

# El diseño de las instalaciones de pollos de carne y su influencia en las condiciones de confort de los animales

E. Guerra-Galdo<sup>1,2,\*</sup>, S. Calvet<sup>1</sup>, A. López<sup>3</sup> y F. Estellés<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Ciencia y Tecnología Animal, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n. 46022

<sup>2</sup> Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Av. de La Cultura 733, P.B. 921, Cusco, Perú

<sup>3</sup> Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n. 46022

## Resumen

Las condiciones de confort de los pollos de engorde son determinantes en su crecimiento. Estas condiciones vienen determinadas por los parámetros microclimáticos de su envolvente como la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del aire. Este artículo revisa los efectos de estos parámetros ambientales y su interacción, así como el estado del arte en la aplicación de modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), en el diseño de instalaciones avícolas de carne, con el fin de establecer las principales líneas de investigación en este ámbito. Las instalaciones para la cría de estos animales deben proporcionar condiciones ambientales óptimas para evitar el estrés térmico en los pollos y lograr los máximos rendimientos productivos. A través del diseño y manejo de las instalaciones avícolas se pueden modificar las condiciones en el interior de las mismas, alcanzando así los óptimos para la producción de pollos de engorde. Para entender y mejorar los sistemas de acondicionamiento de ambientes avícolas, se aplican herramientas como CFD, que permite evaluar diferentes soluciones constructivas y de manejo de la climatización reduciendo el número de pruebas experimentales, de forma que es posible perfeccionar las instalaciones en lo referente al comportamiento de flujos aire, temperatura y humedad.

**Palabras clave:** Velocidad de aire, humedad relativa, temperatura, dinámica de fluidos computacional, pollos.

## Abstract

### Evaluation of alternatives in broilers house for improving the comfort of animals

Broiler chicken performance is highly affected by environmental conditions inside the barn. The main parameters that must be considered in terms of thermic confort are temperature, relative humidity and air velocity. This article reviews the effects of these parameters and their interactions on broiler production and describes the state-of-knowledge of Computational Fluid Dynamics (CFD) used in the design of broiler houses, in order to establish priority research areas in this scope. The design and operation of broiler farms must ensure optimal conditions to avoid heat stress and allow the animals to express their genetic potential. It is well known that the design and management of broiler barns has a clear impact on the environmental conditions occurring inside the building. The use of CFD has been widely used to understand and improve these design and operation parameters in livestock buildings. Com-

---

\* Autor para correspondencia: ehgg.-@hotmail.com

<https://doi.org/10.12706/itea.2016.025>

putational Fluid Dynamics analyzes mass and heat flows inside the building, and the distribution of temperature, relative humidity and air velocity at animal level can be predicted. Therefore, this tool allows testing different solutions prior to their construction reducing thus the number of experimental procedures needed.

**Key words:** Air velocity, relative humidity, temperature, computational fluid dynamics, broilers.

## Introducción

La selección genética para incrementar el ritmo de crecimiento de los pollos de engorde ha permitido aumentar el desarrollo muscular y así obtener animales más precoces, más eficientes en conversión alimenticia y con mayor rendimiento en canal. Sin embargo, esta selección ha afectado también a otras funciones biológicas como los sistemas digestivo, nervioso, cardiovascular, tegumentario e inmunológico (Collins *et al.*, 2014). Estos cambios han llevado a que los animales presenten una mayor sensibilidad a las condiciones ambientales, siendo menos capaces de adaptarse cuando están expuestos a temperaturas fuera de los rangos óptimos (Li *et al.*, 2011).

Sin embargo, las condiciones meteorológicas son cambiantes durante el día y a lo largo del año, con un comportamiento inestable e impredecible a medio plazo. Por ello, en las naves avícolas se necesita controlar cada vez con más precisión las condiciones ambientales para mantener una producción elevada y de alta calidad durante todo el año. Estas naves avícolas, generalmente de planta rectangular, se diferencian entre ellas por su geometría, la ubicación y potencia de los ventiladores así como en la distribución, forma y tamaño de las ventanas o entradas de aire, afectando a la dirección e intensidad del flujo del aire, además de la homogeneidad de la temperatura a nivel del animal. Además, los materiales constructivos determinan el intercambio térmico por conducción entre el interior y el exterior de la nave. La configuración de la nave en cuanto a altura, anchura, longitud tiene gran impor-

tancia en el comportamiento termodinámico del edificio y debe dar respuesta a diferentes cambios meteorológicos en la envolvente para minimizar las pérdidas de calor en épocas frías y las ganancias de calor en épocas calurosas, permitiendo alcanzar en ambas situaciones, condiciones óptimas para la cría de los pollos.

Los factores ambientales como la temperatura, la humedad y la velocidad del aire deben ser estrictamente controlados en las granjas de pollos de engorde, y eso sólo puede conseguirse a través de un adecuado diseño de las instalaciones. La modelización de estos espacios permite precisamente conocer en profundidad el comportamiento del aire en el entorno de los animales. La aplicación de la dinámica de fluidos computacional (CFD; por sus siglas en inglés, *Computational Fluid Dynamics*) es, junto con los modelos físicos, una de las técnicas más potentes para representar este movimiento y la evolución térmica del aire. Además, el uso de CFD permite optimizar el diseño de naves avícolas considerando diferentes escenarios, mediante la investigación del comportamiento de parámetros como la distribución de la velocidad y temperatura de aire, prediciendo así el intercambio de calor entre animales y su entorno.

A la luz de las referencias consultadas que indican las tendencias más actuales en la modelación de los espacios utilizados en la cría de pollos de carne, el objetivo de este trabajo es revisar el estado del arte de la aplicación de la CFD en el diseño de las instalaciones, centrándose en la investigación sobre la modelación de los parámetros que determinan el confort

de estas aves. Para ello, en primer lugar se realiza un análisis descriptivo exploratorio del efecto de las condiciones ambientales como la temperatura, humedad y velocidad de aire, así como su interacción, en la respuesta productiva de los pollos de engorde.

### Material y métodos

Se realizó una revisión de estudios científicos dedicados a evaluar los factores ambientales que intervienen en el confort de pollos de carne, así como al uso de la CFD en el análisis del diseño de naves avícolas.

La información analizada se estructuró en dos apartados: El primero de ellos está dedicado a los factores ambientales (temperatura, velocidad y humedad) que afectan en el confort de pollos de carne y sus efectos en los parámetros productivos. El segundo apartado se centra en evaluar los diseños de instalaciones avícolas usando la dinámica de fluidos computacional buscando mejorar el confort térmico.

### Resultados y discusión

Efecto de los factores ambientales en el confort de pollos de carne

#### *El Confort térmico en Aves*

Las aves son animales homeotermos, capaces de mantener su temperatura corporal dentro de un estrecho rango de temperatura ambiental, a través del intercambio de calor con el entorno (Mostafa et al., 2012). Esta capacidad termorreguladora se desarrolla completamente a partir de los 12 a 15 días de edad. La zona de confort o termoneutra, que se define como el rango de temperaturas ambientales en el que se consigue regular la tem-

peratura únicamente a través de la transmisión de calor sensible (Bligh y Johnson, 1973). En las aves la zona de confort varía de acuerdo a su constitución genética, edad, sexo, tamaño corporal, dieta, estado fisiológico, humedad, radiación y velocidad de aire (Me-deiros et al., 2005a, Lin et al., 2005).

