



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERIA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DE AGUA**

SIMULACIÓN DE UN SISTEMA SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO MEDIANTE CFD

**TESIS QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL
GRADO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA**

Presenta:

ULISES ZACARIAS HERRERA

Bajo la supervisión de: IRINEO LORENZO LOPÉZ CRUZ, DR.



Chapingo, Estado de México, diciembre de 2022

**SIMULACIÓN DE UN SISTEMA SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO
MEDIANTE CFD**

Tesis realizada por Ulises Zacarias Herrera bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

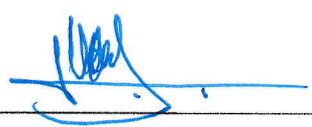
DIRECTOR: _____


DR. IRINEO LORENZO LÓPEZ CRUZ

ASESOR: _____


DR. FEDERICO FÉLIX HAHN SCHLAM

ASESOR: _____


DR. SALVADOR VALLE GUADARRAMA

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	3
1.2 Objetivos particulares	3
1.3 Literatura citada	4
2 REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1 Importancia del secado solar	5
2.2 Clasificación de los secadores solares	5
2.3 Principio de funcionamiento del secador solar tipo invernadero (SSTI). 6	
2.4 Simulación y modelación de los sistemas de secado solar	7
2.5 Dinámica de fluidos computacional	9
2.5.1 Pre-proceso	12
2.5.2 Proceso	18
2.5.3 Postproceso.	20
2.6 Aplicación de la dinámica de fluidos computacional en el modelado de los sistemas de secado solar.....	21
2.7 Literatura citada	23
3 SIMULACIÓN DE UN SISTEMA SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	26
3.1 Materiales y métodos.....	26
3.1.1 Descripción del sistema secador solar tipo invernadero	26
3.1.2 Sistema de monitoreo de datos.....	26
3.1.3 Evaluación del modelo CFD	29
3.1.4 Modelación de un secador solar tipo invernadero mediante Dinámica de Fluidos Computacional.	30
3.1.5 Modelo numérico.....	32

3.1.6	Discretización del dominio computacional y condiciones de frontera	39
3.2	Resultados y discusión	44
3.2.1	Distribución de la humedad relativa del aire.....	44
3.2.2	Distribución de la temperatura del aire	48
3.2.3	Distribución del flujo del aire	54
3.3	Conclusiones	57
3.4	Literatura citada	57

ÍNDICE DE CUADROS

Tabla 1. Incertidumbre asociada a los instrumentos de medición	28
Tabla 2. Coordenadas de los puntos de medición	28
Tabla 3. Mediciones de la trama, urdimbre y diámetro de las cinco muestras de la malla.	38
Tabla 4. Parámetros de tamaño y calidad de la malla de los modelos CDF.	41
Tabla 5. Consideraciones del modelo numérico	42
Tabla 6. Condiciones iniciales utilizadas en las simulaciones CFD.	43
Tabla 7. Propiedades físicas y ópticas de los materiales empleados en el modelo CFD (TIGAMPO et al., 2020; Villagran et al., 2021).	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Secador solar con convección natural (Garduño-García et al., 2017).	7
Figura 2. Discretización del fluido en 3 dimensiones (Anderson, 1995).....	10
Figura 3. Celdas: unidad fundamental de la malla (Fernandez, 2012).....	12
Figura 4. Estructura de un código CFD (Fernandez, 2012).	12
Figura 5. Tipos de celdas.....	13
Figura 6. Ejemplo de malla estructurada.	14
Figura 7. Ejemplo de malla no estructurada.	15
Figura 8. Secador solar tipo invernadero.	27
Figura 9. Ubicación de los sensores en el SSTI	29
Figura 10. Geometrías empleadas en los modelos CFD.	31
Figura 11. Dimensiones del Dominio Computacional	32
Figura 12. Digitalización de la muestra de la malla.....	36
Figura 13. Mediciones del diámetro del hilo, trama y urdimbre de las cinco muestras de la malla utilizada en las mesas de secado.	37
Figura 14. Discretización del dominio computacional.	40
Figura 15. Espectro de métricas de malla: Asimetría.....	41
Figura 16. Espectro de métricas de malla: Ortogonalidad.	41
Figura 17. Humedad relativa del aire a la altura de las mesas de secado (S1).	45
Figura 18. Humedad relativa del aire en las ventanas de salida (S2).	45
Figura 19. Humedad relativa a la altura de las mesas de secado de los escenarios simulados (13:00 horas).	46
Figura 20. Distribución de la humedad relativa en el interior del SSTI, M1. (a) 8:00, (b) 9:00, (c) 10:00, (d) 11:00, (e) 12:00, (f) 13:00, (g) 14:00, (h) 15:00, (i) 16:00, (j) 17:00, (k) 18:00.....	48
Figura 21. Temperatura a la altura de las mesas de secado (S1).	49
Figura 22. Temperatura del aire ventana de salida (S2).....	49

Figura 23. Temperatura de la cubierta norte (S3).....	50
Figura 24. Temperatura de la cubierta sur (S4)	50
Figura 25. Comparación de la distribución de temperatura entre el termómetro Fluke VT04A y los resultados del modelo CFD.....	51
Figura 26. Distribución de la temperatura en el interior del SSTI. Modelo 1. (a) 8:00, (b) 9:00, (c) 10:00, (d) 11:00, (e) 12:00, (f) 13:00, (g) 14:00, (h) 15:00, (i) 16:00, (j) 17:00, (k) 18:00.....	53
Figura 27. Patrones del flujo del aire en el interior del SSTI, vista frontal (13:00 horas).....	55
Figura 28. Velocidad de aire en el interior del SSTI.....	56

DEDICATORIAS

*Dedico esta tesis:
A mi amada esposa,
a mis padres y hermanas.
GRACIAS.*

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo por la formación integral brindada en estos años de estudio.

Al programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso integral del Agua por permitirme ampliar mis conocimientos en su programa educativo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca recibida para realizar mis estudios de maestría.

Al Dr. Irineo L. López Cruz, por la orientación, disposición, motivación y ayuda que me brindó en cada una de las fases de esta investigación.

Al Dr. Federico Hahn Schlam, por sus valiosos comentarios para la realización de este documento.

Al Dr. Salvador Valle Guadarrama por sus valiosas observaciones realizadas durante el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, a todas aquellas personas, compañeros y amigos por su tiempo y apoyo brindado en aras de cumplir este objetivo.

DATOS BIBLIOGRÁFICOS

Ulises Zacarias Herrera nació en San Miguel, Zautla, Puebla el día 13 de octubre de 1996. En el año 2012 ingresó a la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicada en el municipio de Texcoco, Edo. de México. En el 2015 finaliza sus estudios de nivel medio superior e ingresa a la carrera de Ingeniería Mecánica Agrícola, concluyendo en 2019, mismo año en donde obtuvo la titulación por estancia preprofesional con el tema “Diseño y construcción de un secador solar por convección forzada tipo túnel”.

En 2020 ingresó a la maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua en donde decide enfocarse en la orientación de Biosistemas, con el tema de investigación “simulación de un sistema secador solar tipo invernadero mediante CFD”.

RESUMEN

Simulación de un secador solar tipo invernadero mediante Dinámica de Fluidos Computacional

El diseño de los secadores solares depende de diversos factores, entre otros, las características del producto a deshidratar, las condiciones ambientales del lugar en donde se desea edificar y los materiales de construcción, por lo que realizar ensayos experimentales puede resultar altamente costoso. La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permite el diseño, análisis y optimización de los sistemas de secado solar con el fin de incrementar la calidad del producto y evitar costosos experimentos. El objetivo del estudio fue modelar la distribución espacial de la temperatura, humedad relativa y el flujo del aire en el interior de un secador solar tipo invernadero (SSTI) con convección natural y en condiciones de no-carga mediante un modelo tridimensional de CFD aplicado a tres geometrías diferentes. El modelo se implementó en ANSYS-FLUENT. El SSTI se encuentra ubicado en las instalaciones de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, México. El efecto de la turbulencia se simuló con el modelo $k-\epsilon$ estándar asumiendo un fluido turbulento e incompresible. Para la humedad relativa se utilizó el modelo de transporte de especies, mientras que la radiación solar incidente se implementó con el modelo de radiación de ordenadas discretas. Las ventanas y mesas de secado se consideraron como medios porosos. Para la evaluación del modelo se utilizaron mediciones experimentales durante un día, de 8:00-18:00 horas. La comparación entre los datos experimentales y los resultados de la simulación indicó que el modelo de CFD desarrollado predice adecuadamente la distribución espacial de las variables de interés.

Palabras clave: flujo del aire, humedad relativa, temperatura, modelación numérica.

ABSTRACT

Simulation of a greenhouse solar dryer by Computational Fluid Dynamics

The design of solar dryers depends on several factors, among others, the characteristics of the product to be dehydrated, the environmental conditions of the place where it will be built and the construction materials, therefore, experimental trials can be expensive. Computational Fluid Dynamics (CFD) allows the design, analysis, and optimization of solar drying systems to increase product quality avoiding expensive experiments. The objective of this study was to model the spatial distribution of temperature, relative humidity, and air flow inside a solar greenhouse dryer (SSTI) with natural convection and under no-load conditions with a three-dimensional CFD model applied to three different geometries. The model was developed in ANSYS-FLUENT. The SSTI is located at the Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Mexico. The effect of turbulence was simulated with the standard $k-\epsilon$ model assuming a turbulent, incompressible fluid. To determine the relative humidity, the species transport model was used, while the incident solar radiation was implemented with the discrete ordinate radiation model. Windows and drying tables were treated as porous media. Experimental measurements of one day, from 8:00-18:00 hours, were used to evaluate the model. Comparison between experimental data and simulation results showed that the developed CFD model adequately predicts the spatial distribution of the variables of interest.

Keywords: air flow, relative humidity, temperature, numerical modeling.

1. INTRODUCCIÓN

La FAO (2014) calcula que cada año se pierden y desperdician alrededor de un 40–50% de frutas y hortalizas, las pérdidas están relacionadas a la falta de métodos adecuados de almacenamiento y conservación de estos alimentos (Hernández et al., 2017).

Una de las prácticas más importantes y antiguas para la conservación de productos agrícolas es la deshidratación, este proceso utiliza el secado solar (Essalhi et al., 2017). El método tradicional consiste en la exposición directa de los alimentos al sol, sin embargo, debido a la humedad en el ambiente, muchas veces los alimentos no tienen un correcto deshidratado, y son susceptibles al ataque de microorganismos, insectos y plagas (Espinoza S, 2016; Salvatierra-Rojas et al., 2021), además el contacto con polvo y el nulo control de la temperatura de deshidratado perjudican la calidad del producto. Una solución, es realizar el proceso de secado en sistemas semicerrados, como los secadores solares, los cuales representan una alternativa ante las desventajas del secado tradicional, ya que ahorran tiempo, mejoran la calidad del producto y hacen el proceso más eficiente (Essalhi et al., 2017; VijayaVenkataRaman et al., 2012)

Los sistemas de secado solar se deben diseñar en base a los requisitos especiales de deshidratado de cada producto alimenticio (Valera et al., 2006a), sin embargo, esto puede resultar altamente costoso, debido a la variedad de productos y climas existentes, por lo tanto, para optimizar un sistema de secado se necesitan modelos de simulación que permitan predecir su comportamiento bajo determinadas condiciones de temperatura, humedad y la velocidad del aire de secado (Valera et al., 2006a). (Ghaffari & Mehdipour, 2015) proponen clasificar los modelos para analizar los sistemas de secado solar en tres grupos. El primero son los modelos termodinámicos, en el que se utilizan ecuaciones diferenciales semi-empíricas que alcanzan buena precisión, el segundo es el método de resolución de ecuaciones diferenciales parciales, en este método las ecuaciones gobernantes se resuelven mediante métodos numéricos de dinámica

de fluidos computacional (CFD) y el tercero es el método estadístico, este se usa principalmente para derivar las mejores ecuaciones basadas en una serie de datos experimentales.

Recientemente la dinámica de fluidos computacional ha sido utilizada para analizar cambios en el diseño y los parámetros de funcionamiento y estudiar su efecto en la eficiencia del secador tipo invernadero (Ravi et al., 2018). El modelado CFD es la mejor opción para obtener los detalles espaciales y temporales del flujo de aire, la humedad relativa y la temperatura del secador solar (Getahun et al., 2021), sin embargo, es una técnica que se ha usado solo en forma incipiente en la modelación de secadores solares tipo invernadero de convección natural, por lo tanto, existe un gran potencial para futuras investigaciones como una herramienta muy importante que puede contribuir a la generación de un diseño óptimo de secadores solares (Garduño-García et al., 2017).

1.1 Objetivo general

- Modelar mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) un secador solar tipo invernadero para conocer la distribución espacial y temporal de la humedad relativa, temperatura y patrones del flujo del aire.

1.2 Objetivos particulares

- Realizar un sistema de monitoreo y obtener mediciones de las principales variables que afectan el proceso de secado; temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar dentro de un secador solar tipo invernadero.
- Determinar mediante mediciones microscópicas la porosidad de la malla utilizada en las mesas de un secador solar tipo invernadero.
- Generar y evaluar un modelo mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) del sistema secador solar tipo invernadero en condiciones de no carga.

1.3 Literatura citada

- Espinoza S, J. (2016). Innovación en el deshidratado solar. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 24(Especial), 72–80. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000500010>
- Essalhi, H., Tadili, R., & Bargach, M. . (2017). Conception of a Solar Air Collector for an Indirect Solar Dryer. Pear Drying Test. *Energy Procedia*, 141, 29–33. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.114>
- FAO. (2014). *Iniciativa mundial sobre la reducción de la pérdida y el desperdicio de alimentos ¿ Qué son las alimentos ?* <https://www.fao.org/3/i4068s/i4068s.pdf>
- Garduño-García, Á., López-Cruz, I. L., & Ruiz-García, A. (2017). Mathematical modeling of greenhouse solar dryers with natural and forced convection for agricultural products: state of the art. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 9(1), 19–36. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.02.004>
- Getahun, E., Delele, M. A., Gabbiye, N., Fanta, S. W., Demissie, P., & Vanierschot, M. (2021). Importance of integrated CFD and product quality modeling of solar dryers for fruits and vegetables: A review. *Solar Energy*, 220(November 2020), 88–110. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.03.049>
- Ghaffari, A., & Mehdipour, R. (2015). Modeling and Improving the Performance of Cabinet Solar Dryer Using Computational Fluid Dynamics. *International Journal of Food Engineering*, 11(2), 157–172. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0266>
- Hernández, J., Quinto, P., Barbosa, G. R., & Aguilar, J. O. (2017). Secado solar de frutas y verduras en Quintana Roo , México. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 18(1), 1–8. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852017000300015&lng=es&tlng=es.
- Ravi, S., Gupta, V., & Pradeep, K. (2018). A Review on Computational Fluid Dynamics Analysis on Greenhouse Dryer. *International Journal of Scientific Research and Reviews*, 7(3), 1098–1105. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/312/1/012033>
- Salvatierra-Rojas, A., Ramaj, I., Romuli, S., & Müller, J. (2021). CFD-Simulink Modeling of the Inflatable Solar Dryer for Drying Paddy Rice. *Applied Sciences*, 11(7), 3118. <https://doi.org/10.3390/app11073118>
- Valera, D. L., Álvarez, A. J., & Molina, F. D. (2006). Aerodynamic analysis of several insect-proof screens used in greenhouses. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 4(4), 273. <https://doi.org/10.5424/sjar/2006044-204>
- VijayaVenkataRaman, S., Iniyar, S., & Goic, R. (2012). A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2652–2670. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.007>

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia del secado solar

El secado es una técnica de conservación de productos agrícolas, su finalidad es incrementar la vida de almacenamiento de los cultivos cosechados preservando su valor nutricionales y propiedades físicas y químicas (Singh et al., 2021; Srinivasan & Muthukumar, 2021). Desde la antigüedad se practicaba el secado al aire libre de granos, frutas y verduras, carne y pescado con el propósito de almacenarlos para épocas de escases. Sin embargo, este proceso presenta una serie de desventajas, como lo son: la nula protección contra condiciones ambientales poco favorables (lluvia, polvo y viento), el ataque de microorganismo, insectos y plagas, lo que provoca una deficiente calidad del producto final, además de requerir un área extensa para ubicar el alimento a deshidratar (Prakash & Kumar, 2013). La mejora de la calidad del producto y la reducción de las perdidas solo pueden lograrse mediante la introducción de tecnologías de secado adecuadas, como los secadores solares (Janjai & Bala, 2012). Esta tecnología ofrece una alternativa para procesar los productos agrícolas en condiciones higiénicas y sanitarias de acuerdo con normas nacionales e internacionales, ahorra tiempo, superficie de secado y hace el proceso más eficiente, con un gasto energético mínimo y con un menor impacto ambiental (Sharma et al., 2009).

2.2 Clasificación de los secadores solares

Los secadores solares se categorizan en pasivos (circulación natural del aire) y activos (circulación forzada del aire), los cuales se clasifican en directos, indirectos, mixtos e híbridos (Figura 1) (Singh et al., 2021). En el secador solar de tipo directo la radiación solar atraviesa una cubierta transparente e incide directamente sobre el producto, el cual está colocado generalmente en charolas o mesas (Srinivasan & Muthukumar, 2021). Por el contrario, en los secadores de tipo indirecto el producto no está expuesto directamente a la radiación. El sistema consiste en un colector solar independiente con una cubierta transparente y una

cámara de secado con cubierta opaca conectados en serie (Janjai & Bala, 2012). Los sistemas híbridos incorporan distintas fuentes de energía para calentar el aire de secado, emplean la energía solar con sistemas de calefacción adicionales, eléctricos o basados en combustibles fósiles, para suministrar la energía requerida para el funcionamiento de ventiladores e instalaciones térmicas (Srinivasan & Muthukumar, 2021).

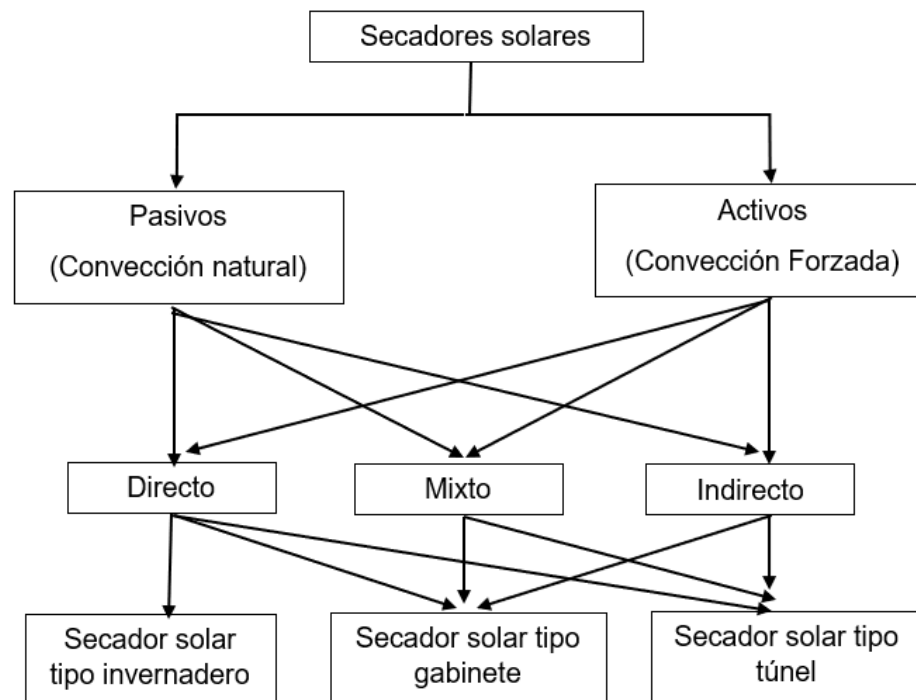


Figura 1. Clasificación de los sistemas de secado (Sharma et al. 2009).

