



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES
UNIDAD MORELIA

CONVECCIÓN NATURAL AL INTERIOR
DE UN SECADOR SOLAR PARA
MADERA EN COMUNIDADES RURALES

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A:

DULCE MARÍA RUÍZ ESPINOZA

DIRECTOR DE TESIS :

DR. ALBERTO BELTRÁN MORALES
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN
MATERIALES, UNIDAD MORELIA

Morelia, Michoacán.

Septiembre 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



ESCUELA
NACIONAL
de ESTUDIOS
SUPERIORES
ENES
UNIDAD MORELIA

10
años
(2011-2021)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

P R E S E N T E

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 04** del **Comité Académico** de la **Licenciatura en Ciencias Ambientales** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), Unidad Morelia, celebrada el día **29 de mayo de 2023**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional de la alumna **Dulce María Ruíz Espinoza** de la Licenciatura en **Ciencias Ambientales**, con número de cuenta **419124904**, con el trabajo titulado: **"Convección natural al interior de un secador solar para madera en comunidades rurales"**, bajo la dirección como tutor del **Dr. Alberto Beltrán Morales**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente:	Dr. José Núñez González
Vocal:	Dr. Luis Bernardo López Sosa
Secretario:	Dr. Alberto Beltrán Morales
Suplente:	Mtra. Rosa María Gallardo Álvarez
Suplente:	Mtro. Delmer Gómez Heleria

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Morelia, Michoacán a 25 de agosto de 2023.

DRA. YUNUEN TAPIA TORRES
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)5623.7300, Extensión Red UNAM: 80614
www.enesmorelia.unam.mx

Dedicatoria

*A mis padres por su amor incondicional.
Agradezco de todo corazón por siempre apoyarme, por su
cariño, consejos, sus grandes sacrificios y preocupaciones.
Jamás podre pagarles todo lo que han hecho por mi.
Los quiero con mi vida.
Los amo con mi alma.*

Agradecimientos institucionales

- Se agradece la beca recibida del proyecto UNAM-DGAPA-PAPIME PE104622. Manual de prácticas de herramientas de modelado y simulación para la asignatura de mecánica de medios continuos. También el financiamiento de actividades a través del proyecto UNAM-DGAPA-PAPIIT IN107722. Convección de líquidos conductores en presencia de campos electromagnéticos con aplicaciones a las baterías de metal líquido.
- Agradezco al Laboratorio de Diseño, Modelado y Simulación (LDMS) de la Unidad Morelia del IIM-UNAM y al IIES-UNAM por permitirme trabajar en sus instalaciones y haberme permitido realizar esta investigación.
- Se agradece a CONACyT PRONACES 319333. Desarrollo e implementación de alternativas energéticas sustentables en comunidades rurales de la Meseta Purépecha, Michoacán.
- Al Dr. Alberto Beltrán Morales por darme la oportunidad de integrarme a su equipo de trabajo y creer en mí desde el servicio social.
- Agradezco también al M.I. Delmer Gómez Heleria por sus enseñanzas y paciencia para mi formación.
- Agradezco a mi jurado revisor: Dr. José Núñez González, Dr. Luis Bernardo López Sosa, Dr. Alberto Beltrán Morales, Mtra. Rosa María Gallardo Álvarez y M. I. Delmer Gómez Heleria por sus valiosos comentarios para el presente trabajo.

- Agradezco a la Licenciatura en Ciencias Ambientales de la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia. A mis profesores de la licenciatura por ayudarme a culminar la misma.

Agradecimientos personales

Agradezco a mi hermano, que fue mi ejemplo a seguir. A mi familia y a todas las personas que me enseñaron algo.

A Jessica, Vanessa y Olivia que fueron mi hogar y lugar seguro durante toda la licenciatura; gracias por todas esas aventuras juntas. A Rosaura por estar conmigo desde 1er semestre y colapsar juntas en Ecotec. A Ambar por siempre estar cuando más lo necesitaba y darme una visión de las cosas que yo no veía. A Bere Huerta por aparecer cuando más necesitaba a alguien con los mismos ideales que yo. A Bere Martínez por traer a una Dulce que ni yo conocía y hacerme mejor persona. A Melina y Bere M. por siempre abrirme sus puertas y renacer una parte de mi espiritualidad que había olvidado. A Yenni y Kathia por sus sabios consejos y compañía. A Elizabeth, Romina y Paola porque a pesar de la distancia siempre que iba a Oaxaca parecía que los años no pasaban y me sentía siempre bienvenida.

Agradezco a la música que ha sido mi consuelo por tanto tiempo.

Creo fielmente que hay algo más grande que nosotros, así que gracias por permitirme llegar hasta aquí; no se lo que tienes preparado para mi, pero estoy ansiosa por descubrirlo.

Y en general dedico esto a las personas que piensan que podemos poner un granito de arena y cambiar algo este mundo.

Resumen

El desarrollo de dispositivos ecotecnológicos utilizando herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD) ha cobrado relevancia en recientes estudios numéricos. En comunidades rurales de México la madera se utiliza para fabricar muebles y constituye una de las principales actividades económicas. Debido a la importancia del secado de la madera, se optó por estudiar numéricamente un secador solar de madera instalado en la comunidad indígena de San Francisco Pichátaro, Michoacán. El objetivo del estudio es comprender el comportamiento tridimensional del flujo al interior del secador con objeto de optimizar su funcionamiento en un futuro. Con un programa CAD se obtuvo el volumen interior con las características geométricas más relevantes para nuestro estudio. Para las simulaciones, el volumen interior se dividió en 288 bloques, con el Software ANSYS-Meshing 2019 R3 se construyó una malla hexaédrica con 573,804 elementos. Después se configuró un modelo CFD 3D en el software ANSYS Fluent, utilizando un modelo de turbulencia y resolviendo la ecuación de energía. Para estudiar la distribución del aire se consideraron flujos másicos de entrada y salida de aire en el rango de 0.1 - 1 kg/s, además se propusieron tres configuraciones geométricas para la salida de aire: 5 salidas de aire en la pared frontal, 5 salidas de aire en la pared posterior y la combinación de las anteriores; es decir, 5 salidas de aire frontales y 5 posteriores. Asimismo dentro del secador se consideró una condición de carga diferente de madera con un cubo. Los isocontornos de velocidad y temperatura muestran distintos patrones de flujo dependiendo de la configuración.

Abstract

The development of ecotechnological devices using computational fluid dynamics (CFD) tools has gained relevance in recent numerical studies. In rural communities in Mexico, wood is used to manufacture furniture and is one of the main economic activities. Due to the importance of wood drying, it was decided to numerically study a solar wood dryer installed in the indigenous community of San Francisco Pichátaro, Michoacán. The objective of the study is to understand the three-dimensional behavior of the flow inside the dryer in order to optimize its operation in the future. A CAD program was used to obtain the interior volume with the most relevant geometric characteristics for our study. For the simulations, the interior volume was divided into 288 blocks, with the ANSYS-Meshing 2019 R3 software a hexahedral mesh with 573,804 elements was constructed. Then a 3D CFD model was configured in ANSYS Fluent software, using a turbulence model and solving the energy equation. To study the internal flow distribution, air inlet and outlet mass flow rates in the range of 0.1 - 1 kg/s were considered. In particular, three geometrical configurations for the air outlet were proposed: 5 air outlets on the front wall, 5 air outlets on the rear wall; and the combination of the previous ones, i.e. 5 front and 5 rear air outlets. Additionally, inside the dryer a different loading condition of wood with a bucket was considered. The velocity and temperature isocontours show different flow patterns depending on the configuration.

Índice general

Agradecimientos Institucionales	V
Agradecimientos Personales	VII
Resumen	IX
Abstract	XI
Índice de figuras	xv
Índice de tablas	xix
1. Introducción	1
1.1. Importancia de la madera en México	1
1.2. Antecedentes: secadores solares para madera	6
1.3. Planteamiento del problema y justificación	9
1.4. Objetivos	10
1.4.1. Objetivo general	10
1.4.2. Objetivos particulares	10
2. Secador solar para madera en comunidades rurales	11
2.1. Zona de estudio: San Francisco Pichátaro	11
2.2. Prototipo a estudiar	13
2.2.1. Diseño asistido por computadora: CAD	15
3. Modelado y simulación	17
3.1. Fenómenos de transporte a estudiar	18
3.1.1. Convección	18
3.2. Dominio computacional	19

3.2.1. Bloques y mallado computacional	19
3.2.2. Mallado computacional	20
3.3. Algoritmos de solución y condiciones de frontera	23
3.4. Condición de temperatura del vidrio	23
3.5. Simulaciones numéricas	25
4. Resultados y discusión	27
4.1. Sensibilidad de malla	27
4.2. Convección libre al interior de la cavidad cerrada del secador	28
4.3. Efecto de las aberturas	29
4.4. Líneas de corriente	35
4.5. Cubo de madera para representar madera	36
4.5.1. Líneas de corriente	38
5. Conclusiones y trabajo a futuro	41
6. Publicaciones y congresos	43
Referencias	45

Índice de figuras

1.1.	Transporte de madera. Obtenido de (Martínez Rojas y Vignote Peña, 2006).	3
1.2.	Partes de un secador solar de madera: 1) colector, 2) ventiladores, 3) área de secado, 4) ventila para extracción de aire húmedo. Modificado de (Cueto, 1997).	5
1.3.	Secador solar de madera en Resistencia, Argentina. Obtenido de (Reuss <i>et al.</i> , 1997).	6
1.4.	Diseño de secador solar de madera en Australia. Modificado de Haque y Langrish (2003).	8
1.5.	Secador solar terminado y en funcionamiento. Obtenido de Fuentes-Salinas <i>et al.</i> (2003).	9
2.1.	Ubicación geográfica de San Francisco Pichátaro. Obtenido de (López-Sosa <i>et al.</i> , 2019).	12
2.2.	Mesa de madera rústica. Obtenido de (Miranda Esquivel, 2011).	12
2.3.	Secador solar construido en San Francisco Pichátaro. Obtenido de (López-Sosa <i>et al.</i> , 2019)	14
2.4.	Componentes del secador solar de madera: 1) piso, 2) carcasa interior, 3) placa metálica, 4) vidrio, 5) esqueleto, 6) carcasa exterior, 7) puerta, 8) madera y 9) montacargas.	14
2.5.	Secador solar diseñado en el software Autodesk Inventor.	15
2.6.	Secador: (a) sin madera, (b) con un cubo simulando madera y (c) con columnas simulando madera.	16

3.1.	Enfriamiento de un huevo cocido por convección forzada y convección natural. Obtenido de (Cengel y Ghajar, 2013).	19
3.2.	Vista isométrica y zonas relevantes para el volumen interior del secador.	20
3.3.	a) Descomposición por bloques para el volumen interior. Mallas hexaédricas para dominios de : b) fluido y c) sólido.	21
3.4.	Mallas hexaédricas para a) M_{gruesa} , b) M_{media} y c) M_{fina}	22
3.5.	Vista isométrica de los dominios en el secador con salidas de aire: a) 5 aberturas en el muro frontal, b) 5 aberturas en el muro posterior y c) 5 aberturas frontales y 5 posteriores.	26
3.6.	Secador con un cubo simulando la madera.	26
4.1.	Distribución de la magnitud velocidad a lo largo de la dirección x ($z = 0$) y z ($x = 0.9$) para convección natural.	28
4.2.	Distribución de la temperatura a lo largo de la dirección x ($z = 0$) y z ($x = 0.9$) para convección natural.	29
4.3.	Distribución de la velocidad plano medio a lo largo de la dirección x ($z = 0$), para $\dot{m} = 0.1$ kg/s. Configuraciones: a) C1, b) C2 y c) C3.	30
4.4.	Distribución de la velocidad plano medio a lo largo de la dirección z ($x = 0.9$), para $\dot{m} = 0.1$ kg/s. Configuraciones: a) C1, b) C2 y c) C3.	30
4.5.	Distribución de la velocidad plano medio a lo largo de la dirección x ($z = 0$), para $\dot{m} = 1$ kg/s. Configuraciones: a) C1, b) C2 y c) C3.	31
4.6.	Distribución de la velocidad plano medio a lo largo de la dirección z ($x = 0.9$), para $\dot{m} = 1$ kg/s. Configuraciones: a) C1, b) C2 y c) C3.	31
4.7.	Distribución de la temperatura plano medio a lo largo de la dirección x ($z = 0$), para $\dot{m} = 0.1$ kg/s. Configuraciones: a) C1, b) C2 y c) C3.	32
4.8.	Distribución de la temperatura plano medio a lo largo de la dirección z ($x = 0.9$), para $\dot{m} = 0.1$ kg/s. Configuraciones: a) C1, b) C2 y c) C3.	32
4.9.	Distribución de la temperatura plano medio a lo largo de la dirección x ($z = 0$), para $\dot{m} = 1$ kg/s.	33
4.10.	Distribución de la temperatura plano medio a lo largo de la dirección z ($x = 0.9$), para $\dot{m} = 1$ kg/s. Configuraciones: a) C1, b) C2 y c) C3.	33
4.11.	Temperaturas promedio en volumen de aire y placa para para flujos masicos de 0.1 a 1 kg/s.	35
4.12.	Líneas de corriente para la velocidad al interior del secador para $\dot{m} = 0.1$ kg/s, Configuraciones: a) C1, b) C2 y c) C3.	36
4.13.	Distribución de la temperatura y velocidad a lo largo de la dirección x ($z = 0$) y z ($x = 0.9$), para $\dot{m} = 0.1$ kg/s con un cubo simulando la madera.	37

4.14. Distribución de los vectores de velocidad a lo largo de la dirección x ($z = 0$) para $\dot{m} = 0.1$ kg/s.	38
4.15. Líneas de corriente para la velocidad al interior del secador para $\dot{m} = 0.1$ kg/s en la configuración C2.	39
4.16. Distribución de los vectores de velocidad para $\dot{m} = 0.1$ kg/s en la configuración C2.	40

Índice de tablas

3.1. Principales características de la malla gruesa	21
3.2. Principales características de las mallas hexaédricas utilizadas para el estudio de sensibilidad de CFD.	22
4.1. Estudio de sensibilidad de malla.	27
4.2. Temperaturas promedio en el volumen de aire para flujos másicos de 0.1 a 1 kg/s en las tres diferentes configuraciones geométricas.	34
4.3. Temperaturas promedio en volumen de la placa para flujos másicos de 0.1 a 1 kg/s en las tres diferentes configuraciones geométricas.	34

Introducción

A lo largo de la historia de la humanidad, la madera debido a sus particulares características y su abundancia, se ha convertido en un material natural disponible para casas y diferentes estructuras, como muebles, herramientas, objetos decorativos e incluso combustible. Hoy en día, la madera es apreciada por sus diferentes usos, mientras seguimos descubriendo nuevas aplicaciones y diseños (Vaca de Fuentes, 1998). Toda la madera está compuesta por celulosa, lignina, hemicelulosas y pequeñas cantidades (normalmente menos del 10%) de materiales extraños contenidos en una estructura celular (Hoadley, 2000). Las variaciones en las características y proporciones de estos componentes y las diferencias en la estructura celular son las que dan a la madera sus propiedades físicas únicas, como ser pesada o ligera, rígida o flexible, dura o blanda (Forest Products Laboratory, 2021).

