos en el que a partir de regiones divididas en pequeños volúmenes de control se obtienen los valores para cada una de las variables del dominio (Álvarez et al., 2015).

3.6 Modelo matemático

Para el estudio del comportamiento térmico y fluidodinámico del caso de estudio, se presentan las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía que gobiernan la dinámica del fluido y los modelos complementarios relacionados con y el transporte de fluidos, usados en el modelo matemático de la simulación.

3.6.1 Ecuaciones de conservación

3.6.1.1 Ecuación de conservación de masa. La ecuación describe el flujo neto de masa que sale del volumen de control por las fronteras y se obtiene de aplicar el principio de conservación de masa (Bird, Stewart y Lightfoot, 2006).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (\text{Ec. 10})$$

Considerando que las partículas viajan a una velocidad promedio (\mathbf{v}), la ecuación 10, es la forma general de la ecuación de conservación de masa o ecuación de continuidad y es válida tanto para flujos incompresibles como compresibles.

3.6.1.2 Ecuación de cantidad de movimiento. La ecuación 11 es la representación matemática de la segunda ley de Newton, describe que el volumen de control que se mueve con el fluido es acelerado por la sumatoria de las fuerzas que actúan sobre él (Bird et al., 2006).

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde, p es la presión estática, el tensor de tensión viene dado por $\bar{\tau}$

$$\bar{\tau} = \mu [(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I] \quad (\text{Ec. 12})$$

El segundo término de la ecuación representa el efecto de la dilatación de volumen donde μ representa la viscosidad molecular e I el tensor unitario (Vegas, 2020).

3.6.1.3 Ecuación de la Energía. La primera ley de la termodinámica establece que cualquier cambio de energía en el tiempo, dentro de un volumen de control, es causado por el

trabajo de las fuerzas que inciden sobre este volumen y por el flujo de calor neto hacia éste (Durán, 2017), como se presenta en la ecuación 13.

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T + (\bar{\tau}_{eff} \vec{v})) \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde, $k_{eff} \nabla T$ representa la transferencia de calor debido a la conducción, el término $\bar{\tau}_{eff} \vec{v}$ representa la transferencia de energía debido a la disipación viscosa y S_h hace referencia a cualquier fuente de calor por reacción química o fuente volumétrica. En cuanto a k_{eff} , es la conductividad efectiva, producto de la suma de k y k_t , que son la conductividad y a conductividad turbulenta, respectivamente (Blazek, 2005).

El término E se calcula de la siguiente manera:

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (\text{Ec. 14})$$

Donde

$$h = e + \frac{p}{\rho} \quad (\text{Ec. 15})$$

El término e , la energía interna por unidad de masa del gas se calcula empleando la ecuación 16.

$$e = \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde C_p es el calor específico [J/kg°C]. y T_{ref} representa la temperatura 25 °C

3.6.2 Modelos de turbulencia

Para modelar el flujo turbulento, el software ANSYS presenta una serie de modelos de cierre dentro del modelo de tipo RANS, o modelos para la viscosidad turbulenta, por lo tanto, a continuación, se presentan las generalidades de algunos de los modelos más usados:

3.6.2.1 RANS: Reynolds Averaged Navier Stokes. El modelo RANS, propuesto por Reynolds en 1895 consiste en descomponer las variables de interés (velocidad, presión, temperatura, etc.) en un valor medio y una fluctuación (Richmond, 2019), dentro de la aproximación RANS, las ecuaciones originales de Navier Stokes se reformulan en función de las variables promedio y se obtiene un nuevo grupo de ecuaciones, similar al conjunto original de ecuaciones, pero con una variable adicional que requiere de un modelo para cerrar el modelo RANS como se presenta a continuación:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (\text{Ec. 17})$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\underline{\rho u'_i u'_j}) \quad (\text{Ec. 18})$$

Esta es la ecuación de Reynolds-Averged Navier-Stokes o RANS. Donde $-\underline{\rho u'_i u'_j}$ es un término adicional que corresponde a la representación matemática de los efectos de la turbulencia. Estos efectos se denominan Reynolds Stress y pueden ser aproximados al gradiente de velocidad asumiendo la hipótesis de Boussinesq.

Según Blazek (2005), expresa que la hipótesis de Boussinesq considera que la transferencia de momento en los flujos turbulentos se encuentra determinada por la combinación de energías de los grandes remolinos turbulentos. Se considera, que el esfuerzo de cizallamiento turbulento es lineal a la tasa media de deformación con un factor de proporcionalidad igual a la viscosidad del remolino (Blazek, 2005).

Al aplicar la hipótesis de Boussinesq a los Reynolds Stress se obtiene la siguiente ecuación

$$\left(-\rho \overline{u'_i u'_j} \right) = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (\text{Ec. 19})$$

A esta expresión se le denomina ecuación Reynolds Stress Tensor empleada en varios modelos de turbulencia o Eddy viscosity μ_t .

3.6.2.2 Shear Stress Transport. SST por sus siglas en Ingles, es un modelo que combina principios de la robustez y la exactitud de los modelos k- ϵ y k- ω , respectivamente, lo que lo convierte en un modelo aplicable a una amplia gama de flujos. Es un modelo para flujos con alto número de Reynolds, también es conocido como un modelo de bajo número de Reynolds puesto que puede resolver todo el flujo hasta las paredes sin hacer uso de las funciones de pared. El modelo emplea k- ϵ en las zonas de corriente libre y k- ω en las regiones cercanas a las paredes, pero elimina algunas debilidades de los anteriores modelos pues tiene en cuenta el transporte de esfuerzo cortante turbulento por una limitación de la viscosidad de remolinos V_t (Menter, 1994).

$$V_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde,

$$V_t = \frac{\mu_t}{\rho} \quad (\text{Ec. 21})$$

S = representa una medida invariante de la tasa de deformación

F_2 = es una función de combinación que restringe el límite a la capa de la pared calculado por:

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (\text{Ec. 22})$$

Donde,

$$arg_2 = \max\left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta'\omega y'}, \frac{500 v}{y^2 \omega}\right) \quad (\text{Ec. 23})$$

Como se mencionó anteriormente el modelo SST es un modelo aplicable a cualquier zona del flujo, gracias a que se emplea una función que permite determinar cuál modelo utilizar en las diferentes regiones del fluido. Según Vegas (2020) se emplean las ecuaciones 24 y 25 para el modelo Shear Stress Transport.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial x_i}(\rho k \mu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + \tilde{G}k - Yk + Sk \quad (\text{Ec. 24})$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial y}{\partial x_i}(\rho \omega \mu_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma \omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + G\omega - Y\omega + D\omega + S\omega \quad (\text{Ec. 25})$$

Donde k representa la energía cinética turbulenta, ω la tasa de disipación específica, las difusividades efectivas para el modelo k - ω SST se representan por Γk , $\Gamma \omega$ respectivamente, los términos ∂k y $\partial \omega$ son los números turbulentos de Prandtl para k y ω . Yk y $Y\omega$ son los términos utilizados para representar los términos de disipación de k y ω debido a la turbulencia, $D\omega$ simboliza la modificación en la difusión cruzada, $S\omega$ y Sk son valores fuente que pueden ser definidos por el usuario y por último $\tilde{G}k$ y $G\omega$ representan la producción de energía cinética turbulenta para k y ω respectivamente (Mendoza y Vera, 2019; Vegas, 2020)

4. Descripción metodológica

Para el desarrollo de la práctica empresarial investigativa se establecieron 4 etapas con el fin de llevar a cabo los objetivos planteados (Figura 2). A continuación, se realiza la descripción global de las etapas:

La primera etapa comprende el desarrollo de destrezas en la herramienta de simulación CFD (ANSYS Fluent) mediante cursos virtuales proporcionados por la empresa AC Ingeniería Virtual, en la segunda etapa se realiza el modelo de simulación del colector térmico con cámara de secado y se valida la simulación mediante resultados reportados en la literatura (Brasil et al., 2012), posteriormente en la etapa 3 se incluyen las bandejas en la geometría de la cámara de secado para estudiar el comportamiento térmico y fluidodinámico del prototipo y generar un análisis de los resultados con los parámetros de post procesamiento más relevantes de la simulación, por último en la etapa 4 se desarrolla material audiovisual para la presentación de resultados.

Durante la práctica empresarial investigativa se desarrollaron tareas y funciones descritas en la tabla 1

Tabla 1.