2.3 Principio de funcionamiento del secador solar tipo invernadero (SSTI)

El producto para deshidratar se distribuye en forma de capa delgada sobre mesas o charolas recibiendo la radiación solar que atraviesa la cubierta de plástico, mientras que la humedad es eliminada por convección natural o convección forzada (Sahdev, 2014). De la radiación total que incide sobre la cubierta transparente del secador una porción se refleja a la atmosfera y el resto se transmite al interior de la cámara de secado (Garduño-García et al., 2017). La cubierta plástica produce un efecto invernadero que retiene la energía solar en forma de calor térmico dentro del volumen de la estructura, esencialmente la

cubierta de plástico actúa como una superficie opaca a la radiación emitida por el producto a deshidratar (radiación de onda larga) y reduce las pérdidas de calor por convección. La fracción de energía retenida es absorbida por el producto (biomasa), el piso del secador y la superficie expuesta de las mesas de secado. La cantidad restante de radiación solar incrementa la temperatura del aire en el interior de la estructura (Jain & Tiwari, 2004). La diferencia de temperaturas entre el aire del secador y el aire ambiente produce una corriente natural de aire. La tasa de evaporación de la humedad depende de la diferencia de presión entre el producto a deshidratar y el aire del secador (Jain & Tiwari, 2004). El principio de funcionamiento del secador solar tipo invernadero se muestra en la Figura 1.

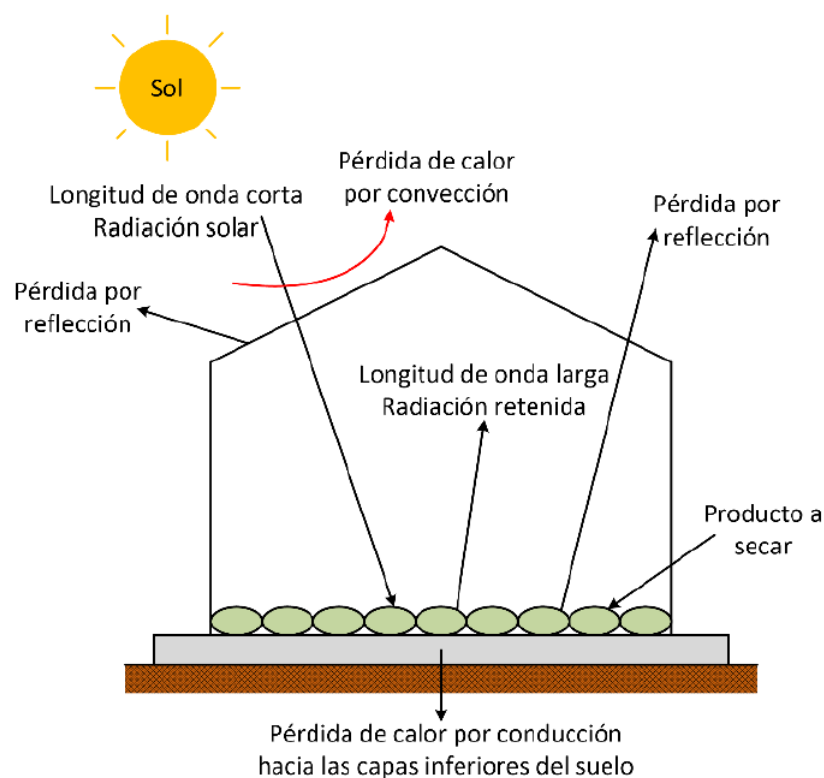


Figura 1. Secador solar con convección natural (Garduño-García et al., 2017).

2.4 Simulación y modelación de los sistemas de secado solar

Ghaffari y Mehdipour (2015) proponen clasificar los modelos y el análisis de los sistemas de secado en cuatro grupos: modelos termodinámicos, modelos

basados en ecuaciones diferenciales parciales, modelos estadísticos y método de ingeniería de reacción.

- 1) Modelado termodinámico: Este método resuelve una ecuación de estado para cada zona del secador (cubierta, piso, producto), siendo posible determinar la temperatura, la humedad y la velocidad. Los principales supuestos del este tipo de modelos son: (a) el flujo de aire es unidireccional y no hay estratificación en el interior del secador, (b) se utilizan modelos de capa delgada para el cálculo del secado, (c) las propiedades de los materiales, como el calor específico, se mantienen constantes, (d) no existe estratificación de la temperatura dentro del sistema de secado. Este método es rápido y se pueden obtener resultados precisos al utilizar ecuaciones semi-empíricas, sin embargo, se descuidan los efectos de diferentes parámetros como la complejidad de la geometría (Jain & Tiwari, 2004; A. Kumar et al., 2006).
- 2) Modelos basados en ecuaciones diferenciales parciales. En este método las ecuaciones de gobierno se resuelven utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), obteniendo de manera detallada la distribución espacial y temporal de los perfiles de temperatura, velocidad y humedad en el volumen del sistema de secado. Con este método es posible considerar geometrías complejas, con la limitante del tiempo de cálculo.
- 3) Modelos estadísticos. Con este método las ecuaciones se derivan de una serie de datos experimentales. Utilizando métodos estadístico y criterios como la raíz del error cuadrado medio (RMSE), el chi-cuadrado reducido y el coeficiente de determinación, es posible establecer la ecuación que describa al sistema de mejor manera.
- 4) Enfoque de ingeniería de reacción (REA). El enfoque REA es un modelo semi-empírico propuesto por primera vez en 1996 para describir la tasa de secado global. Este modelo ofrece la ventaja de ser expresado en términos de una ecuación diferencial ordinaria con respecto al tiempo. Lo que anula las complicaciones que surgen del uso de la ecuación diferencial parcial (Chen Dong & Putranto, 2015). El método REA ha demostrado ser una forma sencilla, precisa y robusta de modelar el secado por convección de materiales

comestibles y no comestibles en condiciones ambientales constantes (Prakash & Kumar, 2014).

2.5 Dinámica de fluidos computacional

La dinámica de fluidos computacional es una técnica numérica para la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes, un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales, que representan matemáticamente el movimiento de un fluido. Estas ecuaciones son capaces de predecir el movimiento a partir de su estado inicial (Mora, 2017). Las ecuaciones de Navier-Stokes se basan en tres principios físicos fundamentales: la conservación de masa, la segunda ley de Newton y la conservación de la energía (Anderson, 1995). Su deducción es típicamente explicada a través de un balance de masa y energía sobre un volumen de control. La Ecuación (1) representa la forma conservativa de la ecuación general de conservación (Anderson, 1995).

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{temporal}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \vec{v} \phi)}_{\text{convectivo}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi)}_{\text{difusivo}} + \underbrace{S}_{\text{fuente}} \quad (1)$$

Donde ϕ representa una variable independiente, tal como, velocidad, masa o temperatura, describiendo las características del flujo en una ubicación puntual, en un espacio tridimensional, en un determinado tiempo, por lo que $\phi = \phi(x, y, z, t)$ (Figura 2).

La ecuación de conservación está compuesta por cuatro términos (Fernandez, 2012):

- 1) Término temporal, que representa la variación local con respecto al tiempo en el interior del volumen de control; es decir, el incremento o disminución de ϕ .
- 2) Término convectivo, que representa el transporte de la variable de un punto a otro del dominio por medio de la velocidad del fluido.

- 3) Término difusivo, que se corresponde con alguno de los fenómenos de transporte que ocurren a nivel molecular: la ley de Fourier para la difusión de calor, la ley de Fick para la difusión de la masa o la ley de Newton para la difusión de cantidad de movimiento por efectos viscosos.
- 4) Término fuente, para tener en cuenta fuentes de generación o destrucción de la variable transportada.

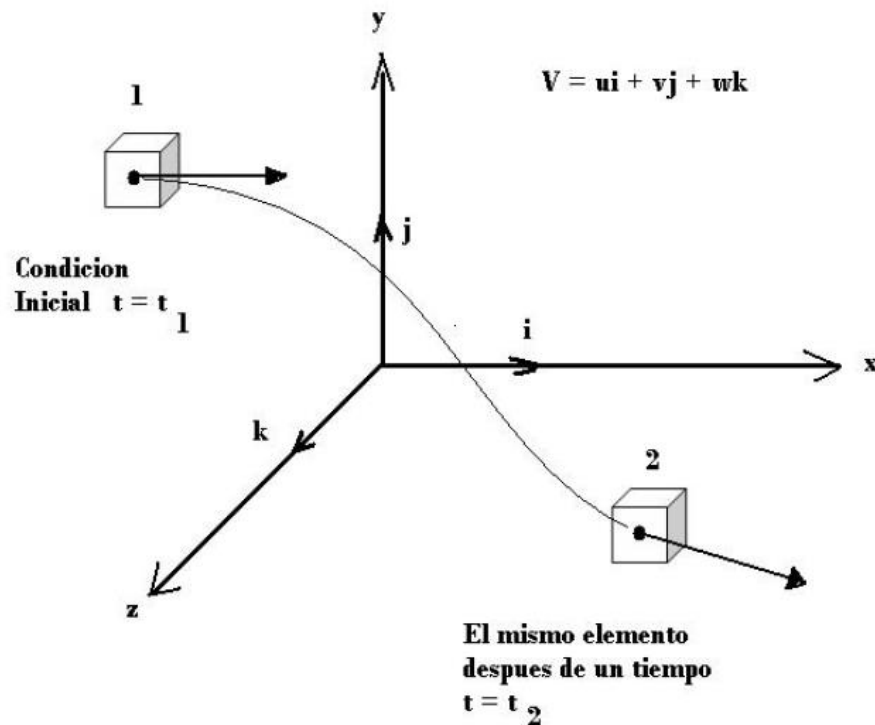


Figura 2. Discretización del fluido en 3 dimensiones (Anderson, 1995).

La deducción diferencial de las ecuaciones de Navier-Stokes es la que permite una aplicación práctica por medio de ecuaciones en derivadas parciales no lineales, las cuales adoptan la siguiente forma:

Ecuación de continuidad:

Para $\phi = 1$

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

Ecuación de momento:

Para $\phi = u_i$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \rho g_i \quad (3)$$

Ecuación de energía:

Si $\phi = h$ (entalpía)

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial P}{\partial T} + u_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (4)$$

Donde u_i es el componente de la velocidad en la dirección- i (m s^{-1}), x_i indica el flujo en la dirección- i , ρ es la densidad del fluido (kg m^{-3}), P es la presión (Pa), g_i es cualquier campo de aceleración, en este caso la aceleración de la gravedad en la dirección i (m s^{-2}), h representa la entalpía del fluido (J kg^{-1}), k es el coeficiente de conductividad del aire ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$), T es la temperatura absoluta del fluido ($^{\circ}\text{K}$), y μ es la viscosidad molecular del fluido ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \text{m}^{-1}$).

Los programas comerciales utilizan principalmente el método de volumen finito para resolver numéricamente las ecuaciones de gobierno. Este método es una técnica numérica que transforma las ecuaciones diferenciales parciales que representan las leyes de conservación sobre volúmenes diferenciales en ecuaciones algebraicas discretas sobre volúmenes finitos (elementos o celdas) (Moukalled et al., 2019). La solución numérica de una ecuación diferencial parcial consiste en encontrar los valores de la variable dependiente en puntos específicos, generalmente denominados celdas, elementos o nodos de la malla

a partir de los cuales es posible conocer su distribución sobre el dominio de interés (Figura 3) (Moukalled et al., 2019). En general, los códigos CFD presentan una estructura compuesta por un módulo de pre-proceso, un módulo de proceso (solver) y un módulo de post-proceso (Figura 4).

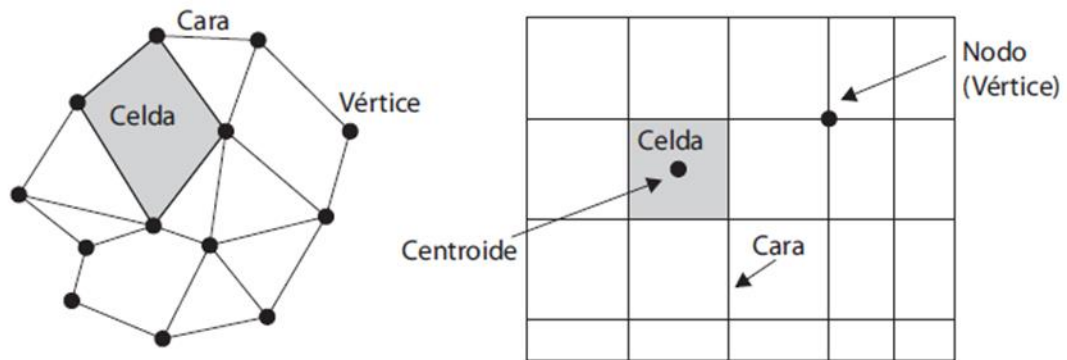


Figura 3. Celdas: unidad fundamental de la malla (Fernandez, 2012).

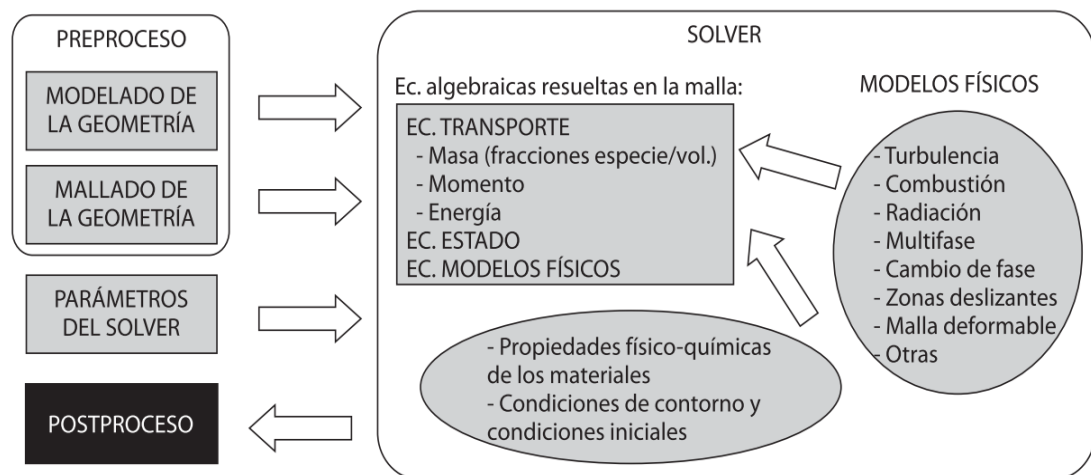


Figura 4. Estructura de un código CFD (Fernandez, 2012).

2.5.1 Pre-proceso

Esta fase abarca los siguientes puntos:

1. Definición de la geometría empleada en el modelo, el dominio computacional.

2. **Generación de la malla y evaluación su calidad.** La transformación de las ecuaciones diferenciales en un conjunto de ecuaciones algebraicas requiere de una discretización espacial. Por lo que es necesario la generación de una malla que permita dividir el dominio de interés en una serie de celdas a las cuales se les asocia el valor de la variable discreta ϕ , para después resolver el sistema de ecuaciones algebraicas y calcular los valores de la variable dependiente para cada uno de los elementos (Fernandez, 2012).

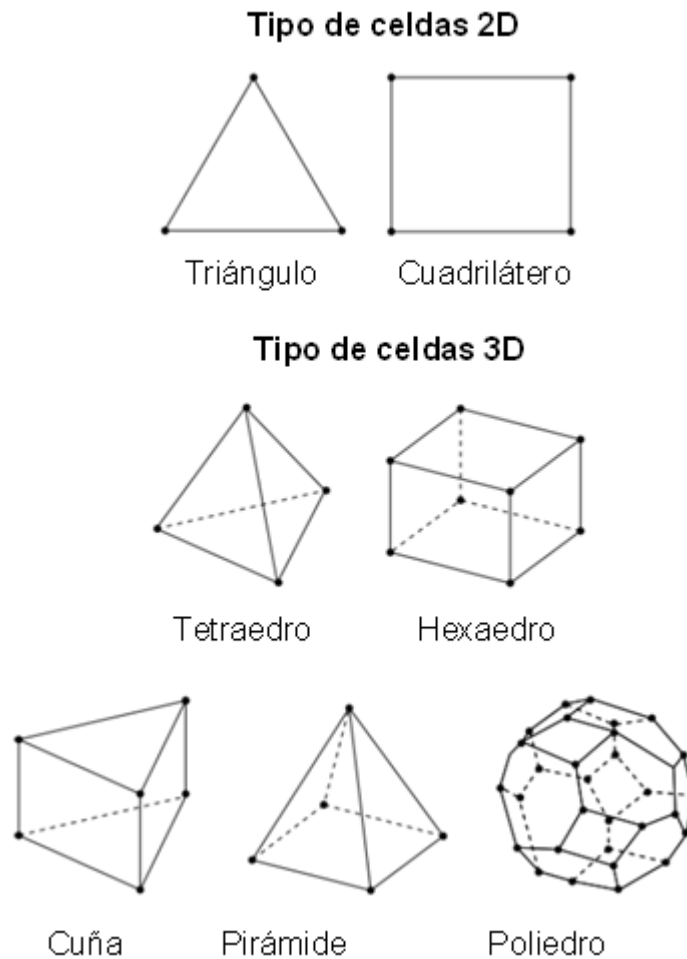


Figura 5. Tipos de celdas.

Ninguna simulación mediante dinámica de fluidos computacional se puede realizar sin la definición previa de una malla con estándares de calidad apropiados, la precisión y estabilidad del cálculo numérico están estrechamente

relacionados a la calidad de la malla empleada, por lo que este proceso se considera una parte fundamental en la preparación de un modelo mediante CFD (Fernandez, 2012).

Actualmente existe una amplia variedad de tipos de malla, las cuales se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de celdas en malla estructuradas y mallas no estructuradas (Figura 5) (García et al., 2009).

Malla estructurada

Según Moraes (2013), una malla estructurada (Figura 6) presenta las siguientes características:

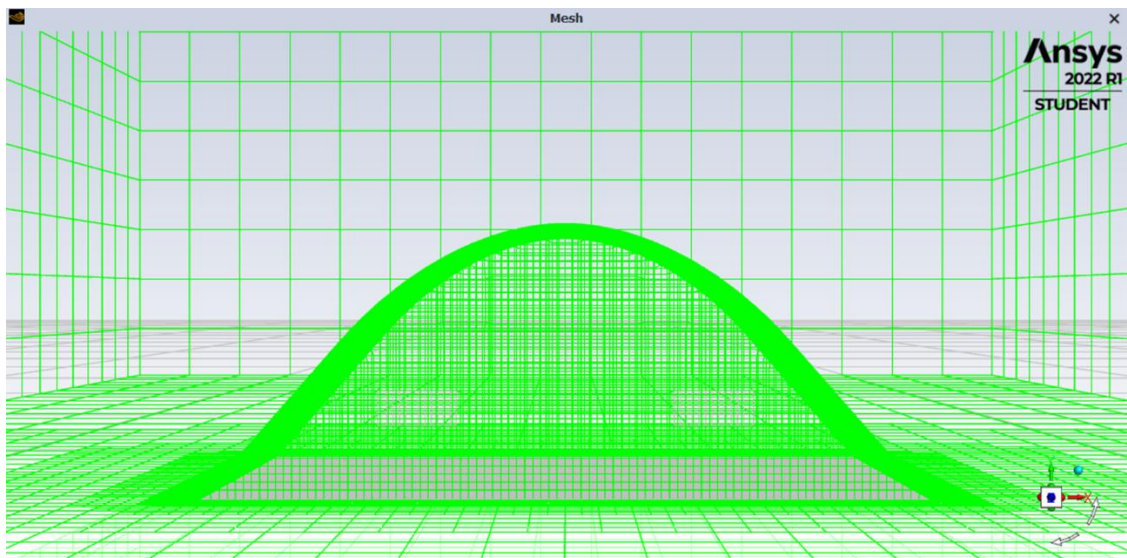


Figura 6. Ejemplo de malla estructurada.