En la zona de confort, la tasa metabólica es mínima y la homeotermia se mantiene con menos gasto de energía; por lo tanto la fracción de energía metabolizable utilizada para la termogénesis es mínimo y el aprovechamiento de la energía ingerida para el crecimiento es máxima (Cordeiro et al., 2010).

Para mantener la temperatura corporal dentro de los límites de la zona de confort, los animales utilizan las diferentes vías de intercambio de calor con el medio: calor latente a través de la respiración y calor sensible mediante la transmisión de calor por radiación, conducción y convección. Así, hay tres parámetros ambientales clave que van a jugar un papel determinante en estos procesos de intercambio de calor: la temperatura, la velocidad del aire y la humedad del aire.

#### *Temperatura*

Como ya se ha comentado anteriormente, la capacidad termorreguladora de un pollito joven no está bien desarrollada y durante los primeros días de vida requieren de temperaturas ambientales elevadas (entre 30 y 33 °C) para mantener su temperatura corporal (Oviedo-Rondón, 2014) y evitar pérdidas de calor sensible por convección (al aire) y por conducción (a la cama), que pueden cuantificarse en 0,5 kcal/hr/kg (Reece y Lott 1982). Debido al reducido tamaño del pollito joven, la superficie de contacto entre el animal y la cama es escaso (Mount, 1968), aunque depende de la postura del animal (Blanco 2004 a, b). En este sentido, se recomienda que los materiales utilizados como cama tengan una baja conductividad térmica, con el

fin de reducir las pérdidas de calor por conducción con el suelo. Con el desarrollo del pollo, y la posterior maduración del sistema termorregulador y el aumento de la reserva energética, la temperatura óptima para los pollos va descendiendo paulatinamente desde los 24°C a las 4 semanas hasta los 18°C a las 6 semanas (Olanrewaju *et al.*, 2010). Con el desarrollo del pollo, y la posterior maduración del sistema termorregulador y el aumento de la reserva energética, la temperatura óptima para los pollos va descendiendo paulatinamente desde los 24°C a las 4 semanas hasta los 18°C a las 6 semanas (Olanrewaju *et al.*, 2010). Así, con 4 semanas de edad los pollos requieren entre 21 y 23°C (Furlan, 2006; Abreu y Abreu, 2011), sobre 21° con 5 semanas (Chepete *et al.*, 2004), reduciéndose hasta los 20-22°C en la sexta semana (Furlan, 2006; Abreu y Abreu, 2011).

Cuando los animales se encuentran fuera de esta zona termoneutra se produce una movilización de recursos para alcanzar la homeostasis, de tal forma que una parte de la energía consumida en alimentación, que podría ser utilizado para la producción, se desvía para el mantenimiento de sistema termorregulador (Teeter y Smith, 1986). A pesar de esta capacidad, cuando se alcanzan determinados extremos la capacidad de adaptación se reduce. Así, los recursos que tienen las aves para el intercambio térmico con ambiente son menores a medida que aumenta la temperatura ambiente, lo que puede producir un estrés severo en los animales (Mickelberry *et al.*, 1966). Por otro lado, cuando las temperaturas se encuentran por debajo de la zona de confort, se pueden desencadenar cuadros de hipotermia (Ipek y Sahan, 2006). La respuesta de las aves frente a condiciones subóptimas de temperatura puede categorizarse en tres grandes grupos: fisiológicas, comportamentales y productivas.

#### a. Respuestas Fisiológicas

Cuando las temperaturas se encuentran por encima de los requerimientos de los animales, éstos incrementan su tasa respiratoria, jadeando para facilitar la eliminación de calor latente, lo que puede llevar a producir alcalosis respiratoria en un esfuerzo por disipar el calor por evaporación (Olanrewaju *et al.*, 2010). También se ha observado vasodilatación a nivel cutáneo, incremento ritmo cardíaco y aumento del flujo sanguíneo para aumentar la disipación del calor sensible desde el cuerpo al ambiente. Esto provoca que el ave sometida a un estrés por calor no sólo sea más liviana sino que también tenga más grasa total y abdominal [aumentadas en un 0,8 y 1,6% respectivamente, por cada grado de incremento de la temperatura ambiental según Estrada y Márquez (2005)]. Por otro lado, en animales jóvenes también se han observado efectos negativos del exceso de temperatura ambiental, provocando deshidratación (Estrada-Pareja *et al.*, 2007), disminución del peso del corazón y reducción de hemocritos y del plasma triiodothyronina (T3) (Moraes *et al.*, 2002).

#### b. Respuestas comportamentales

Los pollos presentan mayores problemas con temperaturas ambientales altas y empiezan a manifestar cambios reduciendo su actividad física, intentando alejarse del resto de animales (Temin *et al.*, 2000). La refrigeración por evaporación (jadeo) se complementa con el aleteo gular, se bañan en la cama o buscan zonas más húmedas bajo los bebederos (aumentando así el riesgo de pododermatitis y lesiones en pechugas), extienden sus extremidades (alas y patas), permanecen echados, escarban para perder calor por conducción y convección aumentando el consumo de agua (Estrada y Márquez, 2005).

### c. Respuestas productivas

Este tipo de respuestas, con un efecto directo sobre los parámetros productivos se encuentran muy relacionadas con las descritas anteriormente, pero dado el interés comercial de las mismas, resulta interesante evaluarlas de forma independiente. Así, a nivel experimental Oviedo-Rondón (2014) observó, en pollos de engorde de 7 días de edad, que al reducirse la temperatura ambiental de 35°C a 20°C, hubo un incremento de 9 veces en la pérdida de calor corporal por radiación, lo que causó además que estos animales criados a 20°C presentaran una reducción de su peso corporal del 15,5% respecto a los animales criados a 35°C. Por el contrario, Moraes et al. (2002) observaron en pollos de 7 días de vida expuestos a 36°C, que éstos disminuyeron la ganancia de peso, reduciendo la ingestión de alimento y eficiencia alimenticia con respecto a los pollos expuestos a 20°C y 25°C. En otro experimento con pollos de engorde de seis semanas, Estrada-Pareja et al. (2007) obtuvieron mayor peso corporal y conversión alimenticia con temperaturas de 19°C frente a temperaturas de 25 y 31°C. Sin embargo, para la ganancia de peso diaria no hubo una diferencia entre aquellas aves sometidas a temperaturas de 19 y 25°C pero sí que encontraron una reducción (7,47%;  $P < 0,05$ ) para el tratamiento de 31°C con respecto a las demás.

