



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Departamento de Ciencia Animal

Tesis Doctoral

***Evaluación de alternativas en las instalaciones
avícolas de pollos de carne para la mejora de las
condiciones de confort de los animales***

Eva Hilda Guerra Galdo

Directores:

Dr. Salvador Calvet Sanz

Dr. Fernando Estellés Barber

Dra. P. Amparo López Jiménez

Valencia, Junio de 2017

Agradecimientos

Al Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo del Perú (PRONABEC) que financia el doctorado y a la Universitat Politècnica de València, por brindarme la oportunidad de desarrollo académico y personal.

Esta tesis sería impensable sin el apoyo de muchas personas que lo hicieron posible.

Agradecer inmensamente a mis directores de tesis profesor Salvador Calvet Sanz, Amparo López Jiménez, Fernando Estellés Barber por su habilidad para transmitir su conocimiento, por la gestión en apoyar una tesis que requería de los elementos principales para validar. Por tener el privilegio de conocerles en la calidad humana y permitirme ver la claridad de las cosas.

También expresar mi gratitud a todas las áreas especializadas que intervienen en el desarrollo de esta tesis CD-Adapco José Viot por facilitar los trámites de horas de licencia, al área de sistemas y redes de la UPV al Francisco Rosich Viana por hacer posible el cálculo de las modelizaciones, al área de termodinámica José Manuel Pinazo Ojer por su disposición y aportaciones.

A las personas que estuvieron dispuestos y disponibles para charlar sobre el tema Juan Escudero, Ehab Mostafa, Eliseo Bustamante.

Y como no, a las personas del departamento por su apoyo y amistad durante este tiempo Elena, Pau, Walter, María Cambra, Mari Carmen, Aránzazu, Martín, Maria del Carmen, Victor, Paloma y amigos por su apoyo en calidad humana Ángel.

A mis hermanos, a mi tía Ruth, María y familia que estaban siempre presente. A mi esposo, Edwin por su apoyo incondicional, aporte profesional y paciencia.

Esta tesis se la dedico a mi hijo Qhaly, a mis padres por ser unos padres extraordinarios y a mi abuelo.

Resumen

La demanda del consumo de carne de pollo incrementa a nivel mundial. Particularmente, en la crianza intensiva se incrementa la necesidad de tener un ambiente controlado para mantener el confort térmico y la eficiencia productiva. Por ello en la presente tesis se realiza un análisis exploratorio de los factores ambientales que intervienen en el confort de las aves y el uso de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés) en granjas. Se ha utilizado para ello el código comercial Star CCM+. Este análisis computacional se ha utilizado para representar el efecto del cambio de los elementos constructivos en naves tipo túnel sobre los parámetros de confort en condiciones climáticas consideradas como de verano e invierno. Se ha validado la modelación numérica propuesta con datos experimentales para la velocidad y temperatura en una nave tipo túnel con fuente de calor constante. Con la información detallada de los factores ambientales que intervienen en el comportamiento productivo y fisiológico del animal, se establecieron valores de rango de confort para la velocidad, temperatura e índices de temperatura y velocidad. Para identificar los desequilibrios microclimáticos dentro de la granja, el código de la mecánica de fluidos computacional analiza las diferentes características del edificio que pueden influir a nivel del animal, realizando un análisis sobre cómo los diferentes autores han utilizado este tipo de herramientas computacionales para validar su credibilidad. Conociendo la diversidad de granjas analizadas con CFD, en el cuarto y quinto capítulo se modeliza la nave túnel con diferentes elementos estructurales y flujo de calor de los animales en el suelo. Se analiza en este caso la distribución de velocidad, temperatura e índice de temperatura y velocidad, observándose el efecto que tiene a nivel del animal la diferente ubicación de los ventiladores y distribución de ventanas. Con este análisis previo y caracterización de la nave tipo túnel se valida en escala real una sección de una nave túnel particular, sita en el Laboratorio de Simulación Ambiental del ICTA, con dos flujos de velocidad constante, tres fuente de calor

y distintas alturas de ventana, observándose entre lo medido y simulado un importante grado de homogeneidad de los resultados de velocidad y temperatura, basándose en los errores cuadráticos medios cuando se comparan velocidades y temperaturas medidas y modeladas. Se comprueba así que las simulaciones virtuales con CFD se aproximan a la realidad y que permiten definir estrategias de ventilación para diferentes estaciones del año. El diseño semi-túnel mejorado presenta uniformidad en la distribución de velocidad y temperatura a la altura del animal influyendo la ubicación y distribución de los diferentes elementos que forman la estructura de la granja en los resultados.

Abstract

The demand for chicken meat consumption increases worldwide. Particularly, intensive breeding increases the need for a controlled environment, in order to maintain thermal comfort and productive efficiency. For this reason, the present thesis is an exploratory analysis of the environmental factors involved in animals comfort and in the use of Computational Fluid Dynamics (CFD) in farms. The Star CCM+ commercial code has been used for this purpose. This computational software has been used to represent the effect of the change of the constructive elements in tunnel type farms buildings, based on the parameters of comfort in climatic conditions considered as summer and winter. The proposed numerical modeling has been validated with experimental data for speed and temperature in a tunnel type farm with constant heat source. With the detailed information of the environmental factors involved in the productive and physiological behavior of the animal, values of comfort range were established for speed, temperature and temperature and speed indexes. To identify the microclimatic imbalances inside the farm, the computational fluid mechanics code analyzes the different characteristics of the building that can influence the solutions at the animal level, making an analysis on how the different authors have used these type of computational tools to validate their credibility. Knowing the diversity of farms analyzed with CFD, in the fourth and fifth chapter the model tunnel building is modeled, with different structural elements and heat flow of the animals in the soil. In this case, the velocity, temperature and temperature and velocity distribution are analyzed, showing the effect of the different locations of the fans and the distribution of windows at the animal level. With this previous analysis and characterization of the tunnel-type farm, a section of a private tunnel spacecraft, in the Laboratorio de Simulación Ambiental (ICTA), with two constant velocity flows, three heat sources and different window heights. Observing between the measured and the simulated an important degree of homogeneity of the speed and temperature results, based on the average quadratic errors

when measured and modeled velocities and temperatures are compared. The virtual simulations with CFD are verified as close to reality, furthermore, they allow to define ventilation strategies for different seasons of the year. The improved semi-tunnel design shows uniformity in the velocity and temperature distribution at the height of the animal, influencing the location and distribution of the different elements that form the structure of the farm in the results.

Resum

El consum de carn de pollastre s'incrementa a nivell mundial. Particularment, en la cria intensiva s'incrementa la necessitat de tenir un ambient controlat per mantenir el confort tèrmic i l'eficiència productiva. Per això en la present tesi es realitza una anàlisi exploratòria dels factors ambientals que intervenen en el confort de les aus i l'ús de la Dinàmica de Fluids Computacional (CFD per les seves sigles en anglès) en granges. S'ha utilitzat per a això el codi comercial Star CCM+. Aquesta anàlisi computacional s'ha utilitzat per representar l'efecte del canvi dels elements constructius en naus tipus túnel sobre els paràmetres de confort en condicions climàtiques considerades com d'estiu i hivern. S'ha validat la modelació numèrica proposta amb dades experimentals per a la velocitat i temperatura en una nau tipus túnel amb font de calor constant. Amb la informació detallada dels factors ambientals que intervenen en el comportament productiu i fisiològic de l'animal, es van establir valors de rang de confort per a la velocitat, temperatura i índexs de temperatura i velocitat. Per identificar els desequilibris microclimàtics dins de la granja, el codi de la mecànica de fluids computacional analitza les diferents característiques de l'edifici que poden influir a nivell de l'animal, realitzant una anàlisi sobre com els diferents autors han utilitzat aquest tipus d'eines computacionals per validar la seva credibilitat. Coneixent la diversitat de granges analitzades amb CFD, en el quart i quint capítol es modelitza la nau túnel amb diferents elements estructurals i flux de calor dels animals a terra. S'analitza en aquest cas la distribució de velocitat, temperatura i índex de temperatura i velocitat, observant l'efecte que té a nivell de l'animal la diferent ubicació dels ventiladors i distribució de finestres. Amb aquesta anàlisi previ i caracterització de la nau tipus túnel es valida en escala real una secció d'una nau túnel particular, situada al Laboratori de Simulació Ambiental de l'ICTA, amb dos fluxos de velocitat constant, 3 font de calor i diferents altures de finestra, observant entre el mesurat i la simulació un important grau d'homogeneïtat dels resultats de velocitat i temperatura, basant-se en els errors

quadràtics mitjans quan es comparen velocitats i temperatures mesures i modelades. Es comprova així que les simulacions virtuals amb CFD s'aproximen a la realitat i que permeten definir estratègies de ventilació per a diferents estacions de l'any. El disseny semi-túnel millorat presenta uniformitat en la distribució de velocitat i temperatura a l'altura de l'animal influent la ubicació i distribució dels diversos elements que formen l'estructura de la granja en els resultats.

