

Computational modeling of a mass transfer measuring device

Wilson Chavez-Basantes¹; Emerita Delgado-Plaza²; Domenica León-Moreira³ Ruben Paredes⁴
^{1,2,3,4}Faculty of Mechanical Engineering and Production Sciences, CDTs, ESPOL Polytechnic University, Ecuador,
wchavez@espol.edu.ec, eadelgad@espol.edu.ec, dvleon@espol.edu.ec, rparedes@espol.edu.ec

Abstract— This article presents a Computational Fluid Dynamics (CFD) model of a mass-transfer measurement device designed to characterize biomass properties using Fick's second law of diffusion, enabling the experimental determination of drying kinetics. The developed numerical model describes the device operation under vacuum conditions and incorporates the Ergun equation to represent the effect of the internal mesh filter. Model predictions were validated against experimental measurements performed with the device for different mesh sizes, yielding discrepancies of less than 1% in mass flow rate and below 7% in outlet air velocity. This validation supports the use of the model to assess alternative device geometries prior to fabrication and to extend the simulations to include biomass properties inside the internal containers, in order to analyze the influence of mass diffusion on the drying process.

Keywords—CFD, biomass, dryer, transient.

Modelamiento computacional de aparato medidor de transferencia de masa

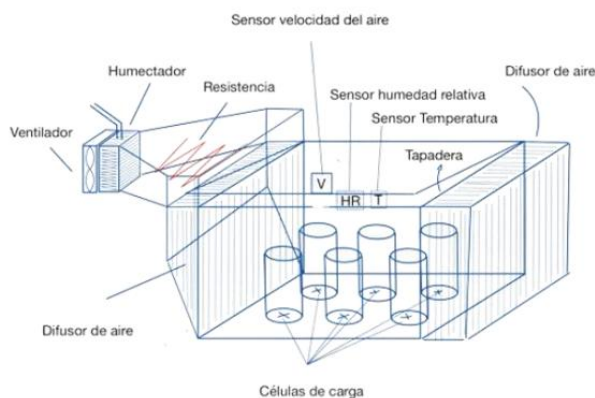
Wilson Chavez-Basantes¹; Emerita Delgado-Plaza²; Domenica León-Moreira³ Ruben Paredes⁴
^{1,2,3,4}Faculty of Mechanical Engineering and Production Sciences, CDTs, ESPOL Polytechnic University, Ecuador,
wchavez@espol.edu.ec, eadelgad@espol.edu.ec, dvleon@espol.edu.ec, rparedes@espol.edu.ec

Resumen— El presente artículo presenta la modelación mediante la mecánica de fluidos computacionales de un aparato medidor de transferencia de masa, el cual permite caracterizar las propiedades de la biomasa mediante la aplicación de la segunda Ley de Fick y de esta forma obtener la cinemática de secado de forma experimental. El modelo computacional desarrollado demuestra el funcionamiento del equipo en vacío considerando la ecuación de Ergun para simular el efecto del filtro de malla interno del equipo, el cual se corroboró con las mediciones experimentales realizadas con el equipo probando diferentes mallados, logrando obtener errores por debajo del 1% para el flujo masico y de menos del 7% en la velocidad de salida del flujo del aire. La validación permite poder probar previamente diferentes geometrías antes de la construcción del equipo y para posteriores modelaciones considerar las características de la biomasa dentro de los recipientes contenedores internos para estudiar los efectos de la difusión de masa.

Palabras clave—CFD, biomasa, secado, transiente.

I. INTRODUCCIÓN

La modelación del flujo a través de un medidor de difusividad de biomasa con flujo turbulento en estado transiente



Fuente: Universidad Politécnica de Valencia (2023).

Fig. 1 Diseño del difusor inicial en proceso de patente

A. Descripción de trabajos experimentales (o numéricos) previos

Tesis de grado de maestría de la universidad de Valencia “Puesta A Punto Y Evaluación De Un Prototipo Medidor De Difusividad Y Convección De Masa Patente P202330957 De La Universitat Politècnica De València”

