

# UNA REVISIÓN ACERCA DE LA DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES (CFD) EN INSTALACIONES AVÍCOLAS

## A REVIEW ABOUT THE USE OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) IN BROILER HOUSE

JAIRO ALEXANDER OSORIO SARAZ

*Profesor Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín aosorio@unal.edu.co*

MARCIO AREDES MARTINS

*Profesor Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Federal de Viçosa, Brazil, iftinoco@ufv.br*

OLGA LUCIA ZAPATA MARÍN

*M.Sc, Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Federal de Viçosa, Brazil, olluzama@gmail.com*

FLAVIO ALVES DAMASCENO

*M.Sc, Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Federal de Viçosa, Brazil, flavio.damasceno@ufv.br*

HECTOR JOSÉ CIRO VELASQUEZ

*Profesor Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín hjciro@unal.edu.co*

Recibido para revisar Agosto 26 de 2010, aceptado Abril 13 de 2012, versión final Junio 1 de 2012

**RESUMEN:** La agroindustria avícola moderna está siendo sometida a rigurosos requisitos internacionales para garantizar el bienestar de los animales y de las personas, al mismo tiempo está buscando una constante mejoría en la producción y competitividad. Para ello, las instalaciones de producción de pollos de engorde deben ser diseñadas de tal manera que ofrezcan las mejores condiciones de confort térmico animal tanto en invierno como en verano. En este sentido, el modelaje computacional se ha constituido en una herramienta interesante en la definición y entendimiento de proyectos de sistemas de acondicionamiento de ambientes compatibles con la avicultura industrial de países como el Brasil. El objetivo de este estudio es dar a conocer el estado del arte de la aplicabilidad de CFD en el acondicionamiento térmico de las instalaciones para pollos de engorde y sus limitaciones actuales. Se parte del supuesto de que a partir de los modelos con CFD se pueden generar conocimientos de las distribuciones de velocidad, temperatura del aire, gases y material particulado, cuando las instalaciones presentan ventilación natural, ventilación mecánica y sistemas de enfriamiento adiabáticos evaporativos.

**PALABRAS CLAVE:** Modelos computacionales, ambiente animal, sistemas de ventilación, producción avícola.

**ABSTRACT:** The modern poultry industry has been undergone to strict international requirements to ensure the welfare of animals and people, while seeking continuous improvement of its production and maintenance of their competitiveness. For this, the broilers facilities should be designed in such a way that affords the best conditions of thermal comfort in both winter and summer. Thus, mathematical modeling has been an interesting tool in the definition and understanding of projects of thermal analysis for environment compatible with industrial aviculture in Brazil, making the application of Computational Fluid Dynamics (CFD) to be highly recommended. The aim of this work was to elaborate the state of art of the applicability of CFD in environment of broilers facilities and their current limitations. It starts from the assumption that from CFD models it is possible to acquire knowledge of the distributions of velocity, air temperature, gases and particulate matter, when facilities are subjected to natural ventilation, mechanical ventilation and adiabatic evaporative cooling systems.

**KEYWORDS:** Computational models, animal environment, ventilation systems, poultry production

### 1. INTRODUCCIÓN

En países de climas tropicales y subtropicales como Brasil es normal encontrar elevadas temperaturas del aire durante casi todo el año, especialmente durante el verano, haciendo que la cría de pollos de engorde

producidos en instalaciones con ventilación natural, sean poco variables en la obtención de producción en escala industrial. Además, de exponer las aves a condiciones de grande desconfort térmico, los altos valores de temperatura asociados también a elevados valores de humedad relativa incrementan los niveles

de gases, tales como el amoníaco. Para minimizar estos impactos y evitar pérdidas en la producción producto del desconfort térmico y las condiciones de calidad del aire, las instalaciones avícolas deben contar con sistemas de ventilación artificial por presión positiva o negativa (sistemas mecánicos), muchas veces asociadas a sistemas de enfriamiento evaporativo generados por nebulizaciones internas o por sistemas de paneles evaporativos “*Pad Cooling*”.

Este tipo de adaptaciones tecnológicas generan en el interior de las instalaciones diferentes gradientes de temperatura, variación en las tasas de ventilación y diferentes concentraciones de gases. Por lo tanto, se hace necesario realizar monitoreos continuos con la finalidad de ofrecer las mejores condiciones para el bienestar de los animales y de los trabajadores, en términos de temperatura, velocidad del aire y concentración de gases [1-2].