ÍNDICE

Capítulo 1: Introducción General	1
Capítulo 2: El diseño de las instalaciones de pollos de carne y su influencia en las condiciones de confort de los animales....	15
Capítulo 3: Review of livestock buildings modelled with CFD techniques	45
Capítulo 4: CFD model for ventilation assessment in poultry houses with different distribution of windows	63
Capítulo 5: Computational Fluid Dynamics analysis applied to engineering and design of poultry farms	89
Capítulo 6: Validation of CFD modelling of an experimental poultry house with heat sources.....	119
Capítulo 7: Discusión General y Conclusiones.....	141

Glosario de términos y abreviaciones

CO ₂	Dióxido de carbono (Carbon dioxide)
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics)
CIGR	Comisión Internacional de Ingeniería Rural (Commission Internationale du Genie Rural)
f	Plano (Flat)
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization)
F/P	Deflector en la abertura (Flap plate)
g	Dos aguas (gable)
Gambit	Geometry and Mesh Building Intelligent Toolkit
HR	Humedad Relativa (Relative humidity)
IST	Semi-túnel mejorado (Improved Semi-tunnel)
ITH	Índice de temperatura y humedad (Temperature and humidity Index)
ITV	Índice de temperatura y velocidad (Temperature and Velocity Index)
ITHV	Índice de temperatura, humedad y velocidad (Temperature Humidity and Velocity Index)
ITGNH	Índice de temperatura de globo negro y húmedo (Temperature and black-globe humidity index)
KWSST	Transporte de esfuerzo de cortadura k- ω (Shear stress transport k- ω)
MAGRAMA	Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente
NH ₃	Amoníaco (Amonnia)
PIV	Velocimetría de imágenes de partículas

	(Particle image velocimetry)
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RAM	Memoria de Acceso Aleatorio (Random Access Memory)
RKE	Realizable k- ϵ
RNG	Grupo de renormalización (Renormalization-group)
RMSE	Raíz cuadrada del error cuadrático medio (Root Mean Squared Error)
RSM	Modelo de tensión de Reynolds (Reynolds Stress Model)
SKE	Estándar k- ϵ (Standard k- ϵ)
SKW	Estándar k- ω (Standard k- ω)
ST	Semi-túnel (Semi-tunnel)
S/O	Sólo abertura (Slot opening)
T	Túnel (Tunnel)
T3	Triyodotironina (Triiodothyronina)
UE	Unión Europea (European Union)
UPV	Universitat Politècnica de Valencia
2D	Dos Dimensiones (Two Dimensional)
3D	Tres Dimensiones (Three Dimensional)

Lista de unidades y magnitudes

cm	centímetro
F	vector fuerza externa, N
g	gravedad
s	subíndice s representa verano
h	hora
I	Tensor unidad, N/m ³
kg	kilogramo
m	metro
m/s	metros por segundo
m ²	metro cuadrado
m ³ /h	metros cúbicos por hora
λ	Conductividad térmica, W/m °K
Pa	Pascal
ρ	Densidad, kg/m ³
Sm	Fuente de masa, kg/m ³
t	Tiempo, s
t	Temperatura interna
T	Temperatura, °C
τ	Tensor de tensión, Pa
Tbh	Temperatura de bulbo húmedo, °C
Tbs	Temperatura de bulbo seco, °C
U	Transmitancia térmica, W/m ² °K
\vec{v}	Velocidad, m/s
W	Watt
w	subíndice w representa invierno
Φ s	Producción de calor sensible
Φ_{total}	Disipación de calor total del animal

Capítulo 1: Introducción General

1.1 Introducción

1.1.1 Contexto general de la producción de pollos

A nivel mundial el consumo de carne de pollo es de 13,5 kg por persona y año (OECD/FAO 2017). Este consumo presenta una tendencia ascendente dado que el pollo es un producto de bajo costo con menos contenido de grasa y de fácil digestión. El país que mayor producción de carne de pollo presentó en el año 2016 fue Estados Unidos (Tabla 1.1), con una producción de 17.971 millones de toneladas, lo que supone un 20,3% de la producción mundial, seguido de China (15,1%) y, en tercer lugar de Brasil (14,8%). La Unión Europea (UE) en su conjunto, ocupó el cuarto lugar en cuanto a producción de carne de pollo con un 12% del total mundial. Las exportaciones a nivel mundial de carne de pollo las lidera Brasil con el 37,4% del total exportado, debido a los bajos costos de producción, seguido de Estados Unidos (27,9%) y en tercer lugar la UE (11,5%). Por otro lado, los principales países importadores con mayor demanda de carne de pollo a nivel mundial fueron Japón con un millón de toneladas anuales (suponiendo el 10,8% del total de las importaciones), seguido por Arabia Saudí (10,7%), México (9,1%) y en cuarto lugar la UE (8,4%) (MAGRAMA, 2016).

Tabla 1.1. Principales países de la producción mundial de carne de pollo (tm), 2015 (MAGRAMA, 2016)

Países	miles	%
Estados Unidos	17.971	20,3
China	13.4	15,1
Brasil	13.146	14,8
Unión Europea	10.62	12
México	3.196	3,6
India	3.9	4,4
Rusia	3.55	4
Argentina	2.08	2,3
Tailandia	1.69	1,9
Turquía	1.9	2,1
Indonesia	1.625	1,8
Otros	15.634	17,6
Total	88.712	100

En la UE los tres países que lideran la producción de carne de aves son Polonia (16,36%), Francia (13,81%) y Alemania (13,31%), encontrándose España (10,5%) en el quinto lugar en cuanto a producción.

En España el consumo de carne de pollo supuso un 44% del total de consumo de carne para el año 2016 (31,1 kg por habitante y año) per cápita de aves/habitante/año aumento 1 kg (31,1 kg) de acuerdo al MAGRAMA (2016).

La producción de carne de aves por comunidades autónomas se concentró en Cataluña con el 24,8% de la producción nacional contando con 950 granjas de producción, ocupando el segundo lugar Andalucía (20,7%) y el tercero la Comunidad Valenciana (13,5%) (MAGRAMA, 2016).

1.1.2 Estructura de la producción avícola de carne

La producción de carne de pollo se realiza mayoritariamente en condiciones de cría intensiva con un elevado grado de especialización. Los animales utilizados para la producción de

pollos, más conocidos como “broilers”, pertenecen a estirpes muy seleccionadas genéticamente, con gran capacidad de crecimiento pero a la vez con unas exigencias elevadas en cuanto al ambiente que las rodea. Durante el proceso de crianza la demanda del consumo de alimento y el crecimiento del animal puede estar influenciado por factores que son propios del animal (edad, sexo, estirpe, fisiología del animal) y del entorno (tipo de alojamiento, los programas de alimentación, luz, ventilación, temperatura, humedad relativa, manejo). Dichos factores se representan en la Figura 1.1 Por tanto, se elaboran raciones según los requerimientos nutricionales recomendados para la estirpe genética, representando la alimentación el 65-70% de los costos para producir un kilo de carne (Vaca, 2003). Por lo tanto, para obtener un rendimiento productivo de pollos de carne los alojamientos deberían mantener un microclima aceptable, capaces de mantener en estado fresco el alimento y agua, con adecuados programas de iluminación e intensidad de luz, ventilación, temperatura y humedad relativa a nivel del animal para evitar problemas de salud, deterioro del alimento, camas húmedas, concentración de gases contaminantes, así como la dependencia de equipos de calefacción y refrigeración.

