

Efecto de diferentes configuraciones de ventilación natural y materiales de cubierta sobre el confort térmico de trabajadores de una instalación para la producción de panela.

Effect of different natural ventilation configurations and roof materials on thermal comfort workers in a non-centrifugal cane production facility

Giovanni Andrés Cortés Tovar  Universidad Nacional de Colombia. Colombia.

gacortest@unal.edu.co (autor de contacto)

Robinson Osorio Hernández  Universidad Nacional de Colombia. Colombia. rosorioh@unal.edu.co

Lina Marcela Guerra García  Universidad Nacional de Colombia. Colombia. lmguerra@unal.edu.co

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo analizar el efecto de tratamientos con diferentes configuraciones de ventilación natural, combinadas con tres tipos de materiales de cubierta, sobre las condiciones de confort térmico del trabajador dentro de una instalación para la producción de panela, utilizando modelamiento en Dinámica de Fluidos Computacional. Se encontró un efecto significativo de las aberturas perimetrales y el efecto chimenea generado por la ventana cenital, el cual mostró un papel decisivo en la transferencia de vapor y de calor al exterior. Adicionalmente, se comparó el Índice de Temperatura Efectiva para cada tratamiento, para determinar las condiciones de confort térmico para los trabajadores en cada configuración de ventilación natural. Se evidenció que el mejor ambiente para el confort térmico del trabajador es el tratamiento con las paredes perimetrales abiertas y la ventana cenital abierta, sin presentar diferencia estadística significativa el material de la cubierta.

Palabras clave: simulación computacional; estrés térmico; índice WBGT; producción de panela; radiación térmica.

ABSTRACT

This study's goal was to use computational fluid dynamics modeling to examine the effects of treatments with various natural ventilation configurations and three different types of roof materials on workers' thermal comfort levels in a facility used to produce non-centrifugal sugar cane. It was found that the lantern window's chimney effect and the perimeter openings had a major impact, in the heat and steam transfer to the exterior. To ascertain the thermal comfort levels for employees in each natural ventilation configuration, the effective temperature index for each treatment was also compared. With no statistically significant variation in the roof material, it was clear that the optimal conditions for the worker's thermal comfort were those with the lantern window and perimeter walls open.

Keywords: computer simulation; thermal stress; WBGT index; NCS production; thermal radiation.

Cómo citar este artículo/Citation: Giovanni Andrés Cortés Tovar, Robinson Osorio Hernández, Lina Marcela Guerra García (2024). Efecto de diferentes configuraciones de ventilación natural y materiales de cubierta sobre el confort térmico de trabajadores de una instalación para la producción de panela. Informes de la Construcción, 76 (576): 6951. <https://doi.org/10.3989/ic.6951>

Copyright: © 2024 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 09/04/2024

Aceptado/Accepted: 24/10/2024

Publicado on-line/Published on-line: 29/01/2025

1. INTRODUCCIÓN

El Azúcar de Caña no centrifugada, (non-centrifugal cane sugar – NCS en inglés), también llamada “panela” (1), es obtenida de la extracción, purificación y concentración de los jugos de caña de azúcar (2). Colombia con el 14.9% de producción mundial, es el segundo productor, después de la India (3, 4), y presenta el mayor consumo per cápita en el mundo (24 kg/persona/año) (5).

En Colombia la elaboración de la panela se lleva a cabo en edificaciones denominadas “trapiches” (6), las cuales son plantas de procesamiento agroindustrial naturalmente ventiladas. Se estima que en Colombia hay cerca de 18.473 trapiches, su tamaño está sujeto a la capacidad de producción que incluyen unidades con rangos de capacidad pequeña (menor a 100 kg h⁻¹), mediana (100 a 250 kg h⁻¹) y grande (mayor a 250 kg h⁻¹) (7-9).

En estas edificaciones se ubican los equipos necesarios para la transformación, especialmente, el horno, donde se lleva a cabo la evaporación de más del 90% del agua contenida en el jugo de caña (10). Lo anterior, hace que estas edificaciones emitan calor y vapor que pueden comprometer el confort y desempeño de los ocupantes en su interior.