- a) Cualquiera de sus elementos tiene el mismo número de celdas colindantes. Cada nodo P de la malla tiene cuatro vecinos en 2D y seis vecinos en 3D.
- b) Cada nodo de malla se identifica de forma única por los índices i, j, k en un sistema cartesiano.

Este tipo de mallas presentan una serie de ventajas, entre las que destacan:

- a) Las métricas de calidad de las mallas estructuradas suelen ser mejores comparadas con las mallas no estructuradas, cuando se tiene una correcta distribución.
- b) Permite una mallado regular en todas las direcciones de la geometría y disminuir el número de celdas en comparación con una malla no estructurada.

Malla no estructurada

Las mallas no estructuradas (Figura 7) se caracterizan por lo siguiente (Samel et al., 2013): a) el número de vecinos depende del tipo geométrico de la celda, b) los nodos y celdas de malla no pueden identificarse directamente por sus índices, ya que no tienen un orden en particular, c) en general las métricas de calidad de la malla son menores comparadas con las mallas estructuradas.

La principal ventaja de las mallas no estructuradas radica en la generación automática de los elementos de la malla, cuadriláteros y triángulos (2D) o tetraedros y hexaedros (3D), independientemente de la complejidad del dominio, ofreciendo una gran flexibilidad en el modelado de geometrías complejas.

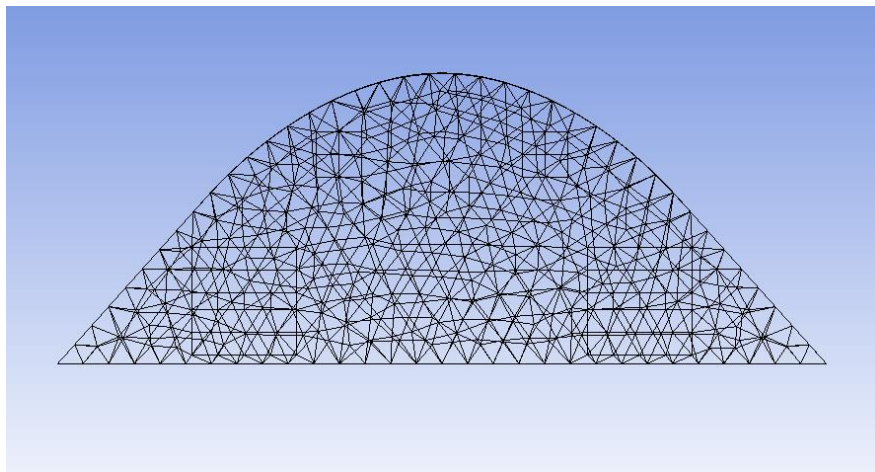


Figura 7. Ejemplo de malla no estructurada.

3. **Identificación de los fenómenos (procesos) físicos y químicos que pretende modelarse.**
4. **Definición de las propiedades del fluido.**
5. **Identificación de las condiciones iniciales y de frontera del problema.**

Modelos de turbulencia

La turbulencia es un estado caótico e irregular del movimiento de un fluido, en el que la velocidad y la presión oscilan instantáneamente a lo largo del tiempo (Fernandez, 2012). En la industria del secado de alimentos los flujos suelen ser de naturaleza turbulenta, ya que la geometría compleja de la cámara de secado no permite flujos laminares (Angula & Inambao, 2019). La solución numérica para flujos turbulentos puede abordarse en función del número de escalas de turbulencia que se desea resolver en la simulación, proporcionando así descripciones del flujo con mayor o menor detalle.

En el secado de productos agrícolas se distinguen dos grupos diferentes de modelos de turbulencia de acuerdo con las ecuaciones de gobierno que utilizan (Malekjani & Jafari, 2018): la simulación LES (simulación de vórtices grandes) que permite resolver solo los torbellinos que transportan entre el 50 y el 80% de toda la energía cinética turbulenta; la simulación RANS (ecuación de Navier-Stokes promediadas por Reynolds) en las que mediante el uso de modelos de turbulencia se modelizan todas las escalas (Fernandez, 2012).

- Los modelos de turbulencia RAN más utilizados son:
- Estándar $k - \epsilon$ (k representa la energía cinética de la turbulencia y ϵ la tasa de disipación de la turbulencia).
- RNG $k - \epsilon$
- Realizable $k - \epsilon$ (k representa la energía cinética de la turbulencia y ω la tasa de disipación específica de la energía cinética).
- Modelo $k - \omega$
- Modelo Reynolds Stress (RSM)

Para flujos turbulentos, el modelo estándar $k - \epsilon$ es el más empleado, ya que presenta un mejor convergencia (Anandharamakrishnan, 2013).

Hipótesis de Boussinesq

En flujos con transferencia de calor, las propiedades del fluido están normalmente en función de la temperatura. Esto implica un fuerte acoplamiento entre la ecuación de la energía y los coeficientes de la ecuación de momento (en los que participa la densidad).

Para evitar esta complejidad es posible introducir la hipótesis de Boussinesq. Este modelo es un método popular para resolver el flujo no isotérmico, pues disminuye el costo computacional, garantiza una mayor convergencia que el planteamiento inicial y reduce la no linealidad del problema. La hipótesis de Boussinesq es precisa cuando las variaciones de densidad son pequeñas, supone que la densidad es constante en todas las ecuaciones, pero introduce un término fuente adicional de flotabilidad en las ecuaciones de momento. El término de flotabilidad (*bouyancy*) se define como:

$$B = (\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\beta(T - T_0)g \quad (5)$$

Donde T_0 es la temperatura de referencia, β es el coeficiente de expansión volumétrica.

La condición de Porous jump

El flujo de aire a través de un medio poroso (mallas de ventanas y mesas de secado) puede ser descrito por la ecuación de Forchheimer (Valera et al., 2005, 2006b):

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\mu}{K}u + \rho \left(\frac{Y}{K^{1/2}} \right) |u|u \quad (6)$$

Donde P , es la presión $[Pa]$, x , es el espesor del material poroso $[m^2]$, μ es la viscosidad dinámica del fluido $[Kg\ m^{-1}\ s^{-1}]$, K es la permeabilidad del medio $[m^2]$, Y es el factor inercial (adimensional), ρ es la densidad del aire $[Kg\ m^{-3}]$ y u es la velocidad del aire $m\ s^{-1}$.

La condición de “Porous Jump” permite modelar una “membrana” delgada que tiene características de velocidad conocidas. El medio poroso delgado tiene un grosor finito sobre el cual el cambio de presión está definido como una combinación de la ley de Darcy y un término adicional de pérdida de inercia, Ecuación (7).

$$\Delta p = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v + C_2 \frac{1}{2} \rho v^2 \right) \Delta m \quad (7)$$

Donde μ es la viscosidad del fluido laminar, α es la permeabilidad del medio, C_2 es el coeficiente de pérdida inercial, v es la velocidad normal a la superficie porosa y Δm es el espesor del medio.

2.5.2 Proceso

La segunda fase consiste en la implementación del modelo numérico, así como su ejecución y el monitoreo del proceso de iteración. Con base en la calidad de la malla y los modelos a resolver esta fase puede durar desde minutos hasta semanas (incluso meses) de cálculos en tiempo real (Fernandez, 2012).

Existen tres métodos distintos de soluciones numéricas: métodos de diferencias finitas, método de elemento finito y método de volumen finito. En resumen, los métodos numéricos que forman la base de proceso (solver) realiza los siguientes pasos (Ambesange & Kusekar, 2017):

1. La aproximación de variables de flujo desconocidas se realiza mediante funciones simples.
2. Discretización por sustitución de la aproximación en las ecuaciones de flujo que rigen y manipulaciones matemáticas posteriores.

Algoritmos de acoplamiento presión-velocidad

ANSYS FLUENT proporciona cuatro algoritmos de acoplamiento presión-velocidad que permiten resolver el problema de flujo de una manera segregada o acoplada: SIMPLE, SIMPLEC, PISO, Coupled. Los esquemas anteriores, excepto el esquema “acoplado”, se basan en el enfoque predicción-corrección (Fluent, 2013). Los cálculos en estado estacionario generalmente utilizan los algoritmos SIMPLE o SIMPLEC, mientras que PISO se recomienda para cálculos transitorios (D. Kumar & Nagendra, 2017).

SIMPLE

El algoritmo SIMPLE es esencialmente un procedimiento de suposición y corrección para el cálculo de la presión (Versteeg & Malalasekera, 2007). Es un algoritmo relativamente sencillo que funciona en un gran número de modelos en CFD. Resuelve una ecuación para la corrección de presión para obtener la solución de las ecuaciones de flujo, forzando a que las velocidades corregidas satisfagan la continuidad (Fernandez, 2012).

SIMPLEC

El algoritmo SIMPLEC (SIMPLE-Consistente) es una versión modificada del algoritmo SIMPLE. La única diferencia se encuentra en la expresión empleada para la corrección del flujo en las caras de la celda. Al utilizar esta ecuación de corrección modificada el proceso de convergencia se acelera, principalmente en los problemas en los que el acoplamiento presión-velocidad es el mayor impedimento para obtener una solución (Fluent, 2013).

PISO

Este algoritmo realiza el cálculo de los campos de presión y velocidad mediante un paso de predicción y dos pasos de corrección: la corrección en las celdas vecinas y la corrección de asimetría, por lo que resulta ser una extensión mejorada del algoritmo SIMPLE integrando un paso corrector adicional. (Fernandez, 2012).

Los algoritmos SIMPLE y SIMPLEC presentan la limitación de que las nuevas velocidades y flujos correspondientes no satisfagan el equilibrio de momento después de resolver la ecuación de corrección para la presión. En consecuencia, el cálculo debe repetirse hasta obtener el equilibrio. Por ello, el algoritmo PISO integra un paso corrector adicional, con la finalidad de mejorar la eficiencia del cálculo.

COUPLED

A diferencia del método segregado, el método de solución acoplado resuelve un conjunto de ecuaciones de acoplamiento de momento y la ecuación de continuidad basada en presión, por lo que no se resuelve la ecuación de corrección. La implementación del enfoque acoplado tiene algunas ventajas sobre el enfoque segregado. Presenta una implementación monofásica robusta y eficiente para flujos en estado estacionario, con un rendimiento superior al de los esquemas no acoplados y debido a que resuelve conjuntamente las ecuaciones de continuidad basadas en el momento y la presión, la velocidad de convergencia del problema es mayor (Fluent, 2013). En flujos turbulentos, la utilización del algoritmo acoplado es necesario cuando se presenta una baja calidad de la malla.

2.5.3 Postproceso.

El post-proceso requiere, al igual que la fase de proceso, un conocimiento físico del fenómeno a modelar, exigiendo al usuario una capacidad de análisis al momento de revisar e interpretar los resultados simulados. Recientemente se ha realizado una gran cantidad de trabajo de desarrollo en la fase de post-proceso debido al desarrollo de equipos de cómputo con excelentes capacidades gráficas (Workstation), los módulos están equipados con herramientas versátiles de visualización de datos (Ambesange & Kusekar, 2017).

Los resultados gráficos pueden ser manipulados para mostrar desde vectores indicando la dirección del flujo en 2D o 3D hasta contornos que indiquen la

distribución espacial y temporal de alguna variable de interés. Incluso es posible obtener animaciones que permitan conocer la dinámica de estas variables.

2.6 Aplicación de la dinámica de fluidos computacional en el modelado de los sistemas de secado solar.

En los últimos años la dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha utilizado en la modelación de los sistemas de secado solar de efecto invernadero para predecir el comportamiento del secado de productos agrícolas. Mediante la herramienta de CFD es posible predecir la distribución espacial y temporal de la temperatura y humedad relativa del aire en el interior del secador solar, la temperatura del producto, el patrón del flujo de aire y su movimiento en la cámara de secado, a través de modelos 2-D y 3-D. La modelación de geometrías complejas utilizando CFD permite el ahorro de tiempo y costos al evitar investigaciones experimentales (Srinivasan & Muthukumar, 2021).

Gupta et al. (2018) realizaron el análisis de un secador solar tipo directo utilizando dinámica de fluidos computacional. Los datos experimentales previos se utilizaron como condición de frontera para la simulación. Estudiaron la distribución de la temperatura y el patrón de flujo de aire y concluyeron que los resultados del modelo permiten comprender los parámetros locales que no se pueden percibir experimentalmente. El estudio permitió concluir que la modelación CFD es una herramienta ágil y precisa que permite evaluar prototipos que no se han construido a escala real. Sanghi et al. (2018) desarrollaron un modelo CFD para simular el proceso de secado de maíz en un secador solar tipo gabinete. El rendimiento del secador fue simulado en condiciones meteorológicas despejadas y nubladas. Se visualizaron los perfiles de temperatura, humedad y velocidad del aire en el secador. Los resultados del modelo numérico fueron evaluados con datos experimentales. Por otra parte, TIGAMPO et al. (2020) utilizaron el enfoque de la dinámica de fluidos computacional para conocer la distribución de la temperatura y la velocidad del viento en un secador tipo parabólico. Emplearon el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ y el modelo de radiación

de ordenadas discretas. La temperatura y velocidad del aire simuladas fueron de 325.95 °K y 0.114 m·s⁻¹ respectivamente.

Villagran, Henao-Rojas y Franco (2021) emplearon un modelo CFD previamente evaluado para estudiar el comportamiento de los patrones de flujo de aire, temperatura y humedad en el interior de cuatro secadores tipo invernadero, los resultados indicaron que la distribución espacial de la temperatura y humedad están relacionados con los flujos de aire. (Román-Roldán et al., 2021), analizaron la distribución y velocidad del flujo de aire, así como la temperatura en un secador tipo mixto mediante un modelo 3D en ANSYS FLUENT, realizaron diferentes configuraciones de simulación con el fin de lograr una distribución homogénea del aire. Los resultados mostraron que la instalación de un sistema de circulación de aire supone una reducción del tiempo de secado.

Se observa que la implementación de la dinámica de fluidos computacional en la modelación de sistemas de secado se enfoca principalmente en la predecir la distribución de la temperatura, patrones y velocidad de flujo de aire, parámetros necesarios para un diseño preciso de un secador solar (Srinivasan & Muthukumar, 2021).

Recientemente se han realizado simulaciones con CFD para predecir el comportamiento del secado de productos agrícolas. Tekasakul et al. (2015) estudiaron los efectos de la transferencia de calor y humedad en el secado de láminas de caucho utilizando un modelo tridimensional de dinámica de fluidos computacional. La desviación máxima entre las temperatura experimental y simulada fue de 7.7 °C. La relación entre los resultados experimentales y los simulados fue aceptable.

2.7 Literatura citada

- Ambesange, A. I., & Kusekar, P. (2017). Analysis of Flow Through Solar Dryer Duct Using CFD 1. © 2017 *Ijedr* |, 5(1), 534–552. www.ijedr.org
- Anandharamakrishnan, C. (2013). *Computational Fluid Dynamics Applications in Food Processing*. Springer.
- Anderson, J. (1995). *Computational Fluid Dynamics. THE BASICS WITH APPLICATIONS*. McGraw-Hill.
- Angula, J. P., & Inambao, F. (2019). Computational Fluid Dynamics in Solar Drying. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 10(11), 259–274.
- Chen Dong, X., & Putranto, A. (2015). Reaction Engineering Approach (REA) to Modeling Drying Problems: Recent Development and Implementations. *Drying Technology*, 33(15–16), 1899–1910. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1069326>
- Fernandez, J. M. (2012). Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos. Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos. *Reverté*. S.A.
- Fluent, A. (2013). *MAN - ANSYS Fluent User' s Guide Release 15.0*. ANSYS, Inc., November, 2692.
- García, F., Palacio, C., & García, U. (2009). Unstructured mesh generation for numeric models implementation. *DYNA (Colombia)*, 76(157), 17–25.
- Garduño-García, Á., López-Cruz, I. L., & Ruiz-García, A. (2017). Mathematical modeling of greenhouse solar dryers with natural and forced convection for agricultural products: state of the art. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 9(1), 19–36. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.02.004>
- Ghaffari, A., & Mehdipour, R. (2015). Modeling and Improving the Performance of Cabinet Solar Dryer Using Computational Fluid Dynamics. *International Journal of Food Engineering*, 11(2), 157–172. <https://doi.org/10.1515/ijfe-2014-0266>
- Gupta, V., Sharma, A., & Gupta, K. S. (2018). NUMERICAL ANALYSIS OF DIRECT TYPE GREENHOUSE DRYER. *ASME 2017 Gas Turbine India Conference GTINDIA2017*, 1–6.
- Jain, D., & Tiwari, G. N. (2004). Effect of greenhouse on crop drying under natural and forced convection II. Thermal modeling and experimental validation. *Energy Conversion and Management*, 45, 2777–2793. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890403003698>
- Janjai, S., & Bala, B. K. (2012). Solar Drying Technology. *Food Engineering Reviews*, 4(1), 16–54. <https://doi.org/10.1007/s12393-011-9044-6>

- Kumar, A., . G. N. T., . S. K., & . M. P. (2006). Role of Greenhouse Technology in Agricultural Engineering. *International Journal of Agricultural Research*, 1(4), 364–372. <https://doi.org/10.3923/ijar.2006.364.372>
- Kumar, D., & Nagendra, C. S. (2017). CFD Analysis of Natural Convection Flow through Inclined Pipe. *International Journal Of Modern Engineering Research (IJMER)*, 7(6), 10–13.
- Malekjani, N., & Jafari, S. M. (2018). Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 206–223. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.06.006>
- Mora, X. (2017). LAS ECUACIONES DE NAVIER-STOKES ¿IMPREDICTIBILIDAD INCLUSO SIN MARIPOSAS? *Métode Science Studies Journal*, 093(8), 67–73. <https://doi.org/10.7203/metode.8.9415>
- Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2019). *The Finite Volume Method in Computacional Fluid Dynamics An Advanced Introducción with OpenFOAM and Matlab* (Vol. 113). <http://www.springer.com/series/5980>
- Prakash, O., & Kumar, A. (2013). Historical Review and Recent Trends in Solar Drying Systems. *International Journal of Green Energy*, 10(7), 690–738. <https://doi.org/10.1080/15435075.2012.727113>
- Prakash, O., & Kumar, A. (2014). Solar greenhouse drying: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 905–910. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.084>
- Román-Roldán, N. I., Ituna Yudonago, J. F., López-Ortiz, A., Rodríguez-Ramírez, J., & Sandoval-Torres, S. (2021). A new air recirculation system for homogeneous solar drying: Computational fluid dynamics approach. *Renewable Energy*, 179, 1727–1741. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.134>
- Sahdev, R. K. (2014). Open Sun and Greenhouse Drying of Agricultural and Food Products: A Review. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3(3), 1053–1066. <https://doi.org/10.17577/IJERTV3IS030902>
- Samel, A., da Cuna, P., Coelho, G., & Lopes, L. (2013). ANALYSIS OF THE NON-ORTHOGONALITY CORRECTION OF FINITE VOLUME DISCRETIZATION ON UNSTRUCTURED MESHES. *22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)*, Cobem, 3519–3530. <https://www.researchgate.net/publication/263972969>
- Sanghi, A., Ambrose, R. P. K., & Maier, D. (2018). CFD simulation of corn drying in a natural convection solar dryer. *Drying Technology*, 36(7), 859–870. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1359622>
- Sharma, A., Chen, C. R., & Vu Lan, N. (2009). Solar-energy drying systems: A

- review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(6–7), 1185–1210. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.015>
- Singh, R., Salhan, P., & Kumar, A. (2021). CFD Modelling and Simulation of an Indirect Forced Convection Solar Dryer. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 795(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/795/1/012008>
- Srinivasan, G., & Muthukumar, P. (2021). A review on solar greenhouse dryer: Design, thermal modelling, energy, economic and environmental aspects. *Solar Energy*, 229(October 2020), 3–21. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.058>
- Tekasakul, P., Dejchanchaiwong, R., Tirawanichakul, Y., & Tirawanichakul, S. (2015). Three-Dimensional Numerical Modeling of Heat and Moisture Transfer in Natural Rubber Sheet Drying Process. *Drying Technology*, 33(9), 1124–1137. <https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1014910>
- TIGAMPO, S., SAMBOU, V., DIEYE, Y., TOURE, P. M., & BODIAN, S. (2020). Study of air movement and temperature distribution in a greenhouse used as a dryer. *MATEC Web of Conferences*, 307, 01051. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202030701051>
- Valera, D. L., Álvarez, A. J., & Molina, F. D. (2006). Aerodynamic analysis of several insect-proof screens used in greenhouses. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 4(4), 273–279. <https://doi.org/10.5424/sjar/2006044-204>
- Valera, D. L., Molina, F. D., Alvarez, A. J., López, J. A., Terrés-Nicoli, J. M., & Madueño, A. (2005). CONTRIBUTION TO CHARACTERISATION OF INSECT-PROOF SCREENS: EXPERIMENTAL MEASUREMENTS IN WIND TUNNEL AND CFD SIMULATION. *Acta Horticulturae*, 691(691), 441–448. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.691.53>
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics. In P. E. Limited (Ed.), *IEEE Concurrency* (Second).
- Villagran, E., Henao-Rojas, J. C., & Franco, G. (2021). Thermo-Environmental Performance of Four Different Shapes of Solar Greenhouse Dryer with Free Convection Operating Principle and No Load on Product. *Fluids*, 6(5), 183. <https://doi.org/10.3390/fluids6050183>

3 SIMULACIÓN DE UN SISTEMA SECADOR SOLAR TIPO INVERNADERO MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

3.1 Materiales y métodos

3.1.1 Descripción del sistema secador solar tipo invernadero

El secador solar tipo invernadero (SSTI) está localizado en las instalaciones de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. de México. Tiene dimensiones de 12 x 9 x 3.4 m de largo, ancho y alto respectivamente, cuenta con una estructura de PTR galvanizado, una cubierta de policarbonato de doble pared de 6 mm de espesor y un piso de concreto de 0.15 m de grosor. En la pared norte se encuentran ubicadas 4 ventanas de 1.23 x 0.53 m protegidas con malla antiáfidos de 40 x 26 hilos por pulgada cuadrada y una puerta de 2 x 2 m, mientras que en la pared sur se ubican dos extractores con una capacidad de $9,435 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ cada uno, los cuales se mantuvieron apagados durante el experimento, por lo que el movimiento del aire es generado únicamente por las diferencias de densidad del fluido debido a gradientes de temperatura, es decir, por convección natural. Figura 8.