A pesar de la complejidad del monitoreo continuo de una instalación avícola, este por sí solo no permite la toma de decisiones futuras ni el perfeccionamiento de las instalaciones, en función de variables de respuestas tales como la temperatura, concentración de amoníaco y velocidad del aire en la altura de las aves.

Los modelos de transporte de calor, masa y cantidad de movimiento, basados en la Dinámica de los Fluidos Computacionales (CFD), han sido ampliamente utilizados en estudios para evaluar el comportamiento de variables climáticas en el interior de estructuras vegetales y animales [3,7] Sin embargo, la mayoría de los estudios han sido realizados en instalaciones para bovinos y suinos, dado que existen pocos estudios en instalaciones para aves.

Los modelos basados en CFD permiten reducir el número de experimentos y perfeccionar las instalaciones a partir de la validación de los datos experimentales, tornándose, cada vez más importante en la industria agropecuaria. Esta importancia ha crecido significativamente, una vez se tiene vencido los principales problemas de esta herramienta tales como son los errores generados por la falta de precisión en las simulaciones y déficit de equipos con grandes dominios computacionales, lo que ha permitido una mayor aplicabilidad de esta técnica en los últimos años.

Así, el objetivo de este trabajo es conocer el estado de arte de la aplicación del CFD en las instalaciones avícolas, para la evaluación de variables como la distribución de temperatura, velocidad del aire y concentraciones de gases en función de los sistemas de ventilación natural y mecánica y de los sistemas de enfriamiento adiabático evaporativo.

## 2. EL CFD Y LAS ECUACIONES GOBERNANTES

La Dinámica de Fluidos Computacionales o CFD hace análisis de sistemas que involucran flujos de fluidos, transferencia de masa y calor y fenómenos asociados, tales como reacciones químicas, que serían difíciles modelar numéricamente sin ayuda computacional.

El modelo que describe el flujo del fluido, es presentado por medio de las ecuaciones de masa, momento y energía, simplificadas a seguir [8]:

$$\nabla \cdot (\rho U) = S_m \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho U U) = \nabla p + [\mu_t (\nabla U + \nabla U^T)] \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (-k \nabla T + \rho C_p T U) = Q \quad (3)$$

Así, las ecuaciones diferenciales que corresponden al fenómeno de transporte pueden ser descritas por la siguiente ecuación [9-10]:

$$\frac{\partial(U\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(V\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(W\phi)}{\partial z} = \Gamma \nabla^2 \phi + S\phi \quad (4)$$

El flujo turbulento puede ser modelado por medio del uso de diferentes modelos, que buscan encontrar los mejores resultados y que han sido usados en varios trabajos conducidos con ventilación natural y mecánica. Entre los modelos disponibles, “*Reynolds averaged Navier–Stokes equation*” (RANS) y “*large-eddy simulation*” (LES) son los más comunes. A pesar de la confiabilidad, los modelos LES exigen mucho tiempo para resolución y por lo tanto, ellos son raramente usados, a no ser que se requiera de una grande precisión. Por otro lado, los modelos RANS requieren menos tiempo de computación, pero algunas situaciones presentan problemas de falta de precisión [11]. Así, los modelos RANS tales como el “*Standard k-ε*”, “*two-equation k-ε*”, “*Realizable k-ε*”, “*Renormalization-*

*group (RNG)  $k-\epsilon$* ” y “*Reynolds stress model (RMS)*” son los más utilizados para simulación de procesos de flujo turbulento.

Para sistemas con ventilación natural y mecánica, algunos estudios recomiendan el uso del modelo “*Standard  $k-\epsilon$* ” para describir la parte turbulenta del fluido debido a su convergencia favorable y precisión razonable [12]. Aunque algunos trabajos recientes hayan encontrado mejores resultados usando el modelo “*Renormalization-group (RNG)  $k-\epsilon$* ”, para modelar el movimiento el aire en el interior y exterior de las instalaciones [9, 13-16] estos destacan que aunque el “*RNG  $k-\epsilon$* ” es similar en su forma al modelo “*Standard  $k-\epsilon$* ”, el modelo “*RGN  $k-\epsilon$* ” incluye términos adicionales para el desarrollo de las tasas de disipación que mejoran significativamente su precisión.