Factores ambientales como la temperatura y humedad relativa contribuyen al confort, salud, rendimiento y productividad de los trabajadores (11). Si el proceso de diseño del edificio ignora los factores climáticos, se pueden generar afectaciones en las actividades de los ocupantes (12).

Una alternativa de diseño de edificaciones es la arquitectura bioclimática, la cual es una forma alternativa de diseño y construcción de edificaciones que involucra condiciones climáticas del entorno, el uso de recursos naturales y técnicas tradicionales y modernas de construcción (13), especialmente en el diseño de la envolvente del edificio (14), con el objetivo de proveer confort térmico a sus ocupantes (15), bajo parámetros de sostenibilidad y eficiencia energética.

La envolvente del edificio divide el ambiente interior de las condiciones climáticas externas (16), y está compuesta por cubiertas, paredes, ventanas, puertas y pisos (17). La envolvente interviene para regular el balance de masa (de aire) y energía entre la edificación y el exterior (18).

Entre las estrategias del diseño bioclimático pasivo se encuentra la ventilación natural, la cual tiene como objetivo, la sustitución del aire interior nocivo, por aire fresco, sin utilizar sistemas o equipos mecánicos (19, 20) esta puede ser térmica o mínima (higiénica), y con ella se busca reducir el consumo energético, incrementar el confort térmico y mejorar de la calidad del aire (21-23).

Colombia, es un país ubicado en la zona ecuatorial, donde predominan los climas cálidos y templados. Al interior de los trapiches se genera calor y vapor del proceso agroindustrial, por lo que estas edificaciones son naturalmente ventiladas. La ventilación natural en estas edificaciones es dinámica y térmica, producto la acción del viento, y el efecto chimenea que generan los gradientes de temperatura en su interior. Es de aclarar que la ventilación térmica en situaciones de calor,

suplen las necesidades de la ventilación higiénica al tener tasas de renovación mayores a las requeridas para la calidad del aire por emisiones de gases.

Cuando la temperatura del ambiente interno es mayor que la temperatura exterior, el aire externo más frío y denso ingresa a la edificación a través de las aberturas bajas, y el aire interno más caliente y menos denso asciende a la parte superior de las cubiertas o sale por las aberturas elevadas; este fenómeno se conoce como efecto chimenea (24), el cual es fundamental en las edificaciones tipo trapiche, por la emisión de calor y vapor en su interior.

En la industria es necesario mantener confort térmico, ya que permite una mayor comodidad y productividad, al tiempo que reduce el riesgo de accidentes en el trabajo y fatiga laboral (25, 26). En ambientes cálidos la incomodidad puede ser causada por alta humedad en la piel generada por niveles altos de humedad del aire (27).

La humedad relativa elevada reduce la capacidad del cuerpo para perder calor a través de la transpiración y la evaporación (28). Según (29), humedades relativas del 80 % al 95 %, pueden causar graves riesgos para la salud, además, puede causar daños en las superficies del edificio (30), por la condensación (31), situación que se presenta en las cubiertas de las instalaciones agroindustriales de fabricación de panela.

Para la clasificación de confort térmico, se han desarrollado diferentes índices, que agrupan en un parámetro el efecto conjunto de variables como: la temperatura de bulbo seco, humedad relativa, velocidad del aire y radiación térmica, y factores humanos como: el aislamiento de la ropa y el nivel de actividad metabólica (32).

Un índice utilizado para determinar el confort térmico en entornos de trabajo, es la temperatura efectiva (33-35), La cual está en función de la temperatura de bulbo seco, humedad relativa y velocidad del aire.