- 1) Desarrollo de un prototipo para la medición de los fenómenos de transferencia de masa en procesos de secado de biomasa
- 2) Dentro de los objetivos se tuvo: 1) La medición por medios experimentales de los coeficientes de transferencia de masa por convección sólido – aire y de difusividad de masa, 2) Comparación de resultados con modelos teóricos predictivos, 3) Identificación de áreas de mejora en los modelos teóricos.
- 3) Para el proceso de secado, es importante considerar la velocidad del aire, el tiempo de secado, la temperatura, la humedad relativa, el tamaño de partícula y la porosidad del material
- 4) Para la determinación de los coeficientes de difusividad y de convección, se utilizó la ley de Fick y la ley de Newton para transferencia de masa

$$\dot{m}_w = -D_w \cdot A \cdot \rho_{aire} \cdot \frac{dw}{dx} \quad (1)$$

$$\dot{m}_w = h_w \cdot A \cdot \rho_{aire} \cdot (w_{sat} - w) \quad (2)$$

- 5) Para el prototipo, se mantuvo un flujo continuo de aire y se controló la velocidad, temperatura, humedad y dirección del aire.
- 6) Se consideró para el producto utilizado como muestra que los coeficientes se ven influenciados por el peso, tamaño, estructura y humedad de las muestras
- 7) El prototipo se desarrolló en una caja prismática de 120 cm x 80 cm x 54 cm a base de aluminio laminado y aislado a través de un recubrimiento de asfalto modificado y polímeros sintéticos SBS, sellados con AlucoBond.

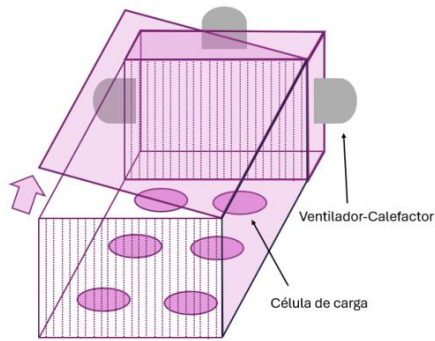


Figura 2. Esquema de la caja del prototipo con compuerta abatible

Fig. 2 Esquema de la caja del prototipo con compuerta abatible

8) El prototipo contiene una precámara de 17 cm x 103 cm separada por una lámina de acero microperforado, con el objeto de generar un flujo uniforme de aire mediante 3 ventiladores de aire y el uso de resistencias de 3 niveles (0, 1000 W y 2000W), así como 5 sensores de temperatura y 5 sensores de humedad.

9) Al interior posee 6 plataformas para la colocación de bandejas o tubos, donde cada bandeja tiene una celda de carga para monitorear el cambio de peso de las muestras durante el proceso de secado.

10) Los datos obtenidos son obtenidos mediante un controlador Arduino Mega 2560, para su posterior análisis en Excel, a fin de poder determinar la velocidad de secado. La lectura de datos se dio cada 3 minutos.

11) Las muestras dentro del prototipo pueden ser trituradas a una granulometría deseada, utilizando 2 configuraciones: 1) Viruta fina y 2) Pedazos de rama enteros.

12) La cámara puede variar la potencia de calentamiento mediante el uso de las resistencias, las cuales están configuradas como: Frio (0%), Templado (50%) y Caliente (100%).

13) Se utilizó como muestras de estudio astillas de madera de Jacaranda mimosifolia.



Fig. 3 Muestras de estudio

14) Se debe tener en cuenta que la densidad del aire es variable al estar en función de la humedad al interior de la cámara, lo cual influye en la determinación de los coeficientes de difusión y convección.

15) La presión de vapor del aire al ingreso se calcula a partir de la humedad relativa del aire.

16) Durante la ejecución de los experimentos, no fue posible calibrar los sensores de carga de manera adecuada.

17) El tiempo de ejecución del experimento por cada muestra fue de 5 horas.

18) El valor de la difusividad fue calculado en base a la velocidad media de secado, mediante el empleo de 3 criterios: 1) Criterio de las medias, 2) Criterio de la pérdida de masa, 3) Criterio de la pendiente.

19) Se observó un comportamiento exponencial en la velocidad de secado. Como dato conservador, se empleó el valor de la pendiente de la recta de regresión, la cual proporciona un tiempo de secado más alto.

20) La grafica mostrada fue obtenida con un flujo laminar con una velocidad de aire de 0.23 m/s con una temperatura inicial de 24.35 °C y una humedad relativa de 43.21%.

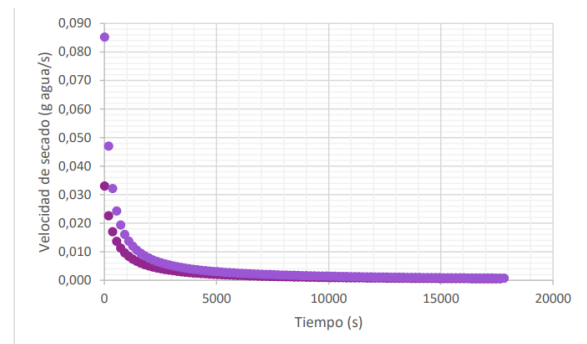


Fig. 4 Curva de velocidad de secado

21) Aplicando el mismo criterio, se determinó el coeficiente de convección de transferencia de masa y se observó un comportamiento exponencial en función de la humedad.