1.1. Importancia de la madera en México

México, gracias a su ubicación geográfica, su orografía y geología, así como su diversidad de climas permite que el 70.2% de la extensión total del territorio presente casi todos los tipos de vegetación natural terrestre (CONAFOR, 2011). De esa superficie con vegetación natural terrestre, 33% lo conforman ecosistemas forestales arbolados (bosques y selvas), 29% son matorrales xerófilos y un 8.2% de otras áreas forestales (pastizales naturales, pastizales halófilos, pastizales gipsófilos, popales y tulares, principalmente). En contraparte, el 29.74% de la superficie en México corresponde a usos de suelo distintos al forestal, como son: agrícola, pecuario, acuícola, zonas urbanas, entre otros (CONAFOR, 2012).

En promedio, durante el periodo 2012 - 2021, la participación del sector forestal en la economía nacional fue constante y significó, en promedio, un 0.2 % del valor del PIB nacional. En términos absolutos, el valor promedio del PIB Forestal fue de \$40,998 millones de pesos (a precios de 2013). La industria de la madera representa alrededor del 60 % del PIB forestal y la fabricación de pulpa, papel y cartón el 40 % restante. El número de empleos en el sector forestal representó un comportamiento variable durante el periodo 2016-2021.

De acuerdo con datos del Inventario Estatal Forestal y de Suelos (2014), Michoacán posee una superficie total de 5,829,628.9 hectáreas, de la cual 58.6 % corresponde a superficie forestal. La mayor parte de su territorio se localiza en dos provincias fisiográficas: la Sierra Madre del Sur y el Sistema Volcánico Transversal. La superficie forestal ocupa 3,414,288.6 hectáreas, de las cuales 26.9 % corresponde a bosques, 31.4 % a selvas y el resto pertenece a otras asociaciones, manglar, matorral xerófilo y otras áreas forestales.

Cabe destacar que Michoacán es el primer productor del país de resina de pino de manera histórica con números que fluctúan entre las 20 y 30 mil toneladas anuales, lo que representa entre 70 y 90 % de la producción nacional (SEMARNAT, 2013).

Por otro lado, conforme al Periodico Oficial Del Gobierno Constitucional Del Estado De Michoacán De Ocampo (2019) a nivel nacional, Michoacán se ha mantenido como uno de los pilares más importantes para la producción forestal maderable, alcanzando en los últimos años el tercer lugar a nivel nacional con un volumen promedio de 460 mil m^3 con un valor aproximado de 560 millones de pesos. Generando en la industria de la madera en 2019 el mayor número de empleos con 219,913 (SEMARNAT, 2022).

Resulta muy conveniente para la industria aumentar el valor de la madera, especialmente mediante la elaboración de productos terminados como lo son muebles, juguetes, instrumentos musicales, entre otros (Salas-Garita *et al.*, 2008). Es aquí donde el secado cobra relevancia ya que es necesario un contenido de humedad mínimo para que la madera se utilice en la mayoría de los productos y sea posible fabricar productos de calidad. Adicionalmente, la eliminación del exceso de agua reduce el peso y, por tanto, los costos de transporte y manejo, ver Figura 1.1.



Figura 1.1. Transporte de madera. Obtenido de (Martínez Rojas y Vignote Peña, 2006).

La madera, al igual que muchos materiales naturales, es higroscópica; es decir, absorbe la humedad del entorno. (Hoadley, 2000). El intercambio de humedad entre la madera y el aire depende de la humedad relativa y de la temperatura del aire, así como de la cantidad de agua en la madera. Esta relación de humedad tiene una importante influencia en las propiedades y el rendimiento de la madera, muchos de los retos que plantea el uso de la madera como material surgen de los cambios en el contenido de humedad o de la abundancia de humedad en la madera (Forest Products Laboratory, 2021).

Por otro lado, el secado adecuado limita la contracción y el hinchamiento de la madera. Además a medida que la madera se seca, la mayoría de sus propiedades de resistencia aumentan, así como sus propiedades de aislamiento eléctrico y térmico (Simpson, 1999). La madera seca puede cortarse a dimensiones precisas y mecanizarse con mayor facilidad y eficacia; las piezas de madera pueden ajustarse y fijarse con mayor seguridad mediante clavos, tornillos y adhesivos; se eliminan en gran medida las deformaciones, las grietas; la pintura, el barniz y otros acabados se aplican y mantienen con mayor eficacia (Vaca de Fuentes, 1998).

La clave para un secado exitoso y eficiente es el control del proceso; la aplicación de condiciones óptimas, o al menos adecuadas, de temperatura, humedad relativa y circulación de aire es fundamental. Un secado incontrolado provoca defectos que

pueden afectar negativamente a la calidad de la madera (Simpson, 1999).

El método más simple y más utilizado desde la antigüedad es el secado al aire libre, este consiste en la exposición del producto al sol, sin embargo, la exposición directa al ambiente puede contaminar el producto (Vásquez Tantas, 2018). Las limitaciones del secado al aire están generalmente asociadas al secado no controlado, por ejemplo la velocidad de secado es muy lenta durante los fríos meses de invierno. En otras épocas, los vientos cálidos y secos pueden aumentar la degradación y las pérdidas de volumen. Los periodos cálidos y húmedos con poco movimiento de aire pueden favorecer el crecimiento de hongos, así como agravar las manchas químicas. Para la producción a gran escala, los altos costos de mano de obra y el requisito de un área grande son limitaciones a tomar en consideración (Mujumdar, 2006).

La otra opción que existe es utilizar secadores industriales, pero este sistema sólo está disponible en muy pocas industrias debido a su alto costo de inversión y de operación, poca disponibilidad de mano de obra calificada y complejos sistemas de control de humedad, de temperatura y humedad relativa de la cámara de secado (Prakash y Kumar, 2017).

La tecnología intermedia entre el secado al aire libre y el secado en horno convencional, es el uso de secadores solares (César-Munguía, 2022). El secado solar se refiere al uso de la irradiancia solar como fuente de energía térmica primaria o suplementaria para disminuir el contenido de agua en un material (Peña Gallardo, 2017). Estos dispositivos térmicos son conocidos como secadores solares, cuales no son complejos de construir ni de operar; permitiendo obtener material seco más rápidamente y con contenidos de humedad óptimos para la fabricación de muebles.

Las secadoras solares son cámaras que tienen la capacidad de almacenar el calor que es generado por la incidencia de los rayos solares sobre un colector de temperatura. La idea es que el calor que se genera sea útil en el proceso de secado de la madera (Cueto, 1997). Las cámaras de secado tienen dos partes fundamentales: la primera se ubica en la parte superior de la cámara (colector) y es la responsable de que el aire se caliente; la segunda es el área de apilado de la madera o área de secado, ver Figura 1.2.

Los secadores solares se clasifican de acuerdo al principio físico bajo el cual se hace circular el aire, en secadores activos y pasivos. En los activos el aire es obligado a circular con ayuda de ventiladores generando una convección forzada,

mientras que en los pasivos, el aire circula por efecto de la convección natural. Se subdividen, en secadores solares directos o indirectos, de acuerdo a si se permite incidir la radiación sobre la biomasa o no (Peña Gallardo, 2017).

El principio de funcionamiento de un secador solar es simple. Una vez que el aire se calienta al interior, ese aire se pone a circular entre la madera gracias a un sistema de ventiladores. Al elevar la temperatura el material empieza a evaporar el agua que contiene y por lo tanto se seca. Esto permite que la madera descienda sus contenidos de humedad a los niveles deseados, según sean las necesidades de la industria (Salas-Garita *et al.*, 2008).

Los secadores solares a pesar de que son simples en cuanto a diseño y funcionamiento, permiten y a la vez requieren de algún grado de control de las condiciones internas de temperatura y humedad relativa. Esto es posible gracias a la instalación de ventanas o ventilas que permitan intercambiar el aire húmedo de la cámara por aire más seco del exterior (Fuentes-Salinas *et al.*, 2003).

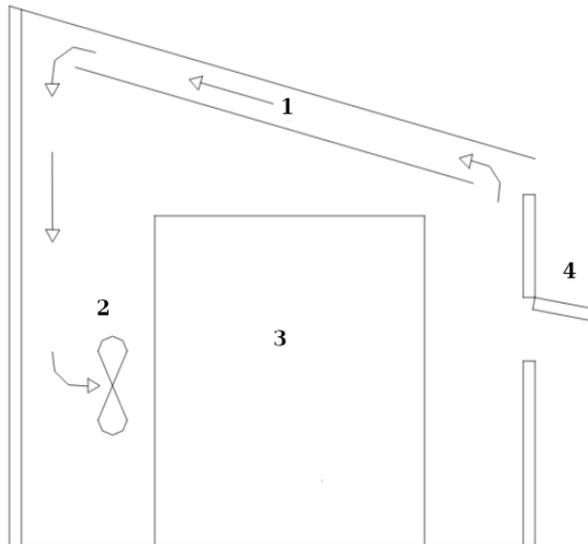


Figura 1.2. Partes de un secador solar de madera: 1) colector, 2) ventiladores, 3) área de secado, 4) ventila para extracción de aire húmedo. Modificado de (Cueto, 1997).

1.2. Antecedentes: secadores solares para madera

En los últimos años se han ido desarrollando diferentes diseños de secadores solares alrededor del mundo. Partamos del diseño de Reuss *et al.* (1997) en el cual un proyecto de investigación en conjunto de la Universidad Nacional del Nordeste, en Resistencia, Argentina, y la Universidad Técnica de Munich, investigó teórica y experimentalmente el secado solar de la madera. En Resistencia, Argentina se construyó y se puso a prueba el secador solar de madera, ver Figura 1.3.

La modelación del secado de la madera se integró en el programa de simulación TRNSYS. El módulo de TRNSYS “Secado de la madera” describe en general el secado de la madera en el aire circulante. El procedimiento para el cálculo del proceso de secado está basado en el método de elementos finitos.

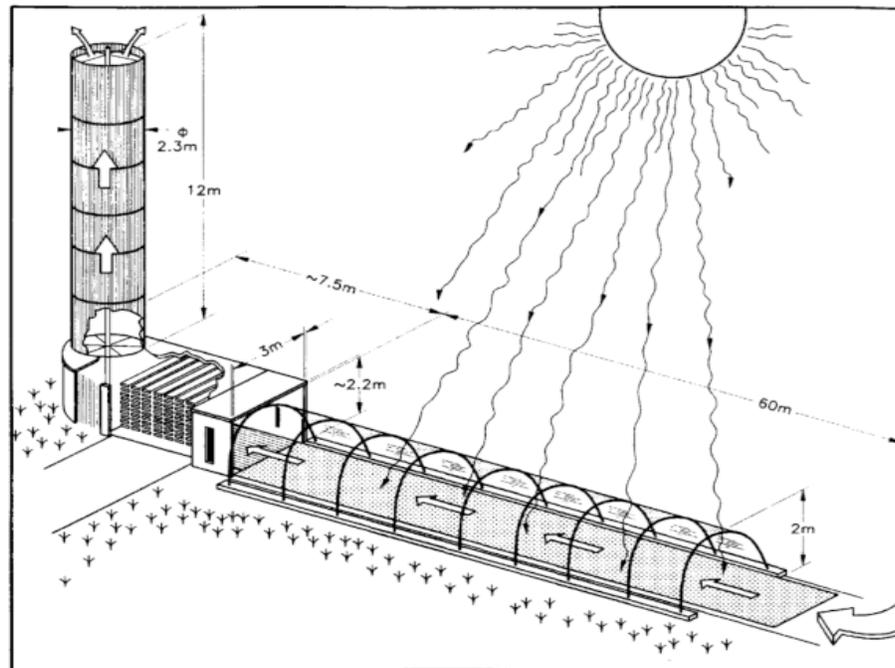


Figura 1.3. Secador solar de madera en Resistencia, Argentina. Obtenido de (Reuss *et al.*, 1997).

De julio a noviembre de 1994, para estudiar el proceso de secado, se eligió una muestra de madera aserrada de algarrobo de diferentes anchos en diferentes puntos de la grapa de madera. El pesaje regular (dos veces al día) de las muestras permitió

determinar la distribución de la humedad en la grapa después de haber medido el peso al final de cada ciclo de secado. Las muestras se numeraron para garantizar su correcta colocación en la grapa tras el pesaje. Para acompañar los experimentos, se tomaron medidas de la radiación solar horizontal, la temperatura ambiente, la humedad relativa del aire en el ambiente, la velocidad del viento, las temperaturas en el secador (colector, cámara y chimenea), la humedad relativa del aire y las velocidades del aire en la cámara de secado cada 10 minutos. La temperatura de operación fue de 40°C, y tuvo una eficiencia de 40 a 60 %, dependiendo de la radiación, la cual estuvo entre 150 y 750 W/m². El tiempo de secado promedio varió de 30 a 51 días.

Ese mismo año Cueto (1997) presentó el diseño de un secador solar madera, de 1200 pies/tabla de capacidad, las partes que forman el secador son: colector solar para el calentamiento de aire el cual tiene una inclinación de 20°, área para colocar la madera durante el proceso, ventilas para salida de aire y puerta de acceso para la madera.

Para validar el diseño se hicieron 4 cargas de diferentes tipos de madera (3 de pino y 1 de hule) en distintas épocas del año y bajo diferentes condiciones climáticas. Para llevar el manejo y control de la cámara de secado, se contó con medidores de temperatura y de humedad relativa; así como la temperatura ambiente. En las diferentes corridas de la madera secada se observa en términos generales como tiempo de promedio de secado, 15 días con contenidos de humedad iniciales de 80 % y finalizando con valores que pueden encontrarse cercanos al 10 %. En general, el diseño y uso del secador solar para madera propuesto se consideró adecuado, ya que se observa que el tiempo que emplea para secar madera es razonable.

Por su parte, (Haque y Langrish, 2003) en Australia diseñaron un secador solar que es esencialmente una cámara rectangular de láminas de hierro corrugado pintadas en negro mate dentro de una estructura de invernadero en forma de túnel con una cubierta de plástico. Esta cubierta de plástico de doble piel que descansa sobre una gran estructura de aluminio curvada y se mantiene siempre inflada por un pequeño ventilador.

El rendimiento real de un secador solar industrial mostró que los aumentos de las temperaturas del aire en el horno (en comparación con las condiciones ambientales) fueron de 17.3 °C (mayo-junio), 13.8 °C (julio-agosto), 10 °C (septiembre-octubre), 8.2 °C (noviembre-marzo) y 7.5 °C (marzo-mayo) para cinco

recorridos supervisados, respectivamente. Los tiempos de secado fueron de 2 a 3 meses desde un contenido inicial (el rango fue de 43 a 62 % de base seca) hasta un contenido final de humedad (el rango fue de 12 a 22 % de base seca), ver Figura 1.4.