En este tipo de edificaciones, el proceso se lleva a cabo en condiciones de alta humedad relativa que puede oscilar entre 80% y cerca de la saturación, y alta temperatura, que puede alcanzar entre 60 y 150°C (36). Estas condiciones ambientales adversas, combinadas con las actividades físicas pesadas propias del proceso, pueden causar estrés térmico y problemas de salud, cambios en el comportamiento mental, disminución del rendimiento, aumento del riesgo de accidentes, y conducir a un deterioro progresivo del trabajador (37).

Varias investigaciones utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), han estudiado el ambiente interno de edificaciones, incluyendo construcciones rurales, y han demostrado ser una herramienta valiosa y eficaz en este tipo de análisis (38), ayudando a reducir costos y tiempo en el diseño y evaluación bioclimática (39).

Relacionados al sector panelero se encuentran estudios utilizando CFD orientados al diseño del horno y las pailas o fondos que la integran (40-42), pero no se registran estudios en instalaciones de producción tradicionales tipo trapiche.

Este estudio tuvo como objetivo analizar el efecto de trata-

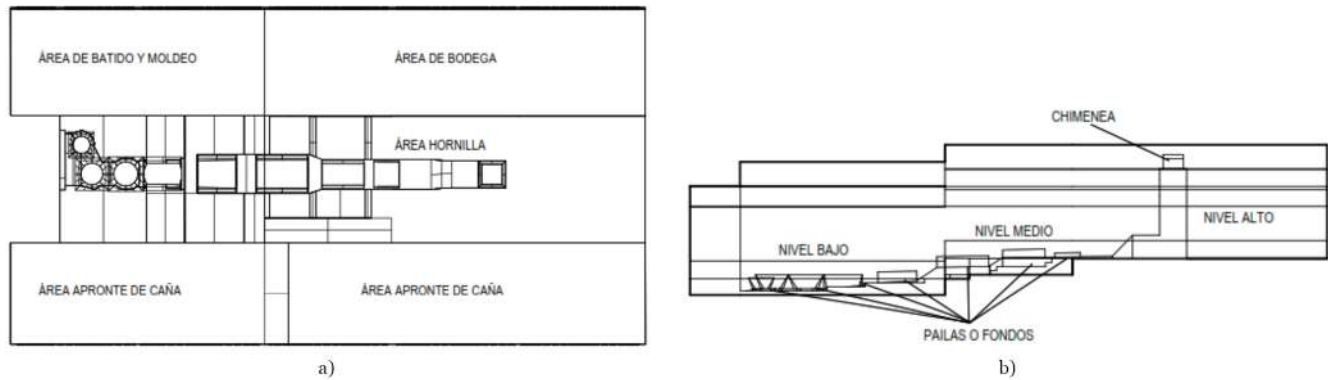


Figura 1. Instalación para la elaboración de panela. a) planta arquitectónica; b) fachada. Fuente: Elaboración autores

mientos con diferentes configuraciones de ventilación natural, combinadas con tres tipos de materiales de cubierta, sobre las condiciones de confort térmico de los ocupantes, dentro de una instalación para la producción de panela, utilizando CFD, con el fin de preservarlas y mejorarlas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se realizó en una edificación para la fabricación de panela, en el municipio de Santo Domingo - Antioquia - Colombia (No6°28'15";Wo75°09'57", 1440 msnm), el cual posee una temperatura media de 20°C, y humedad relativa de 80% (43). Su capacidad de producción es de 150 kg h⁻¹ (mediano), provista de hornos con cámara de combustión doble tipo Plana-CIMPA, que es un diseño mejorado de la cámara tradicional desarrollada por el Centro de Investigación para el Mejoramiento de la Agroindustria Panelera (CIMPA) (10). Las dimensiones de este trapiche son las aproximadas para una unidad con capacidad de producción de tamaño mediano y su distribución arquitectónica permite un flujo secuencial del proceso de producción.

En cada una de las tres áreas críticas de trabajo de la instalación (Hornilla, Apronte y Moldeo) se instaló un Datalogger de humedad y de temperatura marca EXTECH RHT10, rango de medida de -40°C a 70°C y de 0% a 100% de humedad relativa, precisión de 0.1°C y 0.1% respectivamente. Se tomaron datos de 3 moliendas y 2 días de referencia para las 214 horas. En el área de bodega no se instaló dispositivo porque es utilizada como área de tránsito y almacenamiento.