El secador cuenta con 24 mesas de 1.80 x 1.5 x 0.9 m, las cuales tienen una estructura de PTR de 2 pulgadas y un área de malla sintética para colocar el producto a deshidratar.

3.1.2 Sistema de monitoreo de datos

Para la evaluación del modelo se utilizaron mediciones experimentales durante un día, de 8:00-18:00 horas. Las variables monitoreadas fueron:

- a) La radiación solar externa
- b) La temperatura y humedad relativa del aire dentro y fuera del secador
- c) La velocidad del viento fuera y dentro del secador.

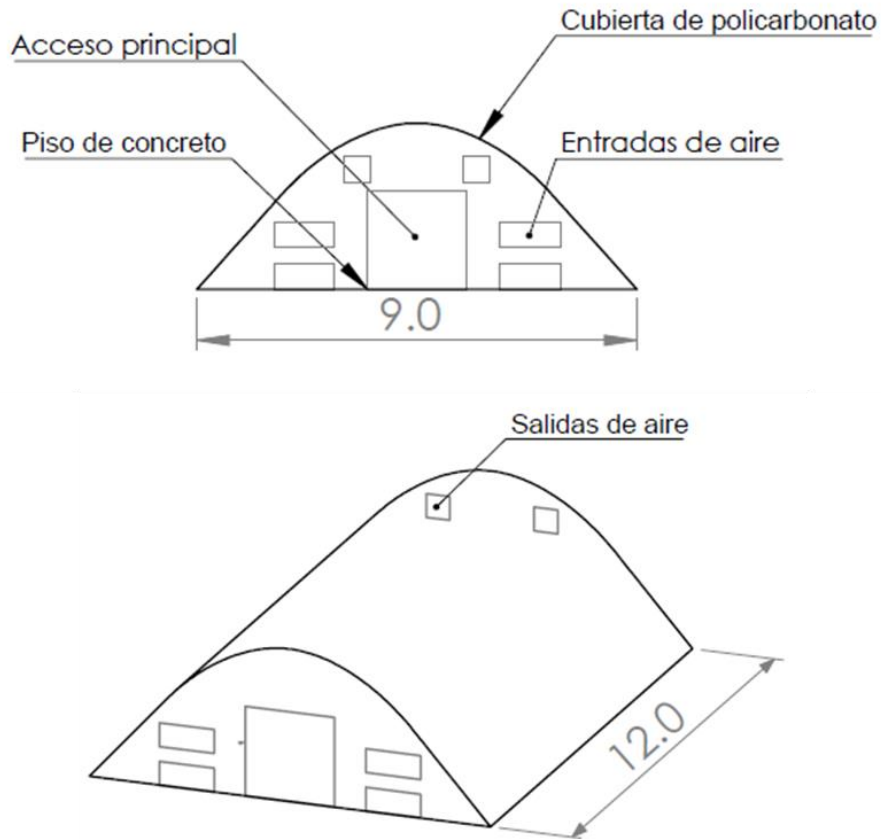


Figura 8. Secador solar tipo invernadero.

Las mediciones se realizaron con dos estaciones Campbell CR1000, el tiempo de muestreo fue de un minuto, posteriormente los datos fueron promediados cada hora para su uso en el modelo CFD. La radiación solar externa fue medida con un piranómetro Campbell CMP3. Los valores de temperatura y humedad relativa del aire externo se obtuvieron con el sensor VAISALA HMP60. Estas variables dentro del secador se midieron con dos sensores Cs 215-L y seis termopares tipo T de Hoboware de aleación de níquel y cobre, distribuidos en el volumen del SSTI para obtener valores de la temperatura de la cubierta y mesas de secado. También se utilizó un termómetro visual de infrarrojos Fluke VT04A para obtener imágenes de la distribución espacial de la temperatura en el interior del sistema. La velocidad del aire fuera del secador se monitoreo con un sensor YOUNG 05305-L, este tiene un rango de medición de 0 a 50 m s⁻¹, mientras que para la velocidad dentro del secador se utilizó el anemómetro WindSonic4, el cual tiene un rango de medición de 0 a 60 m s⁻¹ con una precisión de $\pm 2\%$ y una

resolución de 0.01 ms^{-1} . La incertidumbre máxima asociada a cada instrumento de medición de acuerdo con las especificaciones del fabricante se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Incertidumbre asociada a los instrumentos de medición

	Sensor	Incertidumbre
Radiación solar		$\pm 10 \text{ W m}^{-2}$
Humedad relativa ambiente		$\pm 3\% \text{ RH}$
Temperatura ambiente		$\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Velocidad del viento		$\pm 0.2 \text{ m s}^{-1}$
Humedad relativa interior	S1 y S2	$\pm 2\%$
Temperatura interior		
• CS215-L	S1 y S2	$\pm 0.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$
• Termopar tipo T	S3, S4, S5, S6, S7, S8	$\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
• Termómetro Fluke VT04A		$\pm 2.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Velocidad del viento interior	V1	$\pm 2\%$

La ubicación de los sensores en el volumen del SSTI se muestra en la Tabla 2 y en la Figura 9.

Tabla 2. Coordenadas de los puntos de medición

Sensor	Posición (x,y,z) [m]
S1	(4.50, 0.90, 6.00)
S2	(3.40, 2.20, 11.90)
S3	(4.50, 2.00, 0.00)
S4	(4.50, 2.00, 12.00)
S5	(7.50, 1.70, 4.00)
S6	(1.50, 1.70, 4.00)
S7	(7.50, 1.70, 8.00)
S8	(1.50, 1.70, 8.00)
V1	(2.30, 1.00, 1.00)

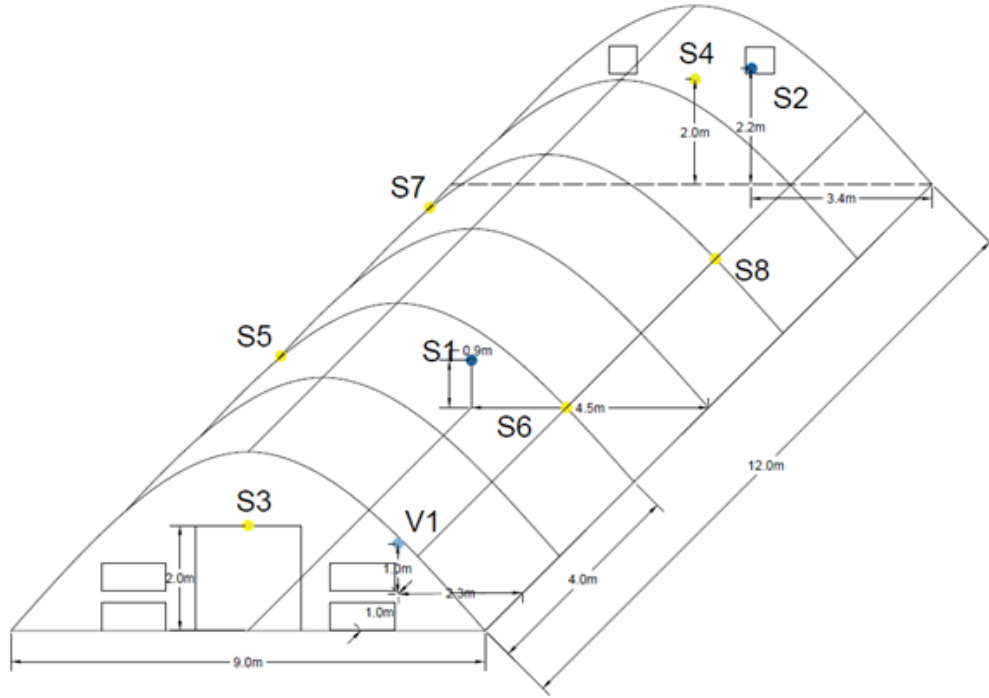


Figura 9. Ubicación de los sensores en el SSTI

3.1.3 Evaluación del modelo CFD

Para comparar los resultados experimentales con los obtenidos con el modelo CFD, se utilizó el criterio estadístico del Error Promedio Absoluto (MAE, por sus siglas en inglés) y el coeficiente de correlación.

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^N |x_i - y_i| \quad (8)$$

$$r = \frac{\sum [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 * \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

Donde N es el número de observaciones, x denota los valores calculados por el modelo CFD y y denota los valores observados.

3.1.4 Modelación de un secador solar tipo invernadero mediante Dinámica de Fluidos Computacional.

Los códigos CFD permiten el cálculo del campo del flujo del aire y la distribución espacial y temporal de la temperatura y la humedad relativa en un SSTI resolviendo las ecuaciones numéricas de transporte a través del método de volumen finito (VOF) (TIGAMPO et al., 2020; Villagran et al., 2021).

En este estudio el software de pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento Ansys Fluent (Workbench 2022 R) se utilizó para realizar la modelación del SSTI considerando tres geometrías diferentes. En el modelo 1 (M1) se consideraron las estructuras de las mesas de secado y el área de la malla sintética en donde se ubica el producto a deshidratar, esta geometría es la más apegada al sistema de secado real. En el modelo 2 (M2) la geometría contempla la malla de las mesas, pero no integra las estructuras de PRT. Mientras que en el modelo 3 (M3) no se incluye ninguna geometría referente a las mesas de secado (Figura 10).

Para contemplar la influencia de las condiciones ambientales externas en el sistema modelado, el secador se colocó en un volumen de aire externo para representar la interacción entre el secador solar y el ambiente exterior. El tamaño del dominio computacional se definió considerando las recomendaciones de Villagrán et al. (2021). En donde el tamaño del dominio se define como una función de la altura máxima de la estructura evaluada (SSTI) ($H_{m\acute{a}x}$). Basado en lo anterior, el dominio computacional considera las siguientes restricciones: la altura tiene una dimensión mínima equivalente a $10 H_{m\acute{a}x}$, la longitud desde la entrada del flujo de aire hasta la estructura del SSTI debe ser de al menos $10 H_{m\acute{a}x}$, mientras que la distancia desde la estructura hasta la pared de salida del flujo del aire tiene dimensiones mínimas de $15 H_{m\acute{a}x}$. Por último, las paredes paralelas a la dirección del flujo del aire deben tener una longitud mínima de $10 H_{m\acute{a}x}$. Dado que la versión estudiantil del software Ansys Fluent limita el número de elementos de la malla a 512,000, el ultimo criterio fue disminuido a

2.6 $H_{m\acute{a}x}$. Las dimensiones del dominio computacional utilizado en los modelos CFD se presentan en la Figura 11.

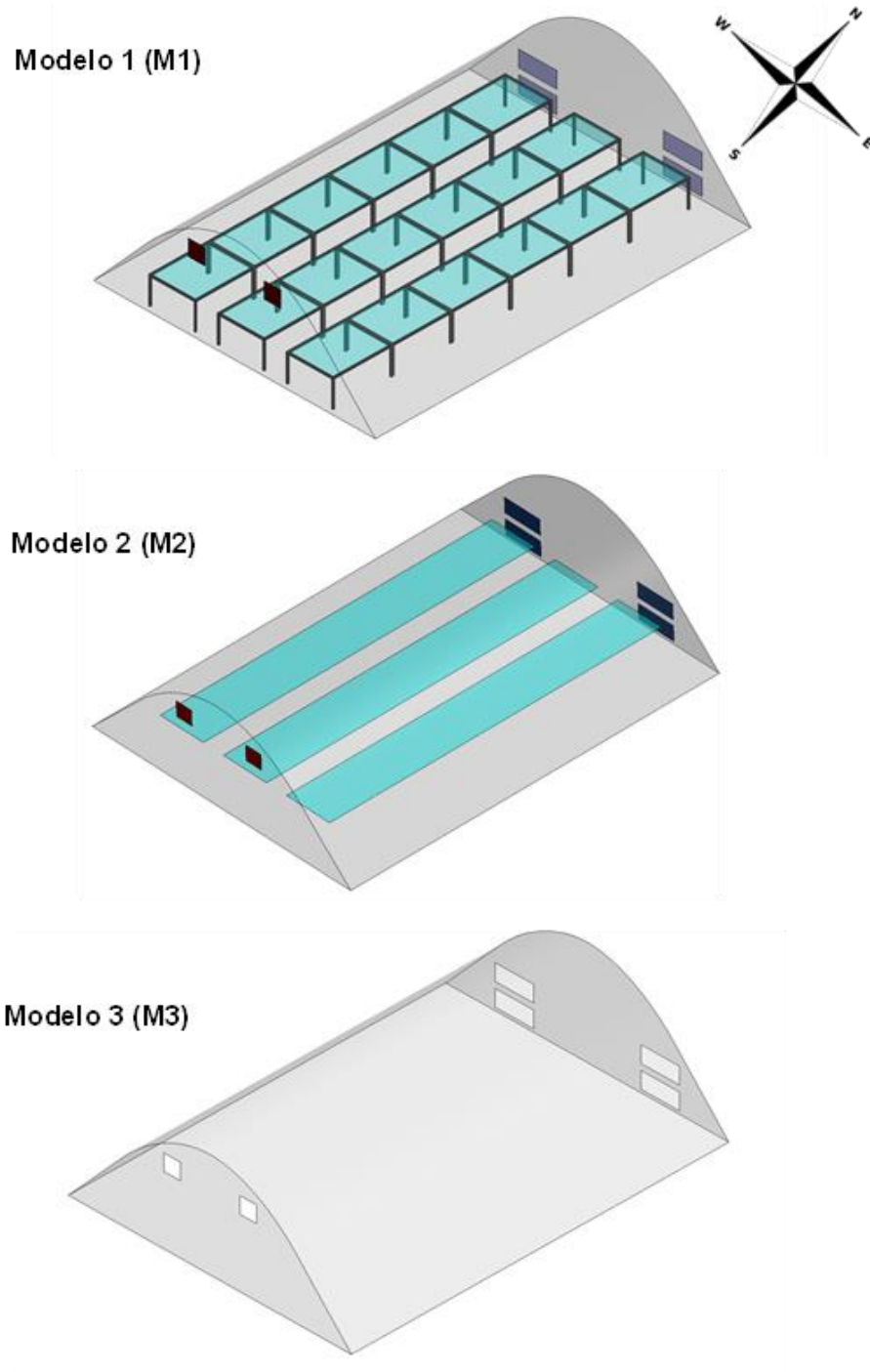


Figura 10. Geometrías empleadas en los modelos CFD.

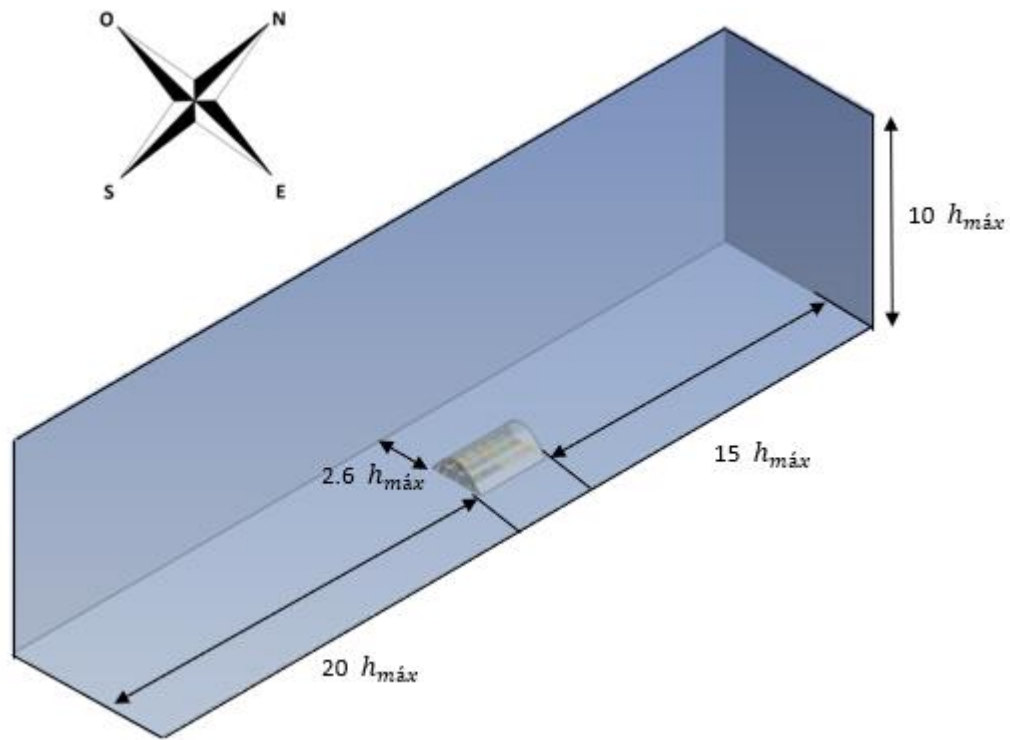


Figura 11. Dimensiones del Dominio Computacional

3.1.5 Modelo numérico

Supuestos del modelo

Con la finalidad de simplificar el cálculo numérico, se consideraron los siguientes supuestos:

1. Se utilizó la aproximación de Boussinesq para considerar la variación de la densidad del aire.
2. Las propiedades físicas de los materiales se consideraron constantes.
3. El aire se comporta como un fluido incompresible, turbulento y newtoniano.

Modelo de turbulencia

La turbulencia del flujo del aire se implementó a través del modelo $k - \epsilon$ estándar. Este modelo ha sido ampliamente utilizado en el modelado de edificaciones agrícolas, ya ha demostrado un óptimo equilibrio entre el costo computacional y una descripción realista de la turbulencia (Mesmoudi et al., 2017) .