Para instalaciones con sistemas de enfriamiento evaporativo como nebulizadores internos y paneles de enfriamiento “*Pad Cooling*”, el modelo “*Realizable  $k-\epsilon$* ” es el más recomendado para describir la turbulencia, una vez que este ofrece mejores previsiones de la distribución de la velocidad [10-17]. Igualmente, en los sistemas que presentan nebulizaciones internas y las dispersiones del fluido son turbulentas, el modelo Realizable  $k-\epsilon$ , es mejor para predecir la expansión circular [18], aunque algunos trabajos aun continúan usando el modelo Standard  $k-\epsilon$ , como es el caso del estudio realizado por [19].

Cuando el objetivo del trabajo es determinar la distribución de gases en las instalaciones, el modelo Renormalization-group (RNG)  $k-\epsilon$  ha sido el más utilizado en condiciones de ventilación mínima (invierno), ya que este ofrece una fórmula analítica para la derivada diferencial de la viscosidad efectiva, que se utiliza para bajos números de Reynolds. Sin embargo, para condiciones de altas tasas de ventilación (verano), el modelo Standard  $k-\epsilon$  resenta el mejor comportamiento [4, 5, 20].

Otro aspecto a ser tenido en cuenta en los modelos de CFD en instalaciones pecuarias es la fuerza de empuje, principalmente cuando se trabaja con sistemas de ventilación natural, o natural combinada con forzada, donde la aproximación de Boussinesq ha sido utilizado intensamente en aplicaciones de instalaciones pecuarias; tratando en esta expresión al aire como

un gas ideal y acoplando los campos de velocidad y temperatura [21].

A pesar de la importancia de las fuerzas de empuje, la mayoría de los trabajos usan los modelos inicialmente sin considerar este aspecto, y cuando los resultados numéricos no presentan buen ajuste con la validación experimental se pasa a introducir esta condición.

### 3. VENTILACIÓN

Las primeras técnicas para intentar disminuir la temperatura interna en las instalaciones avícolas, cuando la ventilación natural no es suficiente, es el uso de sistemas mecánicos como ventiladores (presión positiva) o exhaustores (presión negativa), y con la combinación entre ventilación mecánica y sistemas de enfriamiento evaporativos. Uno de los aspectos más importantes en cuanto al flujo del aire interior de las estructuras, es asegurar una uniforme distribución y no exceder los límites máximos de velocidad, para mantener el confort térmico de las aves y no afectar su condición homeotérmica.

#### 3.1. Ventilación natural

Los trabajos realizados con ventilación natural en CFD han sido poco comparados con sistemas de ventilación mecánica o forzada. Par galpones, debido a que las condiciones de contorno como dirección y velocidad del viento no son uniformes en un mismo instante de tiempo, el trabajo con sistema de ventilación natural hace que las este tipo de construcciones sean más difíciles de evaluar que las instalaciones con ventilación mecánica, especialmente en galpones tipo túnel. Así, la mayoría de los trabajos que estudian los fenómenos de la ventilación natural utilizan los modelos de las instalaciones a escala, con la finalidad de no requerir grandes dominios computacionales y facilitar la convergencia de los mismos.

Hasta el año 2007, fueron publicados tres estudios en CFD, para analizar el ambiente interno en sistemas de cría de aves [21]. A partir de esta fecha, pocos estudios adicionales han sido desarrollados.

Existen un amplio estudio de investigaciones donde se tiene aplicabilidad sobre el comportamiento de la ventilación natural y su efecto en el confort de

las personas [11,15, 23,29], estudios que pueden ser referencia para la aplicación de CFD en instalaciones avícolas con ventilación natural.

A partir de estos estudios, se puede observar los resultados en función de la distribución de la velocidad del aire y la temperatura y las influencias en el confort térmico. Adicionalmente, se tiene la posibilidad de realizar análisis más complejos usando los diferentes modelos de turbulencia que permiten describir con mayor exactitud la validación experimental.

