

Modelamiento del Ambiente Térmico y Aéreo de un Galpón de Presión Negativa Tipo Túnel para Pollitos

Modeling of the Thermal Environments in Shed Negative Pressure Tunnel Type of Chicks

Robinson Osorio Hernández¹; Ilda de Fátima Ferreira Tinôco²; Jairo Alexander Osorio Saraz³; Keller Sullivan Oliveira Rocha⁴ y Lina Marcela Guerra Garcia⁵

Resumen: La optimización de los procesos productivos tiene gran importancia en el mundo actual debido al continuo desarrollo y avance. Con la finalidad de evaluar el desempeño productivo en el sector avícola, se hace necesaria la adecuación del ambiente interno de las instalaciones avícolas con técnicas que atiendan las exigencias de confort térmico con mayor eficiencia energética. En este trabajo, se evaluó el ambiente térmico interno de un galpón de presión negativa tipo túnel durante la primera fase de crecimiento de pollos de engorde. La evaluación de comportamiento térmico en este período fue realizada utilizando la dinámica de fluidos computacionales (CFD). El modelo computacional demostró ser una herramienta eficaz para el entendimiento y mejora de diseños bioclimáticos de ambientes internos de galpones avícolas.

Palabras clave: Confort térmico, dinámica de fluidos computacional, producción avícola.

Abstract: The optimization of production processes has great importance in the world due to the development and advancement. In order to evaluate the productive performance in poultry production, it becomes necessary the indoor environmental adequacy of the poultry buildings by technologies that attend the requirements of thermal comfort with major energy efficiency. This study evaluated the thermal environment of a domestic shed of negative pressure tunnel type, during the first growth phase of broilers. The evaluation of the thermal behavior model during this period was made using the computational fluid dynamics (CFD). The computational model proved to be an effective tool for understanding and improving of bioclimatic designs of indoor environments to create this kind of sheds.

Key words: Thermal comfort, computational fluid dynamics, poultry production.

El estudio de la bioclimática y bioclimatología animal y humana, analiza e instituye las condiciones necesarias para la evaluación y concepción de un ambiente térmico adecuado para las actividades y ocupación; también, establece métodos y principios para un análisis detallado de las condiciones térmicas de una instalación (Croney *et al.*, 2007). Estos aspectos tienen que ver con las nuevas exigencias del mercado consumidor de productos de origen animal como el tema ambiental, la seguridad alimentaria y el bienestar animal.

Dentro de los factores del ambiente, los térmicos son los que afectan más directamente a los pollitos cuando se crían en condiciones de clima frío. La fase inicial de crecimiento de los pollitos es la que demanda más cuidado y atención por parte del productor porque

los errores cometidos no podrán ser corregidos posteriormente, afectando así el peso final de las aves (Cordeiro, 2007; Butcher *et al.*, 2002). En los periodos de frío, como en el invierno o en las noches, este aspecto merece mayor atención (Cordeiro, 2007), debido a que se incrementa la necesidad energética para suplir la diferencia entre la temperatura ideal de los pollitos y la temperatura del ambiente externo (Cordeiro *et al.*, 2010). De esta forma, en confinamiento, la calefacción es fundamental en esta etapa y de ella depende el buen desarrollo del animal (Tinôco, 2001), por lo que su conocimiento y control son fundamentales.

Dentro de las herramientas que han sido usadas para caracterizar el ambiente térmico dentro de las instalaciones están: los índices de confort (Baêta *et al.*, 2010), los mapas de distribución de variables

¹ Investigador a distancia. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Campus UFV 36570-000 - Vicoso, MG, Brasil. Docente Ocasional. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín - Facultad de Ciencias Agrarias - Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <rosorio0@unal.edu.co>

² Profesora. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Campus UFV 36570-000 - Vicoso, MG, Brasil. <iftinoco@ufv.br>

³ Profesor Asociado. Facultad de Ciencias Agrarias - Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <aosorio@unal.edu.co>

⁴ Investigador. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Campus UFV 36570-000 - Vicoso, MG, Brasil. <keller.rocha@ufv.br>

⁵ Investigadora a distancia. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Campus UFV 36570-000 - Vicoso, MG, Brasil. <lina.garcia@ufv.br>

Recibido: Marzo 27 de 2013; aceptado: Septiembre 10 de 2013.

climáticas, y los modelos de intercambio de calor y masa basados en CFD (Norton *et al.*, 2009). Estos últimos han sido usados ampliamente en estudios para evaluar el comportamiento de algunas variables climáticas en el interior de estructuras vegetales y animales (Osorio *et al.*, 2012; Norton *et al.*, 2009), mostrando ser una herramienta interesante para el entendimiento de los ambientes internos de las construcciones rurales. En el caso de la aplicación al sector avícola, esta herramienta se ha utilizado sobre todo para el análisis de la ventilación mecánica, de la emisión de gases y calidad del aire (Bustamante *et al.*, 2013; Zajicek *et al.*, 2012; Osorio *et al.* 2012), más no se tiene registro de trabajos sobre el ambiente térmico de galpones durante la primera fase de crecimiento utilizando esta técnica.