Se simuló el ambiente interno del edificio para las operaciones que se llevan a cabo en el área del horno u hornilla, ya que, cuando esta está en funcionamiento se presenta la situación más crítica para las condiciones de operatividad.

La Figura 1 muestra la distribución arquitectónica de la instalación, la cual tiene un piso en forma escalonada con tres niveles, lo que facilita el transporte del jugo de caña por gravedad en la hornilla. En el primer nivel está el área de batido y moldeo, el área de apronte de caña, el área baja de la hornilla, en el segundo nivel está el área de bodega, el molino de caña, el prelimpiador, el área de apronte de caña, el área media de la hornilla, y en el nivel tres está la chimenea y el área alta de la hornilla.

Las dimensiones de este edificio son, 16.00 m de ancho x 30.00 m de largo x 3.40 m de alto en promedio (Figura 2).

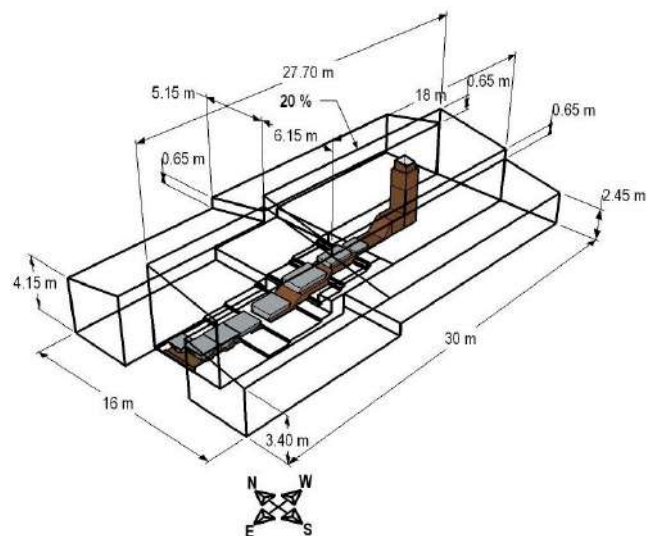


Figura 2. Dimensiones del trapiche panelero. Fuente: Elaboración autores

La edificación cuenta con una cubierta a dos aguas discontinua en dos niveles, y pendiente de 20%. Cada discontinuidad configura una ventana cenital, específicamente tiene una ventana cenital en la cumbre de 27.70 m de largo x 0.65 m de ancho sentido este-oeste, una segunda y tercera ventana cenital de techo discontinuas por cada una de las dos aguas de la cubierta de 5.15 m de largo x 0.65 m de ancho sentido norte-sur costado norte, y una de 6.15 m de largo x 0.65 m de ancho sentido norte - sur y costado sur respectivamente, y una cuarta ventana cenital de 18.00 m de largo x 0.65 m de ancho en el costado sur, sentido este - oeste, (Figura 2).

El edificio tiene cerramiento en ladrillo perforado en sus caras laterales. La cubierta posee, tejas de fibrocemento, cerchas y perfiles metálicos de 0.08 x 0.04 m. El piso está compuesto por una losa de contrapiso en concreto reforzado.

En la Figura 3 se muestran las geometrías 3D de la instalación en formato CAD, la primera es una condición con cerramiento en ladrillo tipo perforado para evaluar tres distribuciones constructivas, y la segunda es una condición base sin cerramiento perimetral, utilizada para evaluar nueve distribuciones constructivas.