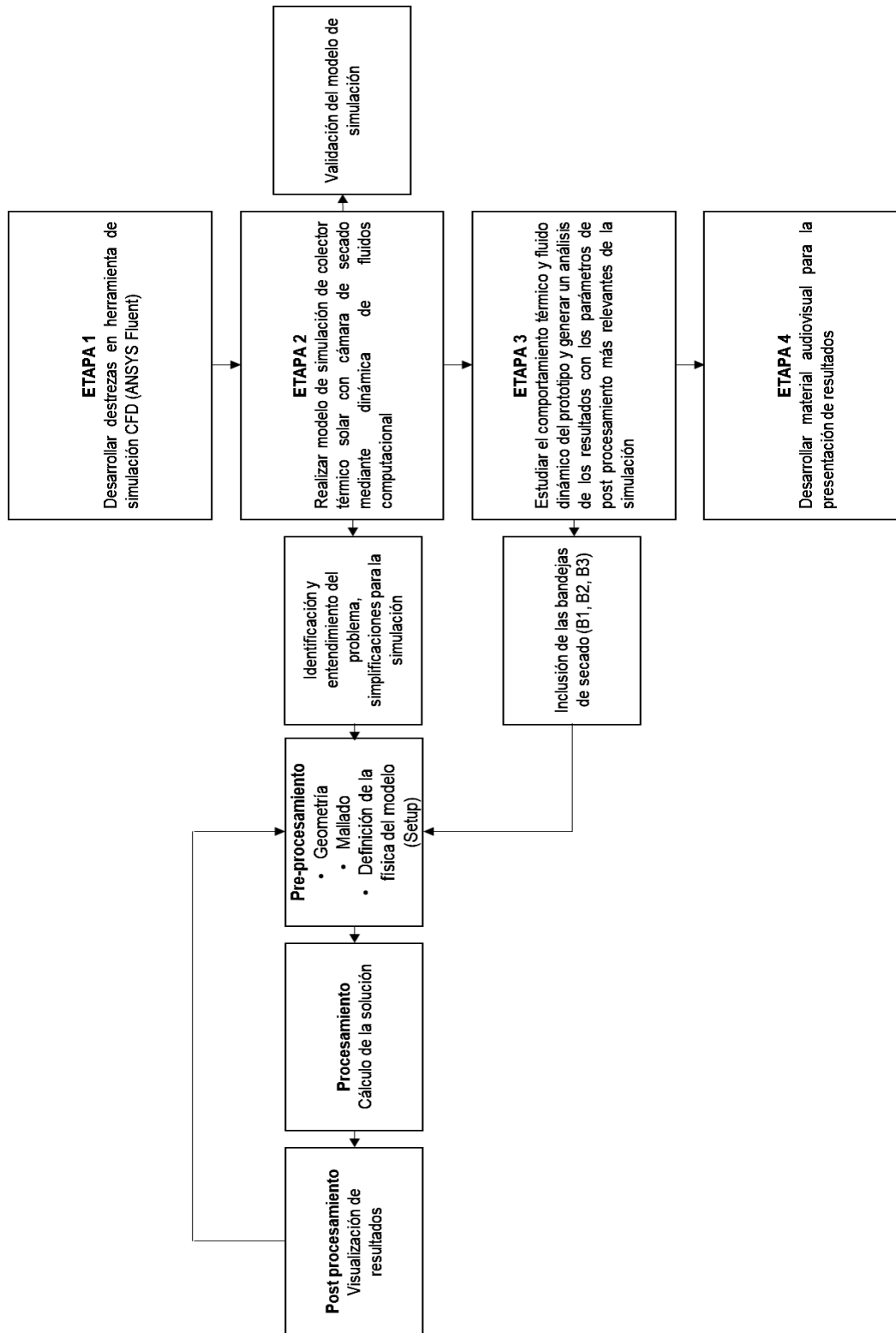
Cuadro de tareas y funciones desarrolladas durante la práctica empresarial

Actividad	Objetivo	Producto	Detalle
1	Documentar las aplicaciones de la industria 4.0 y el rol del Ingeniero 4.0 aplicado a la Ingeniería Química	P1. Documento (presentación) ilustrativa	Desarrollar presentación en la cual ilustre las aplicaciones de la industria 4.0 y el rol de Ingeniero 4.0

Actividad	Objetivo	Producto	Detalle
			aplicado a la Ingeniería química
2	Desarrollar destrezas en la técnica CFD a través de herramientas de simulación.	P3. Archivos de simulación, informe de simulación y presentación de resultados de simulación.	Introducción a la herramienta de simulación CFD. Webinar. Contaminación aire agua. Curso virtual introducción a herramienta de simulación CFD.
3	Simular colector solar con cámara de secado mediante la técnica CFD	P3. Archivos de simulación, informe de simulación y presentación de resultados de simulación	Identificación del problema, Pre-procesamiento, procesamiento y post procesamiento del modelo de simulación.
4	Desarrollar y presentar informe de resultados tipo paper.	P4. Informe final	Desarrollo de informe final y material audiovisual.

Figura 2.

Esquema metodológico de la práctica empresarial



4.1 Simulación computacional

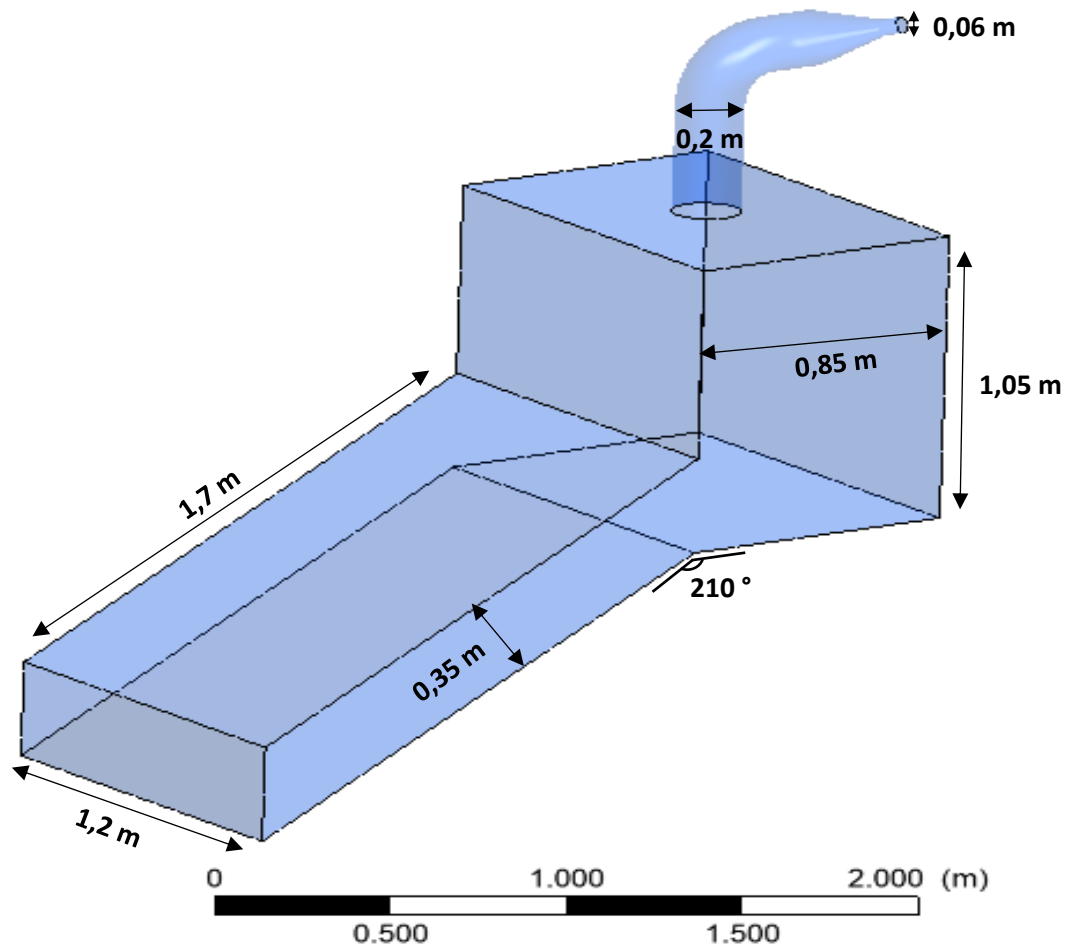
El modelo de simulación de colector térmico solar con cámara de secado se realizó usando el software ANSYS Fluent 2020 R2 en su versión académica, el desarrollo del proceso de simulación se describe a continuación.