Aunque la escala natural (1:1) ofrezca mayor dificultad para el análisis en CFD, por la gran cantidad de nudos (dominio) de la malla computacional, con ayuda de los computadores modernos, los cuales ofrecen mayores capacidades computacionales, este tipo de modelamiento es completamente viable y ofrece mayores detalles para el análisis.

Este trabajo tuvo como objetivos realizar la evaluación, el modelamiento y la simulación computacional a escala real del comportamiento térmico dentro de un galpón de presión negativa tipo túnel, típico en países de América Latina de climas tropicales y subtropicales, durante la fase inicial de desarrollo de pollos de engorde.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. Las observaciones de campo se desarrollaron durante tres semanas de la primavera de 2011, en una granja comercial de una empresa integrada

del Estado de Minas Gerais Brasil, localizada en el municipio de São Geraldo-MG, situada en la latitud 20° 55' S, y longitud 42° 50' W, y altitud de 380 msnm.

Características del galpón experimental. La instalación utilizada fue un galpón de presión negativa tipo túnel, orientado en sentido oriente – occidente, con dimensiones de 14 m de ancho por 110 m de largo, altura del cielo raso de 2,5 m. El sistema de calefacción fue un calentador externo (TERMOAVES® CAC 30.000)¹, con sistema de tubería doble para calefacción interna con caudal de aproximadamente 6800 m³ h⁻¹, temperatura del aire de salida de 75 °C, el sistema de calefacción fue accionado durante las dos primeras semanas. La población aproximada de pollitos fue de 23.000 aves de linaje Cobb, la cama fue de cisco de café de primer uso. La Figura 1 muestra un esquema del galpón utilizado en este experimento.

Adquisición de datos experimentales. Para coleccionar los datos experimentales del ambiente térmico, una red de sensores de temperatura fue instalada de manera uniforme y equidistante dentro del galpón a la altura de las aves. Los sensores fueron distribuidos en forma de malla, con un espaciado aproximado entre ellos de 10,5 m a lo largo y 4 m a lo ancho. Fue instalado un sensor de temperatura dentro de una estación meteorológica localizada cerca del galpón para el monitoreo de las condiciones ambientales externas. Los sensores fueron conectados entre sí por una red de transmisión de datos con tecnología 1-Wire®. El conjunto de sensores fue conectado a un computador, y administrado con ayuda del programa computacional STRADA, desarrollado por Rocha *et al.* (2008). Fueron

¹ Las marcas o empresas nombradas no son mencionadas con fines comerciales, solo son nombradas para dar mayor claridad en el texto y por lo tanto no comprometen a los autores.

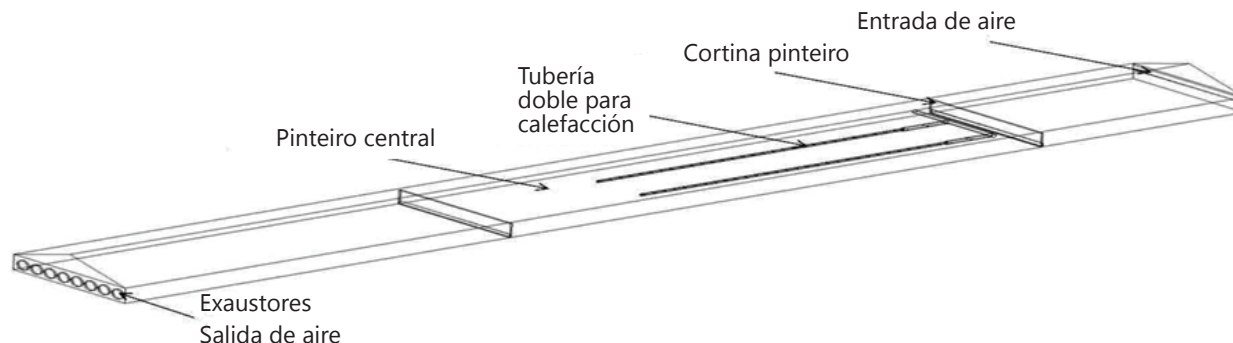


Figura 1. Esquema del galpón experimental de presión negativa tipo túnel empleado para la cría de pollitos.

colectados datos de temperatura de bulbo seco del aire en tiempo real, utilizando sensores DS18B20 y DS2438 conectados al computador por medio de un adaptador USB DS9490, la humedad relativa fue medida con ayuda de sensores HIH400 conectados a los sensores DS2438. Las temperaturas superficiales de los animales, de las cortinas, de los tubos de calefacción y del cielo raso fueron medidas con un sensor de temperatura infrarrojo Testo modelo 830-t1; además, la velocidad del aire fue medida con anemómetro digital anemómetro de hilo caliente marca Testo, modelo 425. Las temperaturas superficiales de los animales, cortinas, calefactor y cielo raso fueron medidas con un sensor de temperatura infrarrojo modelo testo 830-t1.