#### *Humedad Relativa (HR)*

La humedad relativa del aire afecta a la sensación térmica de los pollos a través de la capacidad de intercambio de calor latente con el ambiente. Así, con valores por encima del 70% de HR los pollos tienen dificultades para disipar calor latente. Por el contrario, con humedades relativas por debajo del 35%, se pueden presentar problemas en las vías respiratorias (Genç y Portier, 2005). Si coinciden

una temperatura y humedad relativa elevadas los animales se quedan sin recursos para disipar todo el calor que producen. Por una parte, a temperaturas elevadas la capacidad de disipar el calor sensible por convección se reduce, mientras que por otra parte el incremento del ritmo respiratorio para aumentar la evaporación de agua es menos eficaz para eliminar el calor corporal. Estas condiciones de temperatura y humedad elevadas conllevarán un incremento de la temperatura corporal y, en definitiva, los animales salen de su zona de confort térmico, produciéndose un estrés que lleva a alteraciones comportamentales y fisiológicas. Paralelamente, con humedades relativas elevadas (superiores al 75%) pueden producirse otros problemas de manejo tales como la aparición de condensaciones y la presencia de camas húmedas (Medeiros et al., 2005a).

Genç y Portier (2005) registraron una reducción de un 47% de la producción de calor latente por parte de pollos de engorde alojados a 25°C cuando la humedad relativa aumentó desde un 50 hasta un 86%. En pollos adultos, con 42 días de edad, observaron mayor incremento de la temperatura cloacal y mayor mortalidad con temperatura de 35°C y humedad relativa de 20 a 30%, en comparación con pollos de 5 a 7 días de edad sometidos a 70-80% HR y la misma temperatura (Yahav y Hurwitz, 1996).

De acuerdo con Mazanowski (2011), el rango de humedades relativas óptimo para la cría de pollos de carne debería encontrarse entre el 60 y el 65%, siendo los límites mínimos y máximos de 55 y 70%, respectivamente. Según Medeiros et al. (2005a), la humedad relativa ideal para el crecimiento de los pollos de engorde debe encontrarse entre el 50 y el 70%. En cualquier caso, como se ha comentado anteriormente, la estrecha relación con la temperatura ambiental hace complicado establecer unos límites estrictos para este parámetro.

### Velocidad de aire

La velocidad de aire tiene un efecto directo sobre la transmisión de calor sensible por convección en las aves. Un incremento en la velocidad de aire, facilita la eliminación de calor sensible de los animales, suponiendo una estrategia para reducir el estrés térmico en estos animales cuando las temperaturas son elevadas (Estrada-Pareja *et al.*, 2007; Yahav *et al.*, 2004). Así, según Simmons *et al.* (1997), con una temperatura de 29°C y velocidades de aire incrementando desde 1,01 a 3,05 m/s, para pollos de quinta semana, la pérdida de calor sensible se incrementó de 1,19 a 2,09 W/kg, mientras que la pérdida de calor latente disminuyó desde 2,89 a 2,09 W/kg. En este mismo experimento se observó en la sexta semana de edad que la pérdida de calor sensible fue incrementando desde 1,30 a 2,33 W/kg y disminuyó la pérdida de calor latente de 2,59 a 2,30 W/kg.

Los efectos de esta mayor capacidad para eliminar calor con velocidades de aire elevadas se traducen, dentro de ciertos rangos, en mejores resultados productivos. De este modo, Lott *et al.* (1998), observaron que los pollos de engorde con tres semanas de edad alcanzaron pesos corporales más altos con velocidades de aire de 3,0 m/s y temperaturas de 29 a 30°C, frente a los expuestos a 0,25 ó 2 m/s. También Dozier *et al.* (2006), reportaron un incremento en el crecimiento de pollos de engorde, entre los 29 y los 42 días de edad con altas temperaturas de ciclo diurno (25-35-25°C) durante 24 horas, con mayores velocidades de aire (3,0 m/s) en comparación con las aves sometidas a una velocidad del aire de 2,0 m/s. Este efecto beneficioso de la velocidad de aire con altas temperaturas se ha observado también con valores de velocidad de aire más bajos. Así Yahav *et al.* (2001) también observaron una mayor ganancia de peso, consumo de alimento, y eficiencia alimenticia con velocidades de aire entre 1,5 y 2,0 m/s en pollos de quinta y séptima semana

con temperatura de 35°C y 60% HR en comparación con pollos expuestos a velocidades de aire de 0,5 y 1,0 m/s. También Olsen (2012) y Lott *et al.* (1998), observaron en pollos de 4 a 6 semanas de edad mejor ganancia de peso y conversión alimenticia con velocidades de aire de 2 m/s en comparación con los expuestos a 0,25 m/s. Por tanto, si no es posible reducir la temperatura hasta el rango óptimo, en pollos al final del ciclo de cría es posible paliar los efectos adversos mediante el incremento de la velocidad a nivel del animal, hasta un rango de 2-3 m/s.

### Índices de Temperatura, Velocidad y Humedad

Dada la fuerte relación existente entre estos tres parámetros desde el punto de vista de la regulación térmica de las aves, y con el objetivo de facilitar la toma de decisiones en granja, se han propuesto una serie de índices que combinan estos parámetros. Algunos ejemplos de estos índices son: el índice de temperatura y humedad (ITH) desarrollado por Thom (1959) para humanos, y actualizado posteriormente por varios autores para otras especies animales (Tao y Xin, 2003; Teixeira da Silva, 2007), el índice de temperatura de globo negro y húmedo (ITGNH) desarrollado por Buffington *et al.* (1981) y modificado por varios autores (Medeiros *et al.*, 2005b, Oliveira *et al.*, 2006), el índice de temperatura, humedad y velocidad (ITHV) desarrollado por Tao y Xin (2003), o el Índice Ambiental de Productividad desarrollado por Medeiros (2005).

El ITH es probablemente el índice más utilizado por diversos autores (Purswell *et al.*, 2012) dado que la temperatura y humedad son parámetros de fácil medición. Además, el ITH se ha correlacionado con diversos parámetros productivos en la cría de pollos de engorde. Así, se ha visto que en pollos de engorde entre 49 y 63 días el consumo de pienso y el peso final disminuyen con el aumento del ITH, mientras que el índice de con-



versión se incrementa (Purswell et al., 2012). Aunque existen varias propuestas para el cálculo del ITH en aves, la ecuación propuesta por Tao y Xin (2003) es probablemente la más utilizada (ecuación 1)

$$ITH = 0,85 T_{bs} + 0,15 T_{bh} \quad [1]$$

Donde  $T_{bs}$  y  $T_{bh}$  son las temperaturas del bulbo seco y bulbo húmedo (punto de rocío), respectivamente, y todas las variables se expresan en °C.

Dada la importancia que tiene la velocidad del aire en el confort de los animales, resulta también interesante conocer el efecto combinado entre temperatura, humedad relativa y velocidad de aire. Con este objetivo, Tao y Xin (2003) desarrollaron el ITHV para describir la respuesta de la temperatura corporal a las condiciones de temperatura de bulbo seco, temperatura de punto de rocío y la velocidad del aire. Mediante estos parámetros consideraron la variación de temperatura corporal de las aves como normal (35°C), alerta (38°C), peligro (40°C) o emergencia (mayor de 40°C), si bien existe un menor número de estudios evaluando su aplicación práctica (Blanes-Vidal et al., 2008; Yanagi et al., 2014). La mayor dificultad en la medida de la velocidad del aire en condiciones prácticas, así como su variación espacial, pueden ser factores que dificultan su uso práctico. No obstante, el desarrollo de la tecnología de los sensores, así como la aplicación de técnicas de modelización como la dinámica de fluidos computacional, pueden permitir su aplicación y estudio en la práctica.