La energía cinética de turbulencia, k , y su tasa de disipación, ϵ , se calculan a partir de las siguientes ecuaciones de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (11)$$

Donde u_i es el componente de velocidad en la dirección i , x_i indica la dirección i , μ es la viscosidad dinámica del aire, μ_t es la viscosidad turbulenta, G_k es la producción de energía cinemática turbulenta y G_b es la producción de energía cinemática turbulenta debido a la flotabilidad, μ_t , G_k , y G_b se calculan con las siguientes relaciones:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

Donde u'_i es el componente de velocidad fluctuante en la dirección i , β es el coeficiente de expansión térmica, Pr_t es el número de Prandl de turbulencia y g_i es cualquier aceleración del campo en la dirección i . Los coeficientes

proporcionados por FLUENT para el modelo de turbulencia *i* estándar se utilizan en todos los cálculos y son: $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_\epsilon = 1.2$ y $\sigma_k = 1.0$.

Hipótesis de Boussinesq

El efecto de flotabilidad del aire que permite la descripción del fenómeno de convección natural causada por los cambios en la densidad del aire debido a la temperatura se incluye en el modelo CFD a través de la hipótesis de Boussinesq (TIGAMPO et al., 2020; Villagran et al., 2021). Ecuación (12).

$$\rho = \rho_0[1 - \beta\Delta T] \quad (12)$$

Donde ρ y ρ_0 son la densidad en un momento dado y la densidad de referencia, respectivamente, β es el coeficiente de dilatación térmica del aire y ΔT es la diferencia entre la temperatura local y la de referencia.

Modelo de radiación solar

El modelo de trazado de rayos solares se implementa en la simulación acoplado al modelo de ordenadas discretas (DO) para calcular los efectos de la radiación que ingresa al dominio computacional, siendo posible modelar paredes transparentes y opacas. El modelo de carga solar incluye una función de calculadora solar que puede utilizarse para indicar la ubicación geográfica, la zona horaria y la orientación del dominio (Li et al., 2020). El modelo de ordenadas discretas resuelve la ecuación de transferencia de radiación (RTE), para un número finito de ángulos sólidos discretos, cada uno asociado con una dirección vectorial fija en el sistema cartesiano global, en lugar de agregar fuentes de calor adicionales, Ecuación (13) (He et al., 2017; TIGAMPO et al., 2020).

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s)I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s} \cdot \vec{s}') d\Omega' \quad (13)$$

Donde $\vec{r}$ es el vector de posición, $\vec{s}$ es el vector de dirección, $\vec{s}$ es el vector de dirección de dispersión, s es la longitud de la trayectoria, α es el coeficiente de absorción, n es el índice de refracción, σ_s es el coeficiente de dispersión, σ es la constante de Stefan-Boltzman, I es la intensidad de la radiación, T es la temperatura local, Φ es la función de fase, Ω' es el ángulo sólido.

Modelo de especies

Se considera la ecuación de transporte de especies para representar el aire como una mezcla de aire seco y vapor de agua (Duong et al., 2021). Lo que permite modelar el transporte de masa de agua en todo el dominio computacional (Tamimi & Kacira, 2013). Al emplear ecuaciones de conservación para especies químicas, el software predice la fracción de masa local de cada sustancia (Y_i) resolviendo la ecuación de convección-difusión para la i -ésima sustancia de la mezcla. La ecuación de conservación toma la forma general:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (14)$$

Donde R_i es la tasa neta de producción de especies i por reacción química y S_i es la tasa de creación por adición de la fase dispersa más cualquier fuente definida por el usuario.

Condición “Porous Jump”

Para estudiar el comportamiento del flujo de aire que atraviesa el área de las mallas empleadas en las ventanas del secador y en las mesas de secado se requiere determinar los valores de permeabilidad (K, m^2) y factor inercial ($Y, adimensional$), parámetros que permiten caracterizar el material como un medio poroso. Los valores de Y y K de las mallas utilizadas como protección de las ventanas, se obtuvieron de la investigación de Pérez et al (2016), mientras que para las mallas de las mesas se utilizó la metodología propuesta por Cabrera et al. 2006, en donde se realiza la caracterización geométrica de mallas-anti-insectos empleando imágenes digitales obtenidas con un microscopio óptico. El procedimiento realizado se presenta a continuación:

Preparación de las muestras. Se seleccionaron cinco muestras de 1 cm² de área de la malla, Figura 12. Las cuales se situaron en un portaobjetos de microscopio y se inmovilizaron con cinta transparente con la finalidad de evitar ondulaciones en las mallas. Las cinco muestras fueron digitalizadas con un objetivo a 1.6X del microscopio óptico Leica Microsystems modelo DM500. Para la documentación, anotación y medición de las muestras digitalizadas se empleó el software de adquisición de imágenes Leica Application Suite (LAS) EZ, ya que permite mediciones a mano alzada en imágenes capturadas, Figura 13. Los resultados de las mediciones de la trama, urdimbre y diámetro se presentan en la Tabla 3.

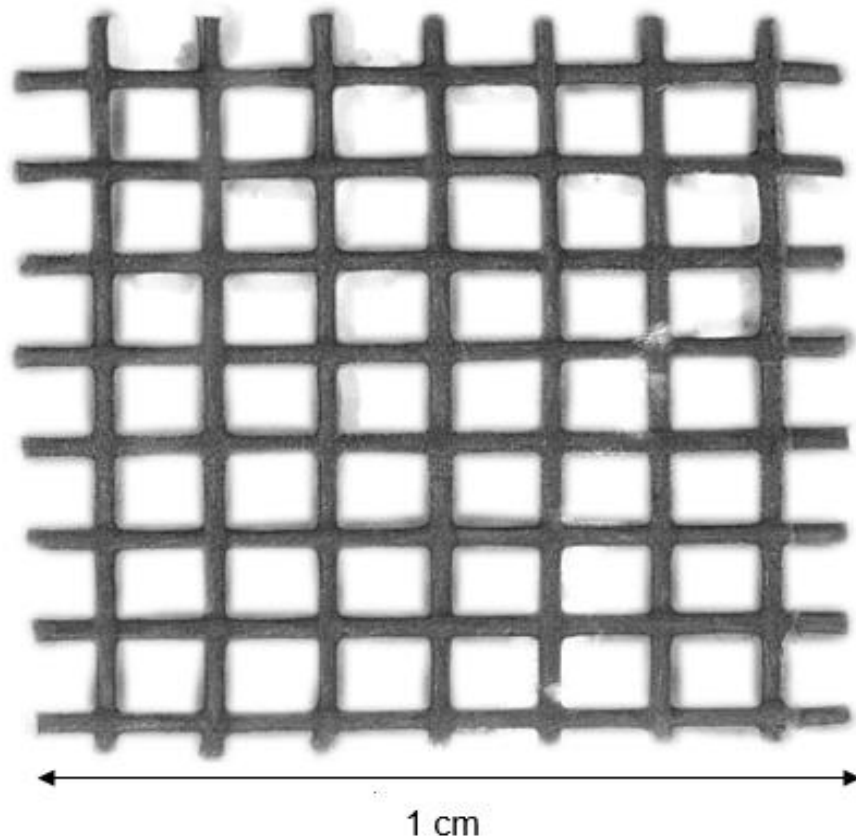


Figura 12. Digitalización de la muestra de la malla.

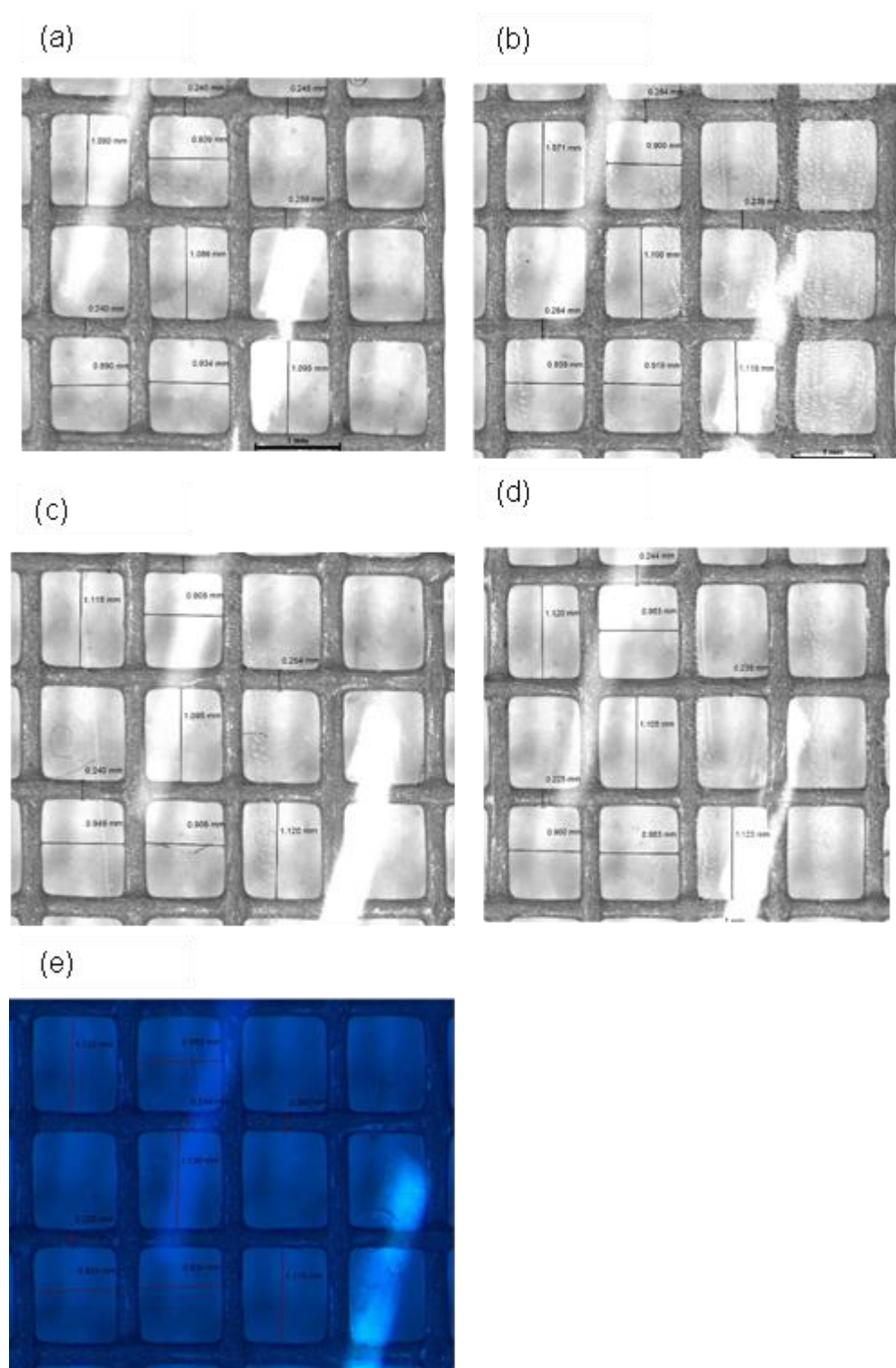


Figura 13. Mediciones del diámetro del hilo, trama y urdimbre de las cinco muestras de la malla utilizada en las mesas de secado.

Tabla 3. Mediciones de la trama, urdimbre y diámetro de las cinco muestras de la malla.

Muestra		Trama (mm)	Urdimbre (mm)	Diámetro (mm)
1		0.939	1.090	0.240
		0.890	1.086	0.259
		0.934	1.095	0.245
2		0.900	1.071	0.284
		0.939	1.100	0.235
		0.919	1.115	0.264
3		0.905	1.115	0.254
		0.949	1.095	0.245
		0.906	1.120	0.240
4		0.983	1.120	0.244
		0.900	1.105	0.235
		0.983	1.120	0.225
5		0.953	1.120	0.240
		0.924	1.139	0.244
		0.934	1.115	0.225
Promedio		0.931	1.107	0.245

Número de hilos por unidad de longitud. El tamaño promedio del poro en ambas direcciones de la malla, L_x (mm) y L_y (mm), puede ser calculado utilizando las ecuaciones (15) y (16).

$$L_x = \frac{10}{N_x} - D \quad (15)$$

$$L_y = \frac{10}{N_y} - D \quad (16)$$

Donde D es el diámetro del hilo (mm) y N_x y N_y son el número de hilos en las direcciones X e Y .

Cálculo de la porosidad. La porosidad $\alpha(m^2m^{-2})$ es una de las características geométricas más importantes en el análisis de las mallas, la cual expresa la

relación entre la superficie de los poros y el área total de la malla (Pérez et al., 2016; Valera et al., 2006b). Para una muestra con el mismo número de hilos en la trama y urdimbre la porosidad se calcula con la ecuación (17) (Cabrera et al., 2006).

$$\alpha = \frac{L_x L_y}{(L + D)(L_y + D)} \quad (17)$$

Cálculo de la permeabilidad y factor inercial. La permeabilidad representa la capacidad del medio para transmitir el fluido a través de este (Miguel et al., 1997; Pérez et al., 2016). Para determinar los parámetros de la permeabilidad y el factor inercial se utilizaron las correlaciones obtenidas en el estudio de Valera et al. (2006), en donde se evaluaron 11 mallas en túneles de viento, obteniendo las ecuaciones (18) y (19).

$$K = -1.81 \cdot 10^{-8} \alpha^2 + 2.22 \cdot 10^{-8} \alpha - 4.47 \cdot 10^{-9} \quad (18)$$

$$Y = \frac{5.96 \cdot 10^{-2}}{\alpha^{1.18}} \quad (19)$$

3.1.6 Discretización del dominio computacional y condiciones de frontera

La generación de la malla es un paso esencial en la formulación de un modelo para simulación por CFD. La convergencia de la solución numérica y la adecuada predicción de los resultados obtenidos dependerán de una calidad y distribución apropiada de la malla (Fernandez, 2012; Salazar et al., 2018).

La discretización de los dominios computacionales bajo las diferentes condiciones de simulación se realizó utilizando una malla no estructurada, empleando celdas tetraédricas y aplicando un refinamiento al volumen del sistema de secado, Figura 14.

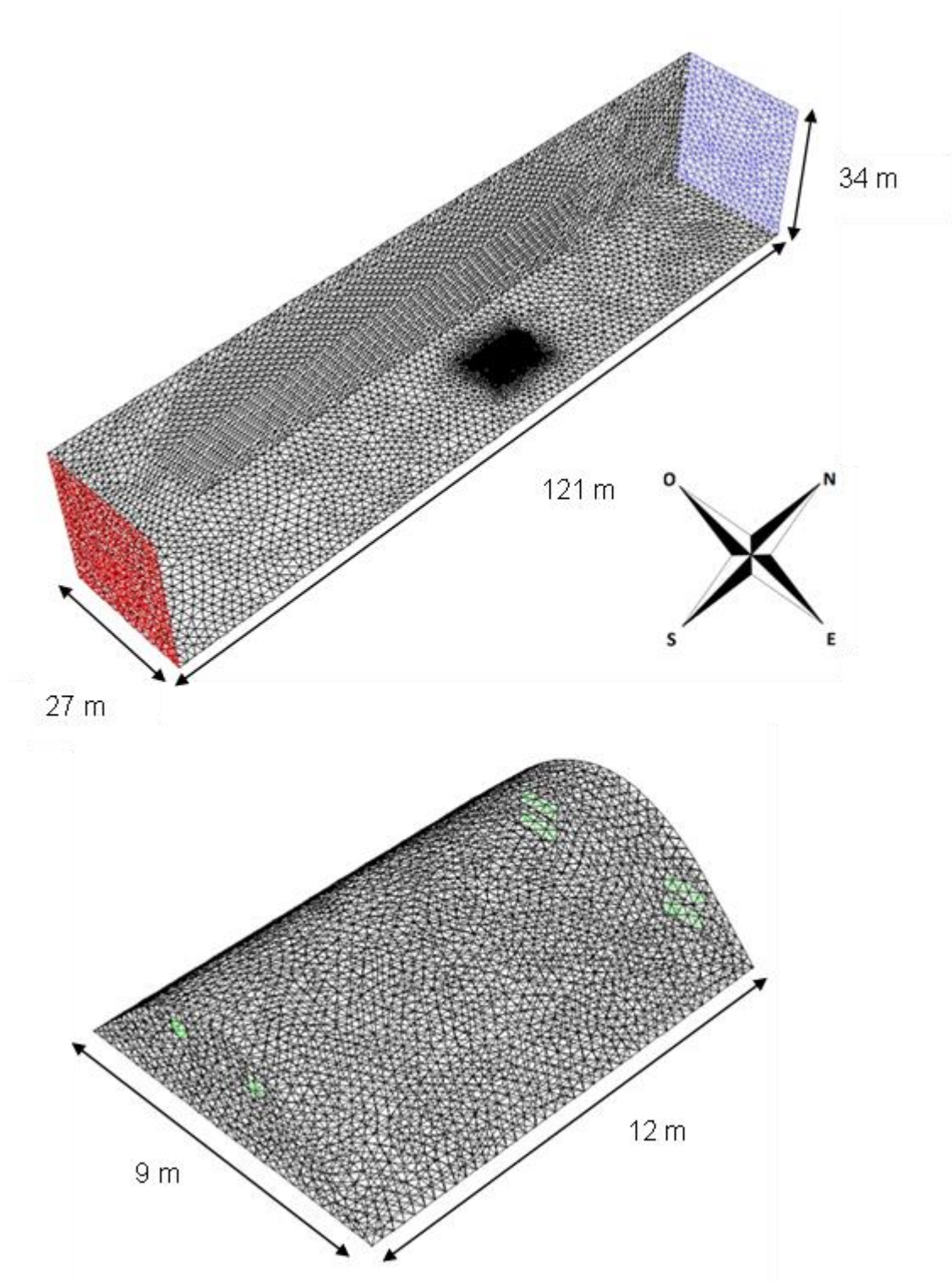


Figura 14. Discretización del dominio computacional.

Para evaluar la calidad de la malla de los escenarios modelados se consideraron los valores promedio de ortogonalidad y asimetría, Tabla 4. De acuerdo con la escala propuesta por Gok et al. (2017), Figura 15 y Figura 16, las tres geometrías presentan una “excelente” asimetría y una “muy buena” ortogonalidad.

Tabla 4. Parámetros de tamaño y calidad de la malla de los modelos CDF.

Modelo	Número de elementos de la malla	Calidad de la malla	
		Valor promedio asimetría	Valor promedio ortogonalidad
M1	509,938	0.25	0.73
M2	410,002	0.24	0.75
M3	461,487	0.24	0.75

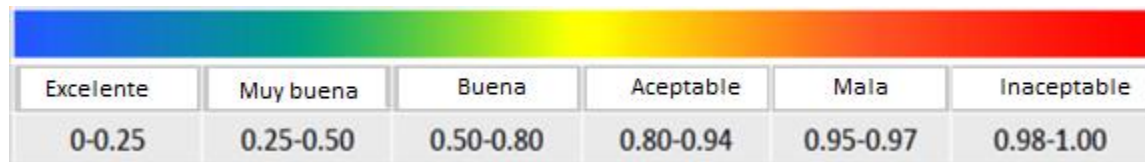


Figura 15. Espectro de métricas de malla: Asimetría.

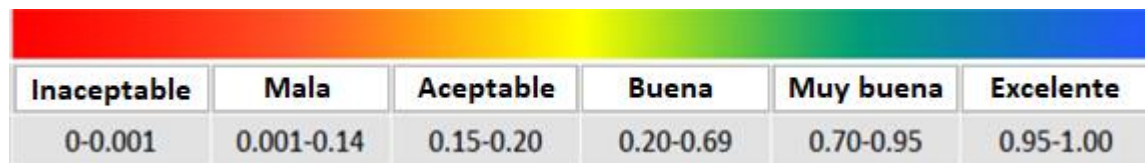


Figura 16. Espectro de métricas de malla: Ortogonalidad.