Debido al incremento de la densidad de aves por metro cuadrado en explotaciones tecnificadas, las aves son susceptibles a la incidencia de enfermedades. Por tanto, es esencial prevenir enfermedades a través de un monitoreo de los parámetros de producción para identificar oportunamente las aves con problemas de salud. Para ello las prácticas de bioseguridad ayudan a prevenir la introducción y propagación de enfermedades dentro de la granja, realizando un control de la entrada y salida del personal, del alimento, equipo y otros animales. En todas las etapas del proceso productivo el manejo interactúa con los programas de alimentación, el protocolo de bioseguridad, controlando el registro de producción, equipos de ventilación, el programa de iluminación que influyen en el rendimiento de las aves. Por tanto, el manejo de la climatización no sólo es esencial para optimizar el crecimiento de los animales, sino también para reducir la incidencia de enfermedades.

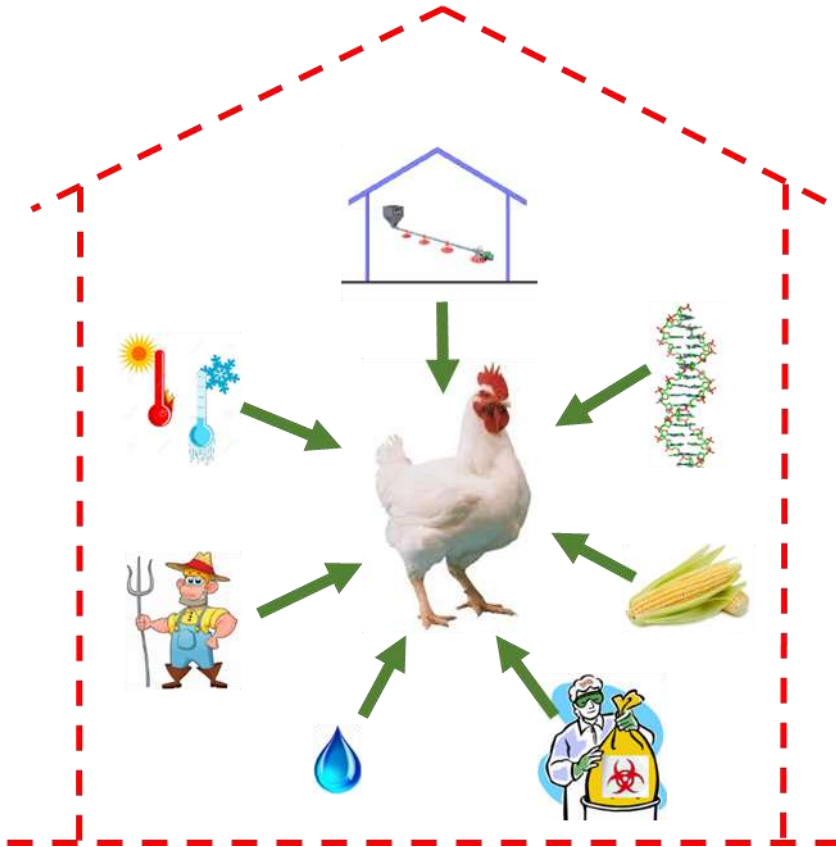


Figura 1.1. Factores que intervienen en el entorno productivo de pollos de carne

La temperatura de confort térmico del ave cambia a medida que ésta crece, disminuyendo cada semana al desarrollar su sistema termorregulador. Así, en los primeros días requieren una temperatura ambiental entre los 30 y los 33°C, mientras que cuando alcanza los 35 días de edad, la temperatura óptima se reduce a 22°C y ya en la sexta semana hasta los 18 o 20°C (Olanrewaju et al., 2010; Abreu y Abreu, 2011). Es conocido que cuando las temperaturas exceden los rangos de 18-20°C en la etapa final de engorde, se produce un estrés en el animal que se refleja en diferentes aspectos fisiológicos, de comportamiento y productivos. Adicionalmente, es necesario considerar la relación

entre la temperatura y la velocidad del aire, en lo que se refiere al confort térmico de los animales.

Sin embargo, las condiciones climáticas naturales fluctúan continuamente y no siempre satisfacen las necesidades de los pollos. Además, la presencia de climas extremos en muchas regiones del mundo podría comprometer la supervivencia de los animales (Oliveira et al., 2014). En particular el clima mediterráneo se caracteriza por tener veranos calurosos e inviernos suaves o frescos, por lo que es necesario proporcionar a los animales las condiciones adecuadas durante todo el año. Para garantizar la eficiencia en la producción de pollos es necesario disponer por tanto de instalaciones adecuadas que además deberán ser manejadas correctamente. Actualmente, proporcionar a los animales las condiciones adecuadas para su producción es uno de los mayores esfuerzos que realizan los productores de pollo.

Así, para mantener los objetivos productivos y el bienestar animal, los productores consideran como un factor clave el diseño del sistema de climatización de las naves combinando en algunos casos los sistemas de ventilación natural con la ventilación forzada (Gerbi et al., 2014). Debe considerarse también que los costes energéticos asociados a la refrigeración o calefacción se ven altamente influenciados por la adecuada selección de un sistema de ventilación para cada caso, jugando por tanto un papel capital en la cuenta de resultados de la explotación.

1.1.3 El control ambiental a través del análisis de la dinámica de fluidos

El sistema de producción intensiva en la crianza de animales ha incrementado el empleo de técnicas de control ambiental de temperatura, velocidad del aire, humedad relativa y concentración de gases, para garantizar un rendimiento productivo y bienestar de los animales en diferentes edades del animal y estaciones del año. Para ello, se ha considerado mejorar el diseño de la estructura de la nave, conociendo los factores que afectan al confort de los animales y definiendo los

indicadores de bienestar, como el índice de temperatura y velocidad (ITV). Existen herramientas computacionales como la dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés, *Computational Fluid Dynamics*) que ayudan en la caracterización de modelos fiables de predicción de ambientes en el interior de alojamientos ganaderos.

Las técnicas CFD permiten realizar un análisis cualitativo y cuantitativo del comportamiento de un alojamiento ganadero en lo que respecta a los flujos de aire, distribución de temperatura y humedad, de presiones o de gases. Para ello se utilizan las ecuaciones de Navier-Stokes (Cortés et al., 2014) teniendo en cuenta los efectos de la configuración de ventilación del edificio, la ubicación de la granja y potencialmente las características del suelo (Bjerg et al., 2002). Todos estos parámetros tienen impactos significativos sobre la calidad del aire interior, el confort térmico de los animales y la eficiencia energética del edificio. Los análisis de CFD trabajan dividiendo el dominio de interés en una serie de pequeños volúmenes discretos usando una malla. Aquí es donde entran en acción las propiedades de los fluidos (densidad, peso específico, gravedad específica, continuidad, viscosidad, esfuerzos, etc.), que son calculadas en cada uno de estos volúmenes como solución de las ecuaciones fundamentales (Li y Nielsen, 2011).

Las herramientas computacionales son una herramienta muy potente para predecir el funcionamiento del diseño arquitectónico de las instalaciones ganaderas. Los alojamientos avícolas han sido ampliamente estudiados, con geometrías de planta rectangular y dimensiones variando en longitud (desde 41 a 126 m), anchura (desde 9 a 17,2 m), altura de pared (entre 2,2 y 2,6 m) y altura de la cumbrera (hasta 5,5 m) (Seo et al., 2009; Rojano et al., 2015; Blanes-Vidal et al., 2008; Bustamante et al., 2015; Kwon et al., 2015). Las configuraciones de ventilación estudiadas abarcan tanto la ventilación transversal como la de tipo túnel.