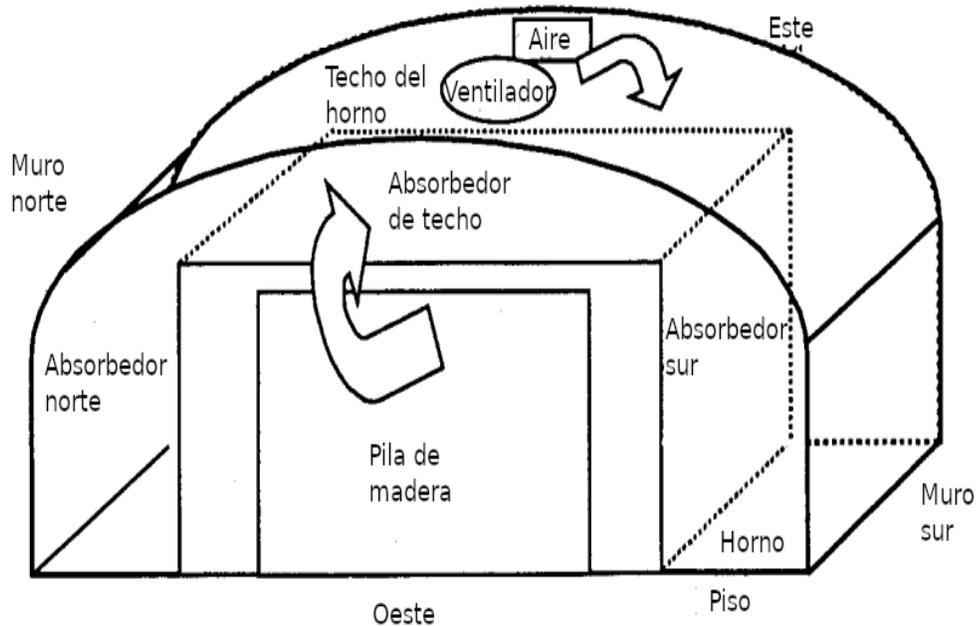


Figura 1.4. Diseño de secador solar de madera en Australia. Modificado de Haque y Langrish (2003).

En México, Fuentes-Salinas *et al.* (2003) diseñó y construyó un secador en la Universidad Autónoma de Chapingo para 7.075m^3 de madera aserrada, en su diseño se evaluaron diferentes variables básicas como: número y tamaño de ventiladores; distancia entre colector solar y transmisor selectivo, relación entre metros cuadrados de colector por metro cúbico de madera, entre otras variables, ver Figura 1.5.

Para evaluar su funcionamiento se usó madera de *Pinus Hartwegii* de 2.54 cm de espesor, 2.50 m de largo y anchos variables. Para la validación se hicieron dos ensayos de secado, uno en el secador solar y otro secado al aire libre, teniendo como resultado que la madera en el secador solar se secó en 8 días, 50 % del tiempo requerido para el secado al aire libre, a un contenido de humedad final del 10 y 12 % respectivamente. Se lograron en el secador solar temperaturas de hasta $49\text{ }^\circ\text{C}$

que fue el doble de la máxima registrada al aire libre.



Figura 1.5. Secador solar terminado y en funcionamiento. Obtenido de Fuentes-Salinas *et al.* (2003).

1.3. Planteamiento del problema y justificación

En México el 70 % de los bosques y selvas son propiedad de comunidades y ejidos, y alrededor de 3 mil comunidades realizan alguna actividad de aprovechamiento forestal, de las cuales 600 de ellas han constituido empresas forestales comunitarias de zonas rurales (CONAFOR, 2011). Particularmente en zonas rurales de Michoacán se ha identificado que la madera es la principal fuente de ingreso de las familias. Para cubrir esta necesidad energética y aprovechar el recurso de la región, tomando en cuenta las tecnologías solares previamente descritas, y conociendo que no se ha estudiado el efecto de aberturas en secadores solares. Debido a lo anterior, este trabajo de tesis se abordara a través de simulaciones numéricas el impacto de diferentes configuraciones aberturas en un secador solar de madera para evaluar la distribución del aire en su interior y asegurar un mezclado adecuado del aire,

que permitan el secado de la madera. La siguiente sección muestra los objetivos establecidos en este trabajo.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Realizar un estudio tridimensional de la convección natural al interior de un secador solar para madera en comunidades rurales para optimizar su funcionamiento en un futuro.

1.4.2. Objetivos particulares

- Diseño CAD de dos diferentes condiciones de carga de madera para el secador.
- Realizar simulaciones numéricas para la dinámica de fluidos y transferencia de calor.
- Estudiar el efecto de las aberturas en la distribución del aire al interior de un secador solar de madera para determinar el mejor diseño que promueva el secado de madera a escala real.

Secador solar para madera en comunidades rurales

2.1. Zona de estudio: San Francisco Pichátaro

La comunidad de San Francisco Pichátaro (Latitud 19.55, Longitud -101.8) perteneciente al municipio de Tingambato es una comunidad indígena enclavada en la sierra purépecha del estado de Michoacán, ver Figura 2.1. Esta es una comunidad indígena cuya principal autoridad social es una asamblea, de la que derivan la representación de los bienes comunales y la autoridad del gobierno comunal, seguido de los comités y representantes de sus siete barrios. (López-Sosa *et al.*, 2019). Sus habitantes se dedican principalmente a la elaboración de muebles rústicos, sus mujeres al área textil artesanal destacando la confección de prendas en punto de cruz principalmente el “huanengo”, así también se encargan del decorado de los muebles y la gastronomía tradicional purépecha. Las artesanías son muy importantes para Pichátaro, así como la gastronomía y las Pirekuas las cuales han sido declaradas patrimonio cultural de la humanidad por la UNESCO. (Miranda Esquivel, 2011).



Figura 2.1. Ubicación geográfica de San Francisco Pichátaro. Obtenido de (López-Sosa *et al.*, 2019).

La principal actividad económica es la elaboración de muebles de madera rústicos, aunque llegan a combinar hasta cinco actividades, siendo las más frecuentes la agricultura de temporal de autoconsumo, la ganadería, albañilería, comercio y como jornaleros. El ingreso promedio anual por hogar en 2009, que se obtiene principalmente de la elaboración de muebles rústicos de madera de pino fue de 42 624 pesos MXN (Francisco-Arriaga *et al.*, 2011).



Figura 2.2. Mesa de madera rústica. Obtenido de (Miranda Esquivel, 2011).

La actividad del mueble rústico cuenta con antecedentes que se remontan a la época de la evangelización cuando la pintoresca comunidad de Pichátaro recibió las enseñanzas de Don Vasco de Quiroga y Fray Jacobo Daciano, de quienes heredaron diversas técnicas para la talla en madera de pino. La elaboración del mueble es la principal actividad económica que representa ingresos estables todo el año y es principalmente de talla estilo español, lo que se destaca es la calidad de las tallas las cuales no tienen competencia en el estado (Miranda Esquivel, 2011).

Los artesanos trabajan en sus hogares, en espacios que son acondicionados para esta función, y al concluir los trabajos los venden fuera de sus casas. Motivo por el cual las pequeñas tiendas están dispersas a lo largo de toda la comunidad. Para la fabricación de los muebles la principal materia prima utilizada es la madera de pino (López-Sosa *et al.*, 2019).

2.2. Prototipo a estudiar

El trabajo aquí propuesto tiene como motivación el secador solar de madera construido en la comunidad rural de San Francisco Pichátaro. El secador se muestra en la Figura 2.3, es de tipo caja, el cual comprende: una primera base de cemento sobre la cual esta sustentado una carcasa interior; un colector solar de doble inclinación, el cual tiene una cubierta metálica y un revestimiento absorbente de bajo impacto ambiental, este se encuentra localizado hacia la parte superior del secador solar para recibir y absorber toda la energía radiante proveniente del sol (López-Sosa *et al.*, 2018); la carcasa interior además de soportar el colector, soporta la carcasa exterior; una cubierta de vidrio se localiza en la parte superior y por encima del colector solar. Cabe destacar que la estructura y los revestimientos se decidieron construir de madera porque la comunidad tiene disponibilidad de este recurso, ver Figura 2.4.



Figura 2.3. Secador solar construido en San Francisco Pichátaro. Obtenido de (López-Sosa *et al.*, 2019)

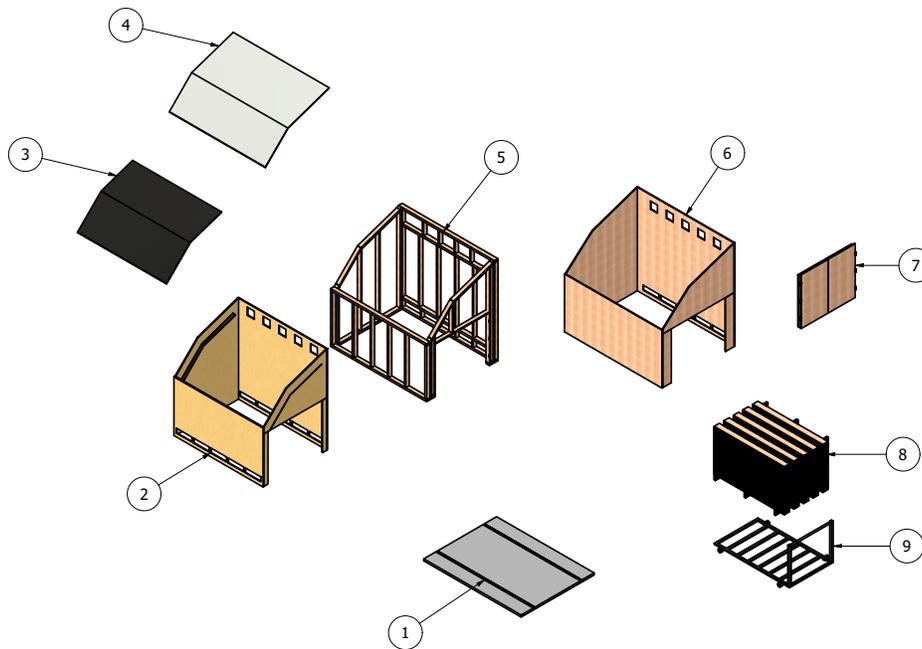


Figura 2.4. Componentes del secador solar de madera: 1) piso, 2) carcasa interior, 3) placa metálica, 4) vidrio, 5) esqueleto, 6) carcasa exterior, 7) puerta, 8) madera y 9) montacargas.

2.2.1. Diseño asistido por computadora: CAD

El proceso de ingeniería inversa implica la medición de un objeto físico para describir su geometría con una precisión requerida y así lograr una reproducción del objeto que mantenga en todo momento sus características funcionales. El proceso de la ingeniería inversa se compone de la digitalización 3D del objeto físico, y la reconstrucción de superficies mediante la aplicación diseño asistido por computadora (CAD). El diseño CAD obtenido puede ser manipulado de acuerdo a las necesidades del usuario (Betancur Rodríguez, 2011). En consecuencia, el secador previamente estudiado por López-Sosa *et al.* (2019) fue dibujado aplicando estas herramientas. Relacionado a esto, el volumen de aire ocupado al interior del secador y el volumen de la placa inmerso en el volumen de aire fueron obtenidas siguiendo metodologías reportadas en la literatura (Núñez *et al.*, 2020; Gómez Heleria, 2023). El volumen del secador solar es de 9.508 m^3 . Con ello, se calculó el volumen del cubo de madera con dimensiones de 1.25 m de ancho, 1.20 m de largo, 2 m de profundidad dando un resultado de 3 m^3 , ver Figura 2.5.

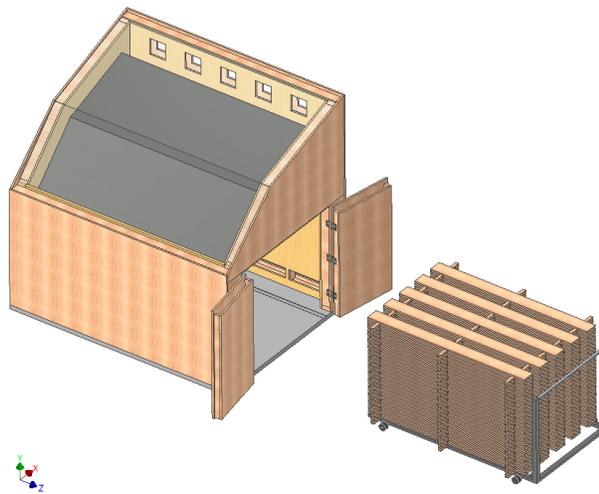


Figura 2.5. Secador solar diseñado en el software Autodesk Inventor.

De igual manera el volumen de 200 maderas con dimensiones de 1.5 cm de ancho, 15 cm de largo, 2 m de profundidad dando un total de 0.9 m^3 . El volumen de los taquetes de madera con dimensiones de 1.5 cm de ancho, 3.5 cm de largo, 1.25 m de profundidad con un total de 0.07875 m^3 .

El volumen del sólido (volumen de madera + volumen de taquetes) es de 0.97875 m^3 .

Con el programa Autodesk Inventor (2021) se diseñaron los tres configuraciones CAD del secador para diferentes condiciones de carga de madera. Dichas configuraciones se muestran en la Figura 2.6.

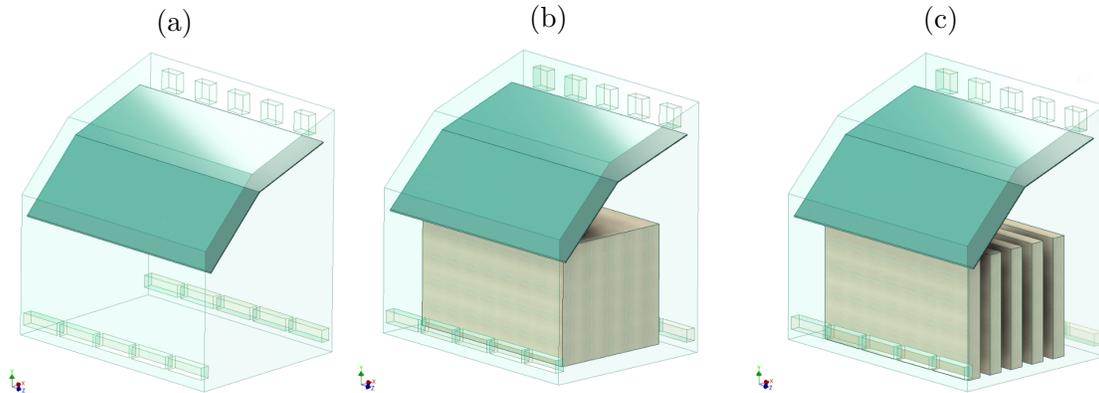


Figura 2.6. Secador: (a) sin madera, (b) con un cubo simulando madera y (c) con columnas simulando madera.

