

# Modelado del comportamiento térmico de un horno de flujo radial para el secado de biomasa como validación de prácticas de laboratorio en institución de educación superior

## Modeling of the thermal behavior of a radial flow furnace for the drying of biomass as validation of laboratory practices in higher education

Jean Escorcía<sup>1</sup>, Joaquín Fontalvo<sup>1</sup>, Henry Santamaria<sup>2</sup>, Jonathan Fábregas<sup>2</sup>, Javier Carpintero<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>Ingeniero mecánico, Programa de Ingeniería Mecánica, Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, Colombia

<sup>2</sup>Magister en Ingeniería Mecánica, Programa de Ingeniería Mecánica, Universidad Autónoma del Caribe, Grupo De Investigación GIIIMA, Barranquilla, Colombia.

<sup>3</sup>Magister en Ingeniería Mecánica, GINS Research Group, Department of Civil and Environmental  
Universidad De La Costa, Calle 58 #55-66, 080002 Barranquilla, Atlántico, Colombia.

Email: Henry.santamaria@uac.edu.co

Cite this article as: J. Escorcía Castro, J. Fontalvo Cantillo, H. Santamaria De La Cruz, J. Fábregas Villegas, J. Carpintero Durango. (2019). "Modelado del comportamiento térmico de un horno de flujo radial para el secado de biomasa como validación de prácticas de laboratorio en institución de educación superior", *Prospectiva*, Vol 17(2), 53-59 2019.

Recibido: 09/07/2019 / Aceptado: 31/07/2019

<http://dx.doi.org/10.15665/rp.v17i2.1911>

### RESUMEN

Se realizó un modelamiento numérico mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) de las variables térmicas que intervienen en un horno de flujo radial utilizado para el secado de biomasa como motivo de validación para prácticas de laboratorio en institutos de educación superior (IES), evaluando el comportamiento de la velocidad de flujo de aire con respecto a la temperatura de entrada, utilizando una geometría de horno radial suministrado por estudios experimentales desarrollados en prácticas de laboratorio en IES.

**Palabras clave:** Dinámica de fluidos computacional (CFD), Diseño asistido por computador (CAD), Horno de flujo radial, Secado de biomasa.

### ABSTRACT

A numerical modelling was performed using computational fluid dynamics (CFD) of the thermal variables involved in a radial flow furnace used for biomass drying as a validation reason for laboratory practices in higher education institutes (HEI), evaluating the performance of the rate of air flow with respect to the input temperature, using a geometry of laboratory studies developed in the laboratory at HEI.

**Keywords:** Computational Fluid Dynamics (CFD), Computer Aided Design (CAD), Radial Flow Furnace, Biomass Drying.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el presente estudio se desarrolla la modelación de un horno con flujo radial para el secado de biomasa como motivo de validación para prácticas de laboratorio en IES. Por medio de herramientas de diseño computacional (CAD) y de Dinámica de Fluidos (CFD).

Los hornos secadores que actualmente se están utilizando para proceso de secado de biomasa consumen mucha energía, contienen puntos de estancamientos que no permiten la extracción de humedad de la biomasa, los niveles de temperatura no son recomendables para obtener una calidad en el producto y no regulan los valores altos de velocidad dentro del horno.

Siendo el secado un proceso relevante para la consecución de la biomasa combustible o para almacenaje en caso de los alimentos, es importante hallar los parámetros más adecuados para aumentar el rendimiento energético en cuanto a calor de la biomasa a secar. Siendo estos la velocidad del flujo, la temperatura de entrada y la cantidad de humedad a retirar.