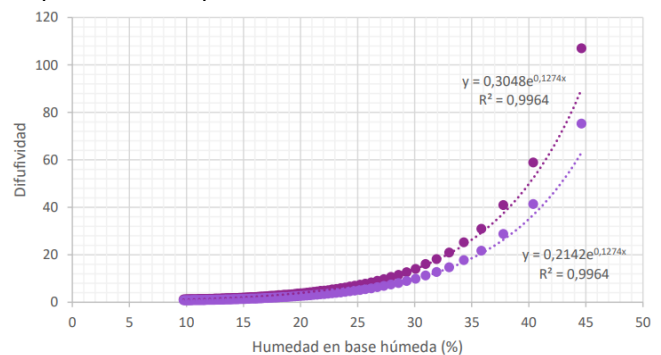


Fig. 5 Curva de difusividad en función de la humedad

22) Para validar las mediciones experimentales, se comparó con los modelos teóricos existentes, donde el coeficiente de convección de transferencia de masa depende del número de Sherwood, el mismo que depende del número de Reynolds y de Schmidt.

$$h_w = \frac{D_w \cdot Sh}{L_c} \quad (3)$$

$$\text{Régimen laminar} \quad (Re < 5 \cdot 10^5, Sc > 0,5) \quad Sh = 0,664 \cdot Re^{0,5} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$\text{Régimen turbulento} \quad (5 \cdot 10^5 < Re < 10^7, Sc > 0,5) \quad Sh = 0,037 \cdot Re^{0,8} \cdot Sc^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot L_c}{\mu} \quad (6)$$

$$Sc = \frac{\mu}{D_w \cdot \rho} \quad (7)$$

23) La siguiente curva presenta la comparación del valor teórico y el obtenido experimentalmente, a fin de validar de que el prototipo permite determinar los valores de difusividad y el coeficiente de transferencia de masa por convección de una muestra.

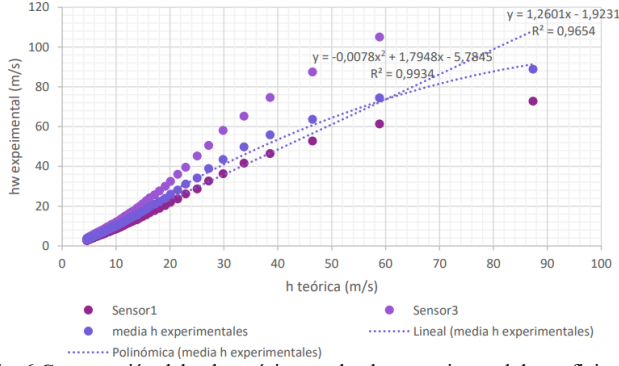


Fig. 6 Comparación del valor teórico vs el valor experimental de coeficiente de transferencia de masa

24) Como observación, no se observó diferencias en el empleo de bandejas o tubos durante los experimentos

B. Fenómenos físicos de interés

- 1) Transferencia de calor por convección forzada sobre elementos para colocación de biomasa.
- 2) Temperatura de ingreso del aire a temperatura constante
- 3) Considerar la salida de la precámara y cámara de placas perforadas como un medio poroso.

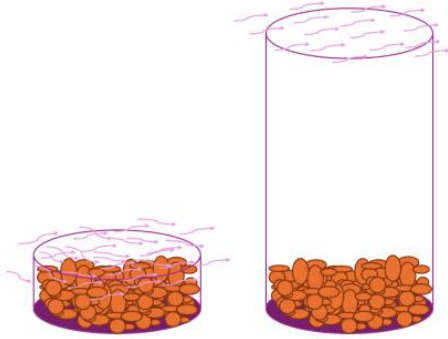


Figura 4. Esquemas de los recipientes a utilizar en el prototipo

Fig. 7 Esquema de los recipientes a utilizar en el prototipo

C. Ecuaciones gobernantes

- 1) Ecuación de continuidad

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (8)$$

- 2) Ecuación de energía

a. Flujo de Aire

$$\rho_a c_{p_a} \frac{\partial T_a}{\partial t} + \rho_a c_{p_a} \nabla \cdot (T_a \vec{u}) + \nabla \cdot (P \vec{u}) = k_a \nabla^2 T_a + hA(T_s - T_a) \quad (9)$$

b. Sólido

$$\rho_s c_{p_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \nabla^2 T_s + hA(T_a - T_s) \quad (10)$$

c. Medio poroso (Ec. Ergun)

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \mu_a \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot \frac{u}{D_p^2} + 1.75 \rho \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^3} \cdot \frac{u^2}{D_p} \quad (11)$$

- 3) Ecuación de conservación de momentum

a. Flujo de aire

$$\rho_a \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right] = -\nabla P + \mu_a \nabla^2 \vec{u} \quad (12)$$

II. METODOLOGÍA

El prototipo de secado probado experimentalmente en la Universidad de Valencia en base a lo descrito anteriormente se muestra a continuación, considerando las placas perforadas a la salida de la precámara y de la cámara y con ambas configuraciones, es decir, con cilindros y con bandejas.