Las condiciones de frontera definidas en el dominio computacional fueron las siguientes; se aplicó una condición “*symmetry*” a las paredes paralelas al flujo de aire (paredes este y oeste), la pared norte se estableció con una condición de entrada de aire, “*velocity inlet*”, mientras que el límite sur se definió con una condición de salida de presión, “*presión outlet*”.

La cubierta del secador se estableció con una condición de pared semitransparente para el fenómeno de radiación, mientras que el piso de concreto se estableció con una condición de pared opaca para este fenómeno. Para las mallas ubicadas en las ventanas y mesas de secado se establecieron condiciones de frontera específicas para un medio poroso. El resumen de las condiciones de frontera se muestran en la Tabla 5. Las condiciones iniciales utilizadas en la simulación CFD se presentan en la Tabla 6.

Tabla 5. Consideraciones del modelo numérico

Supuestos	
Tipo de modelo	Simulación 3D
Solución	Estado estacionario
Modelo de viscosidad	$k - \epsilon$ estándar con flotabilidad
Ecuación de energía	Activada. Transferencia de calor por conducción y convección.
Modelo de radiación	Ordenadas discretas
Humedad	Transporte de especies
Condiciones de frontera	
Entrada al dominio	Velocity-inlet (Tabla 6) • Temperatura • Velocidad • Humedad relativa
Salida del dominio	Pressure-Outlet
Ventanas de salida	Interior
Tratamiento de medios porosos	Porous Jump

Las propiedades físicas y ópticas de los materiales incluidos en el dominio computacional se especifican en la Tabla 7.

Tabla 6. Condiciones iniciales utilizadas en las simulaciones CFD.

Hora	Temperatura (°K)	Humedad Relativa (%)	Radiación solar (W/m ²)
08:00:00 a. m.	285.56	52.58	261.96
09:00:00 a. m.	289.45	40.97	458.19
10:00:00 a. m.	293.89	37.09	626.88
11:00:00 a. m.	295.78	33.84	762.18
12:00:00 p. m.	297.00	29.96	789.06
01:00:00 p. m.	297.52	27.81	744.19
02:00:00 p. m.	297.76	25.28	624.96
03:00:00 p. m.	297.55	24.40	550.00
04:00:00 p. m.	296.46	26.70	364.02
05:00:00 p. m.	295.00	31.81	135.65
06:00:00 p. m.	293.24	33.42	12.10

Tabla 7. Propiedades físicas y ópticas de los materiales empleados en el modelo CFD (TIGAMPO et al., 2020; Villagran et al., 2021).

Variable	Aire	Concreto	Polycarbonato
Densidad [Kg m ⁻³]	1.225	2100	1200
Calor específico (J Kg ⁻¹ K)	1006.43	880	1200
Conductividad térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.0242	1.41	0.21
Absortividad, α		0.6	0.03
Coeficiente de dispersión, σ	0	-10	0
índice de refracción, n	1	1	1
Emisividad, ϵ	0	0.71	0.95

Para el modelo numérico se establecieron los criterios de convergencia para los residuos de 10^{-6} para la ecuación de energía y en 10^{-3} para las ecuaciones de continuidad, momento y turbulencia.

3.2 Resultados y discusión

3.2.1 Distribución de la humedad relativa del aire

La comparación entre los resultados calculados y los valores experimentales de la humedad relativa del aire en el interior del SSTI se presentan en la Figura 17 y la Figura 18. De acuerdo con el criterio estadístico del error medio absoluto el modelo M1 presentó el mejor ajuste, con valores del 1.93% y 0.83% para los sensores S1 y S2 respectivamente, con una correlación de 0.99 y 0.98. Mientras que el peor ajuste se presentó en el M3, con valores del MAE de 3.09% y 3.02% y una correlación de 0.94 y 0.98 para los sensores S1 y S2 respectivamente. En los tres modelos el peor ajuste se presentó en la última hora de simulación (18:00 horas), con un error máximo de 8.64% presentado en el M3. Los modelos M2 y M3 muestran valores similares de humedad durante las 11 horas de simulación en la ubicación del sensor S1. En este punto los modelos se caracterizaron por incrementar el error a lo largo de la simulación, a diferencia del modelo M3, en el cual los valores del MAE se mantuvieron entre el 1.40% y el 2.63%, a excepción de la última hora de simulación.

La distribución espacial de la humedad relativa en el plano de las mesas de secado (0.9 m de altura) de cada uno de los escenarios simulados se muestra en la Figura 19. Se observa que para la hora indicada (13:00 horas) los valores de humedad se encuentran en el rango del 4% - 9%. Los resultados indican que los tres modelos presentan una distribución casi homogénea de humedad relativa.

En la Figura 20 se observa la distribución de la humedad del modelo M1 durante las 11:00 horas de simulación. En general, las zonas de mayor humedad relativa se ubican en las regiones de ventilación del sistema de secado (Villagran et al., 2021). Los resultados indican que en condiciones de no-carga la humedad relativa es inversamente proporcional a la temperatura. La humedad en el interior del secador presentó una distribución homogénea desde las 11:00 am hasta las 3:00 pm.

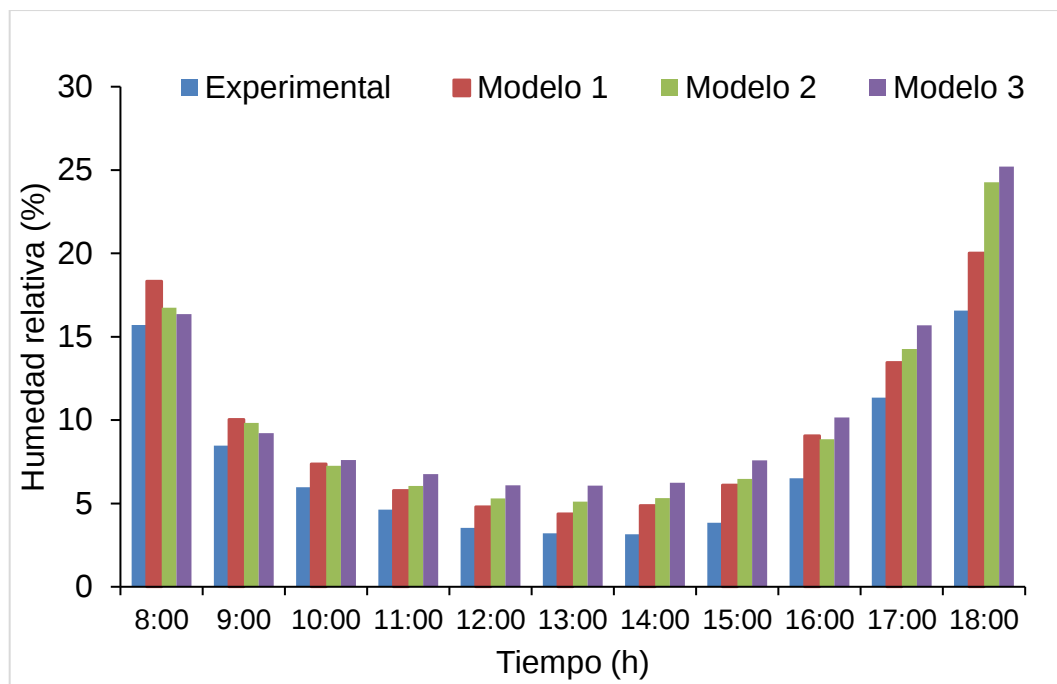


Figura 17. Humedad relativa del aire a la altura de las mesas de secado (S1).

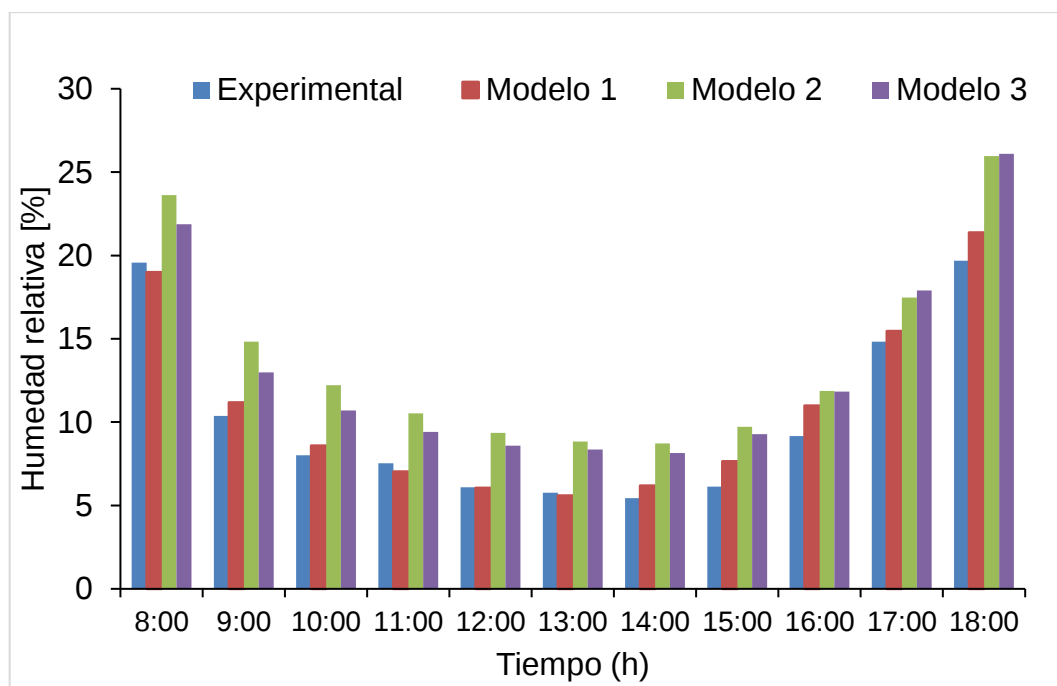


Figura 18. Humedad relativa del aire en las ventanas de salida (S2).

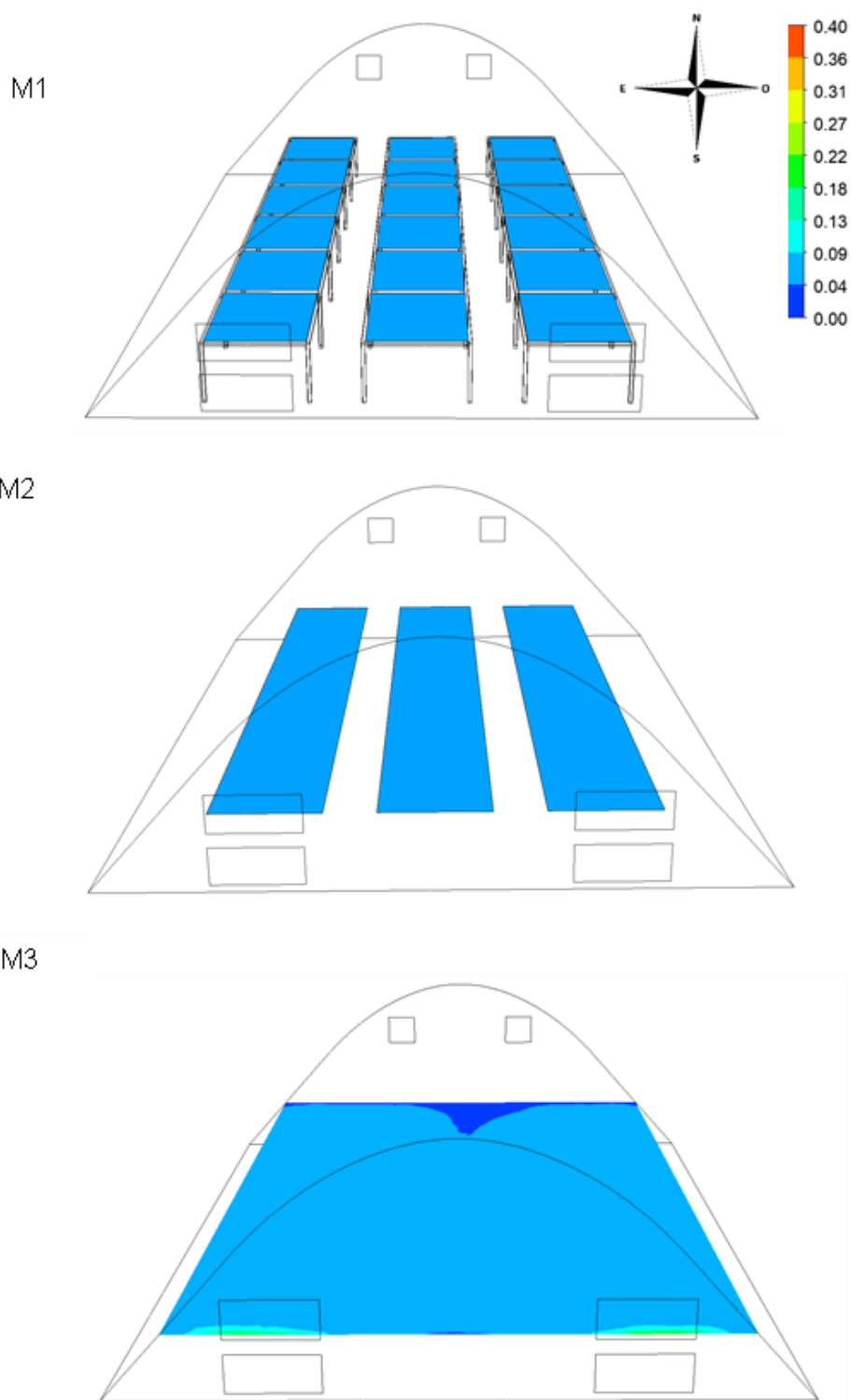
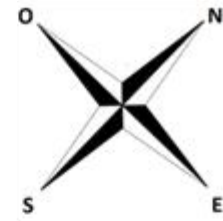
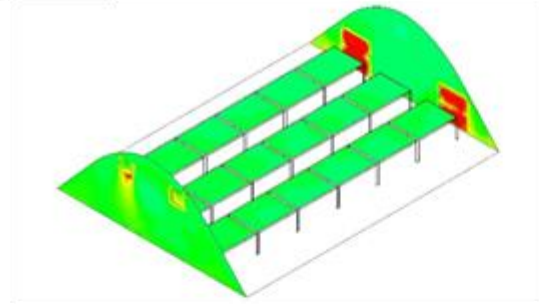
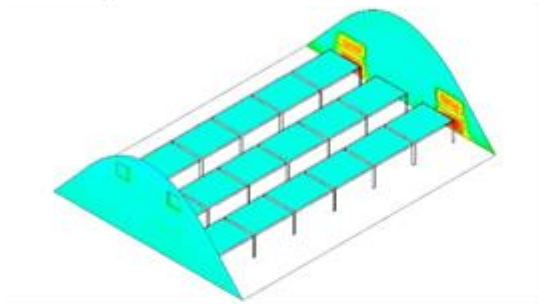


Figura 19. Humedad relativa a la altura de las mesas de secado de los escenarios simulados (13:00 horas).

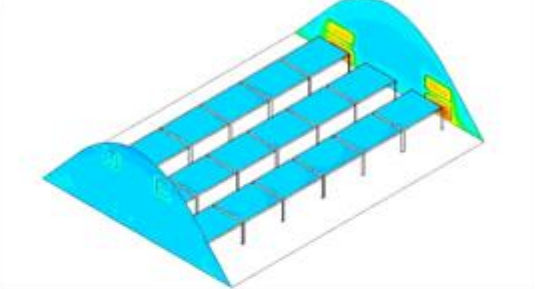
(a)



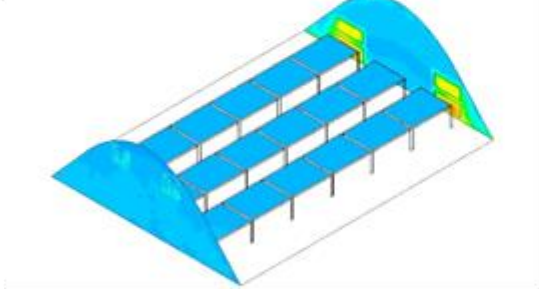
(b)



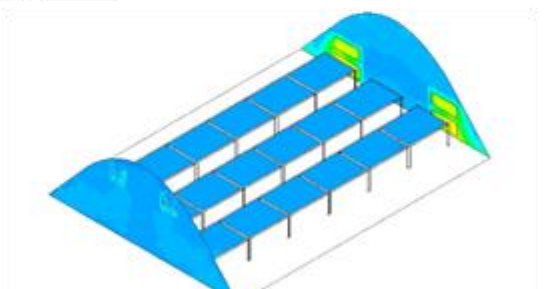
(c)



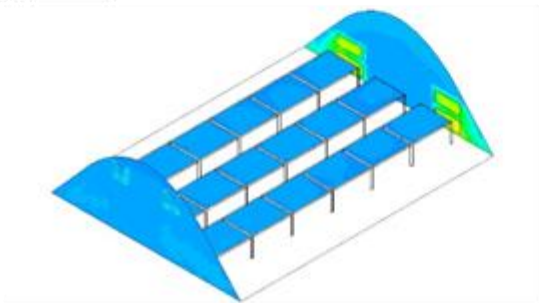
(d)



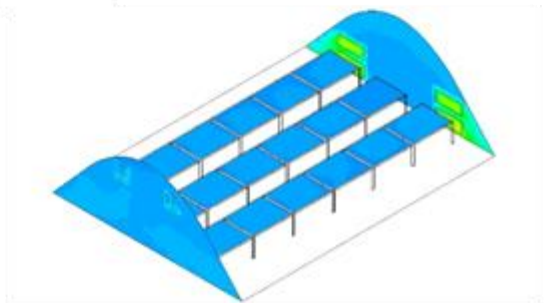
(e)



(f)



(g)



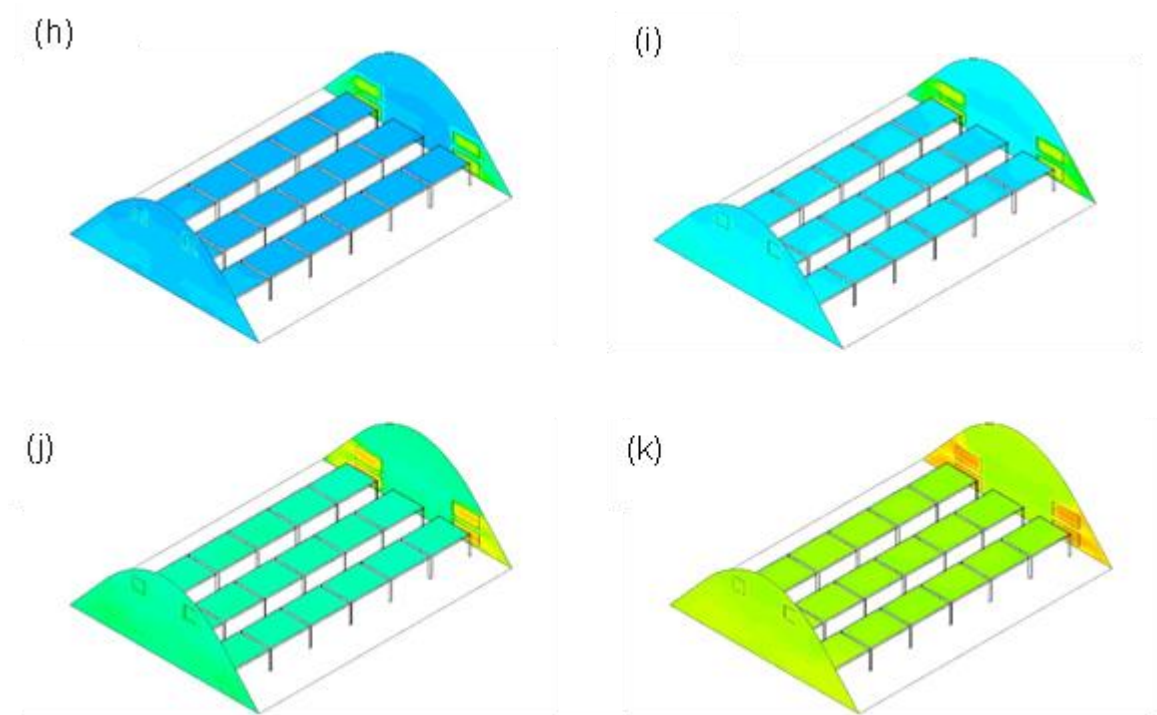


Figura 20. Distribución de la humedad relativa en el interior del SSTI, M1. (a) 8:00, (b) 9:00, (c) 10:00, (d) 11:00, (e) 12:00, (f) 13:00, (g) 14:00, (h) 15:00, (i) 16:00, (j) 17:00, (k) 18:00.