Utilizando estudios experimentales realizados en trabajos de investigación de la Universidad del Norte por Santamaría [1]. En su trabajo desarrollado el cual de manera experimental evaluó el comportamiento de las variables de proceso de secado para un horno radial utilizando como material biomásico la yuca, obtuvo las correlaciones correspondientes a las operaciones de transferencia de masa y números adimensionales para la transferencia de calor por convección. Se han realizado estudios del modelamiento del comportamiento de hornos de secado de biomasa desarrollados en la Universidad Autónoma del Caribe de Colombia como lo son el estudio de Padilla et al. [2] en el cual realizaron un estudio de un horno secador continuo de banda transportadora para arroz, en el cual se obtuvieron los perfiles térmicos y comportamiento de variables internas como velocidades de aire. También se encuentran los estudios realizados por Orozco et al. [3] en el que desarrollaron un modelamiento numérico para un horno de tambor rotatorio utilizado para el secado de biomasa, en el estudio obtuvieron los comportamientos de temperatura, así como la velocidad del aire en el interior del tambor rotatorio. En otros estudios desarrollados se encuentra el trabajo presentado por Fábregas [4] desarrollando la caracterización y modelado de la cinética de secado de la cascarilla de arroz de manera estadística experimental y validación mediante modelamiento computacional, obteniendo modelos matemáticos entre los efectos de las variables de humedad relativa del agente secante, cantidad de masa de las muestras de cascarilla de arroz, velocidad de entrada del agente secante y temperatura de entrada, y como variables de respuestas el tiempo de equilibrio y humedad de equilibrio.

En estudios realizados en la Universidad del Norte de Colombia se encuentran trabajos realizados por Durango et al.

[5] En el que obtuvieron modelos matemáticos para secadores de alimentos de flujo radial, obteniendo las variables incidentes en el proceso de secado de alimentos y el porcentaje de humedad retirada al variar cada una de ellas. Entre los trabajos realizados se encuentran el de Durango et al. [6] Los cuales hicieron la construcción de un modelo de secador de yuca, en medio poroso usando flujo radial y utilizando energía eléctrica como fuente de calentamiento del aire de secado y analizaron el desempeño energético, la tasa de remoción de humedad en función del tiempo y las temperaturas de operación del mismo. Además, en trabajos como los de Fábregas et al. [7] Desarrollaron un proyecto en el cual de manera integrada con los contenidos programáticos del programa de ingeniería mecánica realizaron el estudio de una cámara secadora por medio de prácticas de laboratorio y evaluación por simulación por computador del secado de biomasa del corozo obteniendo buenas aproximaciones en los resultados y en concordancia a las leyes presentes en los estudios de IES (Instituciones de Educación Superior). Consecuentemente se han desarrollado estudios experimentales por modelación para el secado de biomasa con validación computacional presentando una alta eficiencia en sus resultados, entre estos estudios se encuentra Alvarado [8] que desarrollo un estudio del rendimiento en el secado de la fruta fresa usando horno microondas el cual presentaba pulsaciones electromagnéticas controladas para mantener la intensidad de calor deseada. En otros estudios como los de Albis et al. [9] En el que realizaron el proceso de secado a convección forzada de ají tabasco caracterizando la influencia de la velocidad del agente secante y la temperatura, permitiéndose encontrar el punto óptimo para deshidratar esta biomasa, mientras que Alvarado et al. [10] realizaron el proceso de secado del carbón mineral de manera discontinua utilizando un horno microondas comparando su resultado con la técnica de secado en térmico en estufa convencional. Y como se ha mencionado el estudio de secado por medio de modelaciones CFD ha sido un método de análisis que tiene alta precisión a la hora de validar con estudios experimental de secado de material biomásico [11, 12, 13, 14], atendiendo la funcionalidad de los hornos y cámaras secadoras, y teniendo en cuenta la influencia de las variables predominantes, en el presente estudio se realiza el modelado térmico por medio de CFD de un horno de secado tipo radial como motivo exploratorio para la implementación de prácticas de laboratorio en institutos de educación superior.

## 2. METODOLOGÍA

La definición de la configuración física del horno con flujo radial por medio de herramientas computacionales se realizó tomando la configuración del horno de las investigaciones realizadas por Henry Santamaría [1] y consta de las siguientes descripciones:

Dos mallas colocadas cilíndricamente en su interior para colocar intermedio de ellas los trozos de biomasa, con carcasa exterior cilíndrica y su tapa circular, las dimensiones se muestran más adelante en el desarrollo del CAD, para las pertinentes simulaciones. Como núcleos temáticos el presente estudio toma las asignaturas del programa de ingeniería mecánica de la Universidad Autónoma del Caribe en Colombia, como motivo de enseñanza en la aplicación de conocimientos adquiridos desarrollados en un medio virtual el cual reduce los costos de instrumentación y recursos naturales. Los núcleos temáticos se muestran en la figura siguiente.