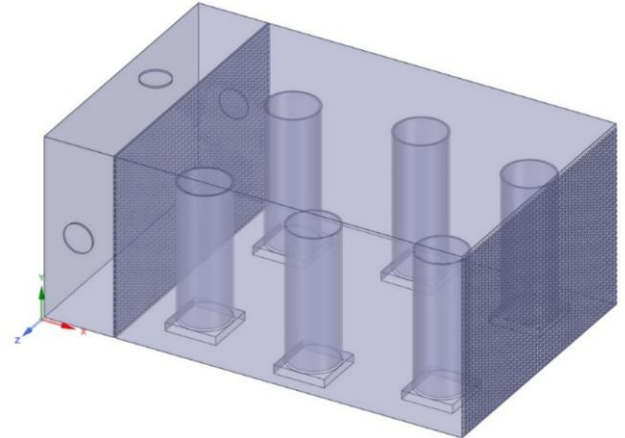


Fig. 8 Prototipo con cilindros

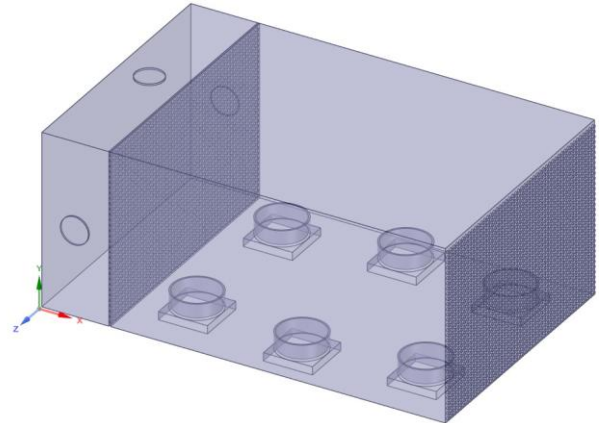


Fig. 9 Prototipo con bandejas

En base a las simplificaciones a utilizar en el modelo, se realizó el modelado computacional en ANSYS Fluent R2 2024 con cálculos de doble precisión y con el uso de 4

procesadores de 13va generación Intel Core i7 en un computador portátil.
Con el fin de verificar si los tamaños de los elementos seleccionados en la malla influyen en los cálculos, se procedió a preparar 3 mallas distintas con elementos poliédricos para el caso del prototipo con los cilindros y una malla media para las bandejas, de acuerdo con la Tabla 1

TABLA 1
Tamaño de malla para modelado computacional

Tipo de malla	Numero de celdas	Tamaño mínimo (mm)	Tamaño máximo (mm)	Ortogonalidad > 70%
Fina (cilindro)	203559	3	75	93%
Media (cilindro)	150718	6	150	91%
Gruesa (cilindro)	105312	9	225	89%
Media (bandeja)	111197	6	150	85%

Para los 4 casos, se discretizo con un paso de tiempo fijo de 0.01 segundos para 6000 pasos de tiempo, a fin de poder observar el comportamiento del prototipo en 60 segundos.

D. Modelo de malla empleado

A continuación, se presenta las mallas utilizadas para el modelado con cilindros y bandejas