Para realizar el balance de energía fue preciso determinar el flujo de calor generado por los pollitos. Para esto fueron considerados despreciables los intercambios de calor por conducción y radiación, ya que las áreas de intercambio de calor son pequeñas (Norton *et al.*, 2009; Norton *et al.*, 2007); por tal razón, se consideró el intercambio de calor por vía convectiva utilizando la ecuación 1, presentada por Ingram (1975). Estos mismos autores sugieren calcular el coeficiente convectivo en función de la conductividad térmica del aire (K), la dimensión característica del animal (d) y el número de Nusselt (Nu), que es calculado en función del número de Reynolds (Re), que a su vez depende de la velocidad del aire, de la viscosidad cinemática del aire y de la longitud característica del animal. El área efectiva (superficial) del animal fue calculada por medio de la ecuación 2, propuesta por Curtis (1983).

$$Q_{cc} = Acc h(T_s - T_{ar}) \quad (1)$$

Donde:

Q_{cc} : Flujo convectivo (W).

Acc : Área efectiva superficial animal (m^2).

h : Coeficiente convectivo ($W m^{-2} °C^{-1}$).

T_s : Temperatura superficial animal ($°C$).

T_{ar} : Temperatura de bulbo seco ($°C$).

$$As = 8,2 \cdot P^{0,71} \quad (2)$$

Donde:

As : Área superficial animal (cm^2).

P : Masa del pollito (kg).

Para las condiciones de contorno, se utilizaron las medias de mediciones experimentales realizadas tales como: velocidad del aire en el interior del galpón, temperatura externa, cantidad de calor generado por los animales y por la calefacción, la presión estática, además de la resistencia térmica de las cortinas. La densidad de ocupación de los pollitos fue disminuyendo en la medida en que el espacio destinado para ellos (pinteiro en portugués) dentro del galpón fue aumentando en área, siendo 31 pollitos m^{-2} para la primera semana experimental, 18 para la segunda semana y 15 para a tercera semana, cuando toda el área del aviario fue ocupada.

Modelamiento computacional. Para el modelo y simulación computacional se consideró una geometría sólida en 3D del galpón a escala real, que fue utilizada con ayuda del programa computacional ANSYS ICEM CFD 13, para la construcción de una malla computacional tetraédrica de 118.989 nodos, y 622.827 elementos tetraédricos, obtenida después de varios refinamientos y test de mallas, la cual es presentada en la Figura 2.

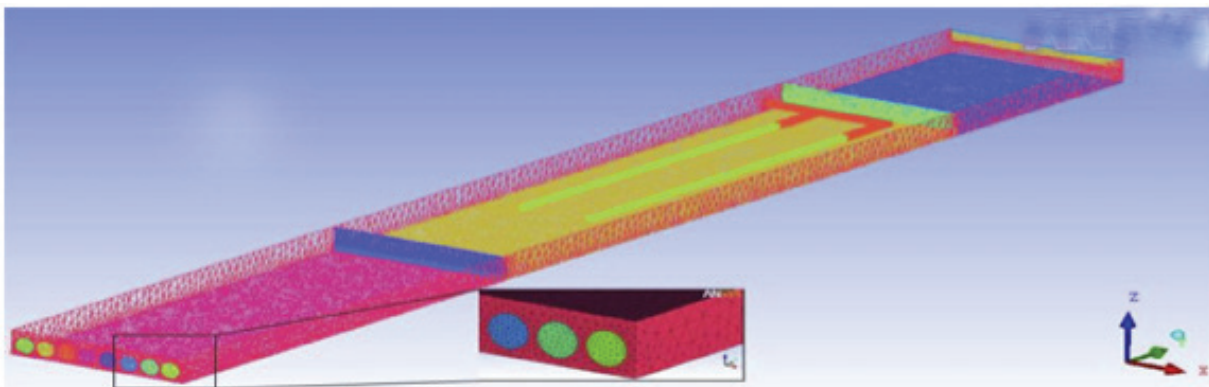


Figura 2. Galpón con malla computacional tetraédrica construida con el programa computacional ANSYS ICEM CFD 13.