Con el objetivo de optimizar estructuras de producción animal, buscando encontrar una óptima tasa de ventilación y temperaturas internas adecuadas para mejorar el confort térmico animal, se destacan algunos trabajos como los referenciados por [30-32], los cuales determinaron experimentalmente la distribución de la velocidad del aire y el comportamiento del flujo en el interior de la estructura usando experimentalmente el método de trazado de gases “*tracer gas decay method*”. El modelo de turbulencia RNG k- $\epsilon$ , además de tener en cuenta el flujo de calor generado por las aves y apoyados en los resultados experimentales del método de trazado de gases, fueron la base para el desarrollado un modelo en CFD que permitió perfeccionar la estructura y obtuvieron buenas precisiones en los resultados.

El trabajo realizado por [6], aplicado a las instalaciones de ganado sobre ventilación natural, muestra el efecto que genera la velocidad y dirección de la entrada del viento en el confort térmico animal, evaluado a través de índices de confort térmico. Este tipo de estudio puede también ser adaptado para instalaciones avícolas debido que el principio de generación del modelo en CFD es el mismo.

### 3.2. Ventilación forzada o mecánica

La tendencia de la mayoría de las instalaciones avícolas comerciales es de contar con sistemas de ventilación mecánica, donde se utilizan sistemas de presión negativa o positiva en galpones modo túnel o en galpones abiertos con sistema de ventilación lateral por presión positiva. Estos sistemas mecánicos, mejoran las condiciones de confort térmico animal, ya que remueven con mayor eficiencia el exceso de calor generado en las instalaciones, disminuyendo así la temperatura interna de la estructura.

La selección de la tasa de ventilación ( $\dot{V}$ ) necesaria en una instalación está relacionada directamente a las diferencias entre las temperaturas externas e internas, con el calor sensible generado por los animales, calor sensible ganado por el sol a través de la radiación, resistencia térmica al flujo de calor a través de las paredes y el piso, en función del coeficiente global de transferencia de calor al perímetro de la estructura y al área de la misma, al calor sensible generado por las luces y equipos internos entre otros, y de acuerdo con [33] puede ser determinada a través de la siguiente ecuación:

$$\dot{V} = \frac{q_s + q_m + q_{so} - (\sum UA + FP)(t_i - t_o)}{1006\rho(t_i - t_o)} \quad (5)$$

Este cálculo a partir de la expresión anterior es importante inicialmente para determinar la tasa de ventilación, y es apropiada especialmente para condiciones cerradas en galpones modo túnel. Igual en el caso de instalaciones abiertas, donde se tiene una influencia de la ventilación natural, además de la mecánica de este tipo de cálculos puede ser inadecuado, requiriendo otros balances de energía más elaborados. Igualmente, para determinar la distribución de las velocidades del aire y de la temperatura en el interior de las instalaciones, es necesario realizar una serie de medidas experimentales en varios puntos de la instalación.

Varios estudios se han llevado a cabo en instalaciones avícolas analizando la propagación de enfermedades, y compararon dos esquemas de ventilación localizadas en direcciones opuestas [34]. Los resultados del modelo en CFD presentaron que la calidad del aire y las características de ventilación, fueron mejores cuando el flujo del aire fue de la parte más baja hasta la parte más alta, que es una configuración más común en instalaciones avícolas.

En una instalación para pollos de engorde con ventilación de presión positiva en las laterales (modo túnel), en el estudio desarrollado por [12] fue utilizado un modelo en CFD para simular el flujo al interior de la estructura, buscando encontrar las mejores condiciones de contorno del modelo experimental para validar el modelo en CFD. Los autores trabajaron en la zona media del galpón, donde localizaron 27 puntos distribuidos a tres alturas diferentes, realizando las mediciones experimentales. El modelo de turbulencia

usado fue el Standard k- $\epsilon$ , y se uso una malla tetraédrica en toda la superficie del elemento. Los resultados encontrados mostraron una alta correlación con los datos experimentales, permitiendo ser utilizados para la optimización de la estructura.