Modelado y simulación

El acrónimo CFD por sus siglas en inglés hace referencia a la rama de la Mecánica de Fluidos nombrada Dinámica de Fluidos Computacional, que consiste en el empleo de computadoras y de técnicas numéricas para resolver problemas físicos que están relacionados con el movimiento de los fluidos y de otros fenómenos asociados como la transferencia de calor, las reacciones químicas y el arrastre de sólidos (Fernández Oro, 2012). En la actualidad el CFD es una poderosa herramienta numérica que se está utilizando ampliamente para simular muchos procesos para proporcionar soluciones de diseño efectivas y eficientes (Mirade, 2003). Cabe destacar que los códigos CFD contienen técnicas de discretización adecuadas para el tratamiento de los fenómenos de transporte como la convección (Versteeg y Malalasekera, 2007).

Considerando que el contenido de humedad de la madera es uno de los parámetros más importantes para los distintos propósitos en que será utilizada, el proceso de secado cobra relevancia y motiva el desarrollo de dispositivos para dicho propósito. Una distribución uniforme del flujo de aire y temperatura al interior de los secadores es un importante parámetro porque determina la eficiencia del secador y la homogeneidad de los productos a ser secados (Amanlou y Zomorodian, 2010). Controlar o medir estos parámetros puede resultar complicado en arreglos experimentales. Es por esto que el uso de herramientas computacionales como CFD pueden ayudar a reducir el tiempo requerido en el trabajo experimental y estudiar o predecir el patrón de movimiento del flujo de aire en un intervalo de tiempo relativamente corto con el fin de examinar y mejorar el desempeño del mismo (Yunus y Al-Kayiem, 2013).

Algunas de las ventajas de utilizar estas herramientas para diseñar o validar sistemas de secado es que proporcionan una comprensión detallada de la distribución del flujo, las pérdidas de peso, la transferencia de masa y calor, entre otras (César-Munguía, 2022). También hace posible evaluar cambios en la geometría o de materiales con menos tiempo y costo de lo que implicaría una prueba de laboratorio, ya que elimina la necesidad de construir y probar prototipos, además puede reducir el número de pruebas que se requieren en las investigaciones. Puesto que es una herramienta proactiva de análisis y diseño, puede resaltar los problemas relacionados con el desempeño de nuevos diseños de procesos antes de la fabricación o implementación (Xia y Sun, 2002).

3.1. Fenómenos de transporte a estudiar

3.1.1. Convección

Definimos calor como la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro, como resultado de la diferencia de temperatura. La ciencia que trata de la determinación de las razones de esas transferencias de energía es la transferencia de calor. La transferencia de energía como calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura. Existen tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación (Incropera y DeWitt, 1999).

El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. Además de la transferencia de energía debida al movimiento molecular aleatorio (difusión), la energía también se transfiere mediante el movimiento global del fluido. El movimiento del fluido se asocia con el hecho de que, en cualquier instante, grandes números de moléculas se mueven de forma colectiva o como agregados. Tal movimiento, en presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor. Como las moléculas en el agregado mantienen su movimiento aleatorio, la transferencia total de calor se debe entonces a una superposición de transporte de energía por el movimiento aleatorio de las moléculas y por el movimiento global del fluido (Cengel y Ghajar, 2013).

La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento. Como contraste, se dice que es convección natural (o libre) si el movimiento

del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido, ver Figura 3.1 (Peña Gallardo, 2017).

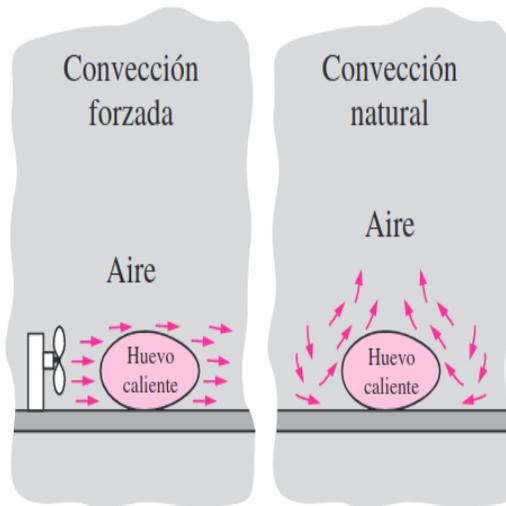


Figura 3.1. Enfriamiento de un huevo cocido por convección forzada y convección natural. Obtenido de (Cengel y Ghajar, 2013).

3.2. Dominio computacional

3.2.1. Bloques y mallado computacional

El volumen interior se muestra en la Figura 3.2. Se consideran dominios fluido y sólido (placa metálica al interior del secador). Las condiciones de frontera se imponen en las zonas más relevantes para nuestro estudio. Están identificadas por 7 etiquetas:

- Entrada de aire: representa la ventana del secador en la parte posterior.
- Sólido dominante: representa la placa metálica.
- Fluido dominante: representa el fluido del secador.
- Piso: representa el piso del secador.
- Salida de aire: representa la ventana del secador en la parte frontal.

- Superficie de vidrio: identifica el techo el cual está formado por dos placas de vidrio en diferentes ángulos.
- Paredes: identifica las cuatro paredes del secador.

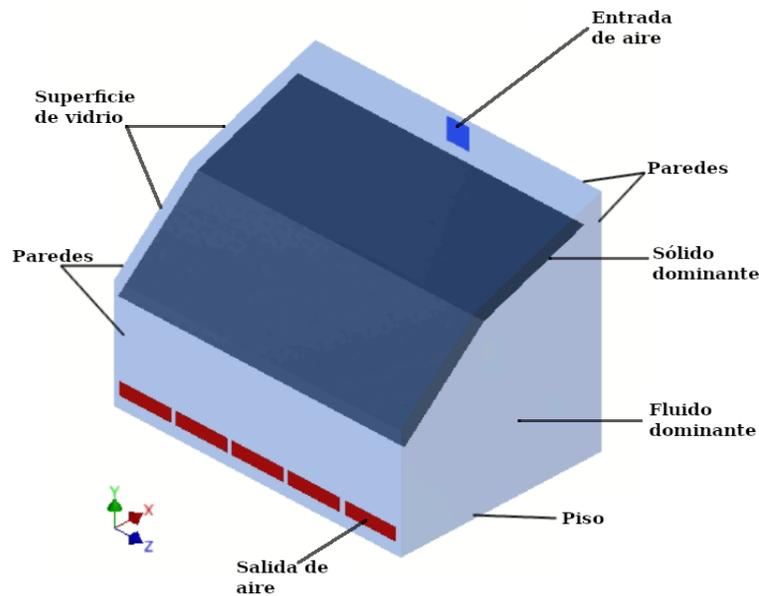


Figura 3.2. Vista isométrica y zonas relevantes para el volumen interior del secador.

3.2.2. Mallado computacional

Para las simulaciones, el volumen interior se dividió en 288 bloques, ver Figura 3.3(a); para esta configuración con el Software ANSYS-Meshing 2019 R3 se construyó una malla hexaédrica. Para capturar los efectos de la capa límite térmica y de flujo, tiene una alta resolución espacial hacia la placa metálica. La malla para los dominios fluido y sólido se muestran en las Figura 3.3(b) y (c); respectivamente. A este mallado se le denominó malla gruesa y sus principales características de calidad son mostradas en la Tabla 3.1 (Ozen y Fellow, 2014).

Tabla 3.1. Principales características de la malla gruesa

Características	Valor promedio
Ortogonalidad	0.881
Asimetría	0.210
Relación de aspecto	20.122
Elementos	508,640

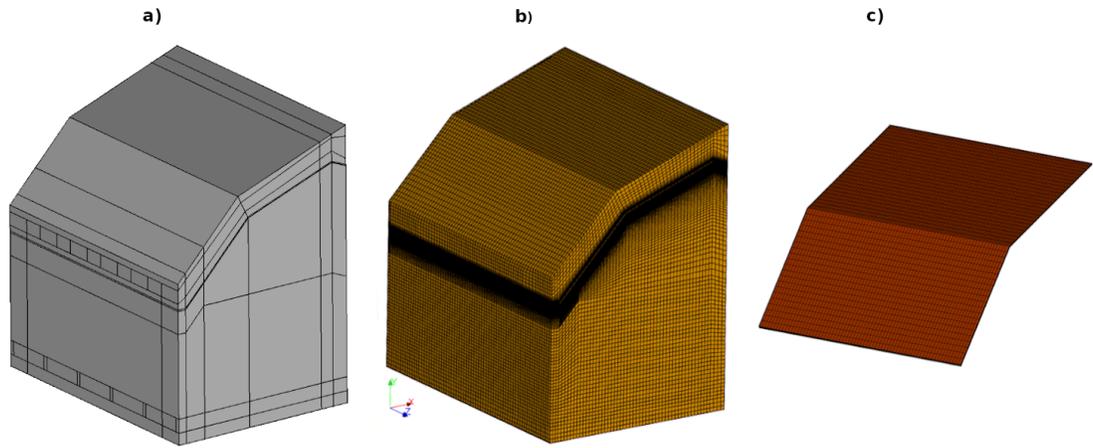


Figura 3.3. a) Descomposición por bloques para el volumen interior. Mallas hexaédricas para dominios de : b) fluido y c) sólido.

Para el estudio de sensibilidad de la malla se realizaron dos mallas a partir de la malla gruesa. Para el dominio sólido y fluido, cual representa el volumen total del secador, la razón del mallado (r_m) se consideró para el cálculo de la longitud de máxima de celda (M_{fs}), cual fue propuesta con base en trabajos relacionados del grupo de investigación (Gómez Heleria, 2023):

$$M_{fs} = \left(\frac{V_s}{r_m E_m} \right)^{1/D} = \left(\frac{V_s}{E_m} \right)^{1/D} \left(\frac{1}{r_m} \right)^{1/D}, \quad (3.1)$$

donde $V_s = 9.508 \text{ m}^3$, $E_m = 500,000$ celdas y $r_m = N_1/N_2$ (Ferziger *et al.*, 2002). Usando esta ecuación se puede controlar el número de celdas al interior de un volumen.

Mientras que, para controlar el refinamiento en segmentos de líneas de interés del dominio, se utilizó el factor de refinamiento de malla (r_f) definido como (Roache, 1994):

$$r_f = (N_1/N_2)^{1/D}, \quad (3.2)$$

donde N_1 es el número de elementos de malla más grande que la malla gruesa, N_2 es el número de elementos de la malla gruesa y $D = 3$ es la dimensión del espacio. Para este estudio $r_f = \sqrt[3]{1.7}$

La Tabla 3.2 muestra las principales características de las mallas hexaédricas utilizadas para el estudio de sensibilidad.

Tabla 3.2. Principales características de las mallas hexaédricas utilizadas para el estudio de sensibilidad de CFD.

Características	M_{fina}	M_{media}	M_{gruesa}
Elementos	1,455,300	852,930	508,640
Ortogonalidad	0.884	0.887	0.881
Asimetría	0.216	0.208	0.210
Relación de aspecto	20.252	20.208	20.122

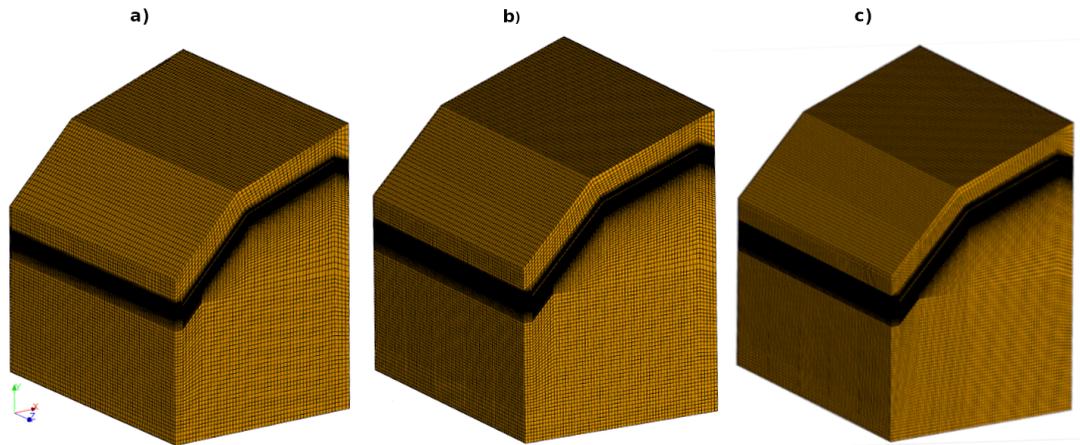


Figura 3.4. Mallas hexaédricas para a) M_{gruesa} , b) M_{media} y c) M_{fina}

3.3. Algoritmos de solución y condiciones de frontera

Las ecuaciones en estado estacionario de continuidad, momentum, turbulencia y energía fueron resueltas utilizando el software comercial de ANSYS Fluent (Fluent, 2013). Las ecuaciones de turbulencia se resolvieron con el modelo de RNG $k - \epsilon$ con mejoras en la pared (Versteeg y Malalasekera, 2007). Para el acoplamiento de la presión-velocidad se utilizó el esquema SIMPLEC (Versteeg y Malalasekera, 2007). Para la interpolación de la presión se utilizó un esquema de segundo orden. Para asegurar la estabilidad de la simulación se utilizó el esquema Upwind de segundo orden en las ecuaciones momentum, turbulencia y energía. Los centroides y la degradación de los gradientes, que se generaron por el método de mallado, se corrigieron utilizando el método de corrección de gradientes de caras deformadas.

Las ecuaciones gobernantes fueron resueltas con condiciones de frontera que emulan las condiciones de operación reales del secador solar. Para este trabajo, tomando a consideración que el secador construido en Pichátaro funciona con una entrada de aire de 0.4 kg/s; se consideraron flujos máscicos de entrada y salida de aire en el rango de 0.1 - 1 kg/s para ver el impacto en la temperatura del secador. Para las superficies sólidas se consideraron condiciones de no deslizamiento, el piso de cemento se consideró un sumidero de calor de 288.15 K. Las paredes laterales del secador son de madera, considerando que hay aberturas por donde se pierde energía a una razón de 10 W/m²K. Para el vidrio superior e inferior se ajustaron valores de temperatura que se describen a continuación.

3.4. Condición de temperatura del vidrio

Para calcular las condiciones de temperatura sobre el vidrio es necesario calcular parámetros ópticos de ángulos solares. Cada parámetro solar se describe a continuación.

Declinación solar, que es la forma en que los rayos del sol inciden sobre la tierra (Martínez y Gómez-Azpeitia, 2015):

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen} \left[360 \frac{284 + n}{365} \right], \quad (3.3)$$

donde n , el día de interés a estudiar, que para este estudio se consideró el día 181.