Estos índices, por tanto permiten considerar de forma conjunta los efectos combinados de las distintas variables que afectan al confort de los animales, y en definitiva a su productividad. Así pues, su estimación en el proceso de diseño de los alojamientos puede resultar una herramienta muy útil para optimizar el comportamiento de los alojamientos ganaderos frente al amplio rango de situaciones ambientales que puedan darse.

El uso de CFD en el diseño y evaluación de alojamientos

#### *Efecto del diseño de la nave en el aire ambiente interior*

La geometría de una nave avícola tiene gran importancia en el comportamiento térmico del edificio y sobre los flujos de ventilación. La configuración de la nave debe dar respuesta a diferentes situaciones meteorológicas para minimizar las pérdidas de calor en épocas frías y las ganancias de calor en épocas calurosas, favoreciendo al mismo tiempo una adecuada ventilación. Tradicionalmente se han utilizado geometrías rectangulares variando la ubicación de los ventiladores y ventanas que influyen en la dirección del flujo del aire y los parámetros de confort (Seo et al., 2009, Mostafa et al., 2012, Bustamante et al., 2013, Osorio et al., 2013).

La ubicación y capacidad de los ventiladores varían dependiendo del caudal de aire que se desea suministrar, de las condiciones ambientales, del sistema de ventilación y de la distribución relativa de las ventanas. La ubicación, dimensión y altura de las ventanas influye en la trayectoria del aire y la homogeneidad de la temperatura (Bustamante et al., 2013; Guerra-Galdo et al., 2015). Así, es posible alcanzar condiciones de temperatura en las naves mucho más homogéneas a través de la modificación de las entradas de aire en la misma (Mostafa et al., 2012), redundando así en una mejora de las condiciones de cría para los animales.

La necesidad de tener un conocimiento completo de la temperatura, humedad y velocidad del aire en todos los puntos del interior de la granja es la principal razón por lo que la aplicación de diferentes herramientas computacionales es muy adecuada para realizar modelos de este movimiento del aire. Asimismo, es una potente herramienta de apoyo en la toma de decisiones para los diseñados.

res e investigadores con el fin de mejorar la configuración de las naves avícolas considerando la simetría y proporción de dichas naves, así como la posición óptima de ventiladores y ventanas.

#### *Las aplicaciones de CFD en granja*

El CFD permite profundizar en los estudios de transferencia de calor y masa, perfeccionar, mejorar y optimizar los diseños actuales de los sistemas estándar de control ambiental en granjas, buscando mejorar el confort de los animales. Para ello, se basa en el análisis del movimiento de gases y partículas contaminantes en el interior de las naves, evaluando la velocidad del aire y la energía turbulenta, la temperatura y humedad.

La simulación CFD puede analizar cualquier estructura diversa con bajo costo comparado con el campo experimental. Esta técnica resulta de gran utilidad para evaluar diferentes diseños, actividad que no se puede realizar al momento de realizar la medición directa de la velocidad del aire porque tiene tres inconvenientes principales: (1) el número de puntos que se puede medir es limitado, lo que dificulta la obtención de un conocimiento exhaustivo de los patrones de la velocidad del aire en interiores; (2) la medición directa requiere un agente de medición, que interfiere inevitablemente con la velocidad del aire y por lo tanto, distorsiona la salida de medición; y (3) las mediciones de campo requieren la existencia de una construcción. Como resultado de estas limitaciones, el número de construcciones que pueden ser estudiadas por medición directa es restringido y las conclusiones obtenidas a partir de dichos estudios no pueden ser consideradas universalmente representativas. La CFD evita estos inconvenientes mediante el cálculo del campo de flujo numérico y simulación de los patrones de velocidad del aire (Blanes-Vidal *et al.*, 2008). Sin embargo, con el fin de reforzar la credibilidad de los resultados, todavía es importante vali-

dar las simulaciones CFD mediante el uso de herramientas de medición directa (Lee *et al.*, 2007, Harral y Boon, 1997).

#### *Modelo turbulento*

El CFD facilita el estudio de los campos escalares y vectoriales presentes en el microclima de las instalaciones de naves avícolas con ventilación natural y mecánica.

Las ecuaciones que se resuelven son las propias de la mecánica del flujo de aire: ecuación de continuidad y de conservación de cantidad de movimiento o Navier Stokes. Sin embargo, la consideración del movimiento del aire conlleva una representación de un fenómeno complejo como es la turbulencia. La turbulencia aparece porque de forma instantánea las componentes de velocidad del aire se aceleran, apareciendo componentes pulsátiles que, sumadas a los valores medios de la velocidad, deben ser estimadas para conocer el flujo real del aire. Sin embargo, la consideración de la turbulencia de forma directa es compleja, incluso para los potentes modelos numéricos de los que se dispone en la actualidad, por lo que se proponen ciertas simplificaciones para analizar esta turbulencia. Los modelos de turbulencia usados para flujos con alto número de Reynolds son los llamados los modelos de simulación de grandes vórtices (LES) que exigen mucho tiempo para resolución y por lo tanto, son raramente usados, a no ser que se requiera de una mayor precisión. Entre los modelos más usados se encuentran los denominados Reynolds Averaged Navier-Stokes equation (RANS) que requieren menos tiempo de computación y dentro de éstos tenemos los modelos  $k-\epsilon$  siendo el más usado, el Standard  $k-\epsilon$ , para simulación aerodinámica y de transferencia de calor. A partir de modificaciones de este modelo Standard  $k-\epsilon$ , y debido a su convergencia favorable y precisión razonable, en sistemas de ventilación natural y mecánica surgen el RNG  $k-\epsilon$  y el Realizable  $k-\epsilon$  (Osorio *et al.*, 2013; Bartzanas *et al.*, 2004). Este último ha



demostrando mayor predicción de flujos con respecto al Standard  $k-\epsilon$ . Por el contrario, el Reynolds Stress Model (RSM) es el más utilizado para la simulación de procesos de flujo turbulento comparado con el modelo  $k-\epsilon$  pero requiere memoria adicional y tiempo de cálculo por el mayor número de las ecuaciones de transporte de Reynolds stress (Blanes-Vidal et al., 2008, Seo et al., 2009, Lee et al., 2007, Guerra-Galdo et al., 2015). En los modelos de movimiento de aire en granjas, las técnicas CFD que se han utilizado generalmente han sido RANS, con un compromiso adecuado entre tiempo de computación y precisión en los resultados.