Algunos trabajos desarrollados, buscando perfeccionar instalaciones con ventilación mecánica, sobre diferentes configuraciones en las entradas y salidas de aire, han sido realizados en instalaciones para bovinos y suinos [3, 34-35], siendo que las metodologías de estos estudios pueden ser aplicadas en instalaciones avícolas. En estos experimentos, fueron utilizadas principalmente mallas hexaédricas y cuadráticas en todo el dominio computacional [3-9]. Otros investigadores subdividieron el campo en varias partes, usando mallas tetraédricas en las entradas y salidas de aire, y hexaédricas en las paredes y puntos donde no existió la necesidad de mayores detalles o precisión [3-9].

Los modelos de turbulencia mas recomendados en estos estudios fueron Standard k- $\epsilon$  e o RNG k- $\epsilon$ , y aunque los modelos con el Standard k- $\epsilon$  convergen más rápido y requiere de un menor dominio computacional, su precisión es baja en comparación al modelo RNG k- $\epsilon$ .

#### 4. GASES, OLORES Y MATERIAL PARTICULADO

Los gases y el material particulado tienen una incidencia directa en la producción animal y sobre el bienestar de las aves, en las personas que elaboran en la estructura y el vecindario. Entre los gases más comunes se encuentra el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) generado a través de la respiración y gases provenientes de la digestión y de los desechos, tales como el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), gas sulfúrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), gases da combustión incompleta proveniente del sistema de calefacción, tales como el monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) y el óxido nitroso ( $\text{NO}_2$ ), además del material particulado. Entre esos gases, el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) ha llamado especial atención en la agroindustria de países de Europa, Estados Unidos y América del Sur, debido al efecto en los animales y trabajadores cuando este se encuentra con valores por encima de los permitidos por la normatividad (25 ppm, por 8 horas por la NIOSH, 2001) [2,36-38].

A pesar de la importancia de determinar la distribución y concentración de contaminantes en las instalaciones avícolas, pocos estudios han sido desarrollados. Un modelo presentado por [39] fue desarrollado para analizar la distribución de contaminantes en un flujo altamente turbulento sobre diferentes configuraciones de techo, donde se obtuvo la mejor configuración en términos de mejorar la circulación del aire, eliminar el material particulado y tener menores concentraciones de contaminantes. Además, los estudios adelantados por [34] muestran la distribución de partículas de virus que generan enfermedades en las instalaciones avícolas, considerando una analogía entre la difusión del gas amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y la dispersión de las partículas del virus.

Un trabajo más reciente fue realizado por [37], donde propuso un modelo en CFD para determinar la distribución de concentraciones de  $\text{NH}_3$ , en galpones avícolas que trabajan con ventilación natural principalmente durante periodo diurno, encontrando una correlación significativa entre los datos experimentales con el modelo en CFD desarrollado.

Otros trabajos donde se utilizados modelos en CFD aplicados a instalaciones de suínos, tales como los estudios realizados por [4-17], utilizan modelos en dos y tres dimensiones, para determinar la distribución de concentración de amoníaco en condiciones de verano e invierno en un instalación comercial “High-Rise™ Hog Building (HRHB)”. Estos modelos son considerados de suma importancia, ya que estas metodologías pueden ser aplicadas para instalaciones avícolas.

De manera similar a lo ocurrido en el caso de los estudios, sobre modelos para la determinación de la distribución de la concentración del amoníaco, no se encontraron otros trabajos de modelos en CFD para determinar la distribución de olores y material particulado aplicado a instalaciones avícolas. Sin embargo, existen estudios en instalaciones de bovinos, realizadas con modelos en CFD para determinar la difusión de olores [40], y para analizar la distribución del material particulado [41-42], cuyas metodologías también pueden ser aplicadas en instalaciones avícolas.

#### CONCLUSIONES

Aunque existan pocos trabajos realizados en Dinámica

de los Fluidos Computacionales CFD aplicados al entendimiento del ambiente interno de instalaciones avícolas, los existentes demuestran las ventajas que tiene esta técnica para profundizar en los estudios de los fenómenos de transferencia de calor y masa, como también para perfeccionar, mejorar y optimizar los diseños de estructuras buscando obtener el mejor confort térmico animal, desde sus dimensiones, hasta encontrar las mejores combinaciones en el uso de la ventilación natural, ventilación mecánica, y sistemas de enfriamiento evaporativo.