Ángulo horario, el cual convierte la hora solar local en el número de grados que el sol se mueve a través del cielo.

$$\tau = \frac{360}{24} (hs - 12), \quad (3.4)$$

donde $hs = 12$, que es la hora del día de interés. Por lo que:

$$\tau = 0, \quad (3.5)$$

Una vez teniendo estos dos parámetros se usan para calcular la radiación solar directa en una superficie horizontal:

$$\cos(\theta) = \text{sen}(\delta)\text{sen}(\lambda) + \cos(\delta)\cos(\lambda)\cos(\tau), \quad (3.6)$$

Despejando:

$$\theta = \arccos [\text{sen}(\delta)\text{sen}(\lambda) + \cos(\delta)\cos(\lambda)\cos(\tau)], \quad (3.7)$$

Para así, poder obtener la razón de radiación solar entre superficies inclinadas respecto a una horizontal (Martínez y Gómez-Azpeitia, 2015):

$$\eta_{D1} = \frac{I_{SI1}}{I_{SH}} = \frac{\text{sen}(\delta)\text{sen}(\lambda - \zeta_1) + \cos(\delta)\cos(\lambda - \zeta_1)\cos(\tau)}{\text{sen}(\delta)\text{sen}(\lambda) + \cos(\delta)\cos(\lambda)\cos(\tau)}, \quad (3.8)$$

$$\eta_{D2} = \frac{I_{SI2}}{I_{SH}} = \frac{\text{sen}(\delta)\text{sen}(\lambda - \zeta_2) + \cos(\delta)\cos(\lambda - \zeta_2)\cos(\tau)}{\text{sen}(\delta)\text{sen}(\lambda) + \cos(\delta)\cos(\lambda)\cos(\tau)}, \quad (3.9)$$

La siguiente ecuación sirve para obtener la radiación global directa en cualquier lugar (Díez, 1992):

$$\begin{aligned} I_{max} &= 1220e^{1/[6 \cos(\theta-1)]}, \\ I_{prom} &= 1230e^{-1/[3.8 \cos(\theta-1.6)]}, \\ I_{min} &= 1260e^{-1/[2.3 \cos(\theta-3)]}, \end{aligned} \quad (3.10)$$

Por otro lado, la radiación global se define como la suma de la radiación directa, radiación difusa y radiación albedo (Díez, 1992):

$$I_{prom} = I_{sh} + I_{dif} + I_{alb}, \quad (3.11)$$

Ahora bien, la radiación albedo es muy pequeña comparada con la radiación directa y difusa. Por lo que suele considerarse despreciable, es decir $I_{alb} = 0$. De

tal manera que para obtener la radiación directa puede calcularse reescribiendo Ecuación (3.11). Es así como calculamos la radiación directa, considerando a la radiación albedo despreciable

$$I_H = I_{prom} - I_{dif}, \quad (3.12)$$

donde $I_{dif} = 150 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Radiación en cada superficie inclinada del vidrio

$$\begin{aligned} I_{SI1} &= \eta_{D1} I_{SH}, \\ I_{SI2} &= \eta_{D2} I_{SH}, \end{aligned} \quad (3.13)$$

Ley de Estefan Boltzaman para cada superficie (Incropera y DeWitt, 1999):

$$\begin{aligned} E_1 &= \varepsilon\sigma (T_a^4 - T_{s1}^4) = I_{SI1}, \\ E_2 &= \varepsilon\sigma (T_a^4 - T_{s2}^4) = I_{SI2}, \end{aligned} \quad (3.14)$$

Condición de temperatura para cada superficie inclinada

$$\begin{aligned} T_{s1} &= \sqrt[4]{\frac{E_1}{\varepsilon\sigma} + T_a^4}, \\ T_{s2} &= \sqrt[4]{\frac{E_2}{\varepsilon\sigma} + T_a^4}, \end{aligned} \quad (3.15)$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} T_{s1} &= 375.947 \text{ K} \\ T_{s2} &= 397.722 \text{ K} \end{aligned} \quad (3.16)$$

3.5. Simulaciones numéricas

Para estudiar el fenómeno de convección libre en el secador primeramente se consideró una geometría sin flujos máxicos de entrada y salida de aire. Posteriormente, para estudiar el impacto de tres configuraciones geométricas para la salida de aire: 5 salidas de aire en la pared frontal, 5 salidas de aire en la pared posterior y la combinación de las anteriores; es decir, 5 salidas de aire frontales y 5 posteriores, ver Figura 3.5 sobre la distribución del aire se consideraron diferentes suministros de flujos máxicos de entrada y salida de aire de 0.1 a 1 kg/s.

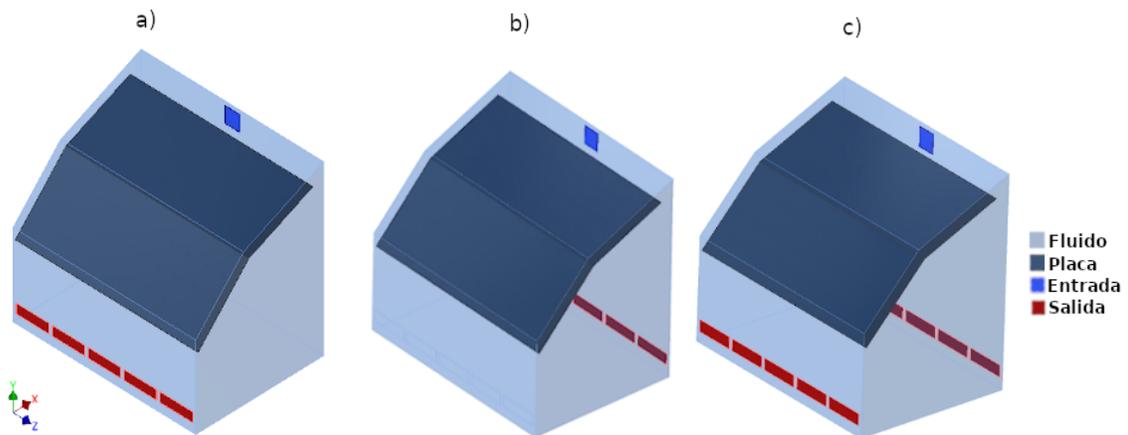


Figura 3.5. Vista isométrica de los dominios en el secador con salidas de aire: a) 5 aberturas en el muro frontal, b) 5 aberturas en el muro posterior y c) 5 aberturas frontales y 5 posteriores.

De los resultados obtenidos tomando en cuenta la mejor geometría, con el objetivo de estudiar el flujo de aire dentro del secador se consideró una condición de carga diferente de madera, ver Figura 3.6.

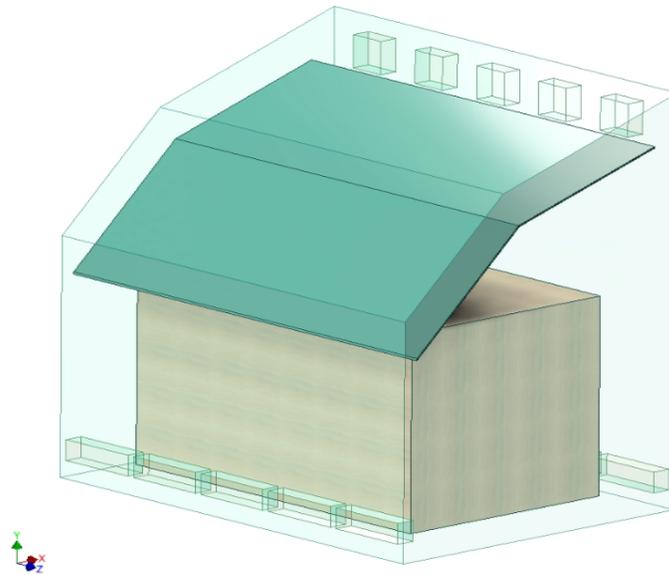


Figura 3.6. Secador con un cubo simulando la madera.

Resultados y discusión

4.1. Sensibilidad de malla

Para evaluar que la solución numérica no depende del tamaño de la malla. En la Tabla 4.1 se presentan las soluciones numéricas para la temperatura promedio del aire al interior del secador (\bar{T}_{aire}) y sobre la placa (\bar{T}_{placa}). En esta tabla se observa que la malla fina tiene un error porcentual menor al 1% comparado con los resultados experimentales reportados por López-Sosa *et al.* (2019). Sin embargo, para ahorrar tiempo de computo en este trabajo se consideró a la malla media para subsecuentes evaluaciones.

Tabla 4.1. Estudio de sensibilidad de malla.

Mallas	\bar{T}_{aire} [K]	\bar{T}_{placa} [K]
Gruesa	319.17	334.75
Media	332.22	337.76
Fina	325.18	338.97

4.2. Convección libre al interior de la cavidad cerrada del secador

Para estudiar el fenómeno de convección libre en este dispositivo se consideró una geometría sin flujos másicos de entrada y salida de aire. Los isocontornos de velocidad se presentan en la Figura 4.1. En donde se aprecia que el máximo cambio de temperatura se da en dirección de la gravedad, ver Figura 4.2. Por consiguiente, el movimiento del aire es debido a los cambios de temperatura. Se registraron temperaturas promedio del aire y de la placa de 322.41 K y 342.58 K, respectivamente.

En el secador construido en Pichátaro, los resultados del análisis térmico mostraron que la cámara de secado logró alcanzar temperaturas superiores 323.15 K (López-Sosa *et al.*, 2019), validando así nuestro estudio.

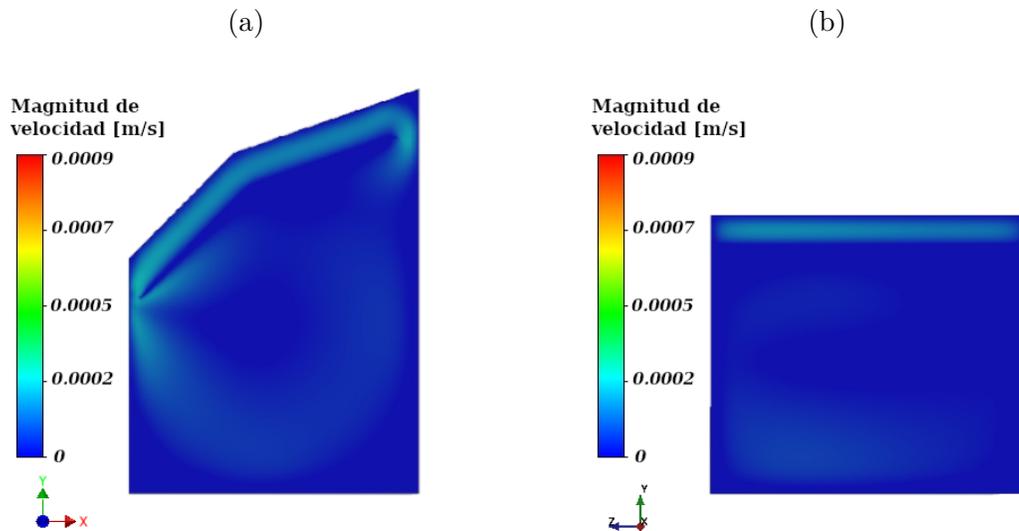


Figura 4.1. Distribución de la magnitud velocidad a lo largo de la dirección x ($z = 0$) y z ($x = 0.9$) para convección natural.

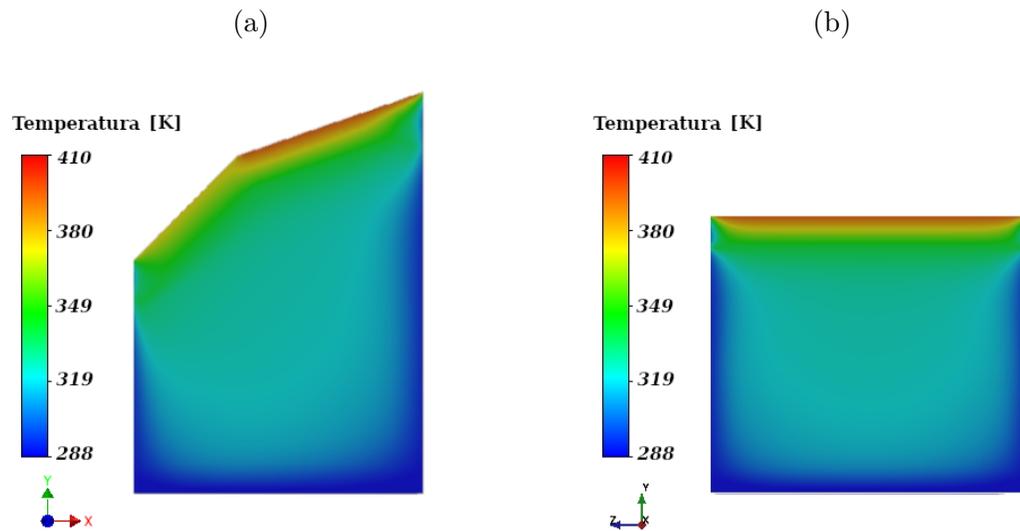


Figura 4.2. Distribución de la temperatura a lo largo de la dirección x ($z = 0$) y z ($x = 0.9$) para convección natural.

4.3. Efecto de las aberturas

Para estudiar el impacto de diferentes configuraciones de aberturas sobre la distribución del aire se consideraron diferentes suministros de flujos máscicos. En este trabajo se considero que el flujo suministrado en la entrada es la misma que el flujo de salida. Esto para satisfacer la ley de conservación de masa. En consecuencia, las Figuras 4.3 y 4.4 presentan los isocontornos de velocidad para $\dot{m} = 0.1$ kg/s, que es el valor más bajo estudiado en las tres diferentes configuraciones geométricas: a) 5 salidas de aire enfrente, b) 5 salidas de aire atrás y c) 5 salidas de aire enfrente y 5 atrás.

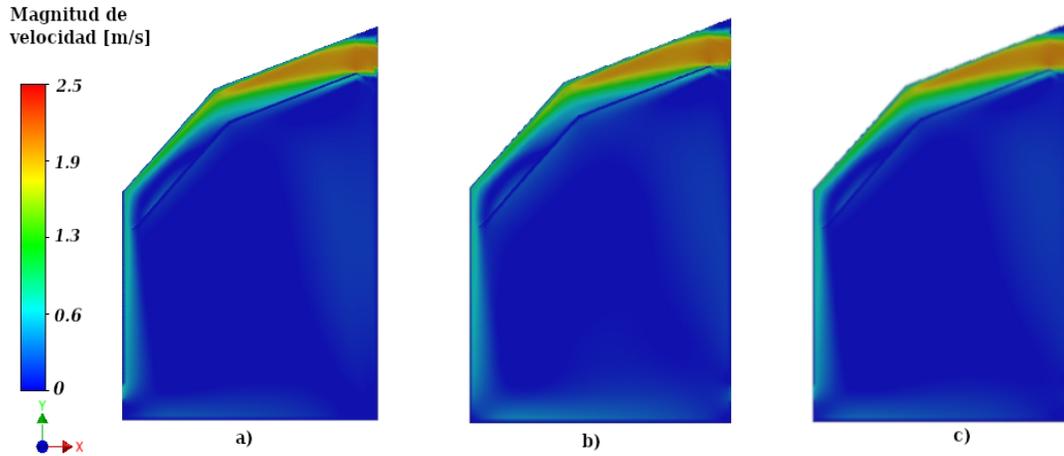


Figura 4.3. Distribución de la velocidad plano medio a lo largo de la dirección x ($z = 0$), para $\dot{m} = 0.1$ kg/s. Configuraciones: a) C1, b) C2 y c) C3.