#### *Estudios de CFD en el estudio de naves avícolas*

Las técnicas de CFD han sido validadas por mediciones directas y pueden ser utilizados para explorar la eficiencia de ventilación y para identificar diseños óptimos de granjas avícolas y evaluar su gestión óptima. En el diseño de las instalaciones avícolas con ventilación mecánica el uso de CFD busca perfeccionar la ventilación y el confort térmico a nivel del animal, con diferentes condiciones de contorno (Blanes-Vidal et al., 2008, Song et al., 2010) que especifican los flujos de masa, momento y energía dentro del dominio computacional. Para ello, se utilizan la condición inicial del fluido aire, las condiciones de contorno internas (ventanas, suelo y techo), y externas (paredes, extractores), la temperatura, la presión, y las velocidades de entrada y salida del aire por ventanas y ventiladores. En las simulaciones se utilizan mallas hexaédricas y cuadráticas en todo el dominio computacional (Seo et al., 2009), si bien algunos investigadores subdividen el campo en varias partes, usando mallas tetraédricas en las entradas y salidas de aire, y hexaédricas en las paredes y puntos donde no existe la necesidad de mayores detalles o precisión (Blanes-Vidal et al., 2008, Bustamante et al., 2013,

Guerra-Galdo et al., 2015). Los principales parámetros de simulación que utilizados en la bibliografía para las variables de contorno de temperatura, velocidad del aire y amoníaco fueron flujo incompresible, tridimensional, isotérmico, gravedad y modelo de flujo segregado (Bustamante et al., 2015, Guerra-Galdo et al., 2015), o bien bidimensional (Seo et al., 2009), y en estado estacionario (Blanes-Vidal et al., 2008, Bustamante et al., 2013, Seo et al., 2009, Bjerg et al., 2002, Osorio et al., 2013, Humbert et al., 2014).

Utilizando estas técnicas, Bjerg et al. (2002) modelaron la ubicación y número de aberturas en la pared de una granja (aberturas ubicadas en diferentes distancias de la pared), y validaron los patrones de flujo de aire, utilizando sistemas de ventilación mecánica, encontrando flujos de aire simétricos con mayor número de aberturas en la pared. También Guerra-Galdo et al. (2015) modelaron una nave avícola tipo túnel (con los ventiladores en el extremo) y dos naves semitúnel (con el mismo número de ventiladores, situados en el centro de la nave y con variaciones en la distribución de las entradas de aire), todas con idéntica geometría pero con diferente distribución de ventanas (Figuras 1 y 2) para comparar la distribución de temperatura, velocidad e índice de temperatura y velocidad a 0,20 m del suelo, encontrando resultados similares con la bibliografía (Tabla 1).

Por otro lado, Bustamante et al. (2013, 2015) modelaron y validaron una nave avícola con ventilación mecánica, encontrando resultados similares de velocidad de aire entre CFD y medidas directas. Asimismo, Mostafa et al. (2012), simularon y evaluaron cuatro sistemas de ventilación en naves avícolas para mejorar la ventilación, la distribución de la temperatura y la dispersión de amoníaco dentro de las naves, realizando propuestas de mejora respecto al diseño estándar. Por otro lado, Seo et al. (2009) usaron el CFD para mejorar, durante la temporada de frío en Corea, las

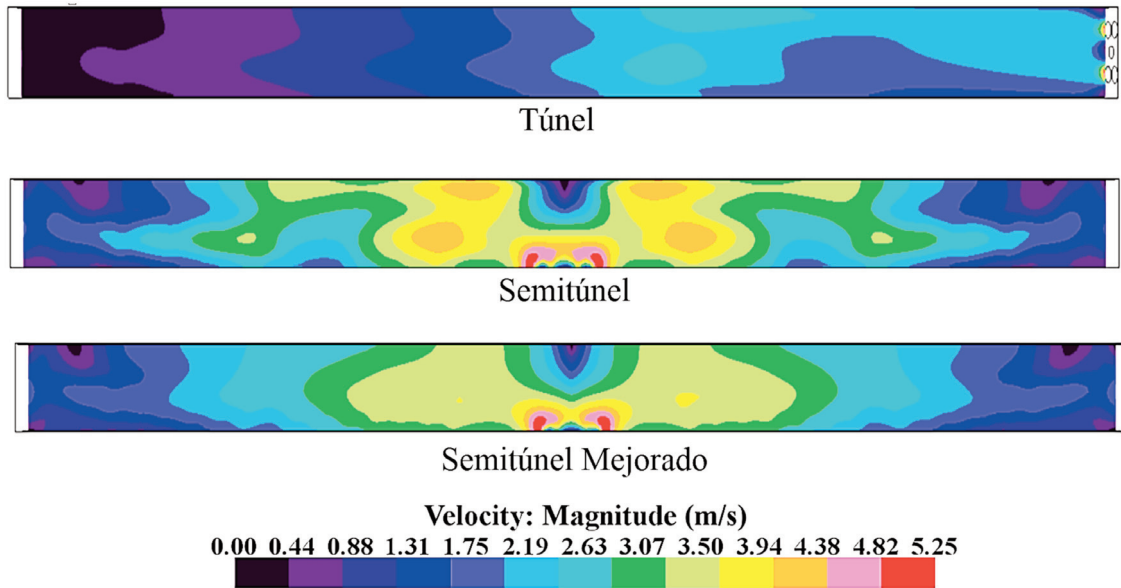


Figura 1. Distribución de velocidad de aire en tres configuraciones de nave: túnel, semitúnel y semitúnel mejorado de sección longitudinal, a 0,20 m de altura.

Fuente: Guerra-Galdo et al. (2015).

Figure 1. Air velocity distribution in three building configurations: Tunnel, Semitunnel and Improved Semitunnel of longitudinal section, at 0.2 m height.

Tabla 1. Promedio  $\pm$  desviación estándar de la velocidad, temperatura y área de confort según criterios de velocidad de aire y temperatura de tres configuraciones de ventanas y ventiladores

Table 1. Average  $\pm$  standard deviation of air velocity, temperature and comfort area in three configurations of windows and fans

Configuración	Velocidad (m/s)	Temperatura (°C)	Área confort (%)	
			Velocidad	Temperatura
Túnel	1,54 $\pm$ 0,74	23,55 $\pm$ 1,01	49,95	91,37
Semitúnel	0,83 $\pm$ 0,32	23,45 $\pm$ 0,82	80,05	93,03
Semitúnel mejorado	0,89 $\pm$ 0,30	23,37 $\pm$ 0,79	88,45	94,52

Fuente: Guerra-Galdo et al. (2015).