El método de CFD está siendo ampliamente usado para evaluar los patrones de flujo de aire, la estratificación de temperatura y concentración de emisiones dentro de la granja. En granjas de

aves de carne se ha comprobado a través de las correspondientes validaciones que la información proporcionada por las técnicas CFD constituye una representación cercana a la realidad. Aun así, la diversidad de modelos, la variabilidad en las condiciones de contorno o la presencia de obstáculos afectan el movimiento termodinámico, lo cual contribuye a las divergencias con la realidad (Blanes-Vidal et al., 2007; Harral and Boon, 1997; Smith et al., 1999; Bjerg et al., 2002). Los estudios realizados analizan variaciones en las infraestructuras para mejorar la ventilación en diversas condiciones. En ventilación mecánica se ha estudiado la modificación del tamaño, distribución y grado de abertura de las ventanas de entrada de aire y la ubicación, diámetro y número de ventiladores. En condiciones de invierno, se han evaluado intercambiadores de calor (Mostafa et al., 2012), ventiladores en la pared lateral (Osorio et al., 2011), cortinas en las paredes laterales (Seo et al., 2009 y Kwon et al., 2015; Osorio et al., 2015) y el uso de calefactores (Rojano et al., 2015). Algunos autores llegan a proponer una distribución de ventanas diferente en el verano y el invierno (Kic y Zajicek, 2009). En condiciones de verano, el uso de nebulizadores distribuidos a lo largo de la cubierta en la nave túnel con presión negativa también ha sido estudiado (Osorio et al., 2013). Otras configuraciones geométricas diversas fueron estudiadas por otros autores (Bustamante et al., 2015; Blanes-Vidal et al., 2008; Kwon et al., 2015). Por tanto, existe un conocimiento bastante fundamentado del funcionamiento de las granjas avícolas de carne.

La ubicación de ventiladores, entradas y salidas de aire afecta a la mezcla, circulación y renovación de aire, existiendo áreas no ventiladas que aparecen cerca de las esquinas y las paredes. Se ha observado que con tasas de intercambio de aire similares, las naves tipo túnel tienen mayor velocidad del aire que la nave con ventilación cruzada convencional, y ello se traduce en mayores ganancias de peso en verano (Blanes-Vidal et al., 2008; Bustamante et al., 2013).

Las técnicas CFD no sólo permiten comparar resultados asociados a diferentes instalaciones, sino también a diferentes

regulaciones de una misma instalación. De esta forma pueden optimizarse cuestiones de manejo relativas a una nave existente sobre las que un ganadero tiene capacidad de decisión, tales como el grado de abertura de ventanas, o el funcionamiento de ventiladores. El CFD permite, por tanto, optimizar la ventilación en términos de evitar zonas muertas y favorecer la homogeneidad de la ventilación, con las ventajas productivas que ello implica, favoreciendo un uso más eficiente de la energía.

Los autores que realizaron las modificaciones de las granjas sugieren modelizar en diferentes períodos de frío y calor naves con ventilación cruzada y tipo túnel (Song et al., 2010) ocupadas con animales de diferentes edades (Bustamante et al., 2015), mejorando si es posible el ambiente interior usando tecnologías novedosas como intercambiadores de calor y reducir la concentración de amoníaco dentro de la granja (Mostafa et al., 2012).

Como se ha comentado, se conocen cuáles son los elementos constructivos de los que depende la climatización de una nave ganadera, al igual que los parámetros de manejo sobre los que puede actuar un ganadero. Sin embargo, el diseño de las instalaciones avícolas de carne sigue realizándose sin seguir criterios basados en la dinámica de fluidos computacional. Adicionalmente, se desconoce cómo afecta la distribución de las ventanas y la inclinación de las cubiertas a las condiciones ambientales interiores. Por tanto, es necesario avanzar en el diseño de granjas adaptadas a condiciones de clima mediterráneo, que se caracteriza por la variación estacional de temperaturas y sobre todo por la exposición de temperaturas y humedades elevadas en los meses de verano.

1.2 Objetivos y estructura de la tesis

El objetivo de esta tesis es evaluar mediante técnicas CFD alternativas de diseño en la cría de pollos que mejoren las condiciones ambientales en las que se encuentran los animales, en granjas situadas en clima mediterráneo.

Para alcanzar este objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Revisar el estado del arte de los factores ambientales que intervienen en el confort de las aves.
2. Realizar un análisis descriptivo de la aplicación de la CFD en granjas avícolas.
3. Analizar mediante CFD el efecto de determinados cambios en la distribución de los elementos constructivos en naves tipo túnel sobre los parámetros de confort de los pollos en verano e invierno.
4. Desarrollar y validar un modelo numérico que permita analizar la distribución de la velocidad de aire y temperatura en una nave tipo túnel con fuentes de calor constante.

Para alcanzar estos objetivos se han realizado una serie de trabajos de revisión bibliográfica, modelización CFD y validación, que se estructuran en siete capítulos, presentando cada capítulo subcapítulos que tienen formato de documentos científicos, cada uno con una introducción, metodología, resultados y conclusiones.

El primer capítulo (Capítulo 1) constituye la presente introducción general de la tesis y estructura de la misma. El segundo capítulo (Capítulo 2) responde al primer objetivo específico y presenta una visión general del estado del arte sobre el efecto de los factores ambientales en la cría avícola de carne. Además, en este capítulo se establecen los indicadores que definen el confort térmico de las aves.

El tercer capítulo (Capítulo 3) revisa la aplicación de la CFD en granjas con diferentes sistemas de ventilación, condiciones de contorno, la distribución de los factores ambientales y el comportamiento aerodinámico del fluido. Este capítulo responde al segundo objetivo específico y constituye la revisión bibliográfica sobre las aplicaciones CFD. El desarrollo del cuarto y quinto capítulo (Capítulos 4 y 5), responden al tercer objetivo específico. En estos capítulos se presentan simulaciones de

naves avícolas variando la configuración de ventanas y ventiladores, así como la pendiente de la cubierta. A nivel de modelo, se evalúan la distribución de la velocidad, temperatura y del ITV a nivel del animal, comparándolo con los rangos recomendados de confort térmico, en condiciones de verano y de invierno.

El sexto capítulo (Capítulo 6), responde al cuarto objetivo específico. En este capítulo se desarrolla y valida un modelo numérico que permita analizar la distribución de la velocidad de aire y temperatura en una nave tipo túnel considerando una fuente de calor constante distribuido a lo largo de la nave en escala real.

Por último, la discusión general de los resultados obtenidos y conclusiones se desarrolla en el séptimo capítulo (Capítulo 7). En este capítulo se analiza el trabajo desarrollado en su conjunto y se determinan las líneas futuras de investigación y recomendaciones prácticas para el diseño de granjas avícolas.