Casi todos los modelos e turbulencia en los trabajos presentados, vienen utilizando el modelo Standard  $k-\epsilon$  o el Renormalization-group (RNG)  $k-\epsilon$ . Su selección depende del grado de precisión que desea y de la capacidad de dominio computacional que se dispone.

La selección de la malla es otro aspecto importante, ya que a partir de esta, se tiene una fuerte dependencia en la necesidad de un grande dominio computacional, y de la facilidad de convergencia del modelo. La mayoría de los trabajos utilizan un mismo tipo de malla en todo el dominio, y generalmente son hexaédricas o tetraédricas, cuando se trabajan con escalas reducidas; entretanto, cuando se presentan modelos con escalas reales, es preferible el uso de mallas cuadráticas.

**AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen a La Universidad Nacional de Colombia, a La Universidad Federal de Viçosa – Brasil, a Colciencias Colombia, y a los fondos de investigación FAPEMIG y CNPq del Brasil.

<b>Nomenclaturas</b>	
C	Calor específico, $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$k_p$	Conductividad térmica, $W\ m^{-1}\ K^{-1}$
P	Presión, $N\ m^{-2}$
T	Temperatura, K
Q	Término fuente en la ecuación de energía
U, V, W	Vector velocidad ( $ms^{-1}$ )
$S_m$	Término de fuente de masa
$S_e$	Término de fuente de energía
$\Phi$	Representa el proceso de interés (masa, energía, cantidad de movimiento)
$\Gamma$	Coefficiente de difusión, $m^2\ s^{-1}$
$\nabla^2$	Operador Laplaciano
$\dot{V}$	Tasa de ventilación, $m^3\ s^{-1}$
$t_o$	Temperatura externa, °C
$t_i$	Temperatura interna, °C
$q_s$	Calor sensible generado por los animales, W
$q_{so}$	Calor sensible debido a la radiación solar, W
U	Coefficiente global de transferencia de calor, $W\ m^{-2}\ K^{-1}$
FP	Pérdida de calor perimetral través del piso de la estructura, $W\ k^{-1}$
A	Área de la instalación, $m^2$
$q_{in}$	Calor sensible generado por las luces y equipos internos, W
<b>Simbolos Griegos</b>	
$\rho$	Densidad, $kg\ m^{-3}$
$\mu$	Viscosidad dinámica del fluido, $kg\ m^{-1}s^{-1}$
k	Energía cinética turbulenta, $m^2\ s^{-2}$
$\epsilon$	Disipación de energía cinética turbulenta, $m^2\ s^{-3}$
$\eta$	Razón entre el flujo medio y escala temporal
<b>Subíndices</b>	
t	Turbulencia
<b>Superíndices</b>	
T	Transposición del tensor

**REFERENCIAS**

[1]. Xin, H., Berry, I.L., Tabler, G. T. and Costello, T.A. Heat and moisture production of poultry and their housing systems: broilers, Transactions of the ASAE, 44, pp.1851–1857, 2001.

[2]. Osorio J., Tinoco, Ilda. and Ciro, H., Ammonia: a review about concentration and emission models in livestock structures, Dyna, 78, pp. 89-99, 2009.

[3]. Bjerg, B., Svidt, K., Zhang, G., Morsing, S. and Johnsen, J.O., Modeling of air inlets in CFD prediction of airflow in ventilated animal houses, Computers and Electronics in Agriculture,34, pp. 223-235,2002.

[4]. Sun, S.H., Keener, R., Stowell, R. and Michel, F.C., Two-dimensional computational fluid dynamics (CFD) modeling of air and ammonia distribution in a High-RiseTM Hog Building (HRHB), Transaction of the ASAE, 45, pp. 1559-1568, 2002.