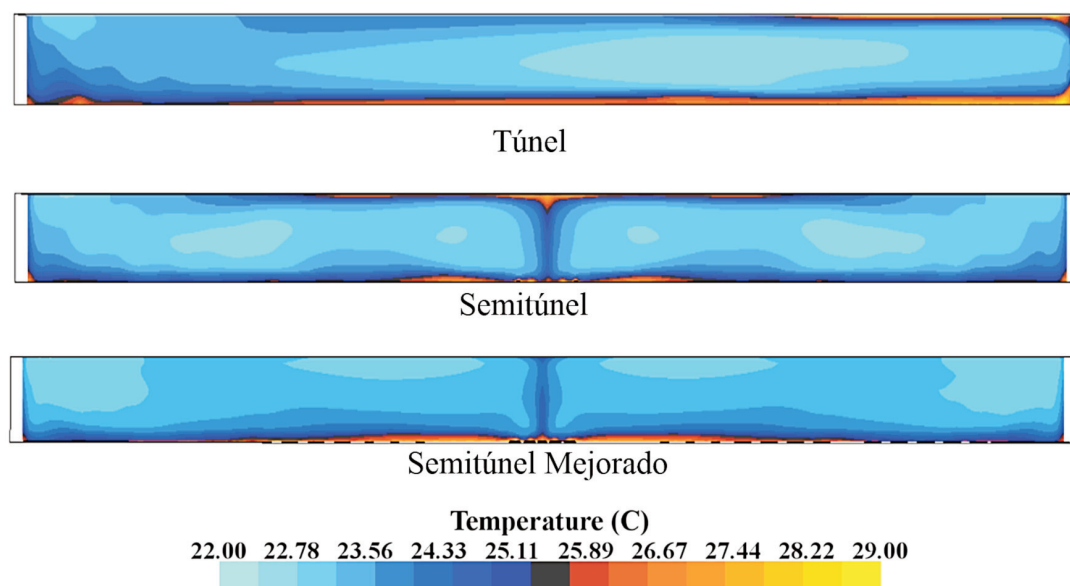


Figura 2. Distribución de temperatura en tres configuraciones de nave: túnel, semitúnel y semitúnel mejorado de sección longitudinal, a 0,20 m de altura.

Fuente: Guerra-Galdo et al. (2015).

Figure 2. Temperature distribution in three building configurations: Tunnel, Semitunnel and Improved Semitunnel of longitudinal section, at 0.2 m height.

condiciones de temperatura y ventilación de una nave con ventilación natural, utilizando en la cubierta cuatro tipos de aberturas. Osorio et al. (2013) evaluaron el ambiente térmico de una nave tipo túnel durante la primera fase de crecimiento de los pollos de engorde, mostrando que no existen diferencias significativas entre los datos experimentales de temperatura medida a la altura de los animales y el modelo en CFD, para las condiciones de día y noche en cada una de las tres semanas. De esta manera la tabla 2 presenta el resumen de simulaciones realizadas con CFD y la validación experimental de naves avícolas en los últimos años.

Así, esta herramienta ha permitido estudiar el comportamiento de la velocidad del aire (Blanes-Vidal et al., 2008; Song et al., 2010; Bustamante et al., 2013 y Guerra-Galdo et al.,

2015), la temperatura (Seo et al., 2009; Mostafa et al., 2012; Osorio et al., 2013 y Damasceno et al., 2014) o el transporte de gases y partículas (Bjerg et al., 2002; Seo et al., 2009; Mostafa et al., 2012). A pesar de ello, no se ha llegado a desarrollar un diseño estándar óptimo para las naves de pollos de engorde, dada la dificultad técnica y la gran variabilidad en las condiciones ambientales entre las diferentes regiones donde se han desarrollado los estudios, por lo que los modelos CFD no se usan aún en la práctica como herramienta práctica para el diseño de naves comerciales.

#### Validación de los modelos

La validación del CFD se realiza utilizando métodos de diseño, como las pruebas experimentales y simulaciones numéricas; las prue-

Tabla 2. Estudios de ventilación en naves avícolas con diferente sistema de ventilación analizadas con Dinámica de Fluidos Computacional CFD y experimentalmente  
*Table 2. Studies of ventilation in poultry houses with different ventilation system analyzed with Computational Fluid Dynamic CFD and experimentally*

Autores	Dimensiones L x a x h (m)	Dimensión	Código	Modelo turbulento	Tipo de ventilación
Blanes-Vidal et al., 2008	68,8 x 15.0 x 2,36 h <sub>1</sub> , 3,94 h <sub>2</sub>	3D	Gambit Fluent	Estándar k- ε	Transversal depresión
Seo et al., 2009	75 x 12 x 2.3 h <sub>1</sub> , 4.2 h <sub>2</sub>	3D	Gambit, Fluent	RNG k- ε	Ventilación natural
Song et al., 2010	50 x 12 x 4.8	3D	Fluent	LES	Túnel depresión
Osorio et al., 2011	126 x 12,8 x 3	2D	Ansys	Estándar k- ε	Túnel-presión negativa, positiva
Mostafa et al., 2012	42 x 9.0 x 2,2 h <sub>1</sub> , 3,7 h <sub>2</sub>	3D	Gambit	RNG k- ε	Túnel depresión
Zajicek y Kic, 2013	41 x 17,2 x 4	2D	Ansys	RNG k- ε	Túnel
Bustamante et al., 2013	110 x 12.6 x 2,6 h <sub>1</sub> , x 4 h <sub>2</sub>	3D	Gambit Fluent	Estándar k- ε	Transversal depresión
Osorio et al., 2013	110 x 14 x 2,5	3D	Ansys CEM	Estándar k- ε	Túnel depresión
Kwon et al., 2015	70 x 13,5 x 3,5 h <sub>1</sub> , 5,5 h <sub>2</sub>	3D	Ansys Fluent	RNG k- ε	Transversal depresión
Bustamante et al., 2015	120 x 12.2 x 2,2	3D	Gambit Fluent	RNG k- ε	Túnel depresión
Rojano et al., 2015	14 x 6 x 1,8 h <sub>1</sub> , 2,6 h <sub>2</sub>	2D	Ansys	Realizable k- ε	Ventilación natural
Osorio et al., 2015	110 x 14 x 2.45	3D	Ansys	Estándar k- ε	Túnel depresión

L: Largo; a: Ancho; h: Altura; h<sub>1</sub>: Altura de pared; h<sub>2</sub>: Altura en cumbre.

bas experimentales necesitan de simulaciones numéricas y viceversa. Las comparaciones de aplicaciones industriales manifiestan que se alcanzan porcentajes máximos hasta 16% entre las mediciones directas y los resultados modelados, siendo éste un valor bastante aceptado a la hora de diseñar y proponer pro-

cesos de optimización (Bjerg et al., 2013; Blanes-Vidal et al., 2008).

Para llevar a cabo estas validaciones a través de mediciones directas de los parámetros estudiados, existen diferentes equipos que permiten medir la velocidad, temperatura y humedad en las naves avícolas. En este sentido,

el sistema multisensor desarrollado por Bustamante *et al.* (2013) (equipado con tres tipos de sensores velocidad del aire, temperatura y diferencia de presión) y capaz de adquirir un máximo de 128 señales simultáneas en un intervalo de 5 segundos), obtuvo valores promedios de la velocidad del aire de  $0,60 \pm 0,56$  m/s por CFD y  $0,64 \pm 0,54$  m/s por medida directa, no encontrándose diferencias significativas entre ambos sistemas. Por otro lado, Bjerg *et al.* (2002) utilizaron un termistor multicanal con sensor para medir el flujo vertical y horizontal de la velocidad del aire y un sensor ultrasónico para medir la velocidad del aire a 0,3 m sobre el suelo, encontrando concordancia entre los patrones de flujo de aire medido y simulado. Lee *et al.* (2007), utilizaron la velocimetría de imágenes de partículas (PIV) para conocer la distribución de los patrones de flujo de aire dentro de la granja, encontrando a 3 m/s patrones de flujos de aire muy similares entre PIV y CFD. En el caso del estudio desarrollado por Mostafa *et al.* (2012), utilizaron datos de una estación meteorológica y 30 higrómetros calibrados, encontrando como error aceptable entre la temperatura medida y calculada con CFD de 0,19% y 0,46% a la altura del animal y a 2 m de altura, respectivamente.