1.3 Referencias

- Abreu Nascimento, V. M. and de Abreu, P. G. (2011). Os desafios da ambiência sobre os sistemas de aves no Brasil the challenges of animal environment on the poultry systems in Brazil. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 40: 1–14.
- Bjerg, B., Svidt, K., Zhang, G., Morsing, S. and Johnsen, J. O. (2002). Modeling of air inlets in CFD prediction of airflow in ventilated animal houses. *Computers and Electronics in Agriculture*. 34: 223–235.
- Blanes-Vidal, V., Fitas, V. and Torres, A. (2007). Differential pressure as a control parameter for ventilation in poultry houses: Effect on air velocity in the zone occupied by animals. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 5(1): 31–37.
- Blanes-Vidal, V., Guijarro, E., Balasch, S. and Torres, A. G. (2008). Application of computational fluid dynamics to the prediction of airflow in a mechanically ventilated commercial

- poultry building. *Biosystems Engineering*. 100(1): 105–116.
- Bustamante, E., García-Diego, F.-J., Calvet, S., Estellés, F., Beltrán, P., Hospitaler, A. and Torres, A. (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., Torres, A. and Hospitaler, A. (2015). Measurement and numerical simulation of air velocity in a tunnel-ventilated broiler house. *Sustainability*. 7(2): 2066–2085.
- Cortés, M., Fazio P., Rao, J., Bustamante, W. and Vera, S. (2014). CFD modeling of basic convection cases in enclosed environments : Needs of CFD beginners to acquire skills and confidence on CFD modeling. *Revista Ingeniería de Construcción*. 29(1): 22–45.
- FAO (2017). Meat consumption (indicator). doi: 10.1787/fa290fd0-en (Accessed on 13 March 2017)
- Gerbi J., F., Baracho, M. and Nääs, I. D. A. (2014). Impacto do tipo de ventilação em galpões para frangos de corte na temperatura de cama. In XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2014. 27-31 de Juho, Campo Grande- MS-Brasil. Pp 1–4.
- Harral, B. B. and Boon, C. R. (1997). Comparison of predicted and measured air flow patterns in a mechanically ventilated livestock building without animals. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 66: 221–228.
- Kic, P. and Zajíček, M. (2009). Air streams in building for broilers. In *Technika V Podmienkach Trvalo Udržateľného Rozvoja Plavnica Medzinárodná*. Pp 57–61.
- Kwon, K.-S., Lee, I.-B., Zhang, G. Q. and 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.

- Li, Y. and Nielsen, P. V. (2011). Commemorating 20 years of indoor air: CFD and ventilation research. *Indoor Air*. 21(6): 442–453.
- MAGRAMA (2016). Informe del consumo de alimentación en España 2015. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Mayo 2016.
- MAGRAMA (2016). El sector de la carne de aves en cifras. Principales indicadores económicos en 2015. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Junio de 2016.
- Mostafa, E., Lee, I.-B., Song, S.-H., Kwon, K.-S., Seo, I.-H., Hong, S.-W., Hwang, H.-S., Bitog, J. P. and Han, H.-T. (2012). Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation system. *Biosystems Engineering*. 112(4): 293–303.
- Olanrewaju, H., Purswell, J. L., Collier, S. D. and Branton, S. L. (2010). Effect of ambient temperature and light intensity on physiological reactions of heavy broiler chickens. *Poultry Science*. 89(12): 2668–2677.
- Oliveira Rocha, K. S., Ferreira Tinôco, I. de F., Helvecio Martins, J., Osorio Saraz, J. A. and Arêdes Martins, M. (2014). Modeling and simulation of internal environment conditions in high-density poultry houses with ventilation using computational fluid dynamics. *International Conference of Agricultural Engineering 2014, Zurich*. Pp 1–8.
- Osorio, H. R., Ferreira, T. I. F., Osorio, S. J. A., Oliveira R. K. S. and Guerra G. L. M. (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 Saraz, A. J., Ferreira Tinôco, I. de F., Oliveira Rocha, K. S., Arêdes Martins, M. and Oliveira de Paula, M. (2011). Modeling and experimental validation to estimate the energy balance for a poultry house with misting cooling. *Dyna*. 78(170): 167–174.

- Osorio, R., Guerra, L., Barreto, L. and Barbari M. (2015). CFD modeling of the thermal environment in a negative pressure tunnel ventilated broiler barn during the first week of life. 7th European Conference on Precision Livestock Farming 2015. Milan-Italy. Pp. 1–8.
- Rojano, F., Bournet, P.-E., Hassouna, M., Robin, P., Kacira, M. and Choi, C. Y. (2015). Modelling heat and mass transfer of a broiler house using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*. 136(0): 25–38.
- Seo, I.-H., Lee, I.-B., Moon, O.-K., Kim, H.-T., Hwang, H.-S., Hong, S.W., Bitog, J., Yoo, J.- I., Kwon, K.-S., Kim, Y.-H. and Han, J. W. (2009). Improvement of the ventilation system of to naturally ventilated broiler house in the cold season using computational simulations. *Biosystems Engineering*. 104 (1): 106–117.
- Smith, J. H., Boon, C. R., Webster, A. J. F. and Wathes, C. M. (1999). Measurements of the effect of animals on airflow in an experimental piggery. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 72(2): 105–112.
- Song, S.-H., Lee, I.-B., Hwang, H.-S., Hong, S.-W., Seo, I.-H., Bitog, J.P. , Kwon, K.-S. and 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). Pp 1–10.
- Vaca A., L. (2003). *Producción Avícola*. 1^{era} Edición. EUNED.

Capítulo 2: El diseño de las instalaciones de pollos de carne y su influencia en las condiciones de confort de los animales

Guerra-Galdo E.^{1,2*}, Calvet S.¹, López A.³, Estellés F.¹

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

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

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

An adapted version of this chapter has been published as:
ITEA (2016), 112(4): 405-420

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.

EVALUATION OF ALTERNATIVES IN BROILERS HOUSE FOR IMPROVING THE COMFORT OF ANIMALS

Summary

Broiler chicken performance is highly affected by environmental conditions inside the barn. The main parameters that must be considered in terms of thermic comfort 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. Computational 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.

Keywords: air velocity, relative humidity, temperature, computational fluid dynamics, broilers.

2.1 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 importancia 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.

2.2 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.

2.3 Resultados y Discusión

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

2.3.1.1 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 temperatura 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 (Medeiros 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.

2.3.1.2 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°C 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 del 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 hematocritos 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.

2.3.1.3 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 conllevan 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.

2.3.1.4 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 2,0 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 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 Wiley (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.

2.3.1.5 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 conversión 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 2.1)

$$ITH = 0,85 T_{bs} + 0,15 T_{bh} \quad (2.1)$$

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 (THVI, por sus siglas en inglés) 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.

2.3.2 El uso de CFD en el diseño y evaluación de alojamientos

2.3.2.1 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 diseñadores 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.

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

a) 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- ϵ , y debido a su convergencia favorable y precisión razonable, en sistemas de ventilación natural y mecánica surgen el RNG k- ϵ y el Realizable k- ϵ (Osorio et al., 2013; Bartzanas et al., 2004). Este último ha demostrado mayor predicción de flujos con respecto al Standard k- ϵ . 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- ϵ 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.

b) 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 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 2.1 y 2.2) 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 2.1).

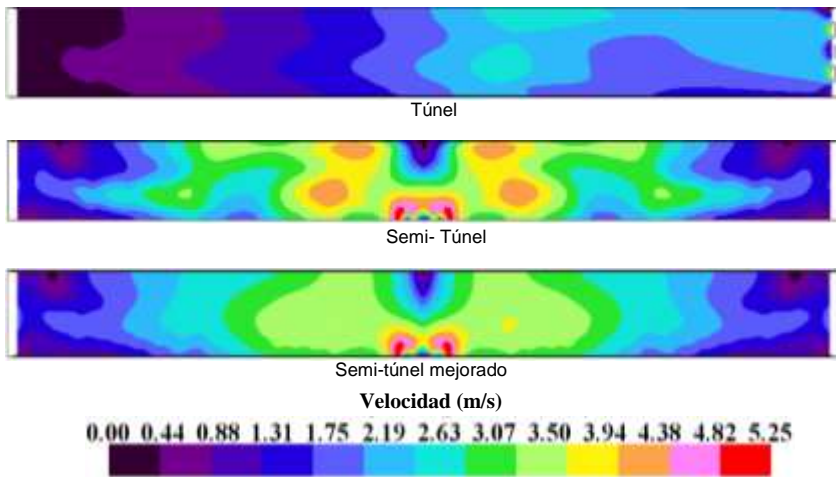


Figura 2.1. Distribución de velocidad de aire en tres configuraciones de nave: túnel, semi-túnel y semi-túnel mejorado de sección longitudinal, a 0,20 m de altura. Fuente: Guerra-Galdo et al. (2015)

Tabla 2.1. 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

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
Semi-túnel	0,83 \pm 0,32	23,45 \pm 0,82	80,05	93,03
Semi-túnel mejorado	0,89 \pm 0,30	23,37 \pm 0,79	88,45	94,52