Figura 1. Núcleos temáticos  
Figure 1. Thematic nuclei



### 2.1. Implementación del modelo computacional

Se importa el modelo CAD del horno a CFD para realizar las correspondientes simulaciones, se le indica las combinaciones de temperatura y velocidades para entrada y salida a su vez el tipo de flujo, materiales y todas las configuraciones que se requieren para la simulación.

### 2.2. Parámetros

Para las simulaciones del horno se toman las siguientes combinaciones a evaluar:

Para la temperatura valores de 50 y 70 °C, y para las velocidades valores de 2, 4 y 6 m/s. Estos serán combinados con el fin de alcanzar la homogeneidad dentro del horno y garantizarlo principalmente en la zona de trabajo para la obtención del secado.

### 2.3. Pérdidas energéticas en el proceso de secado

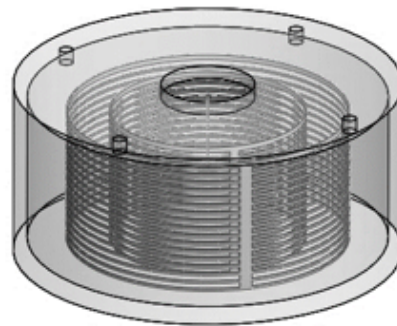
Por medio de cálculos energéticos se cuantifican las pérdidas que tiene el proceso de secado con la variación de los parámetros antes mencionados lo que espera encontrar la combinación de valores que permita que tanto la temperatura como la velocidad del flujo dentro del horno sea homogénea en toda la geometría del secador lo que permitirá la eficiente remoción de la humedad y obtener un producto de mejor calidad.

### 2.4. Realización de la geometría CAD

El horno está conformado por dos piezas; una carcasa y una tapa, las medidas del primero posee un diámetro de 1400 mm y una altura de 600 mm, es hueca en su interior y tiene un espesor de 50 mm en cada una de sus paredes. Para el segundo se tiene un diámetro de 1500 mm y una altura de 100 mm, es hueca en su interior y mantiene el mismo espesor de la carcasa en sus paredes. En la parte interior del horno se encuentran dos mallas circulares situadas perpendicularmente a la base de la carcasa, con un diámetro de 1000 y 700 mm respectivamente, con una altura de 550 mm y un espesor de 3 mm cada una. El espacio entre mallas son colocadas rodajas de biomasa.

Seguido a esto posee una mesa circular, con diámetro de 552 y un espesor de 20 ambas en mm. y 4 barrotos que poseen un diámetro de 20 mm y una altura de 500 mm. La mesa fue diseñada para simular el flujo radial dentro del horno.

Figura 2. Representación geométrica del horno radial  
Figure 2. Geometric representation of radial furnace

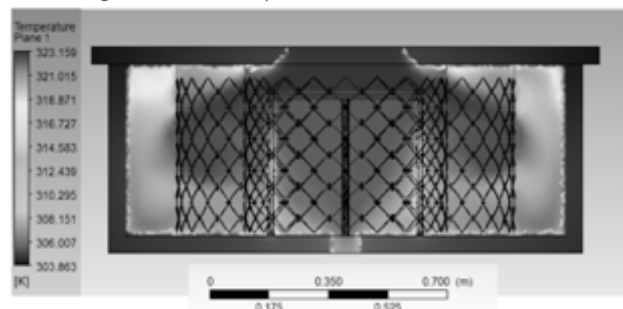


## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Simulación con temperatura de 50°C y velocidad de 2 m/s

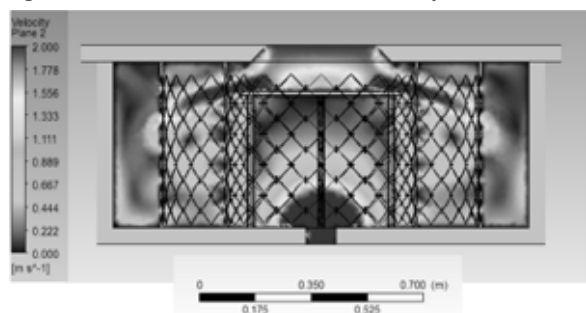
Se introducen en CFD las configuraciones del horno, como es el material, el flujo de aire externo, además se insertan los parámetros de entrada como la temperatura, la velocidad de flujo de aire dentro del horno entre otros.