Las evidencias recogidas en la literatura demuestran un adecuado grado de ajuste entre los resultados de modelizaciones y sus respectivas validaciones, particularmente en el campo de la distribución de flujos de aire. Así, el grado de desarrollo de las técnicas CFD es suficiente para la realización de análisis previos al diseño definitivo y construcción de las naves. Conviene profundizar, sin embargo, en la modelización de los flujos de calor (Bustamante *et al.*, 2015; Osorio *et al.*, 2013) y su aplicación práctica a condiciones de estrés.

## Conclusiones

El diseño y el manejo de los sistemas de ventilación son fundamentales en las granjas de aves de engorde debido a la susceptibilidad de estos animales frente a las condiciones ambientales adversas. No sólo la temperatura, sino la combinación de ésta con la humedad y la velocidad del aire deben tenerse en consideración al diseñar una nave avícola.

Las herramientas CFD se han demostrado como una alternativa para llevar a cabo evaluaciones de diseños constructivos en relación a las condiciones ambientales que se producen en el interior de las naves. A pesar de ello, la validación de estas simulaciones con mediciones reales resulta imprescindible a día de hoy.

Pese a que se han realizado muchos esfuerzos en el diseño y dimensionamiento de las instalaciones para la cría de pollos de engorde, sigue sin existir un modelo óptimo para todas las condiciones climáticas, por lo que debe profundizarse en el estudio de este modelo de explotación para cada uno de los sistemas productivos en condiciones ambientales diferenciadas.

## Agradecimientos

Este trabajo es financiado por el Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo del Perú-PRONABEC.

## Bibliografía

- Abreu VMN, de Abreu PG (2011). Os desafios da ambiência sobre os sistemas de aves no Brasil. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 40: 1-14.
- Bartzanas T, Boulard T, Kittas C (2004). Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosystems Engineering* 88(4): 479-490.



- Bjerg B, Svidt K, Zhang G, Morsing S, Johnsen J (2002). Modeling of air inlets in CFD prediction of airflow in ventilated animal houses. *Computers and Electronics in Agriculture* 34(1-3): 223-235.
- Bjerg B, Giovanni C, In-Bok L, Bartzanas T, Norton T, Is-Woon H, Il-Hwan S, Banhazi T, Liberati P, Marucci A, Zhang G (2013). Modelling of ammonia emissions from livestock buildings ventilated naturally. Part 2: CFD modelling. *Biosystems Engineering* 116: 259-275.
- Blanco OA, Gous RM, Savage MJ (2004a). A simulation model for estimating the effect of warm micro-environmental conditions on the heat balance of a broiler. XII World Poultry Congress, 8-12 junio, Estambul, Turquía, pp. 123-138.
- Blanco OA, Gous RM, Savage MJ (2004b). Modelling the physiological responses of a broiler exposed to micro-environmental conditions above thermoneutrality. 23rd Scientific Day, World Poultry Science Association Southern African Branch, 12 octubre, Pretoria, Sudáfrica, pp. 10-23.
- Blanes-Vidal V, Guijarro E, Balasch S, Torres AG (2008). Application of computational fluid dynamics to the prediction of airflow in a mechanically ventilated commercial poultry building. *Biosystems Engineering* 100(1): 105-116.
- Bligh J, Johnson KG (1973). Glossary of terms for thermal physiology. *Journal of Applied Physiology* 35(6): 941-961.
- Buffington DE, Colazzo-Arocho A, Canton GH (1981). Black globe-humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. *Transaction of the American Society of Agricultural Engineering ASAE* 24: 711-714.
- Bustamante E, García-Diego F-J, Calvet S, Estellés F, Beltrán P, Hospitaler A, Torres AG (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.
- Bustamante E, García-Diego F-J, Calvet S, Estellés F, Torres AG, Hospitaler A (2015). Measurement and numerical simulation of air velocity in a tunnel-ventilated broiler house. *Sustainability* 7(2): 2066-2085.
- Chepete J, Xin H, Puma CM, Gates RS (2004). Heat and Moisture Production of Poultry and their Housing Systems: Pullets and Layers. *Agricultural Biosystems Engineering* 10: 286-299.
- Cordeiro MB, de Fátima FTI, da Silva JN, Vigoderis RB, de Carvalho PF, Cecon PR (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.
- Collins KE, Kiepper, Ritz CW, McLendon BL, Wilson JL (2014). Growth, livability, feed consumption, and carcass composition of the Athens Canadian Random Bred 1955 meat-type chicken versus the 2012 high-yielding Cobb 500 broiler. *Poultry Science* 93: 1-10.
- Damasceno FA, Osorio SJA, Barreto ML, Martin S, Arêdes MM (2014). Evaluation of a heating system in poultry houses using a CFD model. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín* 67(2): 7355-7363.
- Dozier WA, Purswell JL, Branton SL (2006). Growth responses of male broilers subjected to high air velocity for either twelve or twenty-four hours from thirty-seven to fifty-one days of age. *Agriculture Poultry Research* 15: 362-366.
- Estrada MM, Márquez MGS (2005). Interacción de los factores ambientales con la respuesta del comportamiento productivo en pollos de engorde. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 18(6): 246-257.
- Estrada-Pareja M, Márquez-Girón SM, Restrepo BL (2007). Efecto de la temperatura y la humedad relativa en los parámetros productivos y la transferencia de calor. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 20: 288-303.
- Furlan RL (2006). Influência da temperatura na produção de frangos de corte. VII Simpósio Brasil Sul de Avicultura, 04 a 06 de abril de 2006, Chapecó, SC- Brasil, pp. 104-135.
- Genç L, Portier KM (2005). Sensible and latent heat productions from broilers in laboratory conditions. *Turkish Journal Veterinary Animal Sciences*, 29: 635-643.