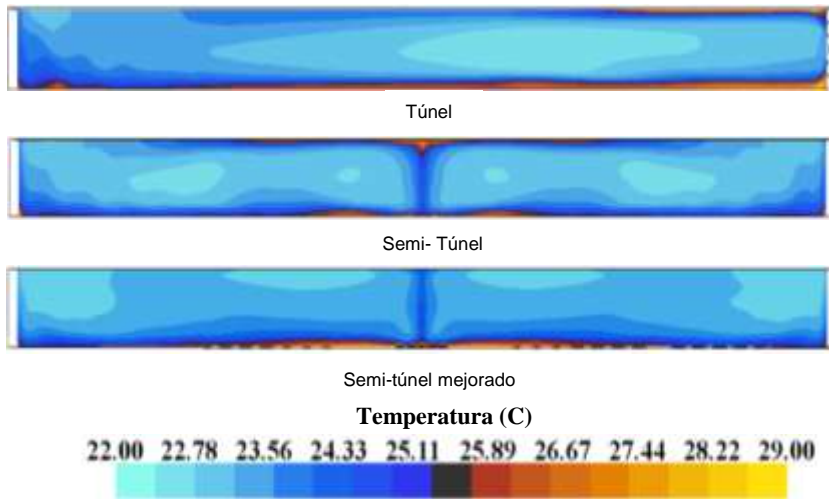


Figura 2.2. Distribución de temperatura en tres configuraciones de nave: túnel, semi-túnel y semi-túnel mejorado de sección longitudinal, a 0,20 m de altura. Fuente: Guerra-Galdo et al. (2015)

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 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 2.2 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.

c) Validación de los modelos.

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

Tabla 2.2. Estudios de ventilación en naves avícolas con diferente sistema de ventilación analizadas con Dinámica de Fluidos Computacional CFD y experimentalmente.

Autores	Dimensiones L x a x h (m)	Dimensión	Código	Modelo turbulento	Tipo de ventilación
Bustamante et al., 2015	120 x 12,2 x 2,2	3D	Gambit Fluent	RNG k- ε	Túnel depresión
Kwon et al., 2015	70 x 13,5 x 3,5 h ₁ , 5,5 h ₂	3D	Ansys Fluent	RNG k- ε	Transversal depresión
Rojano et al., 2015	14 x 6 x 1,8 h ₁ , 2,6 h ₂	2D	Ansys	Realizable k- ε	Ventilación natural
Osorio et al., 2015	110 x 14 x 2,45	3D	Ansys	Estándar k- ε	Túnel depresión
Bustamante et al., 2013	110 x 12,6 x 2,6 h ₁ , x 4 h ₂	3D	Gambit Fluent	Estándar k- ε	Transversal depresión
Osorio et al., 2013	110 x 14 x 2,5	3D	Ansys ICEM	Estándar k- ε	Túnel depresión
Zajicek y Kic, 2013	41 x 17,2 x 4	2D	Ansys	RNG k- ε	Túnel
Mostafa et al., 2012	42 x 9,0 x 2,2 h ₁ , 3,7 h ₂	3D	Gambit	RNG k- ε	Túnel depresión
Osorio et al., 2011	126 x 12,8 x 3	2D	Ansys	Estándar k- ε	Túnel- presión negativa, positiva
Song et al., 2010	50 x 12 x 4,8	3D	Fluent	LES	Túnel depresión
Seo et al., 2009	75 x 12 x 2,3 h ₁ , 4,2 h ₂	3D	Gambit, Fluent	RNG k- ε	Ventilación natural
Blanes-Vidal et al., 2008	68,8 x 15,0 x 2,36 h ₁ , 3,94 h ₂	3D	Gambit Fluent	Estándar k- ε	Transversal depresión

L: largo; a: ancho; h: altura; h₁: altura de pared; h₂ altura en cumbre

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.

2.4 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.

2.5 Agradecimientos

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

2.6 Referencias

- Abreu N., V. M. and de Abreu, P. G. (2011). Os desafios da ambiência sobre os sistemas de aves no Brasil. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 40: 1–14.
- Bartzanas, T., Boulard, T. and 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. and 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., Lee, I-B., Bartzanas, T., Norton, T., Is-Woon, H., Il-Hwan, S., Banhazi, T., Liberati, P., Marucci, A. and Zhang, G. (2013). Modelling of ammonia emissions from livestock buildings ventilated naturally. Part 2: CFD modelling. *Biosystems Engineering*. 116: 259–275.
- Blanco, O. A., Gous, R. M. and Savage, M. J. (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, O. A., Gous, R. M. and Savage, M. J. (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. and Torres, A. G. (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. and Johnson, K. G. (1973). Glossary of terms for thermal physiology. *Journal of Applied Physiology*. 35(6): 941–961.
- Buffington, D. E., Colazzo-Arocho, A. and Canton, G. H. (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. and Torres, A. G. (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, A. G. and 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, C. M. and Gates, R. S. (2004). Heat and moisture production of poultry and their housing systems: pullets and layers. *Agricultural Biosystems Engineering*. 10: 286–299.
- Cordeiro, M. B., de Fátima, F.T.I., da Silva, J. N., Vigoderis, R. B., de Carvalho, P. F. and Cecon, P.R. (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, K. E., Kiepper, Ritz, C. W., McLendon, B. L. and Wilson, J. L. (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, F. A., Osorio, S. J. A., Barreto, M. L., Martin, S. and Arêdes, M. M. (2014). Evaluation of a heating system in poultry houses using a CFD model. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín* 67(2): 7355–7363.
- Dozier, W. A., Purswell, J. L. and Branton, S. L. (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, M. M. and Márquez, M. G. S. (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, S. M. and Restrepo, B. L. (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, R. L. (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. and Portier, K. M. (2005). Sensible and latent heat productions from broilers in laboratory conditions. *Turkish Journal Veterinary Animal Sciences*. 29: 635–643.
- Guerra-Galdo, E. H., Calvet, S. S., Estellés, B. F. and López-Jiménez, P. A. (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. and 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, G. J. C., Smit, J. E. and 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. and Sahan, U. (2006). Effects of cold stress on broiler performance and ascites susceptibility. *Journal Animal Science*. 19(5): 734–738.

- Kwon, K.-S., Lee, I. B., Zhang, G. Q. and 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, I. B., Sase, S. and Sung, S. H. (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. and 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, H.F., Du, R., Gu, X. H., Zhang, Z. Y., Buyse, J. and 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, B. D., Simmons, J. D. and May, J. D. (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. Gerzwald. Pp 246.
- Medeiros, C. M., da Costa, B. F., de Oliveira, R. F. M., Tinôco, I. de F. F., Albino, L. F. T. and Cecon, P. R. (2005a). Efeitos da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar em frangos de corte. *Engenharia na Agricultura*. 13(4): 277–286.
- Medeiros, C. M., da Costa, B. F., de Oliveira, R. F. M., Tinôco, I. de F. F., Albino, L. F. T. and Cecon, P. R. (2005b). Índice térmico ambiental de produtividade para frangos de corte. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 9(4): 660–665.