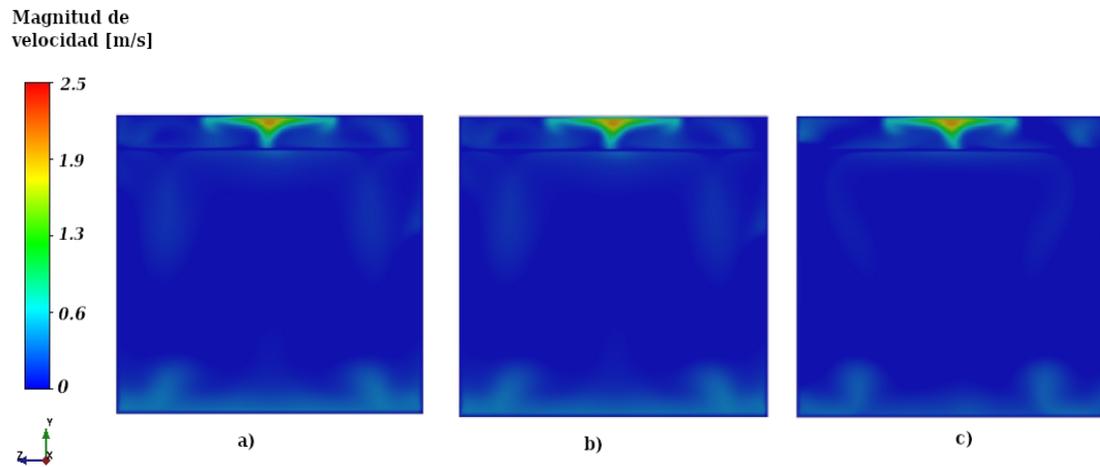


Figura 4.4. Distribución de la velocidad plano medio a lo largo de la dirección z ($x = 0.9$), para $\dot{m} = 0.1$ kg/s. Configuraciones: a) C1, b) C2 y c) C3.

Las Figuras 4.5 y 4.6 presentan los isocontornos de velocidad para $\dot{m} = 1$ kg/s, que es el valor más alto estudiado en las tres diferentes configuraciones geométricas:

a) 5 salidas de aire enfrente, b) 5 salidas de aire atrás y c) 5 salidas de aire enfrente y 5 atrás.

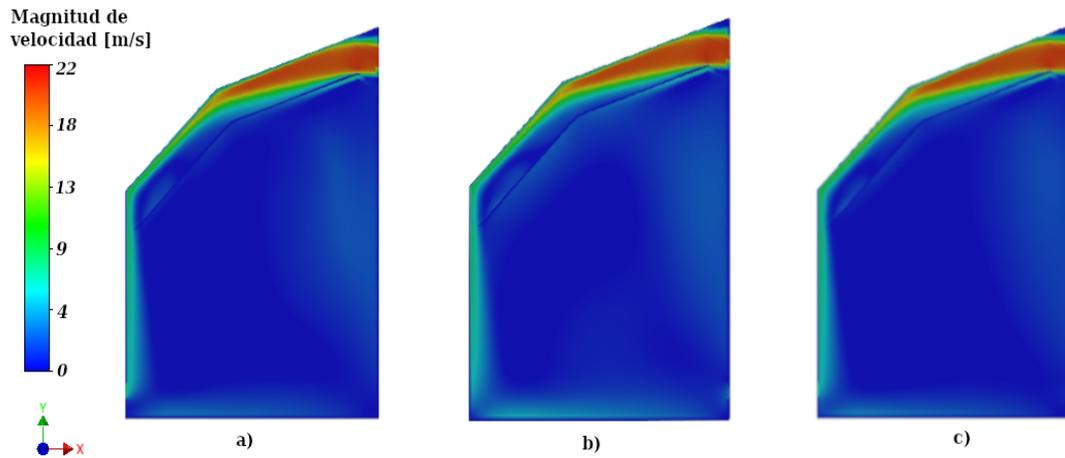


Figura 4.5. Distribución de la velocidad plano medio a lo largo de la dirección x ($z = 0$), para $\dot{m} = 1$ kg/s. Configuraciones: a) C1, b) C2 y c) C3.

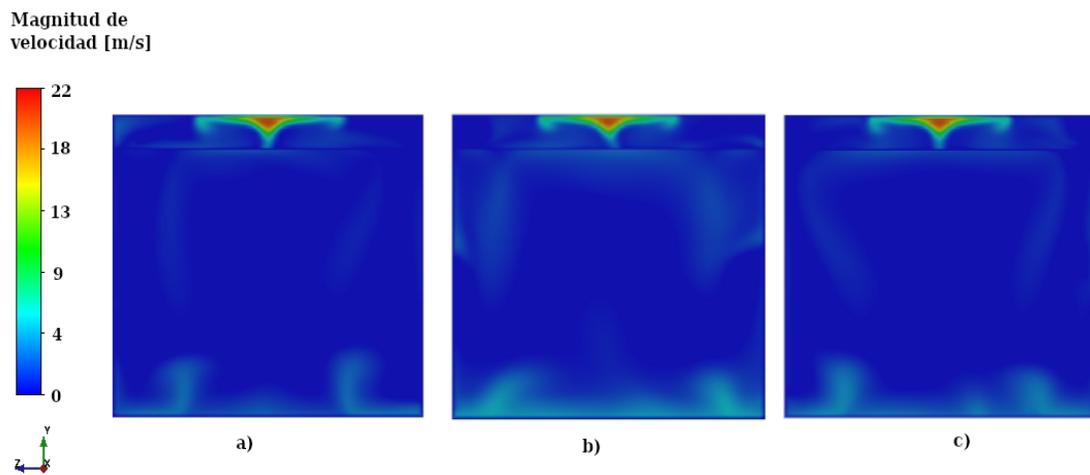


Figura 4.6. Distribución de la velocidad plano medio a lo largo de la dirección z ($x = 0.9$), para $\dot{m} = 1$ kg/s. Configuraciones: a) C1, b) C2 y c) C3.

Las Figuras 4.7 y 4.8 presentan los isocontornos de temperatura para $\dot{m} = 0.1$ kg/s, que es el valor más bajo estudiado en las tres diferentes configuraciones geométricas: a) 5 salidas de aire enfrente, b) 5 salidas de aire atrás y c) 5 salidas de aire enfrente y 5 atrás.

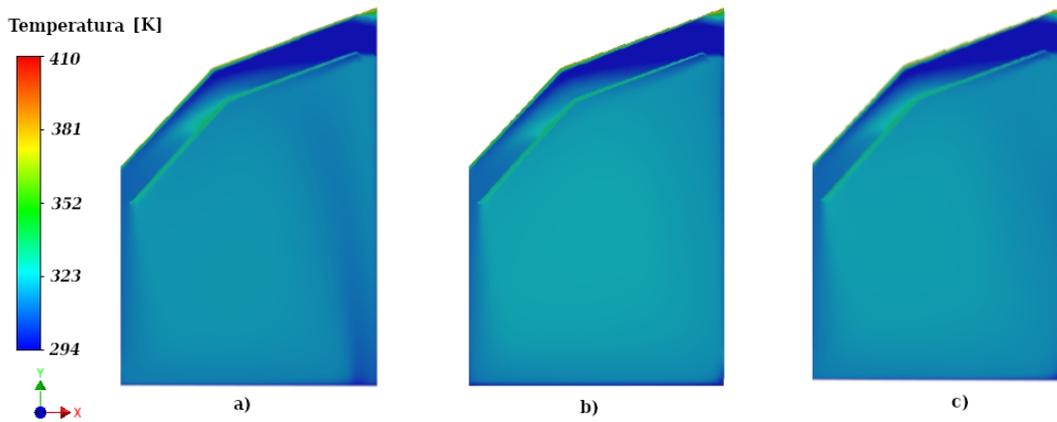


Figura 4.7. Distribución de la temperatura plano medio a lo largo de la dirección x ($z = 0$), para $\dot{m} = 0.1$ kg/s. Configuraciones: a) C1, b) C2 y c) C3.

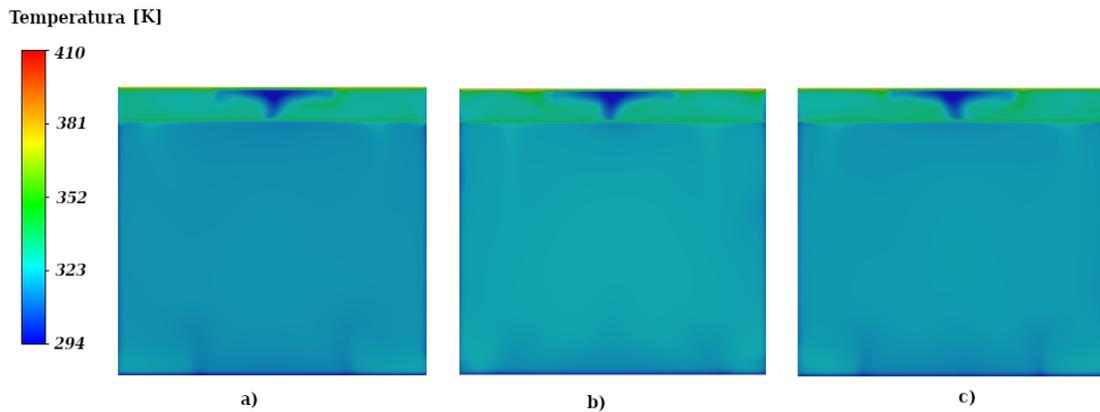


Figura 4.8. Distribución de la temperatura plano medio a lo largo de la dirección z ($x = 0.9$), para $\dot{m} = 0.1$ kg/s. Configuraciones: a) C1, b) C2 y c) C3.

Las Figuras 4.9 y 4.10 presentan los isocontornos de velocidad para $\dot{m} = 1 \text{ kg/s}$, que es el valor más alto estudiado en las tres diferentes configuraciones geométricas: a) 5 salidas de aire enfrente, b) 5 salidas de aire atrás y c) 5 salidas de aire enfrente y 5 atrás.

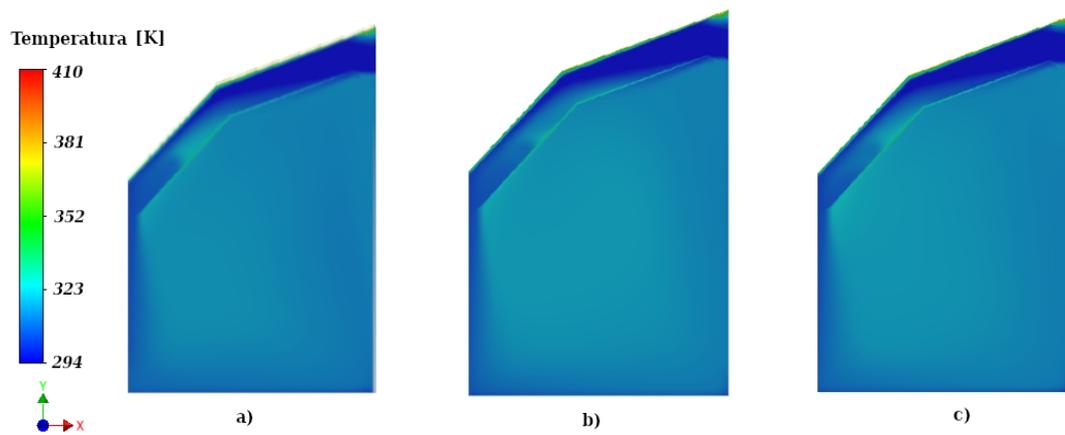


Figura 4.9. Distribución de la temperatura plano medio a lo largo de la dirección x ($z = 0$), para $\dot{m} = 1 \text{ kg/s}$.

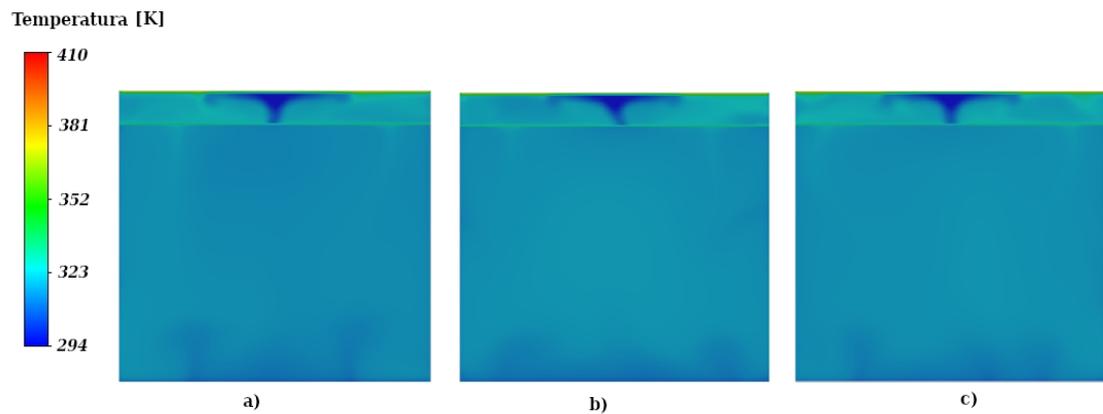


Figura 4.10. Distribución de la temperatura plano medio a lo largo de la dirección z ($x = 0.9$), para $\dot{m} = 1 \text{ kg/s}$. Configuraciones: a) C1, b) C2 y c) C3.

En general, los isocontornos de temperatura muestran que el flujo de calor impuesto en la superficie superior del vidrio produce un aumento en la temperatura de la placa metálica, generando un flujo convectivo tridimensional, el cual recircula en toda la cavidad. Lo anterior ayuda al proceso de secado de la madera.

Las Tabla 4.2 y Tabla 4.3 muestran las temperaturas promedio en volumen de aire y placa para los flujos máxicos de 0.1 a 1 kg/s en las tres diferentes configuraciones geométricas.

Tabla 4.2. Temperaturas promedio en el volumen de aire para flujos máxicos de 0.1 a 1 kg/s en las tres diferentes configuraciones geométricas.