Avances recientes de programas computacionales basados en CFD facilitan el estudio de los campos escalares y vectoriales presentes en el microclima de las instalaciones por medio de la solución de las ecuaciones que describen el flujo de fluidos, comúnmente conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes (Molina *et al.*, 2004):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla(\rho U U) = \nabla \rho o + [\mu_r(\nabla U + \nabla U^T)] \quad (4)$$

$$\frac{\partial(C_p T)}{\partial t} + \nabla(-k \nabla T + \rho C_p T U) = 0 \quad (5)$$

Donde:

- C_p : Calor específico ($J \text{ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$)
- k : Conductividad térmica ($W \text{ m}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$)
- p : Presión ($N \text{ m}^{-2}$)
- U : Vector velocidad (m s^{-1})
- ρ : Densidad (kg m^{-3})
- μ : Viscosidad dinámica ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$)
- T : Temperatura ($^\circ\text{K}$)

El movimiento turbulento fue modelado por medio del modelo $k-\epsilon$ estándar, que evalúa la viscosidad (μ_r) a partir de una relación entre la energía cinética turbulenta (k) y la disipación de energía cinética turbulenta (ϵ). El criterio de convergencia fue el valor del error cuadrático medio (RMS) de la solución

menor de 10^{-4} para las ecuaciones de conservación de momento, energía y de continuidad. Debido a que durante el tiempo de la colecta de datos experimentales el calefactor permaneció encendido durante 90 segundos, y se desactivó hasta que las condiciones ambientales lo requirieran, las simulaciones fueron hechas para un tiempo de 90 segundos en régimen transitorio para cada una de las condiciones. Para comparar los datos experimentales con el del modelo, se realizó un análisis estadístico con delineamiento en bloques casualizados para cada caso, comparando la temperatura de diferentes puntos por medio de test de medias de Tukey (9 para la primera semana y 24 para las semanas 2 y 3) dentro del "pinteiro", a partir de los datos experimentales con los datos simulados para los mismos puntos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3 muestra la temperatura media diurna y nocturna durante las tres semanas experimentales. Se puede observar la proximidad entre temperaturas medias reales y las simuladas por el modelo en CFD.

En las Tablas 1 y 2 se aprecia el análisis de varianza (ANOVA) y el test de medias para la primera semana en condición nocturna, que es el periodo de tiempo de mayor cuidado para las aves. El análisis de variancia y la prueba de Tukey mostraron que aunque exista diferencia entre la temperatura en algunos puntos dentro del galpón, no existe diferencia significativa entre las temperaturas medias del modelo CFD y los datos experimentales, tanto para la condición diurna

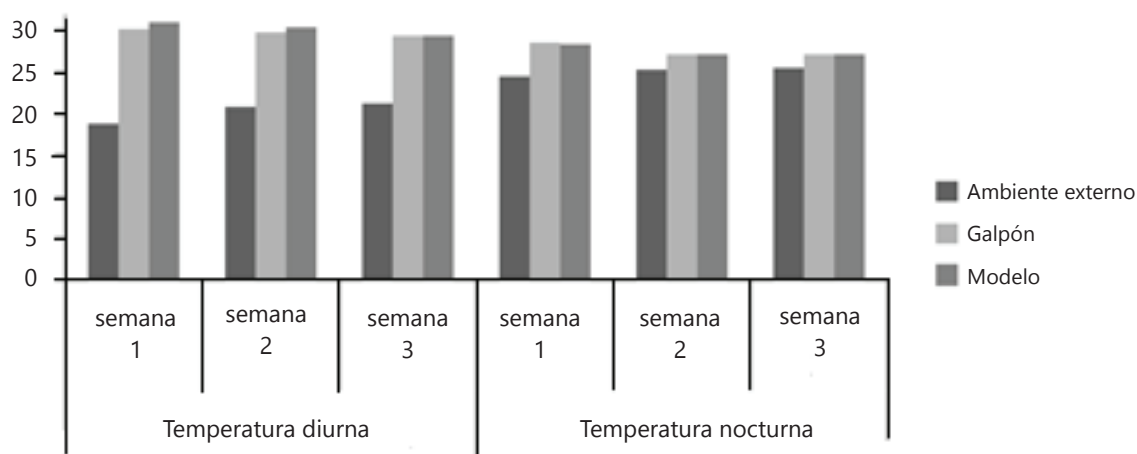


Figura 3. Temperatura media ambiental dentro del "pinteiro" y la temperatura del "pinteiro" simulada por el modelo en CFD.

como para la nocturna, lo que muestra que el modelo es una buena aproximación de la condición real para

la primera fase de crecimiento de pollos de engorde criados en un galpón de presión negativa tipo túnel.

Tabla 1. ANOVA para comparación de temperaturas medias nocturnas para la primera semana experimental.