Se simularon diferentes opciones de aberturas de ventilación natural con el fin de determinar la influencia del área de ventilación, y la ubicación de las aberturas en la temperatura

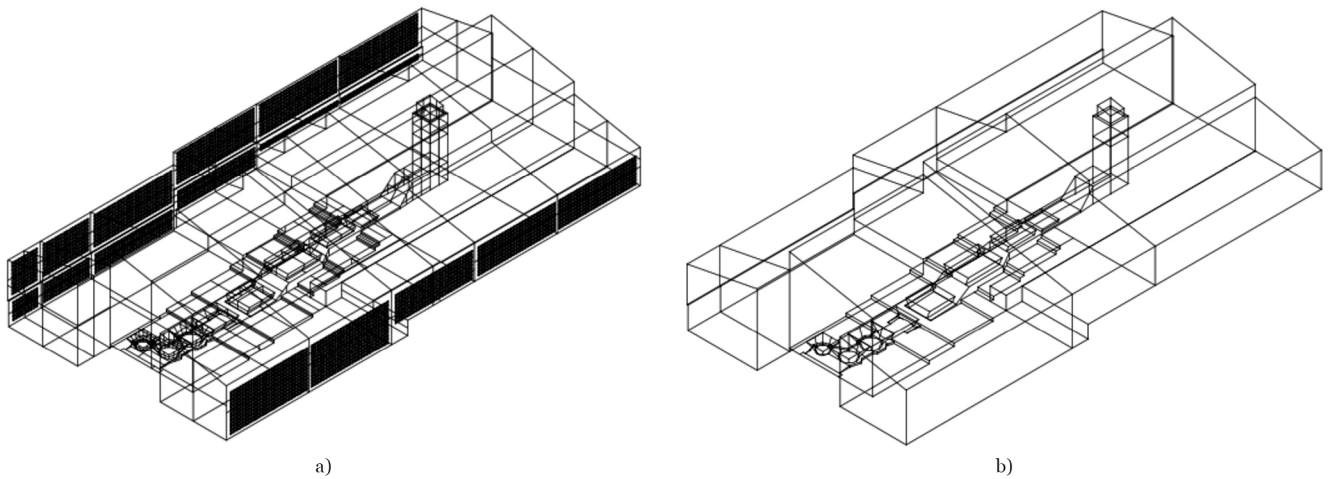


Figura 3. Geometría CAD 3D de la instalación para elaboración de panela.
a) condición ladrillo tipo perforado; b) condición base. Fuente: Elaboración autores

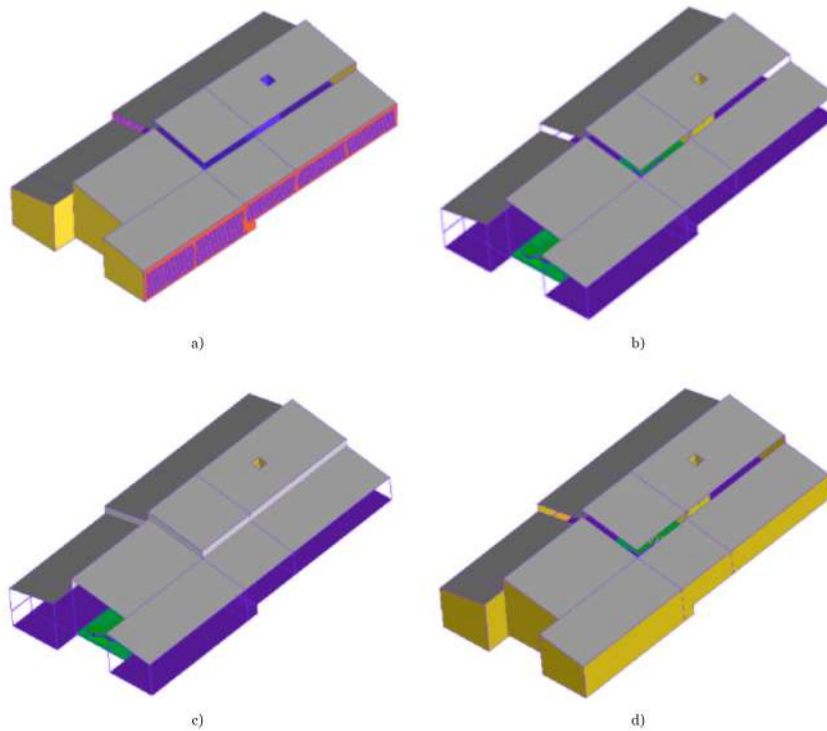


Figura 4. Tratamientos simulados con diferentes distribuciones arquitectónicas.
a) T1, T2 y T3; b) T4, T5 y T6; c) T7, T8 y T9; d) T10, T11 y T12. Fuente: Elaboración autores