\dot{m} [kg/s]	\bar{T}_{aire} C1 [K]	\bar{T}_{aire} C2 [K]	\bar{T}_{aire} C3 [K]
0.1	323.41	325.65	324.56
0.4	322.22	323.25	323.11
0.7	321.42	322.44	322.33
1	321.36	321.72	321.99

Tabla 4.3. Temperaturas promedio en volumen de la placa para flujos máxicos de 0.1 a 1 kg/s en las tres diferentes configuraciones geométricas.

\dot{m} [kg/s]	\bar{T}_{placa} C1 [K]	\bar{T}_{placa} C2 [K]	\bar{T}_{placa} C3 [K]
0.1	340.61	340.59	340.62
0.4	337.76	337.67	337.94
0.7	335.73	335.58	335.94
1	334.18	333.91	334.36

La Figura 4.11 muestra el comportamiento de las temperaturas promedio en volumen de aire y placa para los flujos máxicos de 0.1 a 1 kg/s en las tres diferentes configuraciones geométricas. Se puede observar que entre menor flujo máxico, mayor temperatura promedio en el aire y la placa. Para el $\dot{m} = 0.1$ kg/s en la configuración C2), se registraron las temperaturas promedio más altas, ver Tabla 4.2 y Tabla 4.3

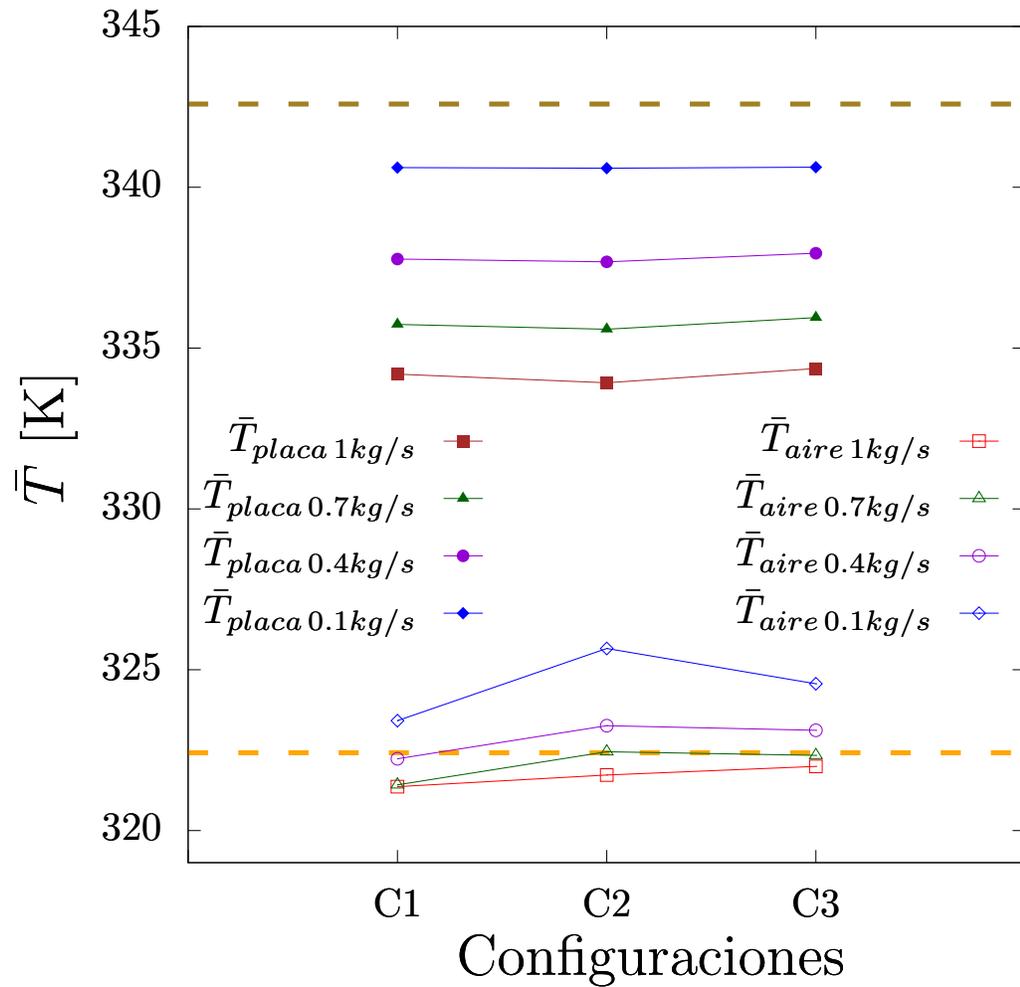


Figura 4.11. Temperaturas promedio en volumen de aire y placa para para flujos masicos de 0.1 a 1 kg/s.

4.4. Líneas de corriente

Para entender de mejor manera el secado de madera, se presentan las líneas de corriente para la velocidad para $\dot{m} = 0.1 \text{ kg/s}$, ver Figura 4.12. La mejor distribución del flujo se da en la configuración C2, permitiendo que el aire caliente al interior del secador se distribuya de forma muy homogénea, lo que mejora el proceso de secado.

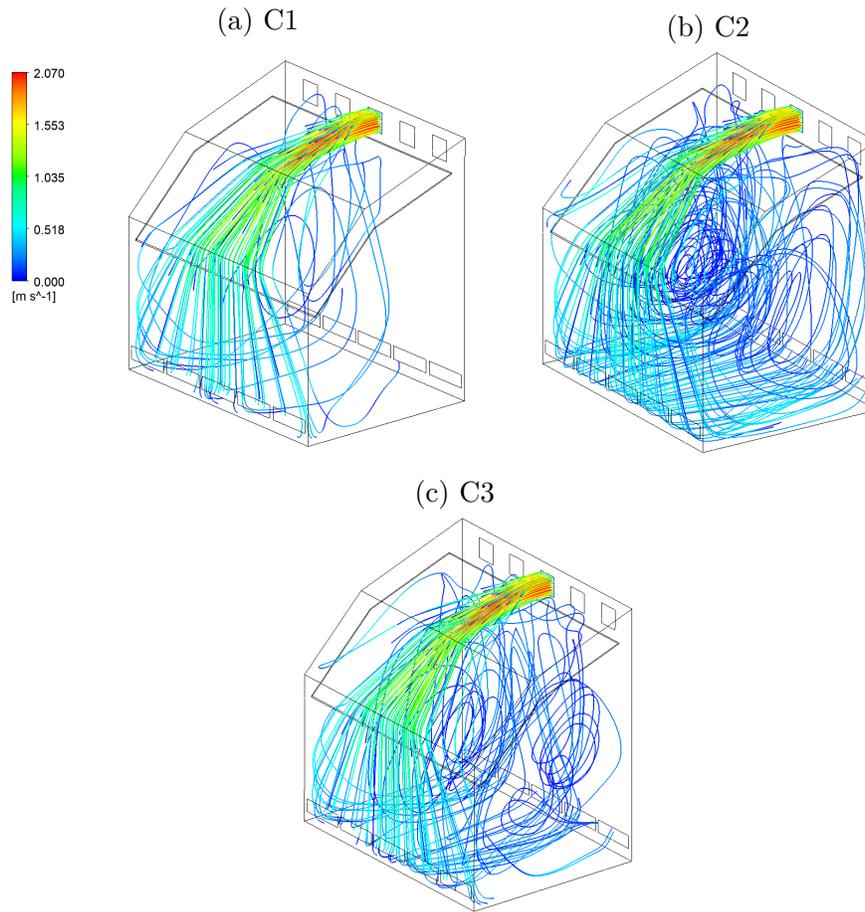


Figura 4.12. Líneas de corriente para la velocidad al interior del secador para $\dot{m} = 0.1 \text{ kg/s}$, Configuraciones: a) C1, b) C2 y c) C3.

4.5. Cubo de madera para representar madera

Dado que para el $\dot{m} = 0.1 \text{ kg/s}$ en la configuración C2, se registraron las temperaturas promedio más altas, se utilizaron los mismos datos para una condición de carga diferente de madera. En la Figura 4.13 se presentan los isocontornos de velocidad y temperatura. Se registraron temperaturas promedio del aire y de la placa de 328.98 K y 382.25 K, respectivamente.

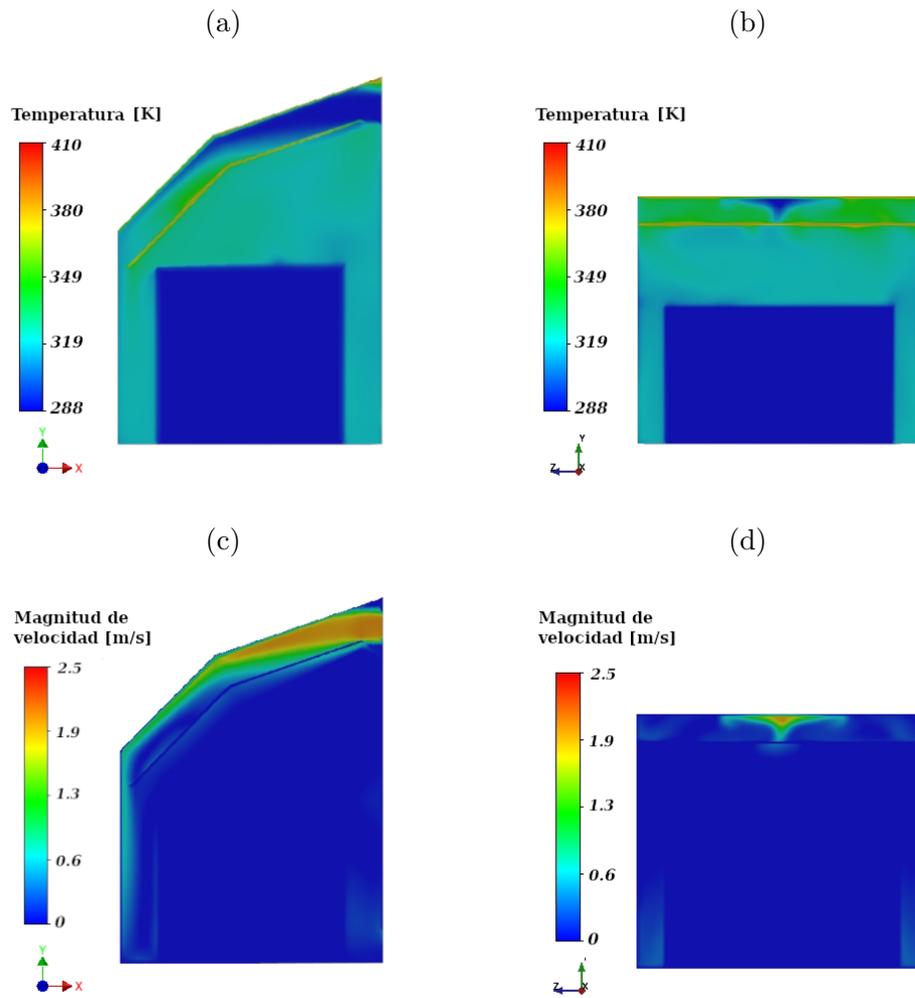


Figura 4.13. Distribución de la temperatura y velocidad a lo largo de la dirección x ($z = 0$) y z ($x = 0.9$), para $\dot{m} = 0.1$ kg/s con un cubo simulando la madera.

En la Figura 4.14 se muestra como el cubo de madera retrasa el flujo de aire que sale, permitiendo el aumento de temperatura en la región superior de la madera. Esto claramente se ve en el vórtice que se genera en esa región.

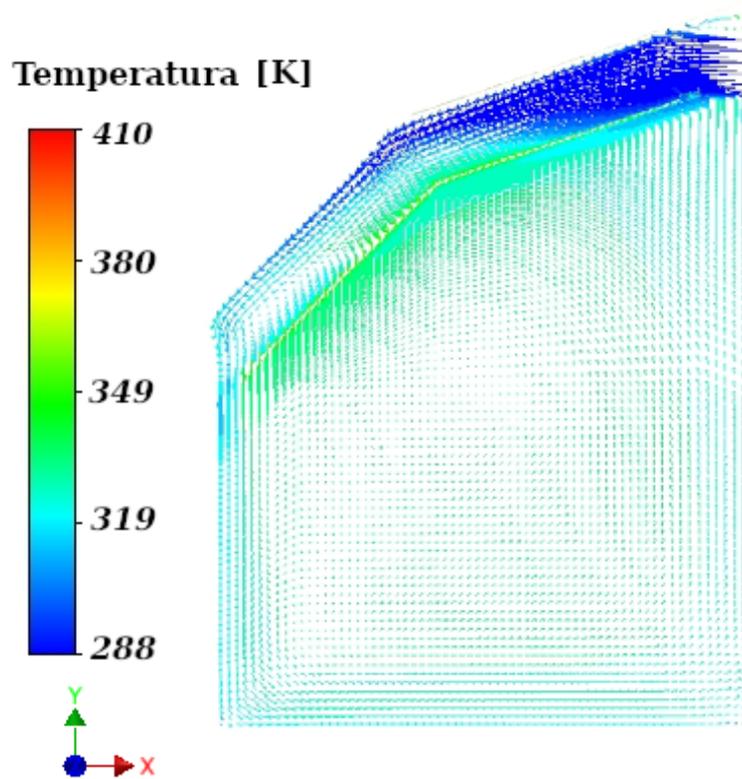


Figura 4.14. Distribución de los vectores de velocidad a lo largo de la dirección x ($z = 0$) para $\dot{m} = 0.1$ kg/s.

4.5.1. Líneas de corriente

Para entender de mejor manera el secado de madera, se presentan las líneas de corriente para la velocidad para $\dot{m} = 0.1$ kg/s en la configuración C2, ver Figuras 4.15 y 4.16. En estas se muestra como el flujo de aire inicialmente se mueve por debajo del techo de vidrio y por encima de la placa metálica, lo anterior hace que el aire se caliente y posteriormente se distribuya en el interior del secador, creando vórtices en ciertas zonas como se aprecia en la Figura 4.15c. Estos vórtices ayudan al recirculamiento del aire y por lo tanto al secado de madera.