4.1.1 Geometría

Para realizar la geometría del secador solar (Figura 3.) se empleó la herramienta de diseño ANSYS DesignModeler, a partir de las dimensiones del prototipo del secador solar (ver Apéndice A.) construido por Brasil et al. (2012).

Figura 3.

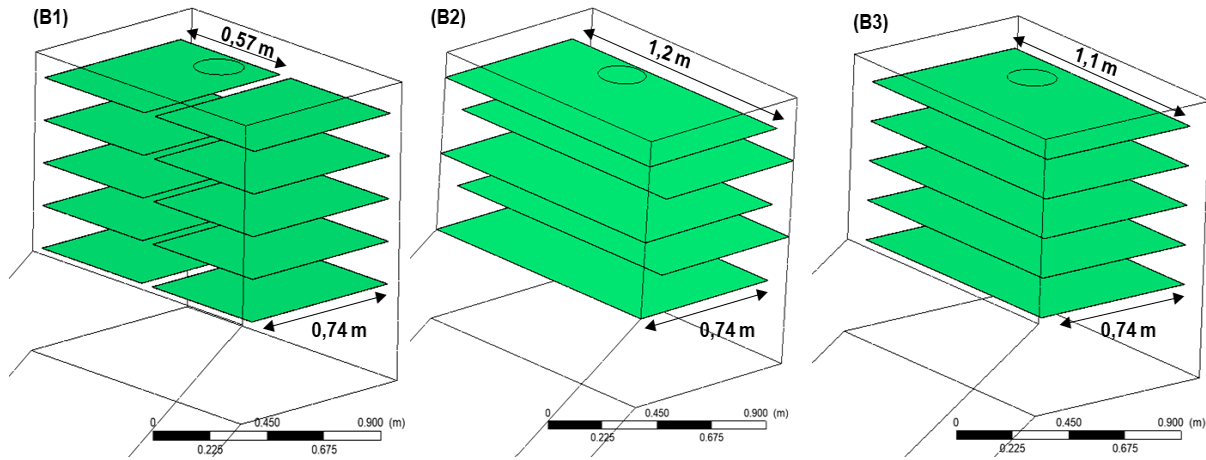
Geometría 3D del secador solar



La figura 4 muestra las configuraciones y dimensiones de las bandejas (con un espaciado entre cada una de 0,15 m), utilizadas para evaluar la distribución de la temperatura y la velocidad dentro del secador solar.

Figura 4.

Geometría de las bandejas dispuestas en la cámara de secado B1, B2 y B3



4.1.2 Malla

Para verificar que la solución es independiente de la malla, se realizaron varias simulaciones, teniendo como parámetro de medida la temperatura y velocidad promedio de salida del aire (Tabla 2), donde se observa que a partir de la solución de la malla 3 no se presenta variación con respecto a la solución de la malla 4 reportada por Brasil et al. (2012), por lo tanto, el desarrollo del presente trabajo se realiza con una malla con elementos tetraédricos (Figura 5.) de un total de 152976 nodos. Con la herramienta *Sizing* se realiza el crecimiento de las celdas activando la función “capturar curvatura” para mejorar la calidad de la malla, cabe resaltar que se realiza un refinamiento en las zonas cercanas a las paredes, mediante la herramienta *Inflation*. Para el mallado de las demás configuraciones (B1, B2, B3) se eligen los mismos parámetros de construcción.

Tabla 2.

Prueba de calidad de la malla

Malla	Número de nodos	Temperatura promedio de salida (K)	Velocidad promedio de salida (m/s)
1	36926	312,4	4,07
2	88893	311,4	4,05
3	152976	311,3	4,06
4	424700	311,3	4,06

Nota. La información de la malla 4 fue tomada de International Journal of Recent Research and Applied Studies, (Brasil et al., 2012).

Figura 5.

Malla con elementos tetraédricos

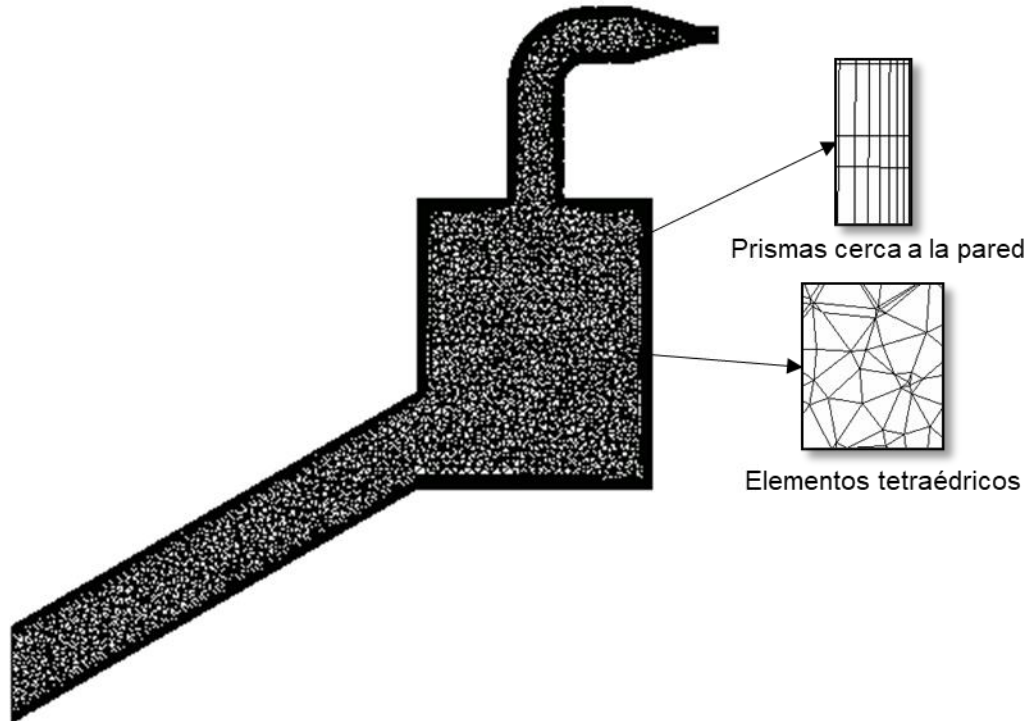


Tabla 3.

Parámetros de calidad de malla

Caso	Número de nodos	Ortogonalidad (Promedio)	Oblicuidad (Promedio)
Sin bandejas	152976	0,772	0,227
B1	156311	0,752	0,245
B2	155246	0,749	0,238
B3	155074	0,758	0,239

Según la definición para ortogonalidad una celda con un valor cercano a 1 define que tan cerrados se encuentran los ángulos entre los elementos para formar una celda perfecta con tamaños uniformes (para valores superiores a 0,7 se considera una muy buena calidad de malla). Por otra parte, la oblicuidad representa que tan ideal pueden ser los elementos de la malla con celdas o caras equiláteras, siendo un valor cercano a 0 una celda equilátera y un valor cercano a 1 celdas degeneradas (Jiménez,2019; Pineda, 2019). Por lo tanto, se determina que cada caso simulado presenta un mallado con muy buena calidad de malla (Tabla 3).

4.1.3 Condiciones de frontera

De acuerdo con los datos experimentales obtenidos e ingresados en ANSYS-CFX 11 por Brasil et al. (2012), se ajustaron las condiciones de frontera reportada en la tabla 4.

Para la definición física de la simulación, se activó la función del modelo de energía, debido a que en el proceso se presenta transferencia de calor, para el desarrollo del modelo de turbulencia se escogió el modelo *k- ω SST* implementado en el trabajo de investigación de Brasil et al. (2012), en el apartado de materiales se ingresaron las propiedades del aire a 24,05 °C y las propiedades térmicas y físicas del acero galvanizado y del vidrio (ver Apéndice B). En la entrada se definió un caudal másico de 0,011 kg/s y una temperatura de entrada de 297,2 K, la dirección del flujo de aire era normal a la entrada. En la salida se fijó una presión manométrica de 0 Pa. En las paredes se

trabajó con un flujo de calor igual a cero para asegurar la condición adiabática debido a que estas se encontraban aisladas térmicamente en la configuración experimental (Brasil et al., 2012), además de trabajar con paredes en condición estacionaria y condición de no deslizamiento. En el absorbedor se alimentó una temperatura de 330,65 K, obtenida a partir de datos experimentales. Para el vidrio del colector solar se usó la condición térmica de convección, para esto se ingresó el coeficiente de transferencia de calor ($h = 2,4281 \text{ W/m}^2\text{K}$) y temperatura de corriente libre de 297,2 K, para el vidrio de la cámara de secado se estableció una temperatura igual a 308,15 K, por último, en las bandejas propuestas se ingresó un espesor de 1,2 mm. En cuanto a las condiciones de operación se activó la expresión de gravedad para efectos de convección natural y se alimentó la presión y temperatura según las condiciones de Belo horizonte Brasil (297,2 K Y 92000 Pa).