FV	GL	SQ	QM	F
Bloques	8	16,1	2,0	
Tratamientos	2	588,9	294,4	188,3*
Resíduo	16	25,0	1,6	
Total	26	630,0		

Tabla 2. Test de temperaturas medias nocturnas para la primera semana experimental.

Tratamientos	N	Media	Desv. Est.	Error Est.
Modelo CFD	9	28,3 a	2,1	0,7
Datos experimentales	9	28,8 a	0,9	0,3
Ambiente externo	9	18,7 b	0,0	0,0

Las medias unidas por la misma letra no difieren entre sí, al 5% de probabilidad por la prueba de Tukey.

En las Figura 4 (A y B) se pueden apreciar los mapas de distribución térmica para la primera semana en condición nocturna realizados a partir de los datos experimentales y del modelo en CFD. En la Figura 4B, se observa una zona con temperaturas más elevadas, lo que puede ser explicado por la Figura 4C, que muestra una zona muerta resultando del efecto de turbulencia, generada entre la entrada de aire, la cortina y la divisoria del "pinteiro", lo que hace que el flujo de aire no sea perpendicular en el comienzo del "pinteiro"; más adelante, la fuerza de succión de los exaustores rectifica el flujo de aire. También una zona fría cerca a las cortinas (o paredes) del "pinteiro", lo que sugiere que el aislamiento térmico que ofrecen estas cortinas de polietileno, es poco para los requerimientos térmicos de los pollitos.

La Figura 5 (A y B) muestra los mapas de distribución térmica para la primera semana en condición nocturna efectuados a partir de los datos experimentales y del modelo en CFD, además de los 9 puntos de comparación utilizados para el análisis de variancia y test de medias. Estas figuras muestran una zona cálida donde se encuentran alojados los pollitos (pinteiro) con temperaturas entre 28 y 30 °C, principalmente cerca de los tubos de calefacción. Una zona fría próxima a las cortinas exteriores fue encontrada a lo

largo del periodo experimental, lo que sugiere que el aislamiento con cortinas no es adecuado para este tipo de estructuras, permitiendo grandes pérdidas de calor e ineficiencia en los procesos de conservación de energía, aspecto también encontrado por Osorio *et al.* (2011). En la Figura 6B, el modelo computacional muestra perfectamente el efecto de la zona muerta que genera una región más cálida en las pared de la divisoria del "pinteiro" (recuadro); esta zona es preferida por los pollitos cuando presentan estrés por frío, evitando el aire en movimiento excesivo y así mayor pérdida de calor por vía latente, buscando temperaturas más adecuadas o cercanas a las temperaturas de la zona de confort cuando la instalación no la ofrece, concordando el modelo con el comportamiento normal del animal.

En la Figura 6 (A y B), se pueden observar los mapas de la distribución térmica para la tercera semana en condición nocturna hechos a partir de los datos experimentales (Figura 6A) y del modelo en CFD (Figura 6B), además los 24 puntos de comparación utilizados para el análisis de variancia y test de medias. Se puede observar un comportamiento similar, con una región fría cerca de la entrada de aire que puede ser explicada por la turbulencia generada en esta región y a la mayor velocidad del aire en la entrada del galpón del aire (Figura 6C).