- Mickelberry, W. C., Rogler, J. C. and Stadelman, W. J. (1966). The influence of dietary fat and environmental temperature upon chick growth and carcass composition. *Poultry Science*. 45: 313–321.
- Moraes, V. M. B., Malheiros, R. D., Furlan, R. L., Bruno, L. D. G., Malheiros, E. B. and 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, I. B., Song, S. H., Kwon, K. S., Seo, I. H., Hong, S. W., Hwang, H. S., Bitog, J. P. and Han, H. T. (2012). Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation system. *Biosystems Engineering*. 112(4): 293–303.
- Mount, L. E. (1968). *The climatic physiology of the pig*. Edward Arnold, London.
- Olanrewaju, H. A., Purswell, J. L., Collier, S. D. and Branton, S. L. (2010). Effect of ambient temperature and light intensity on physiological reactions of heavy broiler chickens. *Poultry Science*. 89: 2668–2677.
- Oliveira, R. F., Lopes, D. J., Teixeira, de A. M., Ferreira, R. A., Marçal, V. V. R. and Segatto, C. P. (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.
- Osorio S., J. A., Ferreira, T. I., Oliveira, R., Aredes, M. and De Paula, M. O. (2011). Modeling and experiential validation to estimate the energy balance for a poultry house with misting cooling. *Dyna*. 170: 167–174.
- Osorio, H. R., Ferreira, T. I. F., Osorio, S. J., Oliveira, R. K. S. and Guerra, G. L. M. (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, H. R, Guerra, G. L. M., Barreto, M. L. and 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, E. O. (2014). Efecto de la temperatura y de la velocidad del aire en naves de pollos. *PV ALBEITAR*. 29: 109–1111.
- Purswell, J. L., Dozier III, W. A., Jeremiah, D. D., Olanrewaju, H. A., Xin, H. and Gates, R. S. (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, F. N. and Lott, B. D. (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, K. R. and Choi, C. Y. (2015). Modelling heat and mass transfer of a broiler house using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*. 136: 25–38.
- Seo, I. H., Lee, I. B., Moon, O. K., Kim, H. T., Hwang, H. S., Hong, S. W., Bitog, J., Yoo, J. I., Kwon, K. S., Kim, Y. H. and Han, J. W. (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, J. D., Lott, B. D. and May, J. D. (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, J. P., Kwon, K.-S. and 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. and 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. and 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 mesorregião do Noroeste e norte pioneiro paranaense. *Revista Acadêmica Curitiba* 5(4): 385–390.
- Temin, S., Chagneau, A. M., Guillaumin, S., Michel, J., Peresson, R. and Tesseraud, S. (2000). Does excess dietary protein improve growth performance and carcass characteristics in heat-exposed chickens?. *Poultry Science*. 79(3): 312–317
- Thom, E. C. (1959). The discomfort index. *Weatherwise*. 12(1): 57–60.
- Wiley O., W. J. (2012). Improving commercial broiler attic inlet ventilation through data acquisition coupled with CFD analysis. Master's thesis, Mississippi State University. EE. UU.
- Yahav, S., Straschnow, A., Luger, D., Shinder, D., Tanny, J. and 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. and Shinder, D. (2001). Air velocity alters broiler performance under harsh environmental conditions. *Poultry science*. 80(6): 724–726.
- Yahav, S. and Hurwitz, S. (1996). Induction of thermotolerance in male broiler chickens by temperature conditioning at an early age. *Poultry Science*. 75: 402–406.
- Yanagi, J. T., Soares, L. W. and Rabelo, G. (2014). Predicting rectal temperature of broiler chickens with artificial neural network. *Journal of Engineering & Technology*. 14(5): 29–34.
- Zajicek, M. and Kic, P. (2013). Improvement of the broiler house ventilation using the CFD simulation. *Engineering for rural development*, 23.-24 mayo, Jelgava. Pp 198–202.

Capítulo 3: Review of livestock buildings modelled with CFD techniques

Guerra-Galdo E.^{1,2*}, Estellés F.¹, Calvet S.¹, López A.³,

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

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

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

An adapted version of this chapter has been accepted as:
International Journal of Energy and Environment (2017), Nº 8,
Agosto

Abstract

The control of the indoor environmental factors (air velocity, temperature, humidity) allows improving the thermal comfort area in automated farms. A deep knowledge of these factors and how they are distributed in the farm allows reducing the effects of thermal stress. In this article, the authors review the use of computational fluid dynamics (CFD) models in the climate control of livestock farms and propose recommendations obtained from different farm models. The use of CFD tools and the validation with experimental results has been widely evaluated in the literature. Both real and reduced, scaled farms were evaluated by different authors, regarding the behaviour of airflow, the appropriateness of turbulence models and the use of measurement equipment. Natural and mechanical ventilation have different challenges in practice, and therefore both have been subject of study. Occupied and empty farms were used for validation, and different CFD analysis were used to determine the distribution of air velocity, temperature and humidity. By means of these analyses the environmental parameters have been evaluated as a function of changing farm design and management: the change of building dimensions, the roof geometry, the height of the air inlet openings, the opening angle of air inlets, and the presence of equipment and animals in different sections of the farm.

Keywords: Farm, CFD, air velocity, real scale, animals.

3.1 Introduction

The environmental factors, the design of farms and their operation have a large influence on animal production, particularly in intensive production systems. It is necessary to control the air velocity, temperature and humidity to maintain the thermal comfort area at animal level. Computational fluid dynamics (CFD) allows understanding the behaviour of gaseous fluids such as the air exchanged in the farm. It also offers valuable simulations of the heat transfer, ammonia and carbon dioxide concentrations gradients inside and outside the building (Bjerg, 2016). Several researchers have analysed the indoor environmental conditions of livestock buildings using different available experimental data at animal level. However, CFD tools can go beyond the limitations of measurements, and therefore they constitute a valuable tool for designing and analysing the airflow behaviour and heat flux modelling at farm level. From a practical point of view, using CFD tools may allow improving the indoor environment of livestock farms in terms of building design and farm operation. Therefore, the use of CFD techniques may contribute to reduce the cost of production and to increase the productivity of the animals.

The livestock domain model is affected by the mesh design and by the turbulence model. The performance of CFD simulations is evaluated in the validation processes, which is influenced by the scale of the building and the consideration of the animals, among others. In the literature, a wide range of situations has been modelled with CFD. The objective of this review study is to analyse how CFD has been used in livestock buildings, in terms of types of buildings, model characteristics and validation.

3.2 Methodology

A comprehensive literature review was conducted regarding the use of CFD to model the environmental conditions of livestock farms in different animal species. Additional aspects revised in this survey related to the type of ventilation (natural or mechanical), the scale of the model (full scale or scaled

experiments), the type of mesh, the turbulent model used, the validation of measurements and the recommendation of future improvements. Selection criteria of publications were the publication in indexed journals and the inclusion of most of the factors mentioned before.

The literature survey was conducted by means of the Web of Knowledge, and a summary table was obtained. Finally, summary statistics of the aforementioned factors were obtained and the results were discussed.

3.3 Results and discussion

As a result of the literature search, a total of 30 references were selected. These references are listed in Table 3.1, together with the characteristics of the study (animal species, type of ventilation, scale of the model, type of mesh, the turbulent model and the validation of measurements).

From the survey, it can be observed that most research has focused on improving the ventilation in broiler buildings, although research is also available in other species such as pigs and cows. This major interest in broiler buildings is related to the sensitivity of broilers to adverse temperatures, and is also conditioned because of the relative simplicity of broiler buildings, compared with other livestock houses.

3.3.1 Scales and dimensions

Both full and scaled simulations can be found in the literature. Full farm models represent the general indoor environment of a farm and provide relevant information of the airflow distribution, which may be very valuable for building design. On the contrary, representing a model of the whole farm building requires important efforts in the model design, particularly in defining the model mesh. Full farm models are therefore used in the literature to establish alternative design options or evaluating farm operation strategies.

Scaled simulations represent a particular farm region of interest. Although this analysis do not provide information of the whole farm measurement, it allows focusing on particular research aspects, for example heat transfer from the animals, animal disturbance of the airstream or modelling gaseous emissions from the animals. This is an interesting option for laboratory validation, since laboratory dimensions are normally smaller than those of commercial farms. Farm scaling is also interesting for representing a whole farm under laboratory conditions. This has been mostly used for validation of naturally ventilated buildings under controlled wind tunnel conditions.

Validation of CFD models is also essential to ensure valid applications. The scale and dimension of models also determine the possibility of validation. Measurement equipment of the most relevant parameters (air temperature, relative humidity and velocity) may interfere with the airstreams in the farm. The presence of animals may also be an obstacle for validation, as a consequence of the disturbance of animals and the installations. Some measurement devices (e.g. ultrasonic anemometers) may have relatively large dimensions, which may impede a practical installation in the farm. Validation of full scale models poses some difficulty, particularly in naturally ventilated buildings. For this reason, scaled models allow concentrating measurement efforts in particular areas of interest (e.g. the performance of fans or windows), although disturbances of measurement devices may be of higher relevance.