Figura 3. Plano de comportamiento de la temperatura (50°C y 2 m/s)  
Figure 3. Plane of temperature behavior (50°C and 2 m/s)



K aproximadamente, esto sin incluir las temperaturas de las paredes del horno que se encuentran a 23°C y varían dependiendo la distribución de temperatura dentro del horno.

Figura 4. Plano del comportamiento de la velocidad de flujo de aire (50°C y 2 m/s)  
Figure 4. Plane of the behavior of the air flow velocity (50°C and 2 m/s)

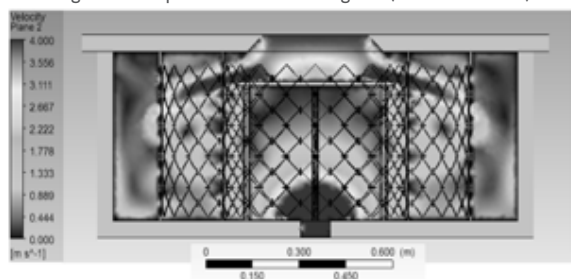


En la figura 4 la velocidad dentro del horno tiene variación de acuerdo con la que presenta el flujo en la entrada. Se observan velocidades 0 dentro del área de trabajo.

### 3.2. Simulación con temperatura de 50°C y velocidad de 4 m/s

Se mantiene las configuraciones y se varía la velocidad de flujo de aire.

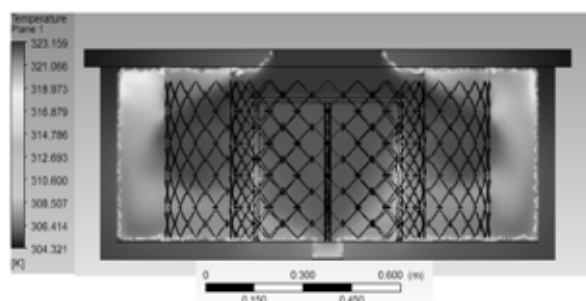
Figura 5. Plano de comportamiento de la temperatura (50°C y 4 m/s)  
Figure 5. Temperature behavior diagram (50°C and 4 m/s)



El comportamiento de la temperatura en la figura 5 permite observar que no se está distribuyendo en el área de trabajo y de esta manera no logra alcanzar lo deseado bajo la zona.

En la figura 6 se observa que la velocidad de flujo de aire se distribuye de manera regular en el área de trabajo, sin embargo, no garantiza un secado con la combinación que se tiene con la temperatura suministrada.

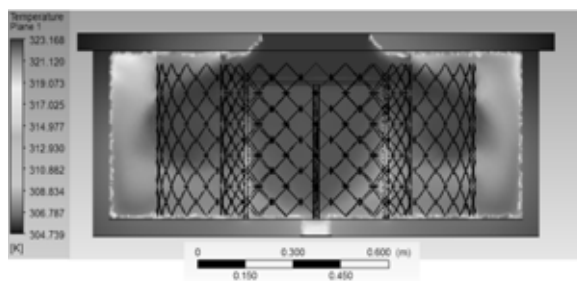
Figura 6. Plano del comportamiento de la velocidad de flujo de aire (50°C y 4 m/s)  
Figure 6. Plane of the behavior of the air flow velocity (50°C and 4 m/s)



### 3.3. Simulación con temperatura de 50°C y velocidad de 6 m/s

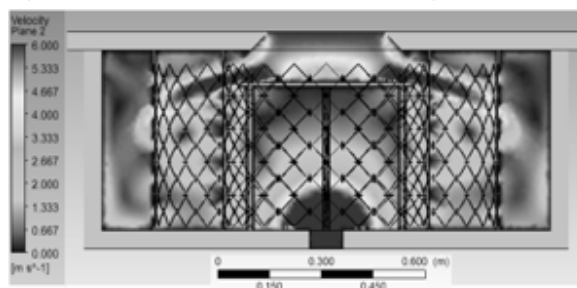
En esta simulación como en las anteriores varia solo la velocidad de flujo de aire.