3.2.2 Distribución de la temperatura del aire

De acuerdo con el criterio estadístico del MAE y la correlación, el modelo M1 tiene el mejor ajuste en la distribución de la temperatura, con un valor del error medio absoluto de $3.10\text{ }^{\circ}\text{K}$ y una correlación de 0.93, considerando los ocho puntos de medición de la temperatura en el volumen del SSTI, estos resultados son similares a los reportados por Mellalou et al. (2021) quienes realizaron la modelación de un secador solar con ventilación natural, obteniendo una correlación para temperatura de 0.94. Por otra parte, el modelo M3 presenta un MAE de $3.82\text{ }^{\circ}\text{K}$ y una correlación 0.92, por lo que es el modelo con menor desempeño. En general, los tres modelos presentan un ajuste adecuado entre los resultados simulados y los valores experimentales de la temperatura del aire en el interior del SSTI (Figura 21, Figura 22, Figura 23, Figura 24). La diferencia más notable entre los resultados calculados y los datos experimentales se presentó en la temperatura de las mesas de secado con los modelos M2 y M3.

Lo cual puede atribuirse a la ubicación del sensor, ya que el punto de medición se encuentra cerca de las estructuras de las mesas y estos modelos no la contemplan en la geometría.

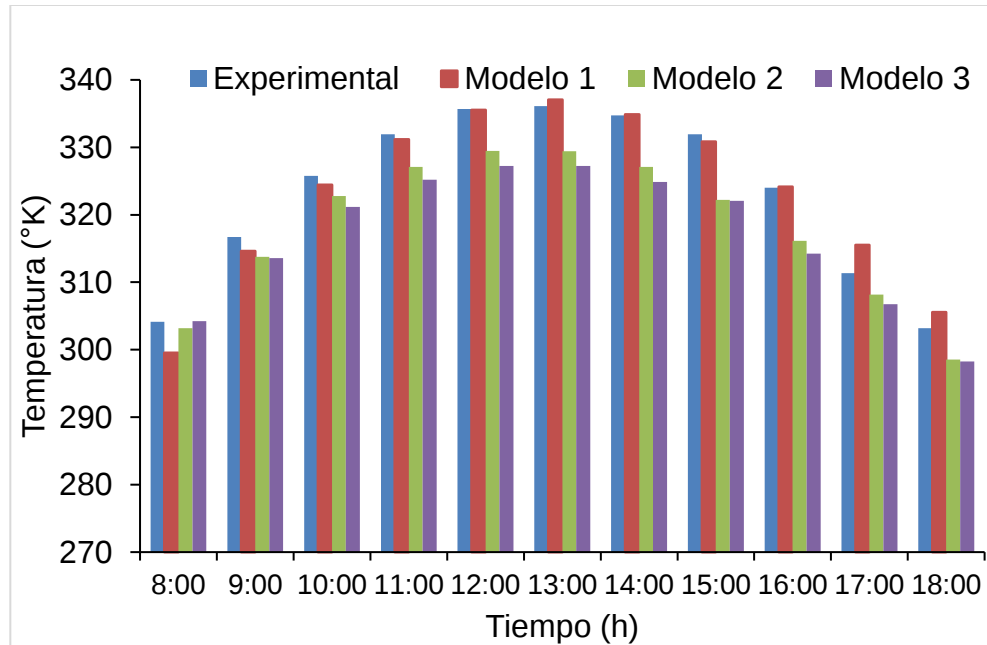


Figura 21. Temperatura a la altura de las mesas de secado (S1).

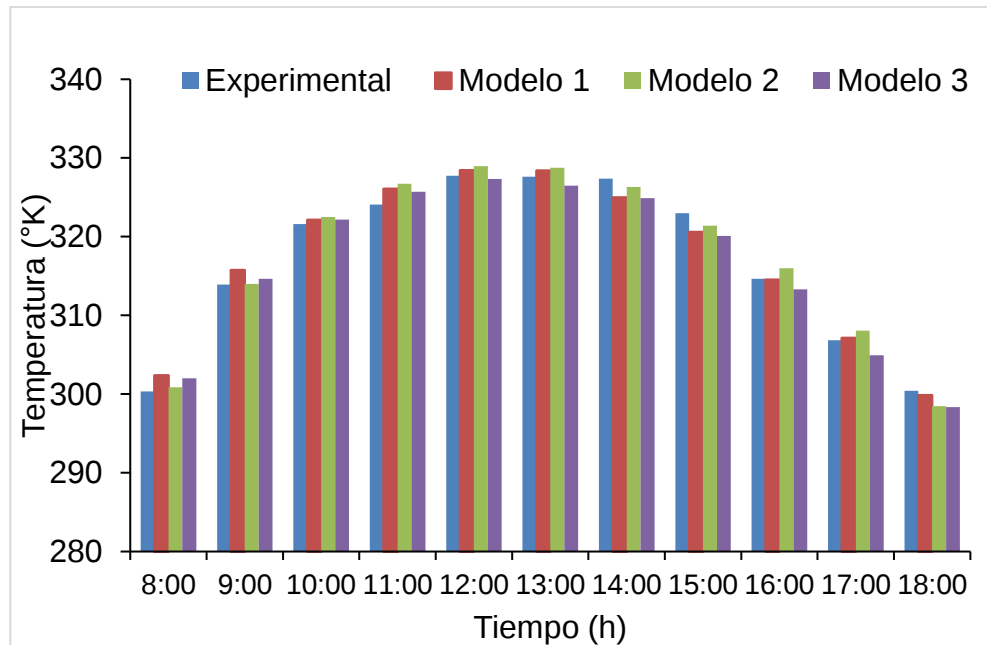


Figura 22. Temperatura del aire ventana de salida (S2).

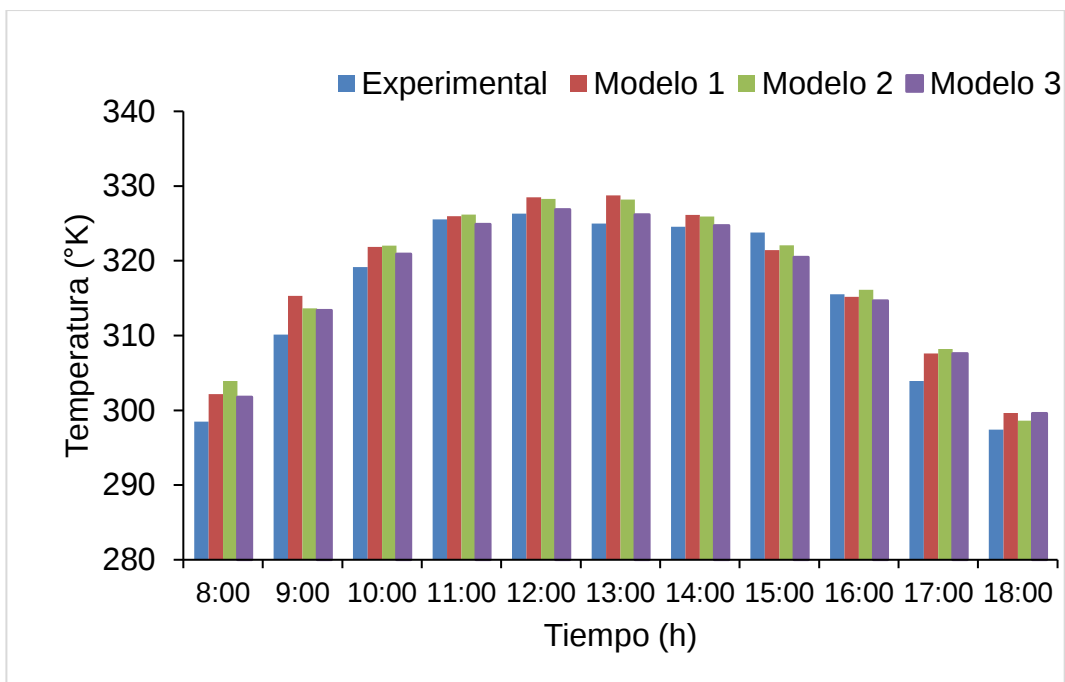


Figura 23. Temperatura de la cubierta norte (S3).

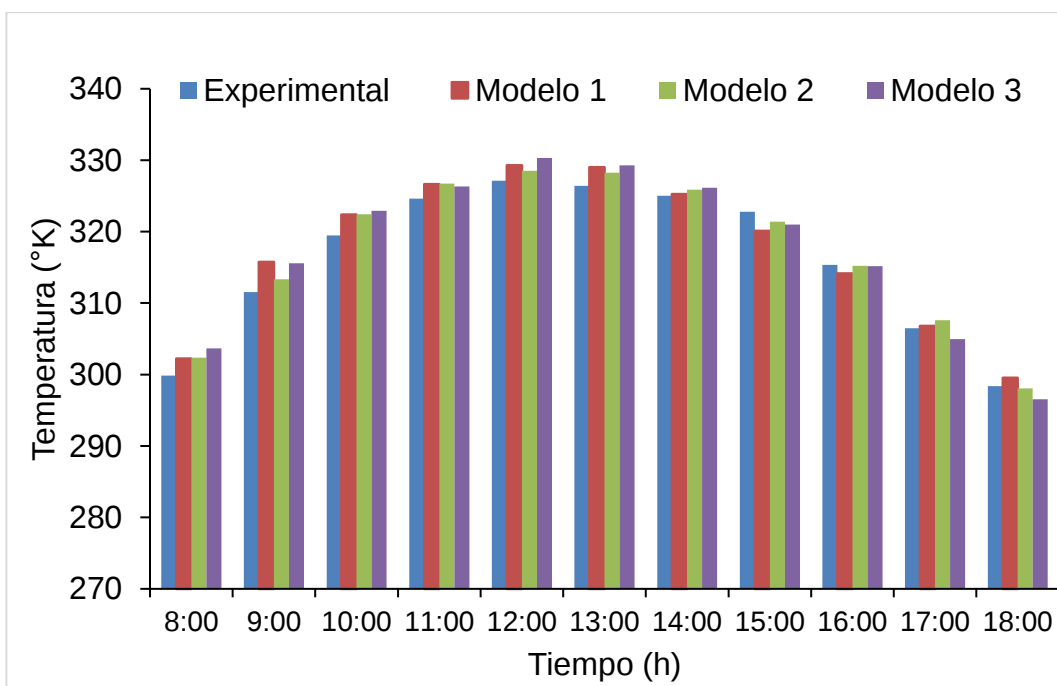


Figura 24. Temperatura de la cubierta sur (S4)

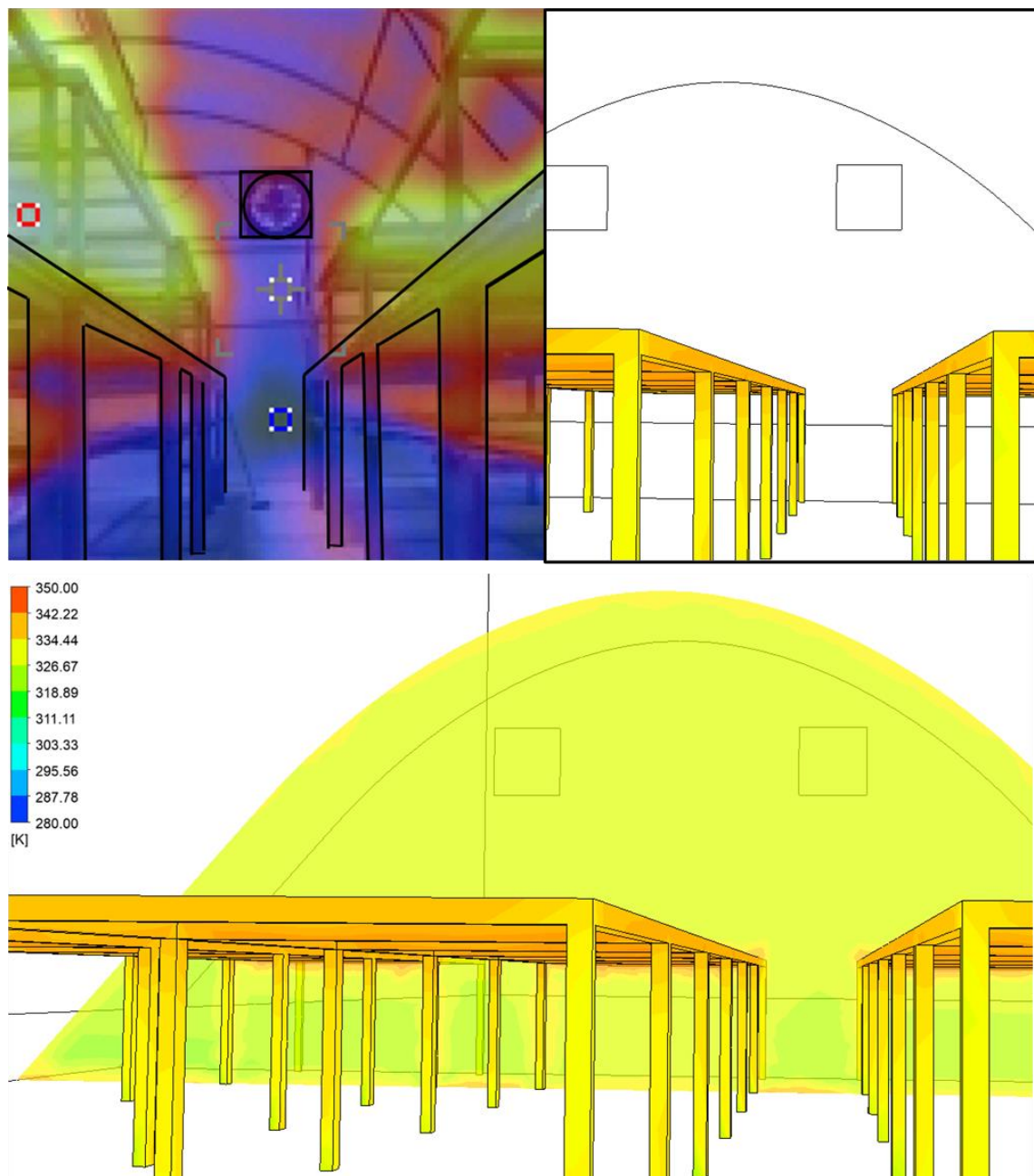
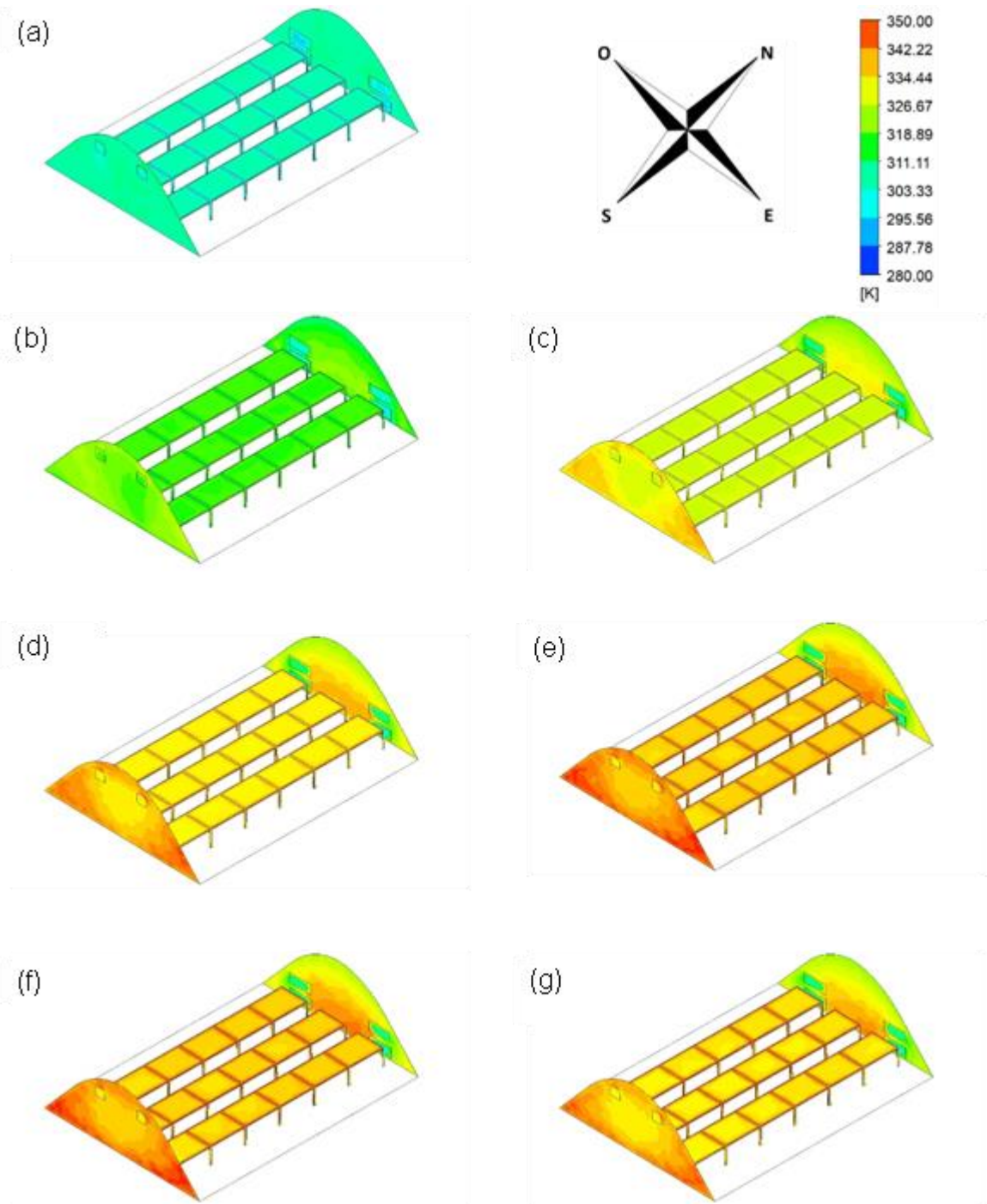


Figura 25. Comparación de la distribución de temperatura entre el termómetro Fluke VT04A y los resultados del modelo CFD.