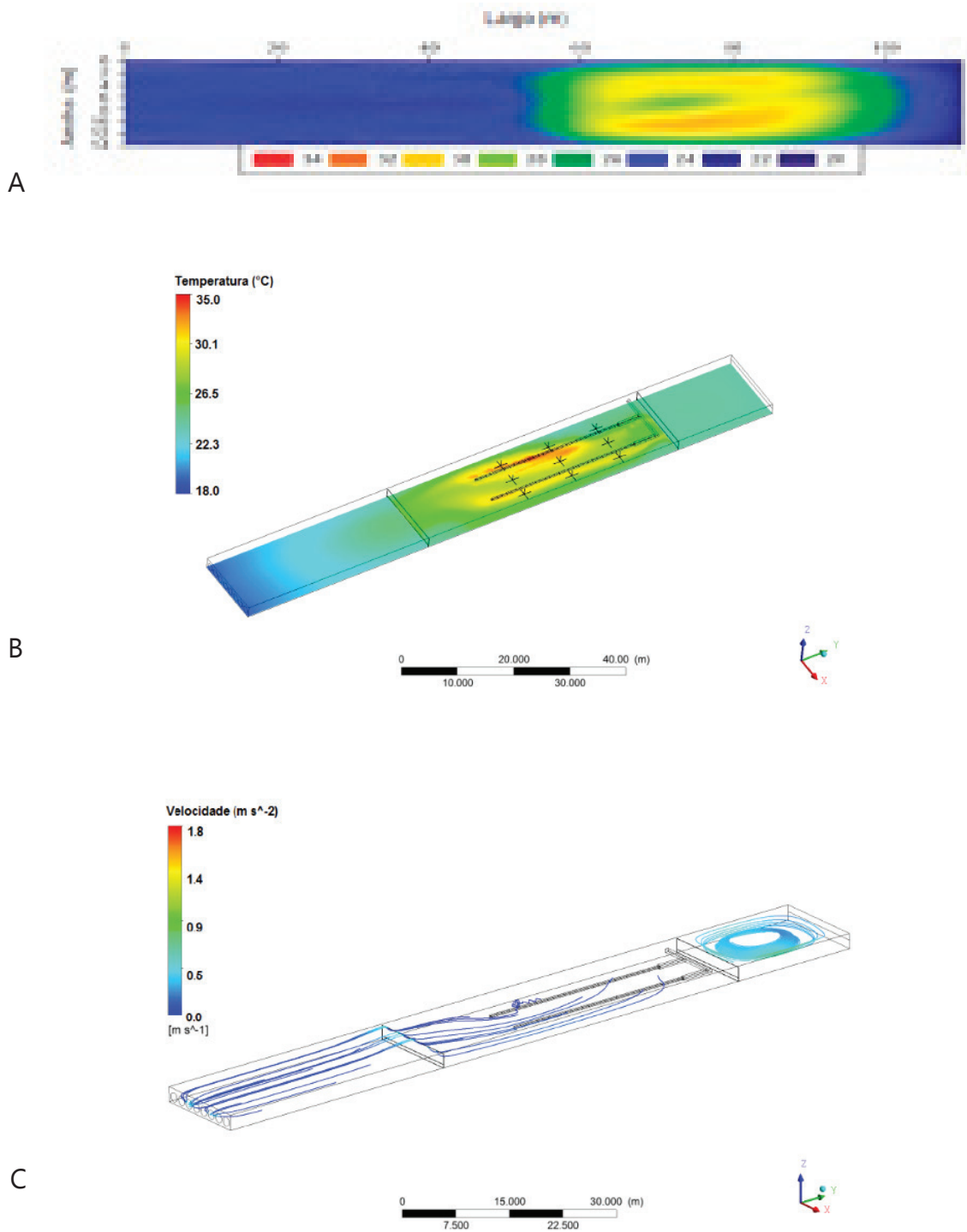


Figura 4. Condición nocturna primera semana de vida de las aves. Mapa de temperatura media a la altura de los pollitos a partir de los datos experimentales (A); mapa de temperatura media a la altura de los pollitos a partir del modelo en CFD (B) y mapa de turbulencia a partir del modelo en CFD (C).