Figura 7. Plano de comportamiento de la temperatura (50°C y 6 m/s)  
Figure 7. Temperature behavior diagram (50°C and 6 m/s)



En la figura 7 se logra evidenciar un cambio significativo respecto a la anterior simulación en cuanto a la distribución de la temperatura en el área de trabajo, sin embargo, no existe uniformidad de la misma para lo que se pretende llegar.

Figura 8. Plano del comportamiento de la velocidad de flujo de aire (50°C y 6 m/s)  
Figure 8. Plane of the behavior of the air flow velocity (50°C and 6 m/s)

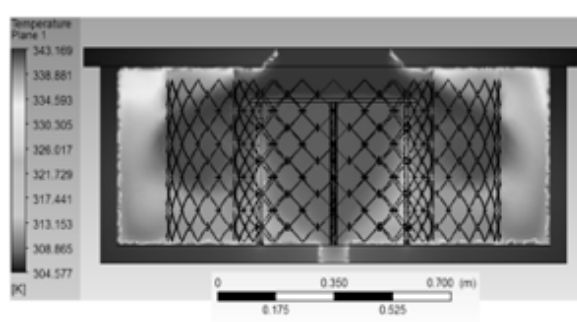


En la figura 8 la velocidad de flujo alcanza a circular de manera más constante y se distribuye el aire dentro del horno alejando de ella puntos en donde la velocidad es cero para garantizar el flujo en el área de trabajo.

### 3.4. Simulación con temperatura de 70°C y velocidad de 2 m/s

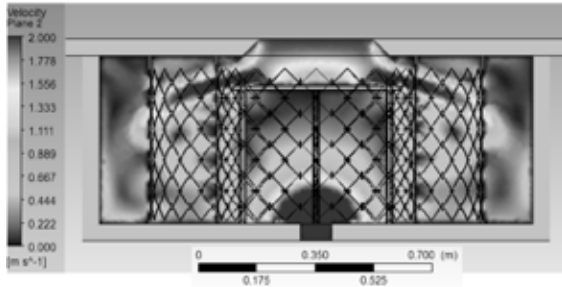
Para esta simulación se guardan las configuraciones anteriores y se varía la temperatura y la velocidad de flujo.

Figura 9. Plano de comportamiento de la temperatura (70°C y 2 m/s)  
Figure 9. Temperature behavior diagram (70°C and 2 m/s)



Para el comportamiento de la temperatura mostrada en la figura 9 se evidencia que la temperatura circula a través del área de trabajo de manera aceptable ya que se distribuye homogéneamente para la obtención de un secado por lo menos completo.

Figura 10. Plano del comportamiento de la velocidad de flujo de aire (70°C y 2 m/s)  
Figure 10. Plane of the behavior of the air flow velocity (70°C and 2 m/s)

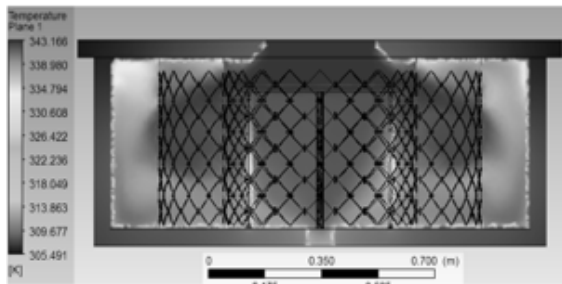


Para circular la temperatura con la homogeneidad que se requiere en el área de trabajo se necesita que la velocidad de flujo de aire complemente el objetivo trazado. Esto se logra observar en la figura 10.