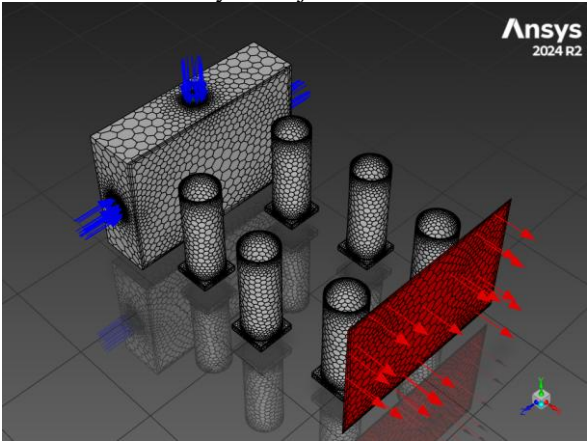


Fig. 10 Mallado fino de prototipo con cilindros

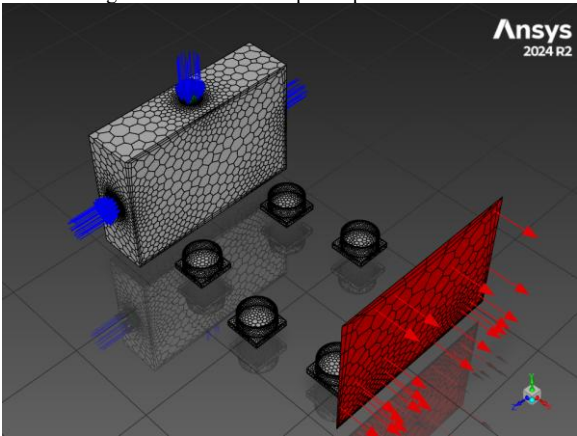


Fig. 11 Mallado medio de prototipo con bandejas

E. Propiedades de los materiales

Se considero las propiedades del aire como constante tanto al interior de la precámara como en la cámara, lo que se muestra en la Tabla 2

TABLA 2
Propiedades del aire

Propiedad	Valor
Densidad	1.225 kg/m³
Calor específico	1006.43 J/ (kg K)
Conductividad térmica	0.0242 W/ (m K)
Viscosidad	1.7894E-5 kg/ (m s)
Peso molecular	28.966 kg/kmol

De igual manera, para las paredes de la cámara y la precámara y las bandejas y cilindros se consideró las propiedades del aluminio.

TABLA 3
Propiedades del Aluminio

Propiedad	Valor
Densidad	2719 kg/m³
Calor específico	871 J/ (kg K)
Conductividad térmica	202.4 W/ (m K)

F. Condiciones de frontera

Se tiene 3 entradas de aire con los mismos valores de velocidad y temperatura de 3.4 m/s y 48.35 C respectivamente.

Para modelar la turbulencia, se empleó el modelo SST con los valores predefinidos por el programa con una intensidad de turbulencia del 5% y un radio de viscosidad turbulenta de 10.

Se considero la salida a presión atmosférica del aire y para que se tome en cuenta el efecto de la placa porosa a la salida, se consideró un coeficiente de pérdida de 3.11, el cual está en función de una caída de presión asumida de 0.11 Pa a la velocidad observada experimentalmente.

Para el modelado de la placa perforada interna, se consideró el modelo de Porous Jump de ANSYS Fluent, la cual obedece la siguiente ecuación con $L= 5\text{ mm}$, $\alpha= 0.363976\text{ m}^2$ y $C_2=14467.78\text{ m}^{-1}$, cuyos valores dependen de la porosidad de la malla en base al área de la placa con respecto al área de los agujeros, la cual tiene 1584 agujeros de 10 mm de diámetro, teniendo un valor de 0.0735

$$\Delta P = -\left(\frac{\mu}{\alpha}u + C_2\rho u^2\right)L \tag{13}$$

Para el caso de los cilindros y bandejas, se consideró la transferencia de calor en las paredes.

G. Esquema de discretización

Para el estado transiente se consideró el esquema PISO de 1er orden implícito y para el resto de las ecuaciones se tomó en cuenta un esquema de segundo orden Upwind.

H. Convergencia

Considerando un error de 0.001, las 3 mallas lograron la convergencia en las ecuaciones de continuidad, momentum, energía y coeficientes de turbulencia

III. RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación, se presenta los resultados obtenidos en cada una de las mallas utilizadas en los cilindros y en las bandejas.

TABLA 4
Resultados del modelado en bandejas y cilindros

Variables	Cilindro Fina	Cilindro Media	Cilindro Gruesa	Bandeja Media
Flujo masico entrada (kg/s)	0.07198832	0.07169506	0.07105498	0.07169524
Flujo masico salida (kg/s)	-	-	-	-
Velocidad placa porosa (m/s)	0.7979003	0.7881168	0.7847508	0.7760101
Velocidad salida (m/s)	0.2173614	0.2170417	0.2154514	0.2160524
Temperatura placa porosa (C)	47.46692	47.48237	47.49843	48.05611
Temperatura salida (C)	44.8196	44.81587	44.83461	47.32591
Temperatura elemento 1 (C)	31.07387	31.21582	31.32459	29.34086
Temperatura elemento 2 (C)	30.83207	31.03691	31.2329	29.56032
Temperatura elemento 3 (C)	30.32829	30.4439	30.53034	27.91902
Temperatura elemento 4 (C)	30.24284	30.28588	30.53302	27.86388
Temperatura elemento 5 (C)	30.04353	30.11937	30.13053	27.61446
Temperatura elemento 6 (C)	29.83647	29.90905	30.17678	27.74036

Como se puede observar en la TABLA 4, los valores obtenidos para el mismo tiempo de simulación en cada malla son similares, por lo que la calidad de malla no influye de forma negativa en la convergencia de los resultados.