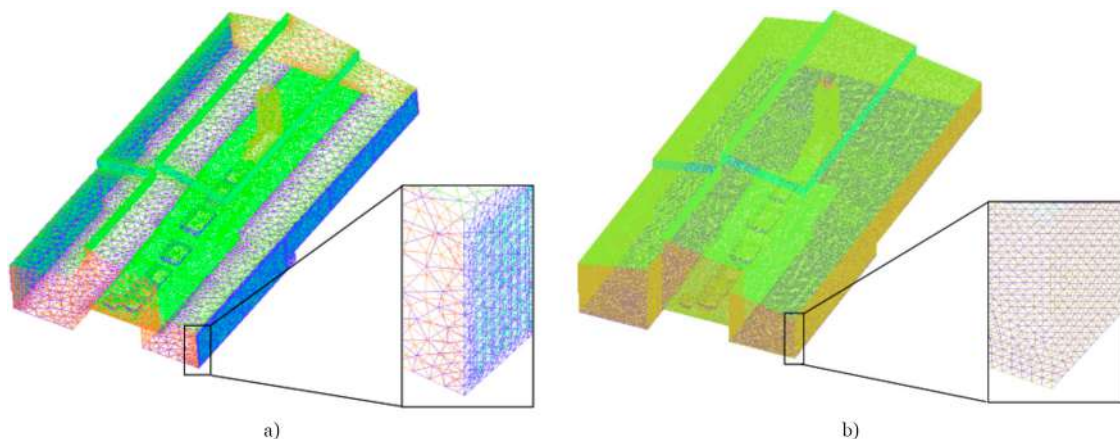


Figura 5. Malla computacional tetraédrica de edificio para la elaboración de panela.
a) condición ladrillo tipo perforado (tratamiento testigo); b) condición base. Fuente: Elaboración autores

y humedad relativa dentro de la instalación. Los diferentes tratamientos se pueden ver en la Tabla 1 y Figura 4, donde el tratamiento T1 es la geometría original (tratamiento testigo) que fue validada y simulada.

Tabla 1. Tratamientos simulados en CFD. Fuente: Elaboración autores

Tratamiento	Material de la cubierta			Cerramiento perimetral			Ventana cenital	
	F	Z	B	LP	A	LM	A	C
T1	X			X			X	
T2		X		X			X	
T3			X	X			X	
T4	X				X		X	
T5		X			X		X	
T6			X		X		X	
T7	X				X			X
T8		X			X			X
T9			X		X			X
T10	X					X	X	
T11		X				X	X	
T12			X			X	X	

Z - Zinc; F - Fibrocemento; B - Barro; LP - Ladrillo perforado; A - Abierto; LM - Ladrillo macizo; C - Cerrado.

Posteriormente, se realizó la malla computacional tetraédrica con ayuda del software ANSYS-ICEM-CFD con 128.197 nodos, y 629.596 elementos para el modelo con cerramiento en ladrillo perforado (Figura 5a), y 154.197 nodos y 776.124 elementos para los modelos sin cerramiento perimetral y con cerramiento perimetral con ladrillo macizo (Figura 5b). Cuando las geometrías son complejas, o el rango de longitudes de escala es grande, como se presentó para los dos modelos propuestos, una malla tetraédrica es apropiada, porque requiere un número menor de elementos (44). Se obtuvo diferentes tamaños de elementos después de varias pruebas de malla donde el refinamiento mayor se encuentra en las aberturas, debido a la necesidad de mayor detalle de análisis fluidodinámico por ventilación natural.