### 3.5. Simulación con temperatura de 70°C y velocidad de 4 m/s

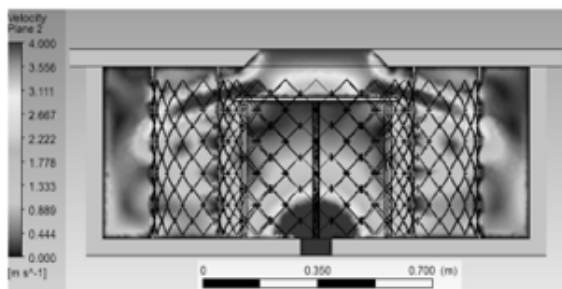
Se mantiene la temperatura y varía la velocidad de flujo de aire.

Figura 11. Plano de comportamiento de la temperatura (70°C y 4 m/s)  
Figure 11. Temperature behavior diagram (70°C and 4 m/s)



En la figura 11 se muestra el comportamiento de la temperatura dentro del área de trabajo circulando de manera homogénea, sin embargo, se logra observar que en las paredes del horno la temperatura no alcanza a distribuirse uniformemente a través de él.

Figura 12. Plano del comportamiento de la velocidad de flujo de aire (70°C y 4 m/s)  
Figure 12. Plane of the behavior of the air flow velocity (70°C and 4 m/s)

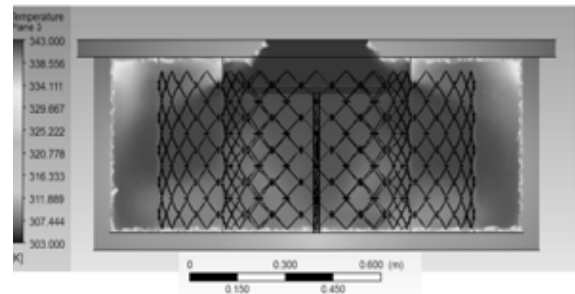


En la figura 12 se logra observar que la velocidad del flujo tiene un comportamiento mejorable respecto a las anteriores simulaciones, dando como resultado una combinación entre temperatura y velocidad considerable para el secado de la biomasa.

### 3.5. Simulación con temperatura de 70°C y velocidad de 6 m/s

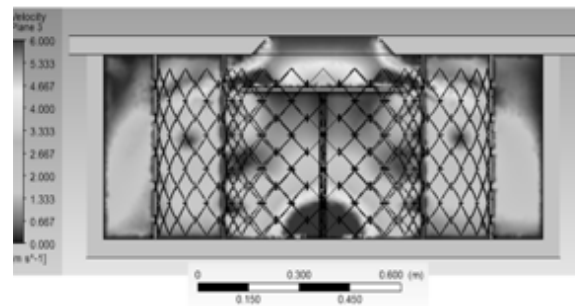
Como en la anterior simulación se varía solo la velocidad de flujo de aire.

Figura 13. Plano de comportamiento de la temperatura (70°C y 6 m/s)  
Figure 13. Plane of temperature behavior (70°C and 6 m/s)



De la figura 13 podemos resaltar que la temperatura alcanzada en las paredes del horno se mantiene homogénea garantizando de esta manera un flujo de temperatura deseado para la zona de trabajo.

Figura 14. Plano del comportamiento de la velocidad de flujo de aire (70°C y 6 m/s)  
Figure 14. Plane of the behavior of the air flow velocity (70°C and 6 m/s)



De la velocidad en mostrada en la figura 14 se logra observar que con la combinación suministrada entre temperatura y la velocidad se evidencia un área de trabajo con pocos puntos muertos, es decir puntos de estancamiento iguales a cero.

### 3.6. Estimación energética

Para el siguiente cálculo es necesario describir las propiedades del aire a las dos temperaturas utilizadas que son 50°C y 70°C, a 1 atm de presión. Con el fin de hallar la cantidad de flujo de calor que entra y que sale en el horno.