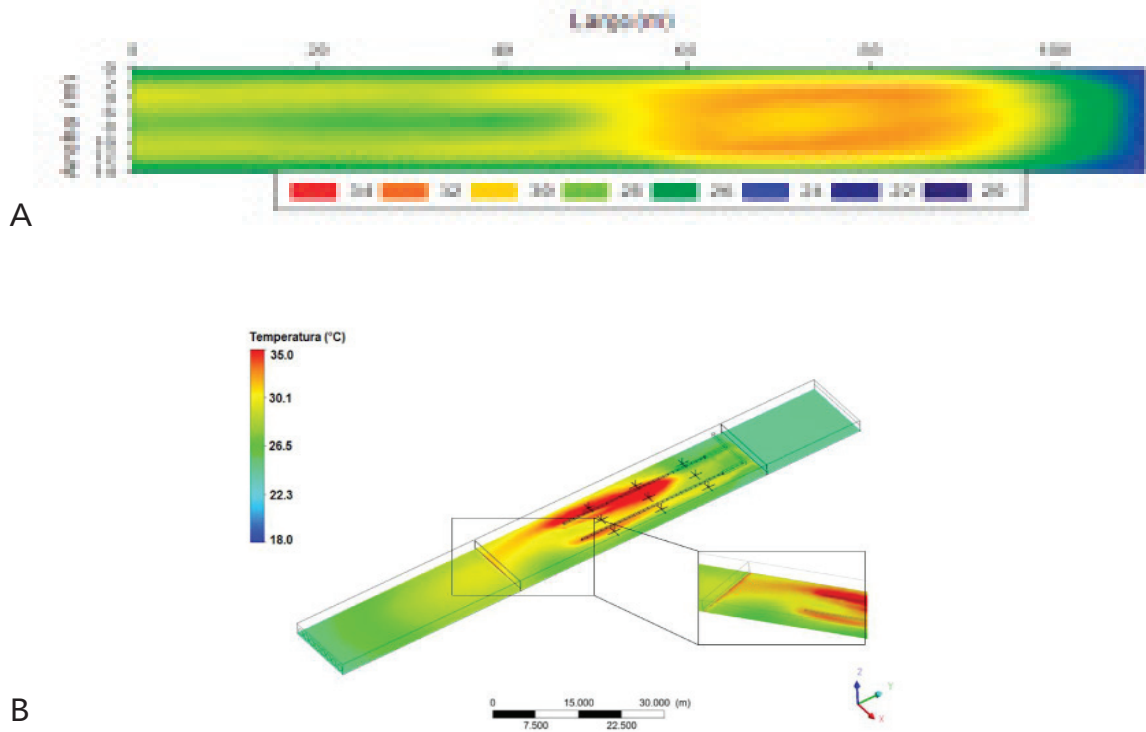


Figura 5. Condición diurna primera semana de vida de las aves. Mapa de temperatura media a la altura de los pollitos a partir de los datos experimentales (A) y mapa de temperatura media a la altura de los pollitos a partir del modelo en CFD (B).

CONCLUSIONES

El modelamiento por medio de la dinámica de fluidos computacionales (CFD) mostró ser una herramienta útil para el análisis térmico y de turbulencia en la primera fase de crecimiento de pollos de engorde, mostrando que no existen diferencia significativa entre los datos experimentales de temperatura media del “pinteiro” y el modelo en CFD, para las condiciones de día y noche en cada una de las tres semanas.

El modelo sugiere mayor atención en el aislamiento térmico externo de los aviarios y el fenómeno de turbulencia dentro de los galpones durante la primera fase de crecimiento de pollos de engorde, sobre todo cerca de la entrada de aire, ya que puede generar heterogeneidad térmica por causa de zonas muertas que son más cálidas y otras más frías, lo que puede traer problemas de confort térmico y consigo problemas en el adecuado desarrollo de los pollitos.

Esta primera aproximación para análisis térmico en CFD de un galpón de presión negativa tipo túnel, presenta resultados satisfactorios para la optimización de este tipo de estructuras tipológicas en países tropicales y subtropicales, y se sugiere para el futuro implementar subrutinas de ventilación mínima y de control de calefacción dentro del modelo computacional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad Federal de Viçosa, al Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos de la Universidad Nacional de Colombia, a la Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior (CAPES), a la Fundación de Amparo a la Investigación del Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq), y a la empresa alimenticia Pif-Paf, por hacer posible esta investigación.