- [5]. Sun, S.H., Keener, H., Wei Deng, R. and Michel, F.C., Development and validation of 3-d CFD models to simulate airflow and ammonia distribution in a high-rise™ hog building during summer and winter conditions. *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*, Manuscript BC 04 004, Vol. VI. December, 2004.
- [6]. Norton, T., Grant, J., Fallon, R. and Sun, D-W., Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics, *Biosystems Engineering*, 103, pp. 78-99, 2009.
- [7]. Reynolds, S. D., Using Computational Fluid Dynamics (CFD) in Laboratory Animal Facilities. In: R. H. Jack e D. M. L. Noel (Ed.). *Planning and Designing Research Animal Facilities*. London: Academic Press, 2009. Using Computational Fluid Dynamics (CFD) in Laboratory Animal Facilities, pp. 479-488, 2009.
- [8]. Ahmadi Motlagh, H. A. and Hashemabadi, S. H., 3D CFD simulation and experimental validation of particle-to-fluid heat transfer in a randomly packed bed of cylindrical particles, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35, pp. 1183-1189, 2008.
- [9]. Bartzanas, T., Kittas, C., Sapounas, A. A. and Nikita-Martzopoulou, E C., Analysis of airflow through experimental rural buildings: Sensitivity to turbulence models, *Biosystems Engineering*, 97, pp. 229-239, 2007.
- [10]. Kim, K. W. and Yoon, N. K., Numerical simulation of ventilation efficiencies of naturally ventilated multi-span greenhouses in Korea, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 51, pp. 1417-1432, 2008.
- [11]. Evola, G. and Popov, E V., Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings, *Energy and Buildings*, 38, pp. 491-501, 2006.
- [12]. Blanes-Vidal, V., Guijarro, E., Balasch, S. and Torres, A.G., Application of computational fluid dynamics to the prediction of airflow in a mechanically ventilated commercial poultry building, *Biosystems Engineering*, 100, pp.105-116, 2008.
- [13]. Roy, J.C. and Boulard, T., CFD predictions of the natural ventilation in a tunnel type greenhouse: influence of wind direction and sensitivity to turbulence models, *Acta Horticulturae*, 691, pp. 457-464, 2005.
- [14]. Lee, I B., Sadanor, S. and Sung, S H., Evaluation of cfd accuracy for the ventilation study of a naturally ventilated broiler house. *JARQ*, 41, pp.53 – 64, 2007.
- [15]. Stavrakakis, G. M., Koukou, M. K., Vrachopoulos, M. G. and Markatos, N. C., Natural cross-ventilation in buildings: Building-scale experiments, numerical simulation and thermal comfort evaluation, *Energy and Buildings*, 40, pp. 1666-1681, 2008.
- [16]. Seo, I. H., Lee, I. B., Moon, O. K., Kim, H. T., Hwang, H. S., Hong, S. W., Bitog, J. P., Yoo, J. I., Kwon, K. S., Kim, Y. H. and Han, J. W., Improvement of the ventilation system of a naturally ventilated broiler house in the cold season using computational simulations, *Biosystems Engineering*, 104, pp. 106-117, 2009.
- [17]. Sun Y., Tan Z., Zhang Y. and Zhao, L., Comparison of six CFD models for room airflow study with PIV measurement data. In: *Proceedings of the 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting*, Ottawa, Ontario. ASAE, Canada, 2004.
- [18]. Rohdin P. and Moshfegh, B., Numerical predictions of indoor climate in large industrial premises. A comparison between different k-ε models supported by field measurements, *Building and Environment*, 42, pp. 3872-3882, 2007.
- [19]. Kittas, C. and Bartzanas, E T., Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations, *Building and Environment*, 42, pp. 3774-3784, 2007.
- [20]. Jayaraman, B., Finlayson, E. U., Sohn, M. D., Thatcher, T. L., Price, P. N., Wood, E. E., Sextro, R. G. and Gadgil, A. J., Tracer gas transport under mixed convection conditions in an experimental atrium: Comparison between experiments and CFD predictions, *Atmospheric Environment*, 40, pp. 5236-5250, 2006.
- [21]. Norton, T., Sun D.-W., Grant, J., Fallon, R. and Dodd, V., Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review, *Bioresource Technology*, 98, pp. 2386-2414, 2007.
- [22]. Boulard, T., Kittas, C., Roy, J. C. and Wang, S.E., Structures and environment: convective and ventilation transfers in greenhouses, part 2: determination of the distributed greenhouse climate, *Biosystems Engineering*, 83, pp. 129-147, 2002.