Las Propiedades del agente secante son:

$$\rho_{50} = 1,092 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \rho_{70} = 1,029 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, C_p = 1,017 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}, T_{\text{amb}} = 28^\circ\text{C}, A = \pi r^2, \dot{m} = \rho VA$$

Estimación del Calor.

$$\dot{Q}_{\text{ent}} = \dot{m}C_p(T_{\text{ent}} - T_{\text{amb}}) \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{\text{sal}} = \dot{m}C_p(T_{\text{sal}} - T_{\text{amb}}) \quad (2)$$

$$\Delta Q = \dot{Q}_{\text{ent}} - \dot{Q}_{\text{sal}} \quad (3)$$

El cálculo se realiza para la simulación de 70°C y 6 m/s.

$$A_{\text{ent}} = \pi(0,17\text{m})^2 = 0,0907\text{m}^2 \quad (4)$$

$$\dot{m}_{\text{ent}} = \left(1,029 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(6 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) (0,0907\text{m}^2) = 0,55 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{\text{ent}} = \left(0,55 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \left(1,007 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}\right) (343\text{K} - 301\text{K}) = 23,68\text{kW} \quad (6)$$

Donde las variables  $\rho$  es la densidad del aire,  $C_p$  es el calor específico del aire,  $T$  representa a la temperatura del recinto,  $A$  es el área de la sección transversal de entrada al horno,  $\dot{m}$  es el flujo másico del aire,  $Q$  es la transferencia de calor. En la tabla 1 se observa las diferentes cantidades de calor calculadas de forma teórica para cada una de las simulaciones con los parámetros y utilizando las fórmulas anteriores.

V (m/s)	Prueba 70°C			Prueba 50°C		
	$Q_{\text{ent}}$ (kW)	$Q_{\text{sal}}$ (kW)	$\Delta Q$ (kW)	$Q_{\text{ent}}$ (kW)	$Q_{\text{sal}}$ (kW)	$\Delta Q$ (kW)
2	7,894	7,307	0,587	4,388	4,015	0,373
4	15,789	14,313	1,475	8,776	7,616	1,160
6	23,683	20,407	3,276	13,165	9,854	3,311

Por medio de las gráficas e imágenes antes mostradas se pudo visualizar en detalle el comportamiento del flujo del aire a dos determinadas temperaturas 50°C y 70°C, y tres velocidades 2, 4, y 6 m/s llamados condiciones de operación se lograron ver en detalle la interacción de estos parámetros en las paredes y en la zona de trabajo (entre mallas), entrada y salida del horno la circulación del fluido y así se pudo determinar de manera característica los puntos más calientes y fríos dentro del horno como también los puntos de estancamiento donde la velocidad del fluido tiende a cero dentro del mismo.

Además de detallar la solución grafica del comportamiento del flujo se logró visualizar el número de iteraciones que necesitó el programa para poder resolver la simulación con dichas condiciones de operación apreciables en las gráficas de momento y masa, transferencia de calor, y turbulencia.

## 4. CONCLUSIONES

Con la variación de parámetros que se trabajó, como fueron en velocidad y temperatura se logró detallar los puntos de estancamiento, es decir en aquellas zonas donde la velocidad tiende a ser igual a 0 dentro del horno. Ésta se refleja en las dos primeras simulaciones o combinación de parámetros como son 50°C, 2 y 4 m/s y 70°C con las anteriores velocidades donde el flujo de aire no llegaba a esparcirse completamente por el interior del horno, dando así una baja eficiencia en la remoción de humedad en el proceso, ya que ésta se da altas temperaturas y velocidades mayores o iguales a 6 m/s. Esto se puede evidenciar en el proyecto del Estudio experimental del fenómeno de transferencia de masa en el proceso de secado artificial en estado transitorio de yuca utilizado en estudios de laboratorio de la Universidad del Norte.

Mediante el cálculo tipo se cuantifico la cantidad de calor en el horno, se concluyó que, aunque la cantidad más baja de calor en el proceso ocurre con 50°C de temperatura y 2 m/s de velocidad no es recomendable para que se logre el proceso de secado, debido a que ni la temperatura ni el flujo de aire en el horno suministran una homogeneidad. Se encontró que los valores de 70°C y 6m/s de velocidad, son las condiciones de operación que mantienen de forma homogénea tanto la temperatura como el flujo dentro del horno, aunque la cantidad de calor sea mayor para estos parámetros.