Tabla 4.

Condiciones de frontera

Frontera	Condiciones de frontera	Material
Entrada	$\dot{m}_{\text{aire}}=0,011 \text{ kg/s}$ $T_{\text{aire, ent}}=297,2 \text{ K}$	-
Salida	$P_{\text{man}}= 0 \text{ Pa}$	-
Paredes (1-5)	Condición de no deslizamiento, $q=0 \text{ W/m}^2$	Acero galvanizado
Vidrio (1-2)	$h=2,4281 \text{ W/m}^2 \text{ K};$ $T_{\infty}=297,2 \text{ K}$ $T_{\text{vidrio2}}=308,15 \text{ K}$	Vidrio
Absorbedor	$T_{\text{ab}}=330,65 \text{ K}$	Acero galvanizado
Bandeja (B1, B2, B3)	Espesor=1,2 mm	Acero galvanizado

4.1.4 Procesamiento de datos de convergencia

Como parámetros de convergencia se estableció la media cuadrática (RMS por sus siglas en inglés) en el orden de 1×10^{-04} , además del monitoreo en la estabilización de las variables de interés.

5. Resultados

Para la validación del modelo de simulación se tomaron las dimensiones del secador solar y datos experimentales proporcionados por el trabajo de investigación de Brasil et al. (2012), donde los resultados reportados en dicho trabajo y los obtenidos por la simulación en ANSYS 2020 R2 versión académica, se muestran en la tabla 4.

Tabla 5.

Comparación de los resultados obtenidos por Brasil et al. (2012) y los obtenidos en ANSYS 2020 R2

Variables	Brasil et al., 2012		Simulación en ANSYS 2020 R2
	Medidas Experimentales	Simulación en ANSYS-CFX 11	
Temperatura media de salida del aire (K)	311,0 ±2,0	311,30	311,25
Velocidad media de salida del aire (m/s)	4,32±0,3	4,06	4,06

Nota. La información de temperatura y velocidad media de salida del aire de las medidas experimentales y simulación en ANSYS-CFX 11 fueron tomadas de International Journal of Recent Research and Applied Studies, (Brasil et al., 2012)

De la tabla 5 se demuestra que los valores numéricos obtenidos, convergen de manera óptima con respecto a los valores simulados por Brasil et al. (2012), presentando un error relativo del 0,016 % con respecto al valor de la temperatura media de salida del aire. En comparación con los resultados experimentales, los resultados simulados en ANSYS 2020 R2 se encuentran dentro del rango de incertidumbre (6%) reportado en dicho trabajo. Aunque esta diferencia entre los resultados es baja, se debe posiblemente a la sensibilidad de los instrumentos de medición de temperatura y velocidad, e incluso a posibles errores experimentales, a la hora de realizar las medidas en la salida del secador solar.

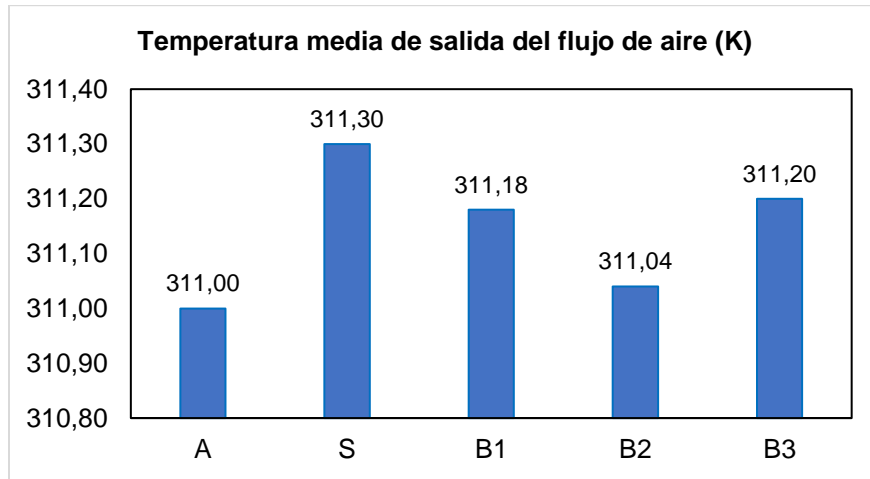
Teniendo en cuenta que tanto en la ejecución experimental (caso A) como en la simulación (caso S) realizada por Brasil et al. (2012), no se tuvo en cuenta la inclusión de bandejas y debido a que el prototipo muestra buenas distribuciones del flujo del aire para procesos de secado (ver Apéndice C), se realizaron nuevas simulaciones con 3 configuraciones diferentes de bandejas (casos B1, B2, B3) para observar el comportamiento del aire y su distribución dentro del secador solar de tipo indirecto.

5.1 Comportamiento térmico del secador solar

La comparación de los resultados obtenidos y los reportados por Brasil et al. (2012) se muestran en la figura 6, donde se observa que la inclusión de las bandejas en la cámara de secado no genera un cambio significativo en la temperatura media de salida de flujo de aire, siendo el caso B2 quien obtiene la mayor diferencia de temperatura (0,26 K) respecto al caso S.

Figura 6.

Temperatura media de salida del flujo de aire de los casos A, S, B1, B2 y B3.



Nota. La información de los casos A y S fueron tomadas de International Journal of Recent Research and Applied Studies, (Brasil et al., 2012).

La figura 7 muestra el contorno de las temperaturas para los casos B1, B2 y B3, para tal fin se usó un plano ubicado en el eje central del secador solar. A partir de los campos de temperatura se puede observar que el flujo de aire se va calentando por convección a medida que pasa por el colector solar y gracias a las fuerzas de flotabilidad, el aire sube hacia la cámara de secado manteniendo una buena distribución de la temperatura en todos los casos y posteriormente sale por la chimenea. Las temperaturas más altas se reportan en la cámara solar, específicamente en la parte inferior, debido a la absorción de la radiación solar por parte del absorbedor alcanzando los 330,65 K.

Por medio de planos horizontales, se presentan los campos de temperatura dentro de la cámara de secado en la figura 8, donde se observa que las temperaturas más altas de todo el sistema en los 3 casos se alcanzan en la parte posterior del secador solar, en consecuencia, a que el flujo proveniente del colector solar se dirige principalmente hacia esa zona. Se realiza un promedio de

área para la variable de temperatura en las bandejas reportado en la tabla 6, donde se determina que el caso B2 obtiene una mayor (aunque no significativa) temperatura media (311,1 K), con respecto a los casos B1 y B3, infiriendo que esta configuración obliga al flujo de aire a estar en mayor contacto, con cada una de las bandejas del caso B2.

Figura 7.

Distribución de temperatura dentro del secador solar de los casos B1, B2 y B3.