Adicionalmente, los valores de velocidad y temperatura se estabilizan entre los 30 y 35 segundos de simulación, como se puede observar en las gráficas siguientes para las velocidades de salida.

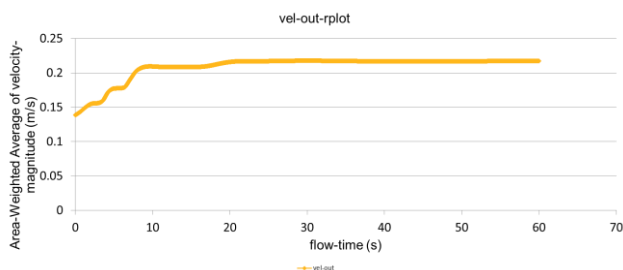


Fig. 12 Velocidad de salida de prototipo de cilindros con malla media

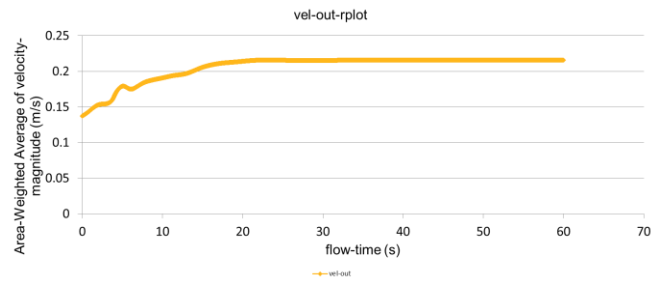


Fig. 13 Velocidad de salida de prototipo de cilindros con malla gruesa

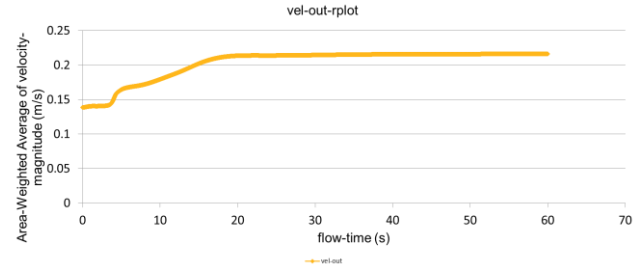


Fig. 14 Velocidad de salida de prototipo de bandejas con malla media

Adicionalmente se puede observar la distribución de temperatura al final de la simulación en todos los casos de los cilindros y el de las bandejas