- [23]. Seifert, J., LI, Y., Axley, J. and Rösler, M., Calculation of wind-driven cross ventilation in buildings with large openings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94, pp. 925-947, 2006.
- [24]. Asfour, O.S. and Gadi, M.B., A comparison between CFD and Network models for predicting wind-driven ventilation in buildings, *Building and Environment*, 42, pp. 4079-85, 2007.
- [25]. Ji, Y., Cook, M.J. and Hanby, V., CFD modelling of natural displacement ventilation in an enclosure connected to an atrium, *Building and Environment*, 42, pp.1158-72, 2007.
- [27]. Mak, C.M., Niu, J.L., Lee, C.T. and Chan, K.F., A numerical simulation of wing walls using computational fluid dynamics, *Energy and Buildings*, 39, pp. 995-1002, 2007.
- [28]. Hu, C.H., Ohba, M. and Yoshie, E R., CFD modelling of unsteady cross ventilation flows using LES. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96,10-11, pp. 1692-1706, 2008.
- [29]. Chen, Q., Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications, *Building and Environment*, 44, pp. 848-858, 2009.
- [30]. Demmers, T. G. M., Phillips, V. R., Short, L. S., Burgess, L. R., Hoxey, R. P. and Wathes, C. M., Structure and environment: validation of ventilation rate measurement methods and the ammonia emission from naturally ventilated dairy and beef buildings in the United Kingdom, *Journal of Agricultural Engineering Research*,79, pp. 107-116, 2001.
- [31]. Scholtens, R., Dore, C. J., Jones, B. M. R., Lee, D. S. and Phillips, V. R., Measuring ammonia emission rates from livestock buildings and manure stores--part 1: development and validation of external tracer ratio, internal tracer ratio and passive flux sampling methods, *Atmospheric Environment*, 38, pp. 3003-3015, 2004.
- [32]. Hong, S.W., Lee I.B., Hwang, H.S., Seo, I.H., Bitog, J P., Yoo, J.I., Kim, K.S., LEE, S.H., Kim, K. W. and Yoon N. K., Numerical simulation of ventilation efficiencies of naturally ventilated multi-span greenhouses in Korea, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 51, pp. 1417-1432, 2008.
- [33]. Albright, L.D., Environment control for animals and plants, *American Society of Agricultural Engineers, ASAE*, 1990.
- [34]. Pawar, S.R., Cimbala, J.M., Wheeler, E.F. and Lindberg, D.V., Analysis of poultry house ventilation using computational fluid dynamics, *Transactions of the ASABE*, 50, pp. 1373-1382, 2007.
- [35]. Gebremedhin, K. G. and Wu, B., Simulation of flow field of a ventilated and occupied animal space with different inlet and outlet conditions, *Journal of Thermal Biology*, 30, pp. 343-353, 2005.
- [36]. Wheeler, E.F., Casey, K.D., Gates, R.S., Xin, H., Zajackowski, J.L., Topper, P.A., Liang, Y. and Pescatore, A.J., Ammonia emissions from twelve U.S.A. broiler chicken houses, *Transactions of the ASABE*, 49, pp. 1495-1512, 2006.
- [37]. Osorio, J.A., Measurement and CFD modeling of ammonia concentration, flux and thermal environment variables in open side broiler housing. Tese (Doutorado em Construções Rurais). Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG 2011.
- [38]. Gates, R. S., Casey, K. D., Wheeler, E. F., Xin, H. and Pescatore, A. J., U.S. broiler housing ammonia emissions inventory, *Atmospheric Environment*, 42, pp. 3342-3350, 2008.
- [39]. Worley, M.S. and Manbeck, H.B., Modelling particle transport and air flow in ceiling inlet ventilation systems, *Transactions of the ASAE*, 38, pp. 231-239, 1995.
- [40]. Lee, I.B., Development of an aerodynamic model for predicting qualitative and quantitative diffusion of livestock odor. *Livestock Environment VIII - Proceedings of the 8th International Symposium*, pp.153-160, 2008.
- [41]. Reynolds, A. M., A model for predicting airborne dust concentrations within a ventilated airspace, *Journal of Agricultural Engineering Research*, 66, pp.103-109, 1997.
- [42]. Quinn, A. D., Wilson, M., Reynolds, A. M., Couling, S. B. and Hoxey, R. P., Modelling the dispersion of aerial pollutants from agricultural buildings: an evaluation of computational fluid dynamics (CFD), *Computers and Electronics in Agriculture*, 30, pp. 219-235, 2001.