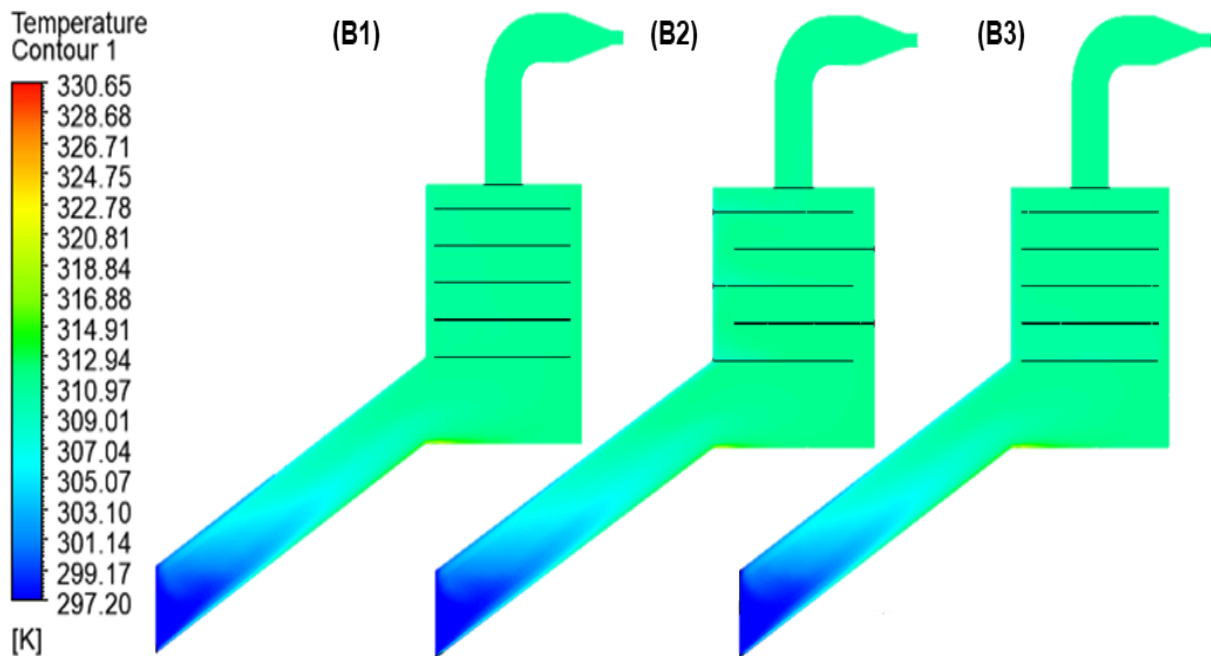


Figura 8.

Distribución de temperatura dentro de la cámara de secado de los casos B1, B2 y B3.

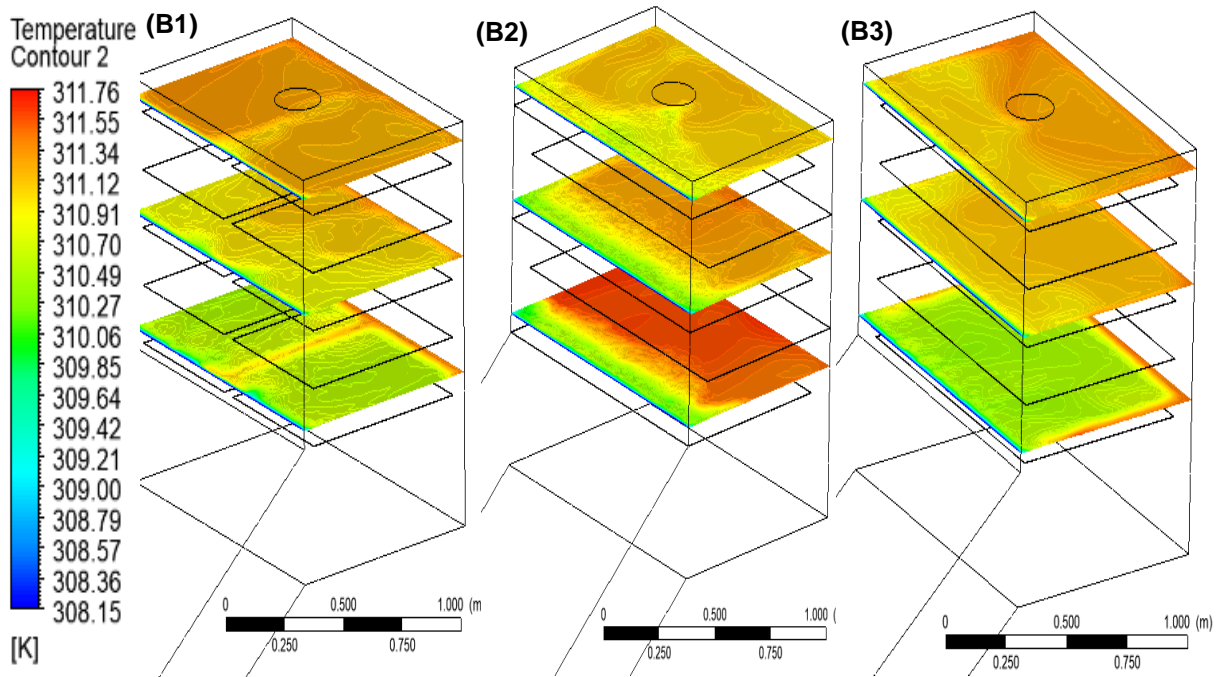


Tabla 6.

Temperatura media en las bandejas de los casos B1, B2 y B3

Variable	Caso		
	B1	B2	B3
Temperatura media en las bandejas (K)	310,96	311,10	311,00

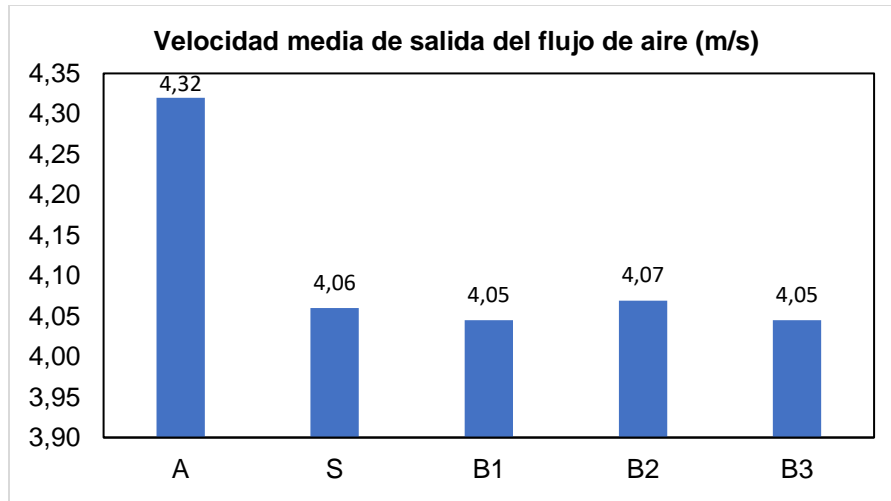
5.2 Comportamiento fluidodinámico del secador solar

Para el análisis del comportamiento fluido-dinámico del secador solar se procede inicialmente con el reporte de la velocidad media de salida del flujo de aire (Figura 9.) donde se puede observar que a pesar de que la distribución de las bandejas de los casos B1 y B3 son diferentes, obtienen la misma velocidad de 4,05 m/s, por otra parte, el caso B2 aumenta en 0,1 m/s

la velocidad media de salida del aire con respecto al valor presentado en el caso S de 4,06 m/s (Brasil et al., 2012), esto debido al redireccionamiento que se le da al aire circundante en la cámara de secado y que se podrá observar en la figura 12.

Figura 9.

Velocidad media de salida del flujo de aire de los casos A, S, B1, B2 y B3.



Nota. La información de los casos A y S fueron tomadas de International Journal of Recent Research and Applied Studies, (Brasil et al., 2012).

La distribución de velocidad dentro del secador de los casos B1, B2 y B3 se presentan en la figura 10. Se evidencia una uniformidad de velocidad en la sección vertical de la cámara de secado en cada caso presentado, lo que conlleva a considerar que las diferentes configuraciones pueden conducir a procesos de secado homogéneos. Cabe destacar, que a medida que el flujo de aire se dirige hacia la zona de salida del secador solar, la velocidad aumenta debido a que la sección transversal en dicha dirección sufre una disminución en el paso de la cámara a la chimenea.

Figura 10.

Distribución de velocidad dentro del secador de los casos B1, B2 y B3.