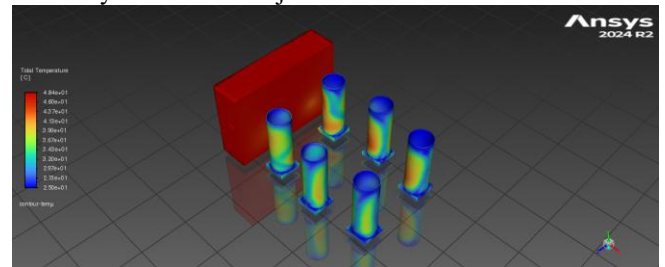


Fig. 15 Contorno de temperatura y velocidad malla fina

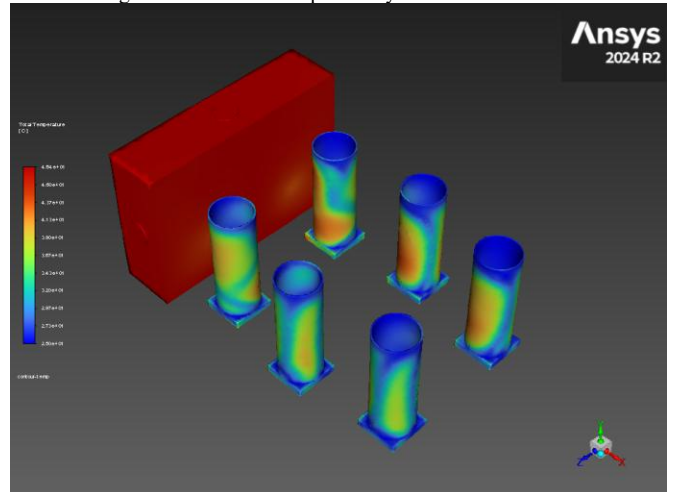


Fig. 16 Contorno de temperatura y velocidad malla media

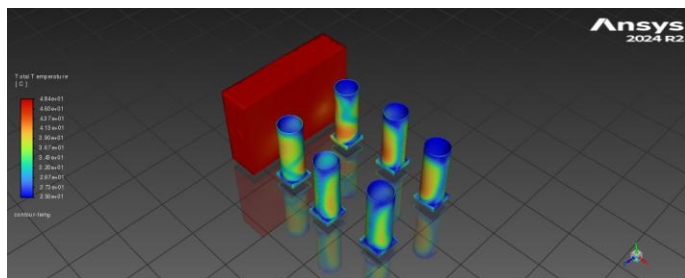


Fig. 17 Contorno de temperatura y velocidad malla gruesa

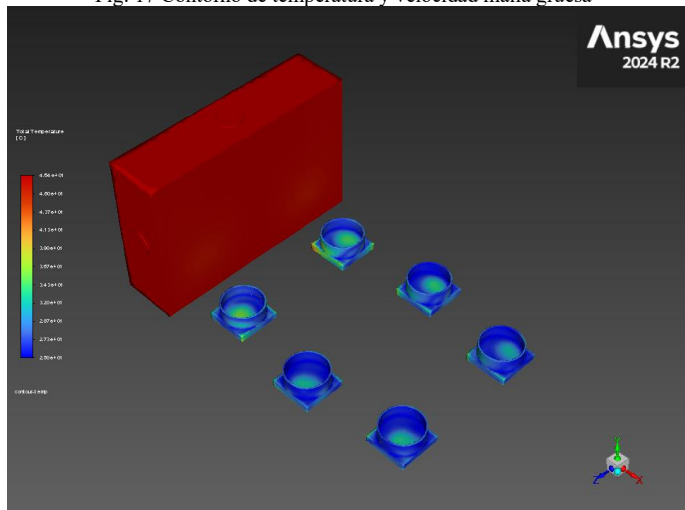


Fig. 18 Contorno de temperatura y velocidad malla fina

IV. VALIDACIÓN: COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

En base a los experimentos ejecutados en la Universidad de Valencia y los datos de entrada, se puede observar que el flujo masico fue de 0.0723 kg/s y la velocidad de salida obtenida fue de 0.23 m/s. En la tabla siguiente, se muestra la diferencia de valor y el error porcentual obtenido.

TABLA 5
Errores entre valores experimentales y el modelado computacional

Variables	Cilindro Fina	Cilindro Media	Cilindro Gruesa	Bandeja Media
Δ Flujo masico (kg/s)	0.00031168	0.00060494	0.00124502	0.00060476
Error Flujo masico salida (%)	0.43	0.83	1.72	0.84
Δ Velocidad salida (m/s)	0.0126386	0.0129583	0.0145486	0.0139476
Error Velocidad salida (%)	5.49	5.63	6.33	6.06

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como se puede observar, el modelado propuesto para simular el comportamiento del prototipo de medición de difusividad de masa en base a los datos experimentales obtenidos en la Universidad de Valencia posee una buena aproximación al estar por debajo del 10% de error en el valor de velocidad de salida y flujo masico.

Se observa como después de un paso de tiempo de 30 segundos aproximadamente, la temperatura del aire comienza el proceso de transferencia de calor con las bandejas y cilindros de acuerdo con los perfiles observados.

A fin de facilitar el modelado, el uso de un modelo simplificado para el medio poroso disminuye la cantidad de elementos al no tener que discretizar cada perforación de la placa metálica.

VI. CONCLUSIONES

El modelo propuesto en vacío se acerca a lo encontrado experimentalmente, por lo que, en caso de necesitar un mejor comportamiento del medio poroso, se debe colocar un volumen que represente la placa y configurar como medio poroso para la posterior discretización, considerando que va a demandar un mayor número de celdas y mayor costo computacional al momento del cálculo.

Se observa durante el modelado computacional, que el modelo no depende del tamaño de la malla para su convergencia a los resultados esperados.

Para completar el experimento ejecutado en la Universidad de Valencia, es necesario colocar al interior de las bandejas y cilindros la biomasa y configurar el programa para que considere las ecuaciones de transporte de especies, medios porosos y el efecto de la evaporación del agua contenida en la muestra.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

En esta sección puede agradecer a las personas e instituciones que contribuyeron con el desarrollo del estudio.