Una vez se ha generado la malla computacional, se importó a la plataforma ANSYS-CFX-Pre, en este punto se insertaron las condiciones de frontera del modelo: propiedades de los materiales, condiciones del ambiente externo, componente energético de la hornilla, entre otros. Las propiedades térmicas de los materiales de construcción utilizados como condiciones de frontera se muestran en la Tabla 2.

Se realizó un modelo transitorio a partir de las condiciones de la actividad crítica durante el proceso de fabricación de panela: flujo másico de vapor producido en promedio por la hornilla es de 0.15 kg de agua s⁻¹, temperatura promedio de las pailas o fondos y jugos en la hornilla alcanzan un valor de 132°C, temperatura del suelo de 20°C, temperatura media del exterior de 20°C, humedad relativa media externa de 80%, conductividad térmica del aire es 0.02514 W m⁻¹ K⁻¹ y la difusividad térmica del aire de 2.074 × 10⁻⁵ m² s⁻¹ (31).

Tabla 2. Propiedades térmicas de materiales de construcción. Fuente: Tomado de NBR ISO 10456 (45)

Material de la cubierta	λ	R	U
	W m ⁻¹ K ⁻¹	m ² K W ⁻¹	W m ⁻² K ⁻¹
Fibrocemento	0.8	0.0125	80
Zinc	110	0.0000027	366666.67
Barro	0.46	0.0239130	41.82
Ladrillo macizo	0.7	0.3714286	2.7
Ladrillo perforado	0.7	0.3714286	2.7

λ - conductividad térmica; R- Resistencia térmica; U - Coeficiente global de transferencia de calor.

La humedad relativa se insertó como una variable adicional a partir de la ecuación [1] (46), en función de la presión de vapor del aire y la presión de vapor de saturación del mismo representada en la ecuación [2] de Magnus-Tetens (47).

$$[1] \text{ HR} = P_v / P_{vs}$$

$$[2] P_{vs} = 6.1078 \times 10^{(7.5 T_{bs} / (237.3 + T_{bs}))}$$

Donde, HR es la humedad relativa (%), es la presión parcial de vapor (hPa), es la presión de vapor de saturación (hPa), es la temperatura de bulbo seco (°C).

Las ecuaciones de transporte son ecuaciones de derivadas parciales utilizadas para describir fenómenos de transporte de energía, masa, y cantidad de movimiento (48), y se expresan en términos generales en las ecuaciones [3], [4] y [5] (41), donde, $\bar{\rho}$ es la densidad media de Reynolds en kg m⁻³; $\tilde{u}_i$, $\tilde{u}_j$, $\tilde{u}_k$ son los vectores de velocidad promedio de Favre en m s⁻¹; x_i , x_j , x_k son las posiciones del vector; u_i'' , u_j'' son los vectores de velocidad fluctuante de Favre en m s⁻¹; g_i es el vector aceleración de la gravedad en m s⁻²; μ es la viscosidad dinámica en Pa s; $\tilde{h}_t$ Favre promediado de la entalpía total en kJ kg⁻¹; Pr Número de Prandtl; S_r término promediado debido a la transferencia de calor por radiación en W m⁻³; p es la presión estática media en Pa.

$$[3] \partial \rho u_j \partial x_j = 0$$

$$[4] \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \bar{\rho} g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right] + \frac{\partial \left(-\overline{\rho u_i'' u_j''} \right)}{\partial x_j}$$

$$[5] \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}_t}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h}_t}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{Pr} \left(\frac{\partial \tilde{h}_t}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\partial \left(-\overline{\rho u_j'' \tilde{h}_t''} \right)}{\partial x_j} = \bar{S}_r$$

Posteriormente, en la plataforma SOLVER se simuló el modelo previamente realizado en ANSYS-CFX-Pre, para ello se utilizó como criterio de convergencia un error máximo de 10⁻⁴ para todos los tratamientos.