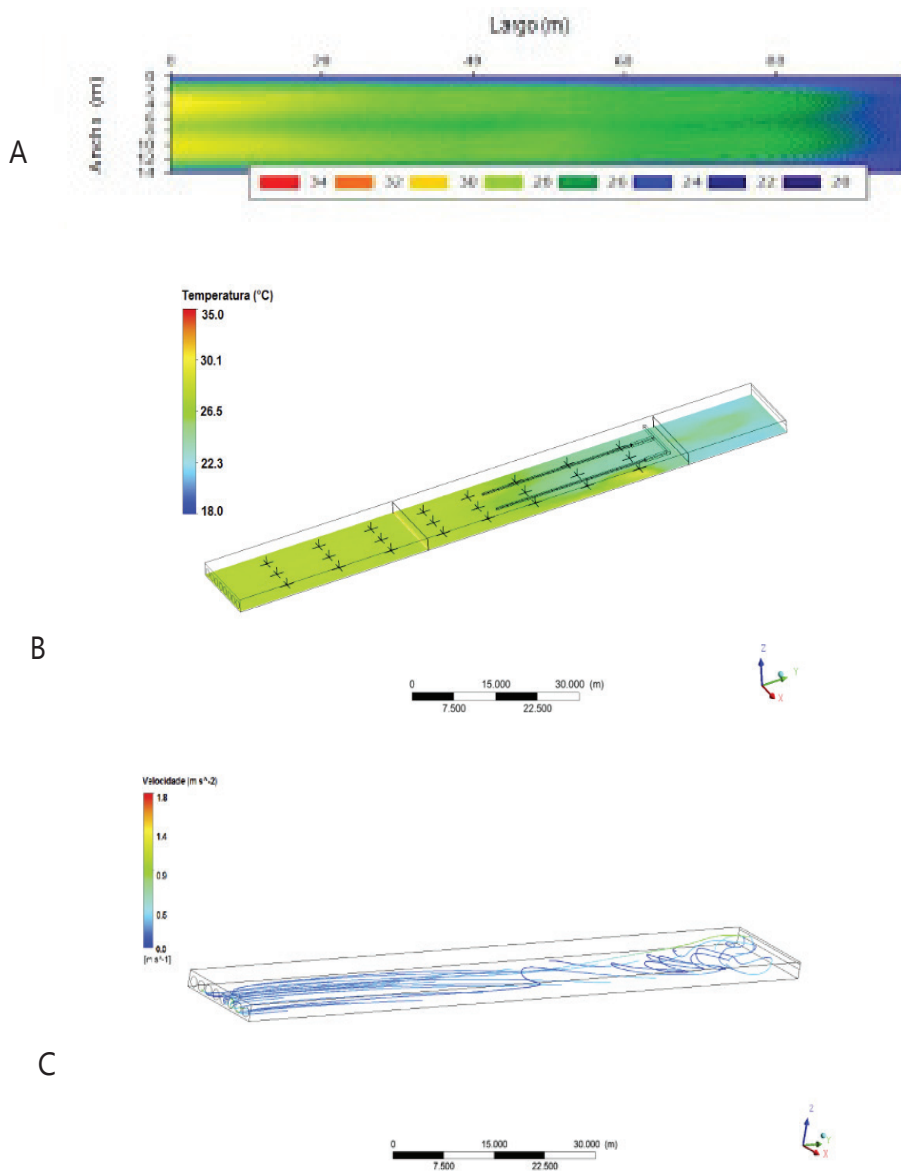


Figura 6. Tercera semana experimental, condición nocturna. Mapa de temperatura media a partir de los datos experimentales (A); mapa de temperatura media a partir del modelo en CFD (B) y mapa de turbulencia a partir del modelo en CFD (C).

BIBLIOGRAFÍA

Baêta, F.C. e C.F. Souza. 2010. *Ambiência em edificações rurais – conforto animal*. Segunda edição. Universidade Federal de Viçosa. 269 p.

Bustamante, E., D.F. García, S. Calvet, F. Estellés, P. Beltrán, A. Hospitaler and A.G. Torres. 2013. *Exploring*

ventilation efficiency in poultry buildings: the validation of computational fluid dynamics (CFD) in a cross mechanically ventilated broiler farm. *Energies* 6(5): 2605-2623.

Butcher, G.D. and A.H. Nilipour. 2002. *Broiler management - the first 24 hours*. Institute of Food and Agricultural Sciences, Florida. 4 p.

- Cordeiro, M.B. 2007. Análise de imagens na avaliação do comportamento, do bem-estar e do desempenho de pintos de corte submetidos a diferentes sistemas de aquecimento. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. 111 p.
- Cordeiro, M.B., I. de F.F. Tinôco, J.N. da Silva, R.B. Vigoderis, F. de A. de C. Pinto, P.R. Cecon. 2010. Conforto térmico e desempenho de pintos de corte submetidos a diferentes sistemas de aquecimento no período de inverno. *Revista Brasileira de Zootecnia* 39(1): 217-224.
- Croney, C.C. and S.T. Millman. 2007. Board-invited review: the ethical and behavioral bases for farm animal welfare legislation. *Journal Animal Science* 85(2): 556-565.
- Curtis, S.E. 1983. Environmental management in animal agriculture. The Iowa State University Press, Ames, Iowa. 409 p.
- Ingram, D.L. and L.E. Mount. 1975. Man and animals in hot environments. Springer – Verlag, New York. 185 p.
- Molina, F.D., D.L. Valera and A.J. Álvarez. 2004. Measurements and simulation of climate inside Almería-type greenhouses using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology* 125(1-2): 33-51.
- Norton, T., J. Grant, R. Fallon and D. Sun. 2009. Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering* 103(1):78-99.
- Norton, T., D. Sun, J. Grant, R. Fallon and V. Dodd. 2007. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review. *Bioresource Technology* 98(12): 2386-2414.
- Osorio, J.A., M.A. Arêdes, O.L. Zapata, F.A. Damasceno y H.J. Ciro. 2012. Una revisión acerca de la dinámica de fluidos computacionales (CFD) en instalaciones avícolas. *Revista Dyna* 79(175): 142-149.
- Osorio, J.A; Tinoco, F.F; Sullivan O.R; Arêdes, M. A.; Oliveira de Paula, M. 2011. Modeling and experimental validation to estimate the energy balance for a broiler house with misting cooling. *Revista Dyna* 78(170): 167-174.
- Rocha, K.S., J.H. Martins, I. de F.F. Tinôco, E.C. Melo, D.C. López and W. Hermsdorff. 2008. Remote environmental monitoring and management of data systems. *Livestock Environment VIII - Proceedings of the 8th International Symposium*. Iguassu Falls, Brazil p. 1001-1008.
- Tinôco, I. de F. F. *Avicultura industrial:2001*. Novos conceitos de materiais, concepções e técnicas construtivas disponíveis para galpões avícolas brasileiros. *Revista Brasileira de Ciência Avícola* 3(1): 1-26.
- Zajicek, M. and P. Kic. 2012. Improvement of the broiler house ventilation using the CFD simulation. *Agronomy Research Engineering Special Issue 1*: 235-242.