REFERENCIAS

- [1] Belleudy, C., Woloszyn, M., Chhay, M., & Cosnier, M. (2016, April). A 2D model for coupled heat, air, and moisture transfer through porous media in contact with air channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 95, 453–465. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.12.030
- [2] Castro, A. M., Mayorga, E. Y., & Moreno, F. L. (2018, April). Mathematical modelling of convective drying of fruits: A review. *Journal of Food Engineering*, 223, 152–167. doi:10.1016/j.jfoodeng.2017.12.012
- [3] Datta, A. K. (2007). Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations. *Journal of Food Engineering*, 80, 80–95.
- [4] Diaz, J. (2024). Estudio y simulación fluidodinámica de un prototipo de difusividad para la FIMCP. bathesis, Escuela Superior Politecnica del Litoral.
- [5] Ge, M., Chen, G., Liu, W., & Liu, C. (2024, December). Study of heat and mass transfer during drying process of maize grain pile based on computed tomography. *Biosystems Engineering*, 248, 82–96. doi:10.1016/j.biosystemseng.2024.10.003
- [6] Haya, R. (2024). Puesta a punto y evaluación de un prototipo medidor de difusividad y conveccion de masa Patente P202330957 de la Universitat Politecnica de Valencia. mathesis, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA.
- [7] Hayyat, U., Khan, M. U., Farooq, M., Sultan, M., Khan, M. M., Liu, G., . . . Riaz, F. (2024, March). CFD simulation of a forced draft biomass cookstove for different airflow conditions. *Results in Engineering*, 21, 101928. doi:10.1016/j.rineng.2024.101928
- [8] Kemp, I. C., & Oakley, D. E. (2002). Modelling of particulate drying in theory and practice. *Drying Technology*, 20, 1699–1750. doi:10.1081/DRT-120015410
- [9] Lal, S., Lucci, F., Defraeye, T., Poulikakos, L. D., Partl, M. N., Derome, D., & Carmeliet, J. (2018, January). CFD modeling of convective scalar

- transport in a macroporous material for drying applications. *International Journal of Thermal Sciences*, 123, 86–98. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2017.09.010
- [10] Malekjani, N., & Jafari, S. M. (2018, August). Simulation of food drying processes by Computational Fluid Dynamics (CFD); recent advances and approaches. *Trends in Food Science & Technology*, 78, 206–223. doi:10.1016/j.tifs.2018.06.006
- [11] Martí, B. V., Neto, A. B., Retana, D. N., Parra, A. C., & Guerrero-Luzuriaga, S. (2024). Determination of biomass drying speed using neural networks. *Biomass and Bioenergy*, 186, 107260. doi:10.1016/j.biombioe.2024.107260
- [12] Martí, B. V., Sánchez, J. R., Ferre, Á. J., & Cortés, I. L. (2019). Dendrometric analysis of *Tamarix africana* L., species of river and wetlands of the Mediterranean area. Characterisation of biomass. *Biomass and Bioenergy*, 120, 426–432. doi:10.1016/j.biombioe.2018.12.003
- [13] Navarro, M. A., & Santos, A. A. (2008, September). Numerical Simulation of Water and Flow through the Bottom End Piece of a Nuclear Fuel Assembly. *Journal of Power and Energy Systems*, 2, 744–755. doi:10.1299/jpes.2.744
- [14] Prukwarun, W., Khumchoo, W., Seancotr, W., & Phupaichitkun, S. (2013, March). CFD simulation of fixed bed dryer by using porous media concepts: Unpeeled longan case. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 6, 100–110.
- [15] Ramachandran, R. P., Akbarzadeh, M., Paliwal, J., & Cenkowski, S. (2017, December). Computational Fluid Dynamics in Drying Process Modelling—a Technical Review. *Food and Bioprocess Technology*, 11, 271–292. doi:10.1007/s11947-017-2040-y
- [16] Seiedlou, S., Ghasemzadeh, H. R., Hamdami, N., Talati, F., & Moghaddam, M. (2010). Convective Drying of Apple: Mathematical Modeling and Determination of some Quality Parameters. *INTERNATIONAL JOURNAL OF AGRICULTURE & BIOLOGY*, 12, 171–178.
- [17] Singh, P., & Talukdar, P. (2019, August). Design and performance evaluation of convective drier and prediction of drying characteristics of potato under varying conditions. *International Journal of Thermal Sciences*, 142, 176–187. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2019.04.019
- [18] VELÁZQUEZ MARTÍ, B., PERALTA JARAMILLO, J., DELGADO PLAZA, E., & REINOSO TIGRE, J. (2025, January). *Aparato Medidor de Transferencia de Masa*. techreport, OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS.
- [19] Wu, H., Fang, C., Wu, R., & Qiao, R. (2020). Drying of porous media by concurrent drainage and evaporation: A pore network modeling study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 152, 118718. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118718
- [20] Zhang, R., Wang, Y., Ren, H., Li, W., Tang, Z., & Zhang, D. (2024, January). Multi-scale study of turbulent mass transfer process in different shaped-adsorbent packed bed. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 218, 124810. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124810
- [21] Zhao, A., Rui, X., Rong, B., & Wang, G. (2021, November). Conjugate modeling of flow and simultaneous heat and mass transfer in convective drying of porous substances. *Applied Thermal Engineering*, 199, 117571. doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.117571
- [22] Zhu, Y., Wang, P., Sun, D., Qu, Z., & Yu, B. (2021, August). Multiphase porous media model with thermo-hydro and mechanical bidirectional coupling for food convective drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 175, 121356. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121356