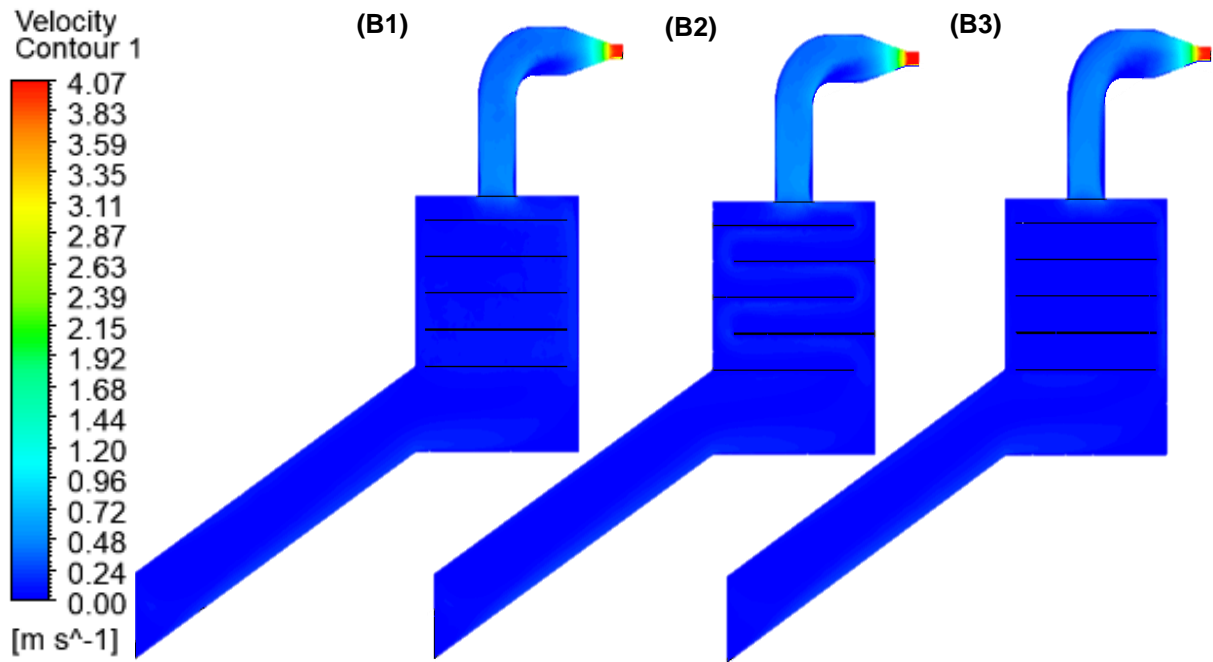
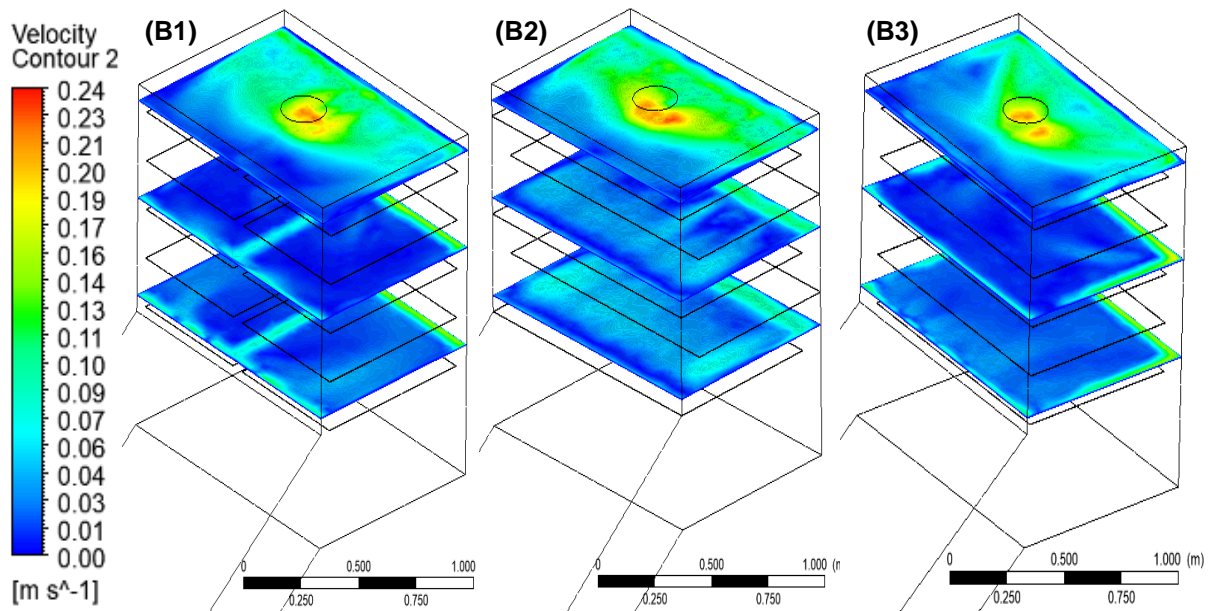


Figura 11.

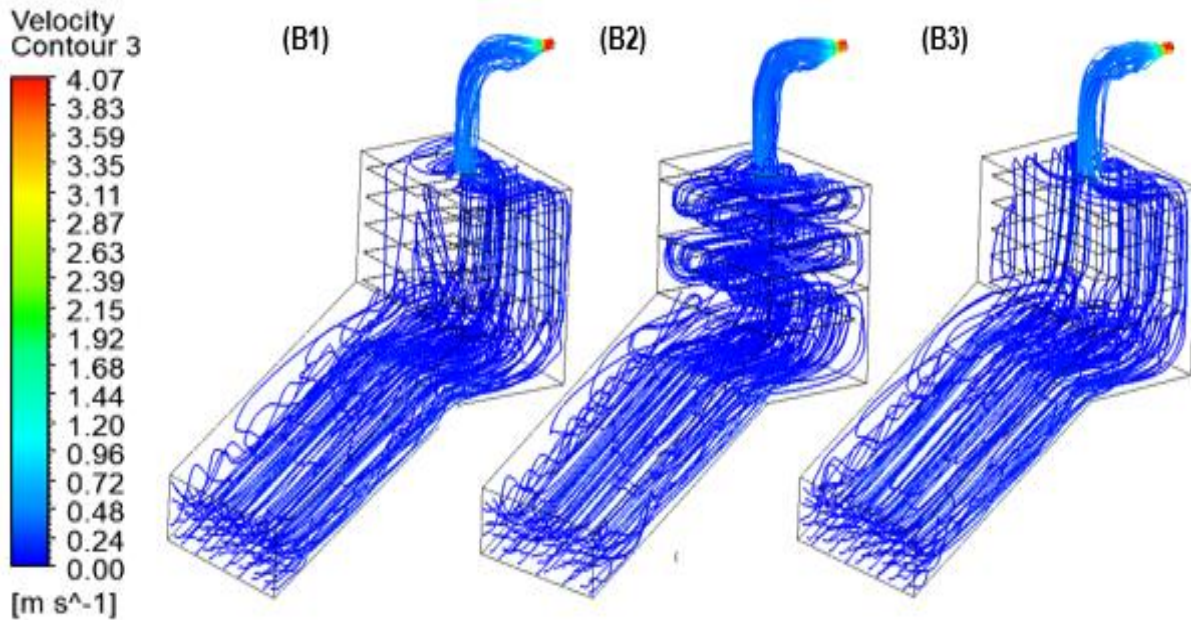
Distribución de velocidad dentro de la cámara de secado de los casos B1, B2 y B3.



La figura 11 muestra la distribución de la velocidad dentro de la cámara de secado, donde se observa que para los casos B1 y B3 la velocidad del flujo de aire aumenta en las zonas aledañas a los lados de las bandejas y en la pared del secador. En el plano superior esta velocidad se concentra en la región central y posterior de la cámara de secado debido a que allí se encuentra la chimenea por donde se ubica la salida del flujo de aire, cabe resaltar que estas distribuciones muestran que el aire pasa a bajas velocidades sobre las bandejas, haciendo que el proceso de secado sea más lento. Para el caso B2 el contorno de velocidad muestra en el plano superior, una mejor distribución en comparación con el caso B3 y una muy similar al caso B1, pero con zonas de mayor velocidad en la parte central. En los planos inferiores, aunque se presentan bajas velocidades en la parte frontal de la cámara de secado, en la región central se observa un aumento en el flujo de aire debido a la distribución en zigzag de la bandeja, por ende, el producto a secar estaría en mayor contacto con el aire beneficiando el proceso de secado.

Figura 12.

Líneas de flujo dentro del secador solar de los casos B1, B2 y B3.



A partir de las líneas de flujo dentro del secador para cada uno de los casos presentados en la figura 12, se deduce que la implementación de las bandejas dentro de la cámara de secado cambia la distribución del aire en comparación con la distribución de flujo de aire presentado por Brasil et al. (2012), donde se puede observar que se genera una zona de recirculación en la parte central del secador (ver apéndice D). Por otra parte, gracias a este patrón de flujo de aire se puede comprender el comportamiento en la distribución de temperatura y velocidad dentro de la cámara de secado, siendo el caso B2, quien efectuaría un proceso de secado más uniforme, por la trayectoria que realiza el aire debido a la configuración de las bandejas en el secador solar.

6. Conclusiones

Se adquirieron destrezas en el uso de la técnica CFD mediante los conocimientos adquiridos durante la práctica empresarial, a partir de las cuales se logró desarrollar el modelo de simulación del colector térmico solar con cámara de secado.