- Guerra-Galdo EH, Calvet SS, Estellés BF, López-Jiménez PA (2015). CFD model for ventilation assessment in poultry houses with different distribution of Windows. *International Journal of Energy and Environment*. 6(5): 411-424.
- Harral B, Boon C (1997). Comparison of predicted and measured air flow patterns in a mechanically ventilated livestock building without animals. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 66(3): 221-228.
- Humbert U, Wessels GJC, Smit JE, Ubbink O (2014). Improving broiler lifestyle: a CFD approach. 9th South African conference on computational and applied mechanics somerset west. 14-16 enero de 2014. Sudáfrica, pp. 1-7.
- Ipek A, Sahan U (2006). Effects of cold stress on broiler performance and ascites susceptibility. *Journal Animal Science*, 19(5): 734-738.
- Kwon K-S, Lee IB, Zhang GQ, Ha T (2015) Computational fluid dynamics analysis of the thermal distribution of animal occupied zones using the jet-drop-distance concept in a mechanically ventilated broiler house. *Biosystems Engineering*. 136: 51-68.
- Lee IB, Sase S, Sung SH (2007). Evaluation of CFD accuracy for the ventilation study of a naturally ventilated broiler house. *Japan Agricultural research quarterly JARQ* 41(1): 53-64.
- Li C, Wang X, Li N, Wu C (2011). Expression analysis of global gene response to chronic heat exposure in broiler chickens (*Gallus gallus*) reveals new reactive genes. *Poultry Science* 90: 1028-1036.
- Lin H, Zhang HF, Du R, Gu XH, Zhang ZY, Buyse J, Decuyper E (2005). Thermoregulation responses of broiler chickens to humidity at different ambient temperatures. II. Four Weeks of Age. *Poultry Science* 84: 1173-1178.
- Lott BD, Simmons JD, May JD (1998). Air velocity and high temperature effects on broiler performance. *Poultry science* 77(3): 391-393.
- Mazanowski A (2011). Modern broiler chicken production. Ed. Pro Agricola, Gerzward, 246.
- Medeiros CM, da Costa BF, de Oliveira RFM, Tinôco Ide FF, Albino LFT, Cecon PR (2005a). Efeitos da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar em frangos de corte. *Engenharia na Agricultura* 13(4): 277-286.
- Medeiros CM, da Costa BF, de Oliveira RFM, Tinôco Ide FF, Albino LFT, Cecon PR (2005b). Índice térmico ambiental de produtividade para frangos de corte. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 9(4): 660-665.
- Mickelberry WC, Rogler JC, Stadelman WJ (1966). The influence of dietary fat and environmental temperature upon chick growth and carcass composition. *Poultry Science* 45: 313-321.
- Moraes VMB, Malheiros RD, Furlan RL, Bruno LDG, Malheiros EB, Macari M (2002). Efeito da temperatura ambiente durante un primeira semana de vida de frangos sobre o peso vivo, desenvolvimento de vísceras e crescimento osseo. *Revista Brasileira de Ciências Avícolas*, 4 (1): 1-8.
- Mostafa E, Lee IB, Song SH, Kwon KS, Seo IH, Hong SW, Hwang HS, Bitog JP, Han HT (2012). Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation system. *Biosystems Engineering* 112(4): 293-303.
- Mount LE (1968). The climatic physiology of the pig. Edward Arnold, London.
- Olanrewaju HA, Purswell JL, Collier SD, Branton SL (2010). Effect of ambient temperature and light intensity on physiological reactions of heavy broiler chickens. *Poultry Science* 89: 2668-2677.
- Oliveira RF, Lopes DJ, Teixeira de AM, Ferreira RA, Marçal VVR, Segatto CP (2006). Efeitos da temperatura e da umidade relativa sobre o desempenho e o rendimento de cortes nobres de frangos de corte de 1 a 49 dias de idade. *Revista Brasileira Zootecnia*. 35(3): 797-803.
- Olsen JWW (2012). Improving commercial broiler attic inlet ventilation through data acquisition coupled with cfd analysis. Master's thesis, Mississippi State University. EE.UU.
- Osorio SJA, Ferreira TI, Oliveira R, Aredes M, De Paula MO (2011). Modeling and experiential validation to estimate the energy balance for a poultry house with misting cooling. *Dyna*, 170: 167-174.

- Osorio HR, Ferreira TIF, Osorio SJ, Oliveira RKS, Guerra GLM (2013) Modeling of the thermal environments in shed negative pressure tunnel type of chicks. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 66 (2): 7085-7093.
- Osorio HR, Guerra GLM, Barreto ML, Barbari M (2015) CFD modeling of the thermal environment in a negative pressure tunnel ventilated broiler barn during the first week of life. *Conferencia 19 septiembre, Brazil*, pp. 1-8.
- Oviedo-Rondón EO (2014). Efecto de la temperatura y de la velocidad del aire en naves de pollos. *PV ALBEITAR* 29: 109-1111.
- Purswell JL, Dozier III WA, Jeremiah DD, Olanrewaju HA, Xin H, Gates RS (2012). Effect of temperature-humidity index on live performance in broiler chickens grown from 49 to 63 days of age. *AKNOWETH Conference Presentation*, 8-12 julio 2012, Valencia, España, pp. 1-9.
- Reece FN, Lott BD (1982). The effect of environmental temperature on sensible and latent heat production of broiler chickens. *Poultry Science*, 61: 1590-1593.
- Rojano F, Bournet P-E, Hassouna M, Murat KR, Choi CY (2015) Modelling heat and mass transfer of a broiler house using computational fluid dynamics. *Biosystems engineering*, 136: 25-38.
- Seo IH, Lee IB, Moon OK, Kim HT, Hwang HS, Hong SW, Bitog J, Yoo JI, Kwon KS, Kim YH, Han JW (2009). Improvement of the ventilation system of a naturally ventilated broiler house in the cold season using computational simulations. *Biosystems Engineering* 104(1): 106-117.
- Simmons JD, Lott BD, May JD (1997). Heat loss from broiler chickens subjected to various air speeds and ambient temperatures. *Applied Engineering Agriculture*, 13: 665-669.
- Song S-H, Lee I-B, Hwang H-S, Hong S-W, Seo I-H, Bitog JP, Kwon K-S, Choi J-S (2010). CFD analysis and comparison of forced-ventilation systems of poultry houses in Korea XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR), 13-17 junio de 2010, Québec, Canada, pp. 1-9.
- Tao X, Xin H (2003). Temperature-humidity-velocity index for market-size broilers. *American Society of Agricultural Engineering ASAE*, 27-30 de julio de 2003, Las Vegas, Nevada, EE.UU., pp. 1-12.
- Teeter R, Smith M (1986). High chronic ambient temperature stress effects on broiler acid-base balance and their response to supplemental ammonium chloride potassium chloride and potassium carbonate. *Poultry Science* 65(99): 1777-1781.
- Teixeira da Silva E (2007). Índice de temperatura e umidade (itu) na Produção de aves para mesoregião do Noroeste e norte pioneiro paranaense. *Revista Acadêmica Curitiba* 5(4): 385-390.
- Temin S, Chagneau AM, Guillaumin S, Michel J, Peresson R, Tesseraud S (2000). Does excess dietary protein improve growth performance and carcass characteristics in heat-exposed chickens? *Poultry Science* 79(3): 312-317.
- Thom EC (1959). The discomfort index. *Weatherwise* 12(1):57-60.
- Yahav S, Straschnow A, Luger D, Shinder D, Tanny J, Cohen S (2004). Institute ventilation, sensible heat loss, broiler energy, and water balance under harsh environmental conditions. *Poultry Science* 83: 253-258.
- Yahav S, Straschnow A, Vax E, Razpakovski V, Shinder D (2001). Air velocity alters broiler performance under harsh environmental conditions. *Poultry science* 80(6): 724-726.
- Yahav S, Hurwitz S (1996). Induction of thermotolerance in male broiler chickens by temperature conditioning at an early age. *Poultry Science* 75: 402-406.
- Yanagi JT, Soares LW, Rabelo G (2014). Predicting rectal temperature of broiler chickens with artificial neural network. *Journal of Engineering & Technology* 14(5): 29-34.
- Zajicek M, Kic P (2013). Improvement of the broiler house ventilation using the CFD simulation. *Engineering for rural development*, 23-24 mayo, Jelgava, pp. 198-202.

(Aceptado para publicación el 19 de abril de 2016)