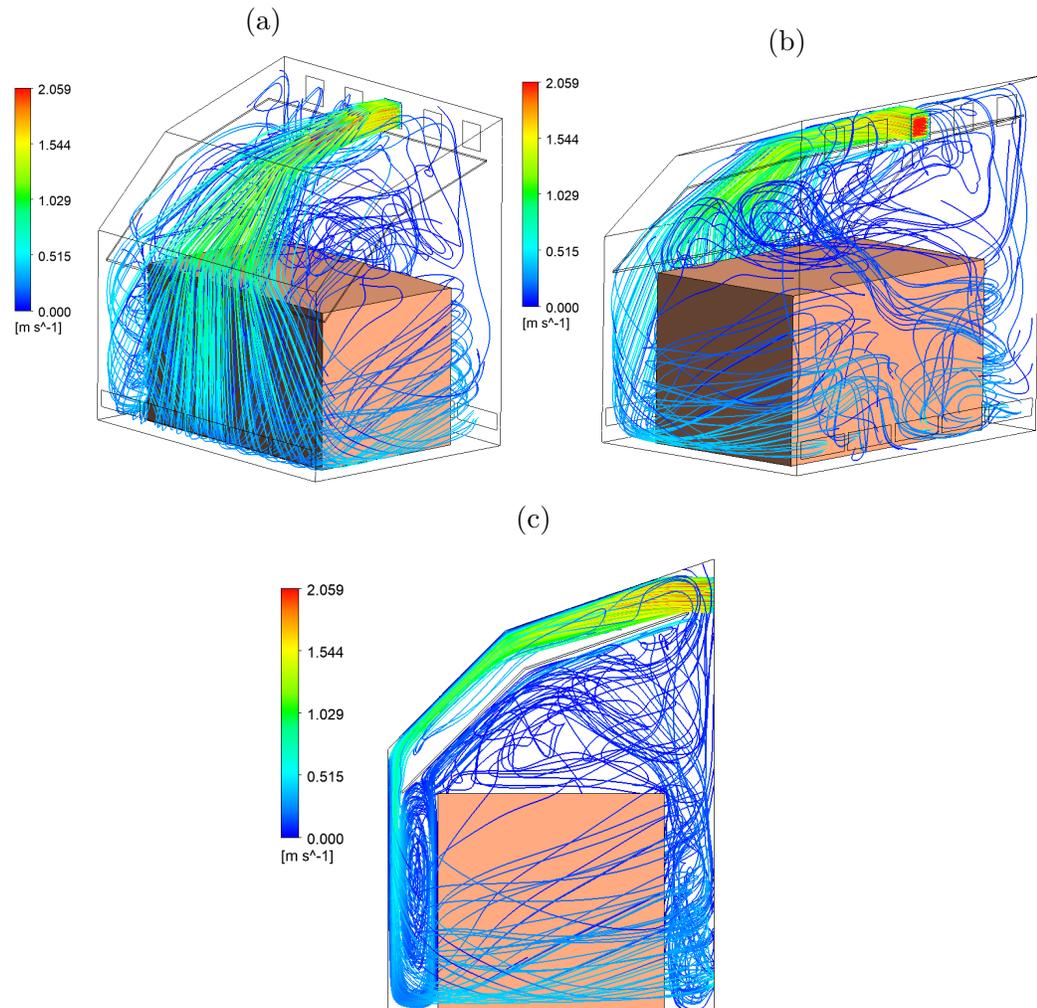


Figura 4.15. Líneas de corriente para la velocidad al interior del secador para $\dot{m} = 0.1$ kg/s en la configuración C2.

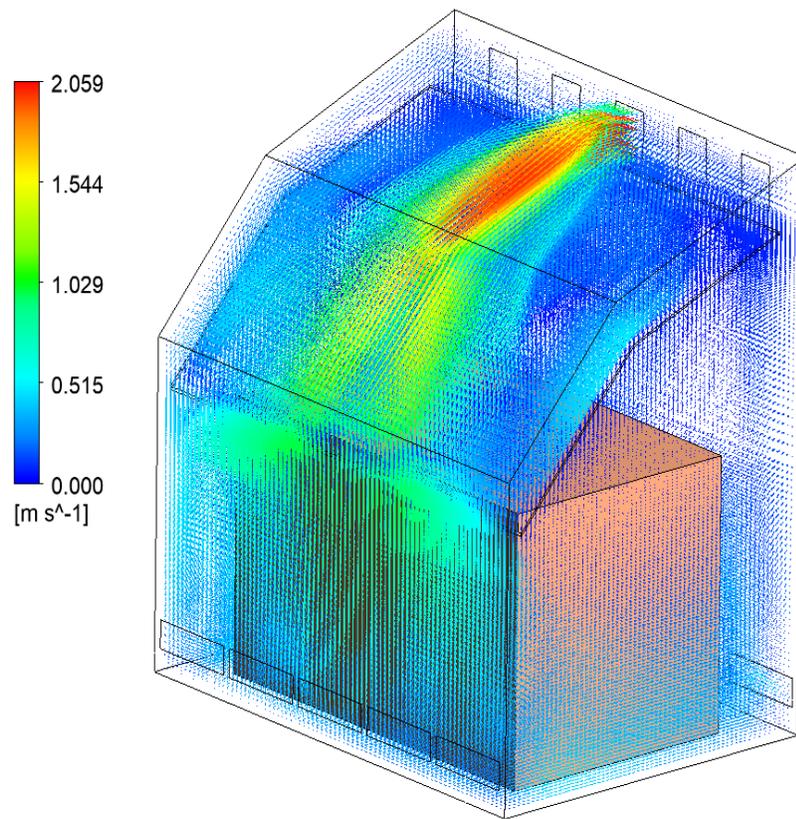


Figura 4.16. Distribución de los vectores de velocidad para $\dot{m} = 0.1 \text{ kg/s}$ en la configuración C2.

Conclusiones y trabajo a futuro

En el presente trabajo se analizó la distribución del aire dentro del secador solar para estudiar los efectos convectivos. Adicionalmente, se consideraron diferentes flujos máscicos de entrada y salida de aire entre 0.1 a 1 kg/s para tres configuraciones geométricas de salida de aire: 5 salidas de aire en la pared frontal (C1), 5 salidas de aire en la pared posterior (C2) y la combinación de las anteriores, es decir, 5 salidas de aire frontales y 5 posteriores (C3). Asimismo, se consideró una condición de carga con un cubo simulando la madera.

Se contempló el diseño, mallado y simulación de un secador solar construido en Pichátaro, Michoacán. El secado es necesario para que la madera se utilice en la mayoría de los productos y sea posible fabricar productos de calidad en función de un contenido de humedad óptimo.

Para entender mas a fondo el fenómeno de convección en este dispositivo se consideró una geometría sin flujos máscicos de entrada y salida de aire. En donde se apreció que el movimiento del aire es debido a los cambios de temperatura, se registraron temperaturas promedio del aire similares al secador construido en Pichátaro. En cuanto al flujo de calor impuesto en la superficie superior del vidrio de este caso se observó un aumento en la temperatura de la placa metálica, generando un flujo convectivo tridimensional, el cual recircula en toda la cavidad.

Los resultados de este estudio para tres configuraciones geométricas de salida de aire indican que entre menor flujo máscico, mayor temperatura promedio en el aire y la placa. Para distintos flujos máscicos se encontró que la configuración C2 (salidas de aire atrás), tiene una temperatura promedio sobre la placa mas alta

que las otras configuraciones, siendo ésta la mejor geometría encontrada, seguido de la configuración C3 (salidas de aire combinadas). Siendo el peor de los casos la configuración C1. En todas las configuraciones la máxima temperatura promedio sobre la placa ocurrió cuando $\dot{m} = 0.1$ kg/s .

Para la condición de carga con cubo de madera se observó que el flujo de aire que sale se retrasa por la carga de madera, permitiendo el aumento de temperatura en el aire que se localiza en una región superior cercana a la madera.

Los resultados presentados en esta tesis, son de interés en el diseño de secadores, ya que muchos de los retos que plantea el uso de la madera como material surgen de los cambios en el contenido de humedad.

Estudiar el comportamiento de la dinámica de fluido computacional, dentro del secador solar, para conocer los gradientes de velocidad, temperatura y el comportamiento de estos, puede ayudar a mejorar la eficiencia e identificar errores en su diseño.

En trabajos futuros se contemplan simulaciones con diferentes cargas: como 5 columnas simulando la madera, así como con taquetes y tablas de madera de tamaño real. Además de estudiar diferentes flujos máxicos y configuraciones geométricas.

Publicaciones y congresos

Beltrán, A. Gómez-Heleria, D. and Ruíz-Espinoza, D.M. (2022). Forced fluid flow in a solar wood-dryer: numerical study. XII National and III International Conference on Engineering Thermodynamics. Proceeding book. Universidad Carlos III de Madrid. 758:763. ISBN: 978-84-09-42477-1

Presentación oral (2022). Convección Natural al interior de un secador para madera en comunidades rurales. XXVIII Congreso de la División de Dinámica de Fluidos de la Sociedad Mexicana de Física

Presentación oral (2022). Convección Natural al interior de un secador de madera para comunidades rurales. XVII Congreso Estatal de Ciencias, Tecnología e Innovación del Estado de Michoacán.

Referencias

- Amanlou, Y. y Zomorodian, A. (2010). Applying cfd for designing a new fruit cabinet dryer. *Journal of food engineering*, 101(1):8–15.
- Autodesk Inventor (2021). Autodesk Inventor. <https://www.asidek.es/industria-y-fabricacion-2/autodesk-inventor-professional/>.
- Betancur Rodríguez, M. (2011). En *Ingeniería inversa aplicada: metodología y aplicaciones industriales*. Tesis. Universidad EAFIT.
- Cengel, Y. A. y Ghajar, A. (2013). *Heat and Mass Transfer, 5-th edition*. Tata McGraw Hill Education Private Limited, USA.
- César-Munguía, A. L. (2022). En *Diseño y evaluación de un secador solar mixto*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.
- CONAFOR (2011). Servicios Ambientales y Cambio Climático. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/24/2727DOSSIER.pdf/>.
- CONAFOR (2012). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos Informe de Resultados 2004-2009*. Coordinación General de Planeación e Información-Gerencia de Inventario.
- Cueto, E. M. (1997). Diseño y ensayo de un secador solar de madera. *Madera y Bosques*, 3(2):13–28.
- Díez, P. F. (1992). Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura. *Universidad de Cantabria, Escuela Politécnica Superior de Ingeniería*.

- Fernández Oro, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos*. REVERTER.
- Ferziger, J. H., Perić, M., y Street, R. L. (2002). *Computational methods for fluid dynamics*, volumen 3. Springer.
- Fluent, A. (2013). Ansys fluent theory guide 15.0. ANSYS, Canonsburg, PA, 33.
- Forest Products Laboratory (2021). *Wood handbook: wood as an engineering material*. The Laboratory.
- Francisco-Arriaga, F., Guerrero García-Rojas, H. R., Kido-Cruz, A., y Cortés-Zavala, M. T. (2011). Ingreso generado por la recolección de recursos forestales en pichátaro, michoacán, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 8(1):107–117.
- Fuentes-Salinas, M., Luna-Sánchez, D., Osorio-Suárez, J., y Corona, J. (2003). Construcción y validación de un secador solar para madera aserrada. *Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9:171–176.
- Gómez Heleria, D. (2023). En *Modelado y simulación de fenómenos de transporte en estufas de biomasa*. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Haque, M. y Langrish, T. (2003). Mathematical modelling of solar kilns for drying timber: Simulation and experimental validation. *Drying Technology: An International Journal*, 21(3):457–477.
- Hoadley, R. B. (2000). *Understanding Wood: a craftsman's guide to wood technology*. Taunton press.
- Incropera, F. P. y DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educación.
- Inventario Estatal Forestal y de Suelos (2014). Inventario estatal forestal y de suelos-michoacán de ocampo 2013.
- López-Sosa, L., Hernández-Ramírez, L., González-Avilés, M., Servín-Campuzano, H., y Zárate-Medina, J. (2018). Desarrollo de un recubrimiento absorbente solar de bajo costo basado en hollín de biomasa forestal: Caracterización térmica y aplicación en un sistema de cocción solar. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 17(2):651–668.

- López-Sosa, L. B., Núñez-González, J., Beltrán, A., Morales-Máximo, M., Morales-Sánchez, M., Serrano-Medrano, M., y García, C. A. (2019). A new methodology for the development of appropriate technology: A case study for the development of a wood solar dryer. *Sustainability*, 11(20):5620.
- Martínez, A. T. y Gómez-Azpeitia, G. (2015). Prontuario solar. *Enfoque Académico. México*.
- Martínez Rojas, I. y Vignote Peña, S. (2006). *Tecnología de la madera*. Ediciones Mundi-Prensa.
- Mirade, P.-S. (2003). Prediction of the air velocity field in modern meat dryers using unsteady computational fluid dynamics (cfd) models. *Journal of food engineering*, 60(1):41–48.
- Miranda Esquivel, A. (2011). Plaza del artesano pichátaro, michoacán.
- Mujumdar, A. S. (2006). *Handbook of industrial drying*. CRC press.
- Núñez, J., Moctezuma-Sánchez, M. F., Fisher, E. M., Berrueta, V. M., Masera, O. R., y Beltrán, A. (2020). Natural-draft flow and heat transfer in a plancha-type biomass cookstove. *Renewable Energy*, 146:727–736.
- Ozen, M. y Fellow, A. (2014). Meshing workshop. En *MESHING WORKSHOP*, p. 25.
- Peña Gallardo, F. (2017). En *Convección natural en geometrías para secadores de biomasa*. Tesis de licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Periodico Oficial Del Gobierno Constitucional Del Estado De Michoacán De Ocampo (2019). PROGRAMA DE DESARROLLO SUSTENTABLE DE LOS RECURSOS FORESTALES Y DE SUELOS 2017- 2021. <http://congresomich.gob.mx/file/5a-3319.pdf>.
- Prakash, O. y Kumar, A. (2017). *Solar drying technology: concept, design, testing, modeling, economics, and environment*. Springer.
- Reuss, M., Benkert, S., Aeberhard, A., Martina, P., Raush, G., Rentzell, B., y Sogari, N. (1997). Modelling and experimental investigation of a pilot plant for solar wood drying. *Solar Energy*, 59(4-6):259–270.
- Roache, P. J. (1994). Perspective: a method for uniform reporting of grid refinement studies. *Journal of Fluids Engineering*, 116(3):405–413.

- Salas-Garita, C., Moya-Roque, R., y Córdoba-Foglia, R. (2008). Diseño y construcción de un secador solar para madera. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 5(14):ág-30.
- SEMARNAT (2013). La producción de resina de pino en México. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/43/6046La%20producci%C3%B3n%20de%20resina%20de%20pino%20en%20M%C3%A9xico.pdf>.
- SEMARNAT (2022). PIB Forestal. <https://snif.cnf.gob.mx/indicadores-economicos/>.
- Simpson, W. T. (1999). Drying and control of moisture content and dimensional changes. *Wood handbook: wood as an engineering material. Madison, WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL; GTR-113: Pages 12.1-12.20*, 113.
- Vaca de Fuentes, R. B. (1998). Técnicas para la preservación de maderas.
- Vásquez Tantas, G. J. (2018). Modelación matemática, simulación, análisis paramétrico y financiero de una cámara de secado solar para cacao.
- Versteeg, H. K. y Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education.
- Xia, B. y Sun, D.-W. (2002). Applications of computational fluid dynamics (cfd) in the food industry: a review. *Computers and electronics in agriculture*, 34(1-3):5-24.
- Yunus, Y. y Al-Kayiem, H. H. (2013). Simulation of hybrid solar dryer. En *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, volumen 16, p. 012143. IOP Publishing.