Por medio de las simulaciones se logró visualizar el comportamiento de las variables de un horno de secado radial para biomasa, detallando la distribución de temperatura y velocidades a través de graficas que muestran las zonas de trabajo del horno, asumiendo que la combinación en la cual el horno alcanza una temperatura homogénea, en procura de mejoras es a 70° C y velocidad de 6 m/s para la obtención de un buen secado.

El uso de herramientas computacionales como los son los análisis en CFD son una buena interacción con los objetivos planteados en las asignaturas teóricas y prácticas de las IES para validar los conocimientos aprendidos en las aulas de clases, ya que estos estudios presentan resultados con alta eficiencia sin agotar recursos físicos y contaminantes en el desarrollo de las pruebas, abordando a un valor agregado al estudiante para su desarrollo profesional.

## 5. REFERENCIAS

- [1] H. Santamaría, «Estudio Experimental del fenómeno de transferencia de masa en el proceso de secado artificial en estado transitorio de yuca,» Universidad del Norte, Barranquilla, 2006.
- [2] A. Padilla y J. Roa, «Simulación térmica de un horno secador continuo en banda transportadora para arroz,» Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, 2012.
- [3] L. Orozco y Y. Tejada, «Simulación térmica de un horno rotatorio aplicado a biomasa,» Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, 2011.
- [4] J. Fabregas, «Caracterización y modelado de la cinética del secado en estado transitorio de la cascarilla de arroz autóctona de la región caribe,» Universidad Autónoma del Caribe, Barranquilla, 2015.
- [5] A. Bula y N. Durango, «Optimización energética de un secador radial de yuca,» ingeniería & desarrollo, vol. 14, pp. 24-37, 2003.
- [6] N. Durango y A. Bula, «Modelo matemático para secador de alimentos de flujo radial,» Ingeniería & desarrollo, vol. 15, pp. 1-8, 2004.
- [7] J. Fabregas, H. Santamaría, F. Bermejo y W. Orozco, «proyecto Interdisciplinario en ingeniería para experiencia de laboratorio y simulación térmica de un horno experimental de secado de biomasa como medio de aprendizaje,» espacios, vol. 39, n° 20, pp. 25-33, 2018.
- [8] M. Alvarado, «Estudio del proceso de secado de fresa usando horno microondas,» Prospectiva, vol. 15, n° 1, pp. 29-34, 2017.
- [9] A. Albis, J. Rocha y T. Rocha, «Secado de ají tabasco (*Capsicum frutescens*) mediante deshidratación por convección forzada,» Prospectiva, vol. 14, n° 1, pp. 89-95, 2016.
- [10] M. Alvarado, J. Mejía, M. Vanegas, R. Barranco y L. Hernández, «Variables influyentes en el secado discontinuo del carbón asistido con microondas,» Prospectiva, vol. 10, n° 2, pp. 37-42, 2012.
- [11] J. Fábregas, H. Santamaría, F. Bermejo, W. Orozco y A. Bula, «Obtaining Fruit-Drying Curves and CFD Analysis for Corozo (*Bactris Guineensis*),» Contemporary Engineering Sciences, vol. 10, n° 12, pp. 569-577, 2017.
- [12] J. Fábregas, H. Santamaría, F. Bermejo y W. Orozco, «CFD Numeric Simulation to Obtain the Proper Parameters of Corozo Drying (*Bactris Guineensis*),» Contemporary Engineering Sciences, vol. 10, n° 15, pp. 703-711, 2017.
- [13] T. Defraeye, B. Blocken y J. Carmeliet, «Influence of uncertainty in heatmoisture transport properties on convective drying of porous materials by,» Chem. Eng. Res. Des, vol. 91, n° 1, pp. 36-42, 2013.
- [14] D. Pham, Y. Lim, H. Jee, E. Ahn y Y. Jung, «Porous media Eulerian computational fluid dynamics (CFD) model of amine absorber with structured - packing for CO<sub>2</sub> removal,» Chemical Engineering Science, vol. 135, pp. 259-270, 2015.