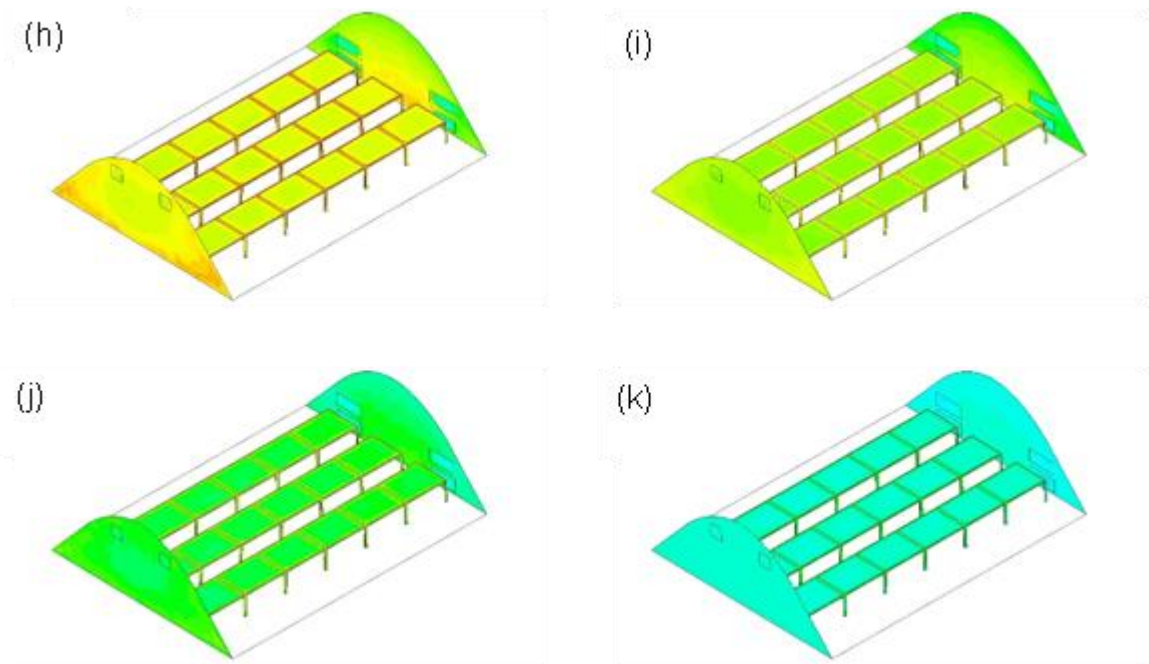


Figura 26. Distribución de la temperatura en el interior del SSTI. Modelo 1. (a) 8:00, (b) 9:00, (c) 10:00, (d) 11:00, (e) 12:00, (f) 13:00, (g) 14:00, (h) 15:00, (i) 16:00, (j) 17:00, (k) 18:00.

Los modelos generados presentan patrones similares de temperatura en el interior del SSTI. La región con la temperatura más alta se ubica en las estructuras de las mesas y el piso de concreto ($^{\circ}\text{K}$), lo cual concuerda con las investigaciones de Mellalou et al. (2021) y Chauhan y Kumar (2016). Lo anterior se observa claramente en la Figura 25, en donde se compara la distribución de la temperatura obtenida con el termómetro Fluke VT04A con los resultados del modelo M3. Por otra parte, las zonas cercanas a las entradas de aire presentan la temperatura más baja, ya que el aire que ingresa al secador se encuentra a temperatura ambiente, Figura 26 (Villagran et al., 2021). Los patrones de temperatura en la cubierta y piso de concreto indican una relación con la intensidad de radiación solar incidente durante el día (dado que es la fuente de energía principal), es posible observar que durante las 11 horas de simulación la distribución de la temperatura está en función de la ubicación del sol. En las mesas de secado, este efecto solo se observa a las 8:00 horas, posterior a ello, la temperatura presenta una distribución homogénea.

3.2.3 Distribución del flujo del aire

La circulación general y la velocidad de los flujos del aire en el interior del SSTI bajo las condiciones de simulación establecidas se muestran en la

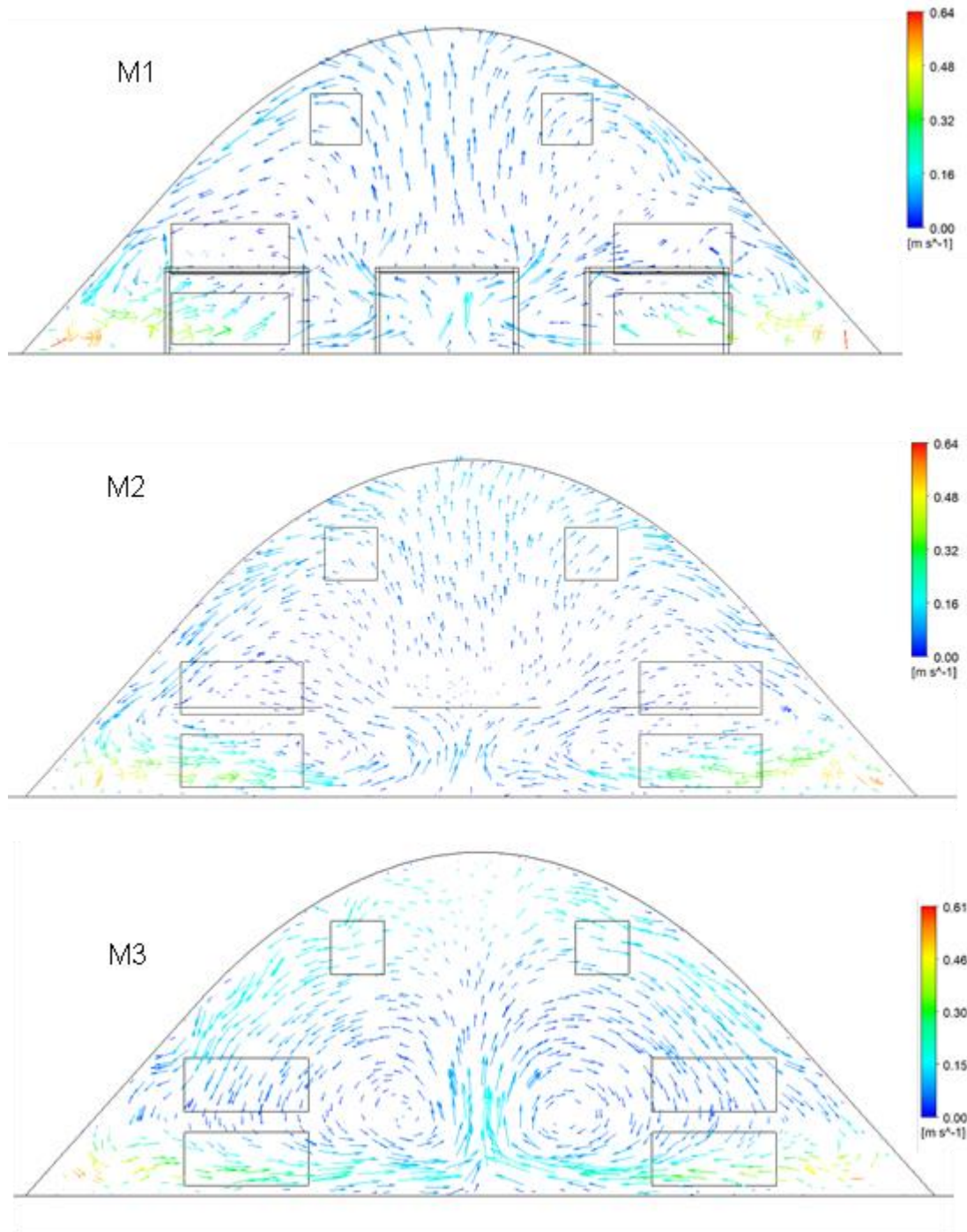


Figura 27. El movimiento del flujo de aire se caracteriza por la formación de dos bucles convectivos con rotación opuesta, siendo más evidente en los modelos

M1 y M3, lo que nos indica un flujo inestable, patrones similares fueron reportados por Lalmi et al. (2021) y Mesmoudi et al. (2017) al modelar invernaderos tipo túnel en 2D.

En la zona central del secador los flujos de aire presentan una baja velocidad, mientras que en las zonas cercanas al piso de concreto se producen velocidades mayores, considerando lo anterior se puede observar una relación entre la distribución de la temperatura y las velocidades del aire (Duong et al., 2021; Mesmoudi et al., 2017; Villagran et al., 2021).

La comparación de la velocidad entre los datos experimentales y los datos calculados se presentan en la Figura 28. Los resultados de la simulación muestran que los valores de la velocidad del aire oscilan en el rango de los $0.001 - 0.64 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, estos valores concuerdan con el reportado por Duong et al. (2021) quien obtuvo un valor de $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ al simular un secador solar tipo invernadero. El valor del MAE para el M1 fue de $0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, el cual presentó el mejor ajuste, mientras que para el M2 y el M3 el MAE fue $0.08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y fue $0.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente.

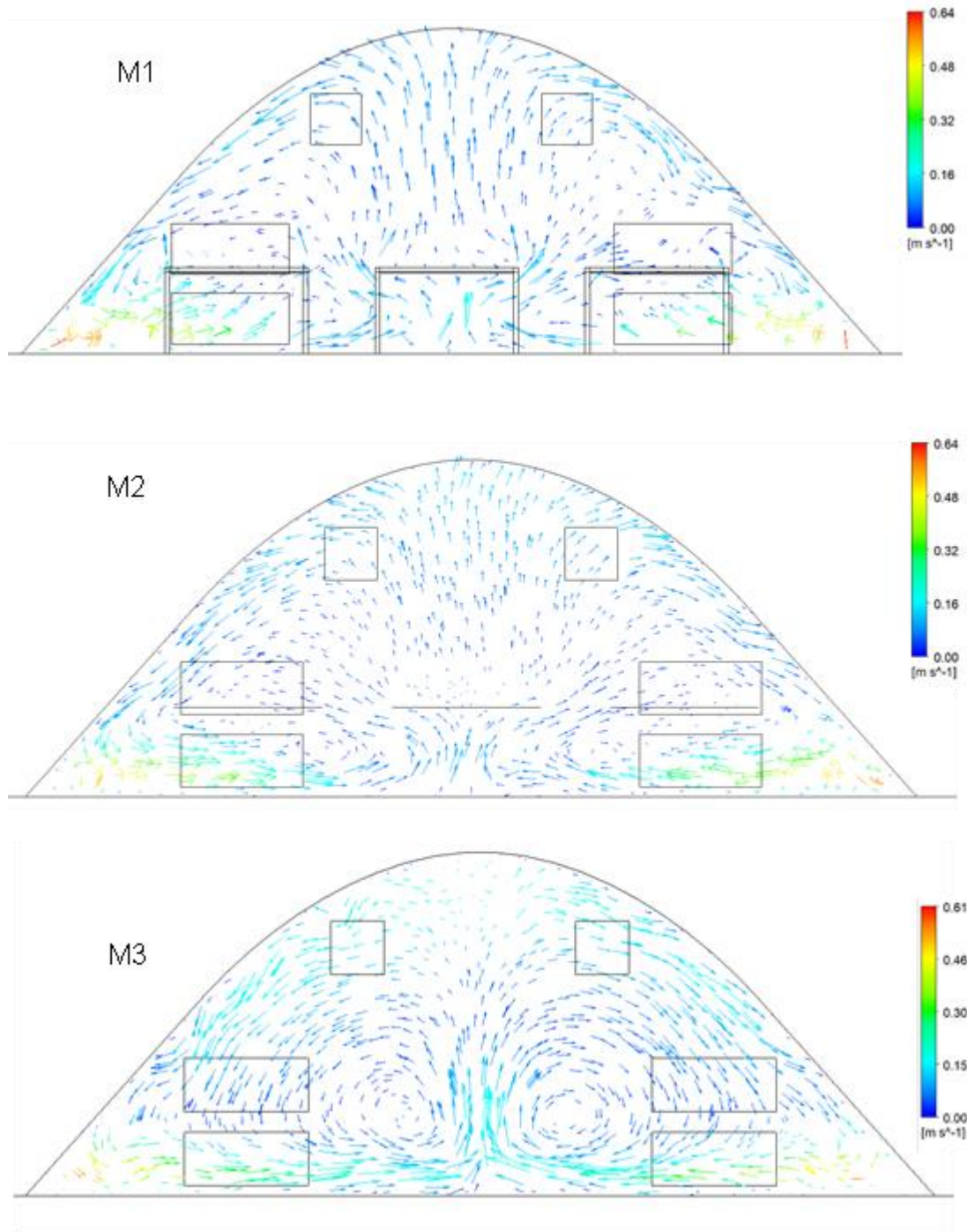


Figura 27. Patrones del flujo del aire en el interior del SSTI, vista frontal (13:00 horas).

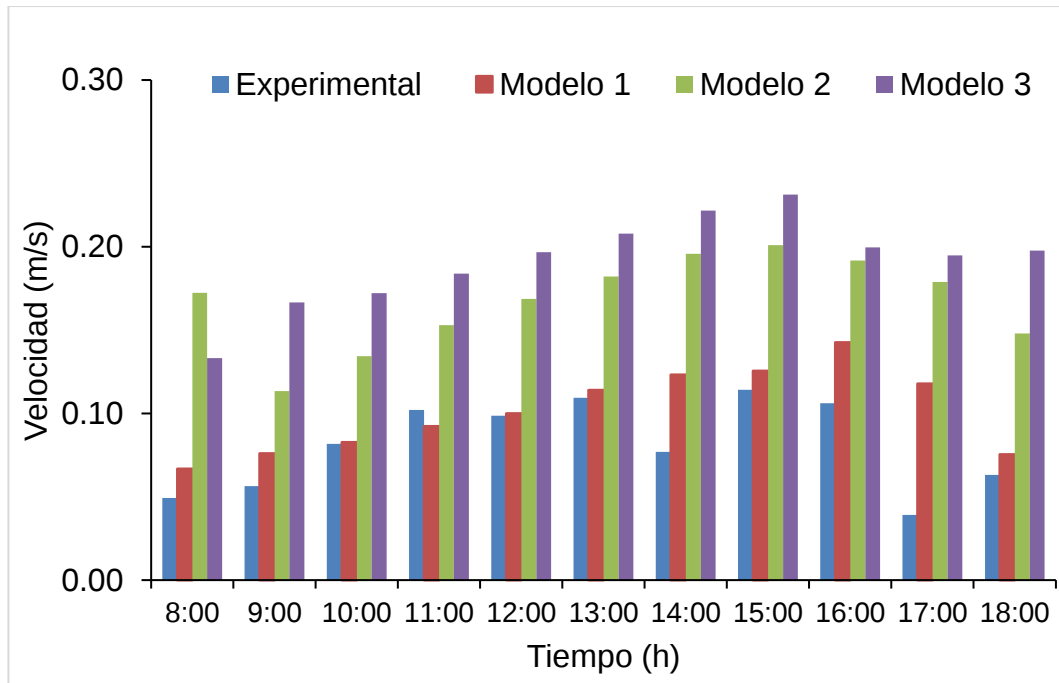


Figura 28. Velocidad de aire en el interior del SSTI.

3.3 Conclusiones

En este estudio se determinó la distribución espacial y temporal de las principales variables que intervienen en el proceso de secado de los productos agrícolas (temperatura, humedad relativa y flujo de aire), mediante modelación numérica con dinámica de fluidos computacional bajo tres condiciones de simulación diferentes. Los patrones de distribución de la temperatura y humedad relativa en el interior del sistema de secado de los tres modelos CFD son semejantes a los reportados en otros estudios, pero el comportamiento del flujo del aire difiere en las zonas cercanas a la cubierta. Los modelos fueron evaluados con datos medidos para soportar la credibilidad de los resultados simulados. El modelo que mejor se ajustó a los datos experimentales fue el M1, lo cual se esperaba, ya que es una representación más fiel del sistema real de secado, este modelo obtuvo valores del error medio absoluto de 3.10 °K, 1.40 % y 0.03 m·s⁻¹ de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento respectivamente y una correlación del 0.98 para la humedad y 0.93 para la temperatura. Sin embargo, también fue el modelo de mayor costo computacional (4 horas), un 50% más de tiempo de simulación comparado con los modelos M2 y M3 (2 horas). De acuerdo con los valores de correlación y MAE de los modelos M2 y M3 es viable considerar estos modelos para conocer el microclima de un secador solar por convección natural, pero con un nivel de detalle menor en la distribución de las variables de interés en relación con el modelo M1.

La comparación entre los datos experimentales y los resultados simulados muestran que la modelación mediante dinámica de fluidos computacional permite predecir el comportamiento de un sistema de secado solar con convección natural, brindando un amplio detalle de los patrones de distribución de las variables de interés, lo que hace a la dinámica de fluidos computacional una herramienta útil en el diseño de sistema de secado solar, evitando realizar experimentos físicos.

3.4 Literatura citada

Cabrera, F. J., López, J. C., Baeza, E. J., & Pérez-Parra, J. (2006). Efficiency of

Anti-Insect Screens placed in the Vents of Almería Greenhouses. *Acta Horticulturae*, 719, 605–614.

<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.719.70>

Chauhan, P. S., & Kumar, A. (2016). Performance analysis of greenhouse dryer by using insulated north-wall under natural convection mode. *Energy Reports*, 2, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2016.05.004>

Duong, Y. H. P., Vo, N. T., Le, P. T. K., & Tran, V. T. (2021). Three-dimensional simulation of solar greenhouse dryer. *Chemical Engineering Transactions*, 83, 211–216.

Fernandez, J. M. (2012). Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos. Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos. In *Editorial Reverté*. S.A.

Gok, K., Inal, S., Gok, A., & Gulbandilar, E. (2017). Comparison of effects of different screw materials in the triangle fixation of femoral neck fractures. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 28(5), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s10856-017-5890-y>

He, X., Wang, J., Guo, S., Zhang, J., Wei, B., Sun, J., & Shu, S. (2017). Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.001>

Lalmi, D., Benseddik, A., Bensaha, H., Bouzaher, M. T., Arrif, T., Guermoui, M., & Rabehi, A. (2019). Evaluation and estimation of the inside greenhouse temperature, numerical study with thermal and optical aspect. *International Journal of Ambient Energy*, 42(11), 1269–1280. <https://doi.org/10.1080/01430750.2019.1594369>

Li, H., Li, Y., Yue, X., Liu, X., Tian, S., & Li, T. (2020). Evaluation of airflow pattern and thermal behavior of the arched greenhouses with designed roof ventilation scenarios using CFD simulation. *PLOS ONE*, 15(9), e0239851. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239851>

- Mellalou, A., Riad, W., Hnawi, S. K., Tchenka, A., Bacaoui, A., & Outzourhit, A. (2021). Experimental and CFD Investigation of a Modified Uneven-Span Greenhouse Solar Dryer in No-Load Conditions under Natural Convection Mode. *International Journal of Photoenergy*, 2021, 1–12.
<https://doi.org/10.1155/2021/9918166>
- Mesmoudi, K., Meguellati, K., & Bournet, P.-E. (2017). Thermal analysis of greenhouses installed under semi arid climate. *International Journal of Heat and Technology*, 35(3), 474–486. <https://doi.org/10.18280/ijht.350304>
- Miguel, A. F., Van De Braak, N. J., & Bot, G. P. A. (1997). Analysis of the airflow characteristics of greenhouse screening materials. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 67(2), 105–112.
<https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0157>
- Pérez, C., Ramírez, J. A., & López, I. L. (2016). Características aerodinámicas de mallas anti-insectos usadas en ventanas de invernaderos en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 493–506.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v7i3.302>
- Salazar, R., Rodríguez, M., Casanova, P., & Solís, K. (2018). Cfd Applied in the Optimization of A Dryer For Parchment Coffee Drying (Coffearabica L .) By Forced Ventilation. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 7(1), 221–229. www.ajer.org
- Tamimi, E., & Kacira, M. (2013). ANALYSIS OF CLIMATE UNIFORMITY IN A NATURALLY VENTILATED GREENHOUSE EQUIPPED WITH HIGH PRESSURE FOGGING SYSTEM USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS. *Acta Horticulturae*, 1008(1008), 177–183.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1008.23>
- TIGAMPO, S., SAMBOU, V., DIEYE, Y., TOURE, P. M., & BODIAN, S. (2020). Study of air movement and temperature distribution in a greenhouse used as a dryer. *MATEC Web of Conferences*, 307, 01051.
<https://doi.org/10.1051/matecconf/202030701051>

- Valera, D. L., Álvarez, A. J., & Molina, F. D. (2006). Aerodynamic analysis of several insect-proof screens used in greenhouses. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 4(4), 273–279. <https://doi.org/10.5424/sjar/2006044-204>
- Villagran, E., Henao-Rojas, J. C., & Franco, G. (2021). Thermo-Environmental Performance of Four Different Shapes of Solar Greenhouse Dryer with Free Convection Operating Principle and No Load on Product. *Fluids*, 6(5), 183. <https://doi.org/10.3390/fluids6050183>