Se estudió el comportamiento térmico y fluidodinámico del secador solar a partir de la técnica de CFD, donde se determinó que dicho estudio es esencial para el diseño y desarrollo de nuevas geometrías que permitan generar posibles mejoras en el proceso de secado.

Se realizó un análisis de resultados con los parámetros de post procesamiento más relevantes en la simulación como la temperatura y velocidad del flujo de aire, donde se observa que la disposición de las bandejas, influye en la distribución de estas variables dentro de la cámara de secado, debido a la modificación en la trayectoria del fluido, por lo que se considera que el transporte de vapor de agua del producto a secar pueda verse afectado.

El modelo del secador solar de tipo indirecto se desarrolló utilizando el software ANSYS Fluent, versión académica 2020 R2, donde se logró validar la simulación numérica del flujo de aire dentro del secador, desarrollado por los investigadores Brasil et al. (2012), obteniendo los resultados reportados en el trabajo de investigación.

7. Recomendaciones

Para futuros trabajos se recomienda realizar la ejecución experimental del prototipo del secador solar con la inclusión de las bandejas propuestas, con el fin de determinar la veracidad de los resultados obtenidos y así validar el nuevo modelo de simulación.

Se recomienda realizar nuevas configuraciones al prototipo como la implementación de aletas o generadores de turbulencia para mejorar la transferencia de calor entre el absorbedor y el aire que fluye a través del colector solar con el fin de mejorar los procesos de secado.

Se recomienda realizar la simulación del proceso incluyendo un producto a secar, con la finalidad de evaluar el efecto de las modificaciones realizadas, sobre el proceso de evaporación de la humedad del producto.

Referencias Bibliográficas

- Alvarez, H. C., Matos, E. M., Mori, M., Martignoni, W. y Ocone, R. (2015). The influence of the fluidization velocities on products yield and catalyst residence time in industria risers. *Advanced Power Technology*, 26, 836-847.
- Biescas, S. E. (2015). *Actuaciones de un colector solar de aire para secado de productos agrícolas en países en vías de desarrollo* (Tesis de pregrado). Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España.
- Bird, R. B., Stewart, E. W., Lightfoot E. N. (2006). *Fenómenos de Transporte*. México: Editorial Reverté, S.A.
- Brasil, C., Guimarães A., Cabezas, L., de Moraes, S. y de Oliveira, T. (2012). Simulation of the Airflow Inside a Hybrid Dryer. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 10(3), 382-389. Recuperado de http://arpapress.com/Volumes/Vol10Issue3/IJRRAS_10_3_02.pdf
- Blazek, J. (2005). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Kidlington, Reino Unido: Elsevier.
- Cerón, J. F. (2012). *Análisis del mecanismo de transferencia de calor en colectores solares térmicos y de la influencia de las condiciones de contorno* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, Colombia.
- Chan, G. E. (2010). *Construcción de un secador solar de tipo indirecto para la deshidratación de productos agrícolas* (Tesis de pregrado). Universidad de Quintana Roo. México.
- Comité de Seguridad Alimentaria Mundial. (2014). *Las pérdidas y el desperdicio de alimentos en el contexto de sistemas alimentarios sostenibles, un informe del Grupo de alto nivel ded expertos en seguridad alimentaria y nutrición* (8). Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i3901s.pdf>.

- Departamento Nacional de Planeación. (2016). Pérdida y desperdicio de alimentos en Colombia. Recuperado de https://mrv.dnp.gov.co/Documentos%20de%20Interes/Perdida_y_Desperdicio_de_Alimentos_en_colombia.pdf
- Durán, L. F. (2017). Análisis y desarrollo de la simulación termo-hidráulica de flujo multifase en CFD con Ansys Fluent. (Tesis pregrado). Universidad politécnica de Madrid, España.
- Eckert, E. R. G., y Carlson, W. O. (1961). Natural convection in an air layer enclosed between two vertical plates with different temperatures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2, 105–120. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(61\)90019-9](https://doi.org/10.1016/0017-9310(61)90019-9)
- El-Sebaei, A. A., y Shalaby, S. M. (2012). Solar drying of agricultural products: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(1), 37–43: Elsevier Ltd., Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.134>.
- Fernández, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos. Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Barcelona, España: Editorial Reverté S.A.
- Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H. y Othman, M. Y. (2013). Performance and cost benefits analysis of double-pass solar collector with and without fins. *Energy Conversion and Management*. 76, 8-19.
- González, J. J., Borrajo, R. y Koulibaly, A. (2017). Simulación numérica de un colector solar plano de aire operando en régimen de convección natural. *Ingeniería Energética*, 38(1), 62-72.
- Güler, H. Ö., Sözen, A., Tuncer, A. D., Afshari, F., Khanlari, A., Şirin, C., y Gungor, A. (2020). Experimental and CFD survey of indirect solar dryer modified with low-cost iron mesh. *Solar Energy*, 197, 371–384.
- Jiménez, T. (2015). *Análisis de los mecanismos de transferencia de calor en un secador solar de alimentos* (Tesis de maestría), Veracruz, México.

- Jiménez, K. (2019). *Análisis del efecto de una modificación en el ángulo de boquillas para una broca PDC aplicando Dinámica de Fluidos Computacional*. (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander. Colombia.
- Kumar, P. y Sing D. (2020). Advanced technologies and performance investigations of solar dryers: A review. *Renable Energy Focus*, 35, 148-158.
- Maldonado, J. (2018). *Análisis matemático y simulación numérica del comportamiento de fluidos en un caldero pirotubular vertical* (Tesis de maestría). Cuenca, Ecuador.
- Martínez, R. L. (2012). *Simulación y optimización del captador de un secadero solar*.(Tesis de pregrado). Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, España.
- Maurad, K. M. (2017). *Estudio del desempeño hidráulico del canal multipropósito del laboratorio de hidráulica y dinámica de fluidos LHyDF del campus balzay* (tesis de pregrado). Universidad de Cuenca, Ecuador.
- Mendoza, L. D. y Vera L. E. (2019). Estudio de diferentes modelos de turbulencia para obtener las curvas características de un perfil naca 2415 mediante la simulación tridimensional de flujos de fluidos. *Revista Bistua Facultad de Ciencias Básicas*. 17(3),43-51. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7149205>
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605.
- Moghimi, P., Rahimzadeh, H., Ahmadpour, A. (2021). Experimental and numerical optimal design of a household solar fruit and vegetable dryer. *Solar Energy*, 214, 575-587.
- Pineda, C. (2019). Estudio fluidodinámico en la inyección de nanopartículas de óxido de aluminio y de óxido de silicio para diferentes formas de poros en recobro mejorado aplicando dinámica de fluidos computacional (CFD). (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander. Colombia.
- Puerta, G. I. (2008). Riesgos para la calidad y la inocuidad del café en el secado. *Cenicafé*. Recuperado de <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/399/1/avt0371.pdf>

- Richmond, G. (2019). *Modelos de turbulencia introductorio*. 1–16. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/335611158_Modelos_de_turbulencia_introductorio.
- Roche, L., Hernández, J. P., y García, A. (2017). Diseño conceptual de secador solar a escala piloto para algas marinas. Conceptual design of Pilot Scale Solar Dryer for Seaweeds. *Tecnología Química*, 37(2), 206–219.
- Rodríguez, J. M. (2008). Transferencia de calor, flujo de aire y similitud en un secador solar pasivo de tipo indirecto (Tesis de maestría). Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.
- Sharma, A., Chen, C. R. y Vu Lan, N. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy review*. 13, 1185-1210.
- Vegas, L. A. (2020). *Modelación en CFD de la transferencia de calor y comportamiento dinámico del aire en un secador solar de chimenea*. (Tesis de pregrado). Universidad de Piura, Piura, Perú.
- Yunus, A., Ç. y Afshin J. G. (2011). Transferencia de Calor y Masa. México. D.F.: Mac Graw Hill.

Apéndices

Apéndice A. Prototipo del secador solar construido por Brasil et al. (2012)



Figura A-1 Secador solar implementado en la ejecución del trabajo de investigación. Tomado de Brasil et al. (2012).

En la Figura A-1 se muestra el prototipo diseñado y construido por Brasil et al. (2012), donde la ejecución experimental y toma de datos, se realizan sin la inclusión de bandejas.

Apéndice B. Propiedades de los materiales utilizados en la simulación computacional

Tabla B-1. Propiedades de los materiales

Material	Propiedades			
	ρ [kg/m ³]	C_p [J/kg K]	k [W/m K]	μ kg/m · s
Aire	Gas ideal incompresible	1007	0,0254	1,8444x10 ⁻⁵
Acero galvanizado	7800	470	52	-
Vidrio	2500	840	0,8	-

Apéndice C. Distribución de temperatura y velocidad dentro del secador solar

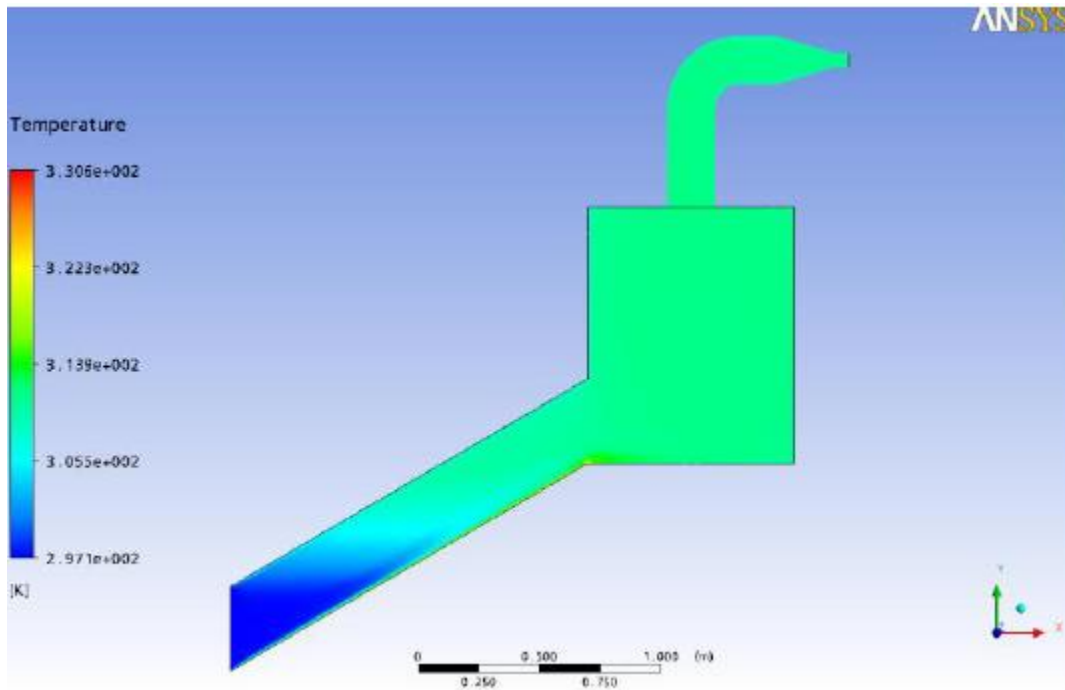


Figura C-1 Distribución de temperatura dentro del secador solar. Tomado de (Brasil et al., 2012)

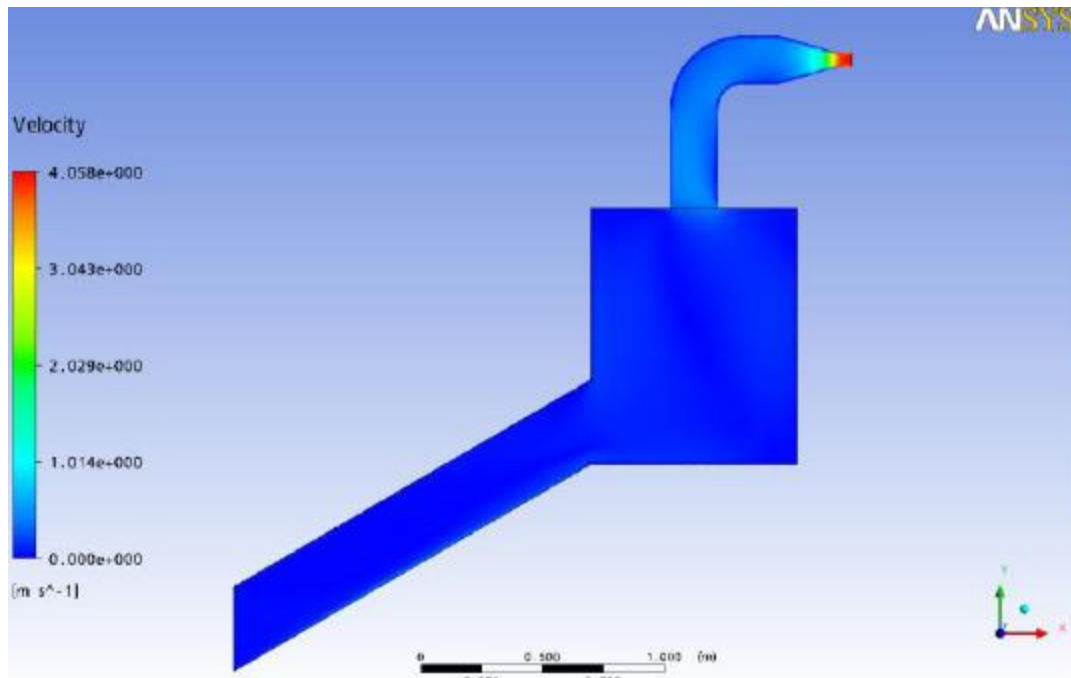


Figura C-2 Distribución de velocidad dentro del secador solar. Tomado de (Brasil et al., 2012).

Según los autores del trabajo de investigación (Brasil et al., 2012) en la figura C-1 y C-2 se observa una buena distribución tanto en la temperatura como en la velocidad del modelo de simulación (sin la inclusión de bandejas), por lo cual el prototipo puede presentar un buen proceso de secado homogéneo y de alta calidad.

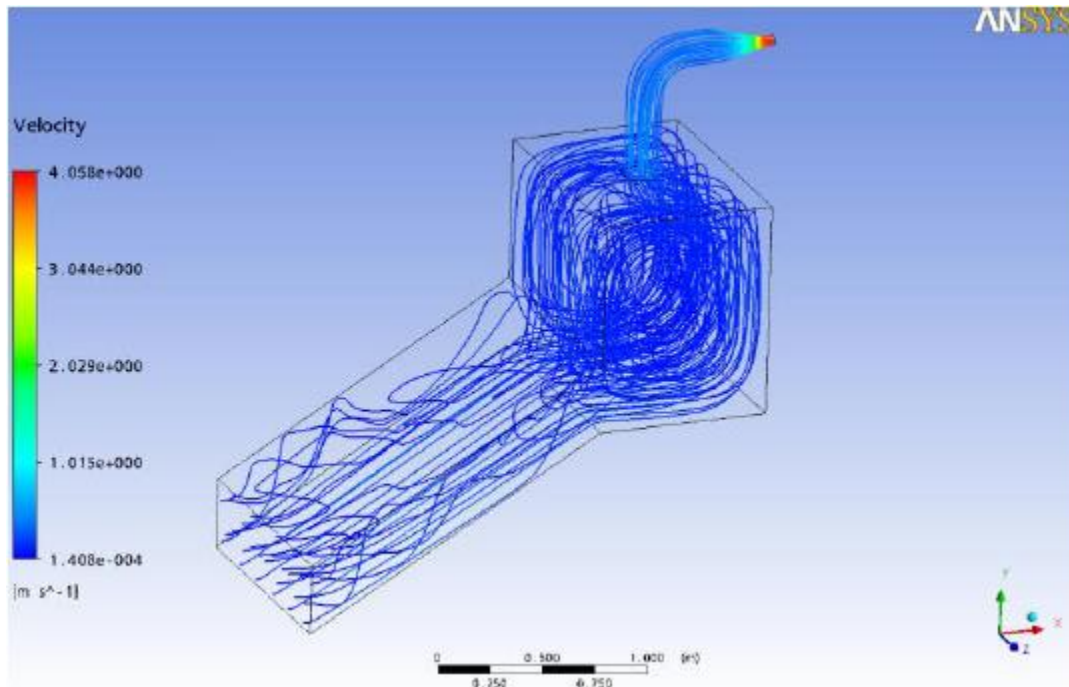
Apéndice D. Línea de flujo dentro del secador solar

Figura D-1 Línea de flujo dentro del secador solar. Tomado de (Brasil et al., 2012)

En la figura D-1, presentada por Brasil et al., se observa en las líneas de flujo que el aire dentro de la cámara de secado pasa de la parte posterior del secador hacia la parte superior para luego dirigirse hacia la zona frontal, generando así en la región central, una zona de recirculación y posteriormente el fluido sale del prototipo por la chimenea.