3.3.2 Analysis of CFD simulations

CFD simulations were performed at many different scales. The computational domain was based on an improvement of the structural characteristics of the farm and by modifying the locations of windows, fans, air ducts, heaters, humidifiers and chimneys. The improvements of poultry farms with mechanical and natural ventilation have based on the analysis of air velocity, temperature, humidity and concentrations of CO₂ and ammonia at animal level. Different results from measurements at farm were compared with those ones modified in different buildings models.

Table 3.1. Short summary of studies CFD by species

Ref	Animal	Ventilation	Scale	CFD Code	Mesh type	Turbulent model	Measurements
Bjerg et al., 2016	Pigs	Natural	Scaled	Fluent	Hexahedral	Standard k-ε	Temperature, air velocity, water content
Li et al., 2016	Broilers	Mechanical	Scaled	Fluent	Unstructured tetrahedral	SST k-ω	Heat transfer and air velocity
Li et al., 2016	Pigs	Mechanical	Scaled	Ansys-Fluent	Unstructured tetrahedral and prismatic	SST k-ω	Airflow speed, heat transfer
Bustamante et al., 2015	Broilers	Mechanical	Full	Fluent	Tetrahedral (Gambit)	RNG k-ε	Temperature and velocity
Kwon et al., 2015	Pigs	Mechanical	Scaled	Ansys	hexahedron and tetra-hybrid mixed shapes (Gambit)	RNG k-ε	Ventilation rate, temperature, pressure
Osorio et al., 2015	Broilers	Mechanical	Full	Ansys	Tetraedral	Standard k-ε	Temperature, humidity, air velocity
Rojano et al., 2015	Broilers	Natural	Full	Ansys	Orthogonal	Realizable k-ε	Temperature, humidity, air velocity
Oliveira et al., 2014	Broilers	Natural	Full	Ansys	Tetraedral	Standard k-ε	Air velocity and temperature
Bustamante et al., 2013	Broilers	Mechanical	Full	Fluent	Tetrahedral (Gambit)	Standard k-ε	Temperature and velocity

Ref	Animal	Ventilation	Scale	CFD Code	Mesh type	Turbulent model	Measurements
Osorio et al., 2013	Broilers	Mechanical	Full	Ansys ICEM	Tetraedral	Standard k-ε	Air temperature and velocity
Seedorf et al., 2013	General farm	Natural	Scaled	CFD	Tetrahedral	Turbulent k-ε	Air pollutant and wind trajectories
Tong et al., 2013	Pigs	Natural	Scaled	Fluent	Hexahedral	S k-ε and RNG	Air velocity
Zajicek and Kic, 2013	Broilers	Natural	Full	Ansys	Structured	RNG k-ε	Temperature, velocity
Mostafa et al., 2012	Broilers	Natural	Full	Fluent	Hexahedron and tetra-hybrid mixed shapes (Gambit)	RNG k-ε	External wind velocity, relative humidity, Tracer gas decay method
Seo et al., 2012	Pig	Mechanical	Full	Fluent	Hexahedron mesh (Gambit)	RNG k-ε	Air and surface temperature, relative humidity, air velocity, gas concentrations
Wu et al., 2012	Cows	Natural	Scaled	Fluent	Structured	Standard k-ε	Temperature, air velocity, gas concentrations
Wu et al., 2012	Pigs	tunnel	Full	Fluent	Structured	Standard k-ε, RNG, RNS	Air velocity and CO ₂ concentration
Osorio et al., 2011	Broilers	Mechanical	Full	Ansys	Tetraedral	Standard k-ε	Outdoor temperature and velocity
Norton et al., 2010	Cows	Natural	Scaled	STAR-CCM+	Hexahedron	Standard k-ε	Ventilation rate

Evaluación de alternativas en las instalaciones avícolas de pollos de carne para la mejora de las condiciones de confort

Ref	Animal	Ventilation	Scale	CFD Code	Mesh type	Turbulent model	Measurements
Song et al., 2010	Broilers	Mechanical	Full	Fluent	Tetrahedron (Gambit)	LES	Air velocity
Seo et al., 2009	Broilers	Natural	Full	Fluent	Hexahedron and tetra-hybrid mixed shapes (Gambit)	RNG k-ε	Temperature, air velocity, gas concentrations
Blanes-Vidal et al., 2008	Broilers	Mechanical	Full	Fluent	Unstructured (Gambit)	Standard k-ε	Temperature, air velocity, pressure
Rong et al., 2008	General farm	Mechanical	Scaled	Fluent	Hexahedral	Standard k-ε	CO ₂ concentration, emission rate and tracer gas method
Gebremedhin et al., 2003	Cows	Natural	Full	Phoenics	Tetrahedral, hexahedral	Standard k-ε	Heat transfer
Norton et al., 2003	Cows	Natural	Full	Phoenics	Orthogonal	Standard k-ε	Air velocity
Sun et al., 2002	Pigs	Mechanical	Scaled	Fluent	Structured	Standard k-ε	Air velocity and ammonia distribution
Harral and Boon (1997)	Broilers	Mechanical	Scaled	Phoenics	Non-orthogonal	Standard k-ε	Velocity and turbulence energy distribution
Mistriotis et al., 1997	Broilers	Natural	Full	Phoenics	Finite volume (Gambit)	Standard k-ε	Air velocity and temperature
Hoff et al., 1992	General farm	Mechanical	Scaled	In-hse	Structured	FTKE, LRKE, LBLR models	Air velocity and temperature

The incorporation of animals in CFD models in natural farms was used in cows, pigs and broilers. Mechanical ventilated farms with broilers were analysed under the different production conditions. In a simplified way, broilers may be modelled as spheres, which can be used to calculate the convective heat loss of large number of animals under the production conditions (Bustamante et al., 2013).

Computational grids discretise the entire physical domain calculation for 3D and 2D studies. These studies can incorporate unstructured meshes composed by polyhedral (Norton et al., 2009), tetrahedral (Osorio et al., 2015; Song et al., 2010; Blanes-Vidal et al., 2008), hexahedral elements (Tong et al., 2013) (with the denser mesh in the inlet, outlet and walls). Furthermore, triangular prisms for ducts and roofs were used (Tong et al., 2013; Seo et al., 2012) changing the airflow gradients for different configurations (Kwon et al., 2015; Song et al., 2010; Tong et al., 2013). These different configurations included a mesh sensitivity analysis (coarser, medium, fine, and very fine mesh). In this article and for the calculation, it was selected the medium resolution in Gambit options (Ansys). Lee (2007), Seo (2009, 2012) and Blanes-Vidal (2008) concluded that hexagonal meshes have better results with less errors than tetrahedral meshes. On the contrary, Osorio (2015) obtained the best results using tetrahedral meshes. In this line, tetrahedral volume elements were very useful in order to maintain the high quality in regions/volumes in different ways. These tetrahedral volume elements enabled more complex geometries in order to discretise the regions of interest, even though they are required more nodes than in hexahedral meshed. Larger file size and longer computation time and fine results were obtained using tetrahedral volume elements (Oliveira et al., 2014).

Unstructured tetrahedral grids were used to characterise the heat generation of a broiler. This mesh is very fine from the surface of the body (Li et al., 2016) and to form the face, body, and legs (Guerra-Galdo et al., 2016). Pig house models included a large number of pigs and only used hexahedron meshed. In this pig house models; the computational domain was divided into

numerous hexahedron volumes and subdivided into corridors, pig pens, steel bars, partition walls, pigs and vent openings. Seo (2012) used finer grids obtaining accurate predictions. However, more nodes and longer simulation time was required in a larger file size than the building design without animals of Guerra (2016) (Figure 3.1).

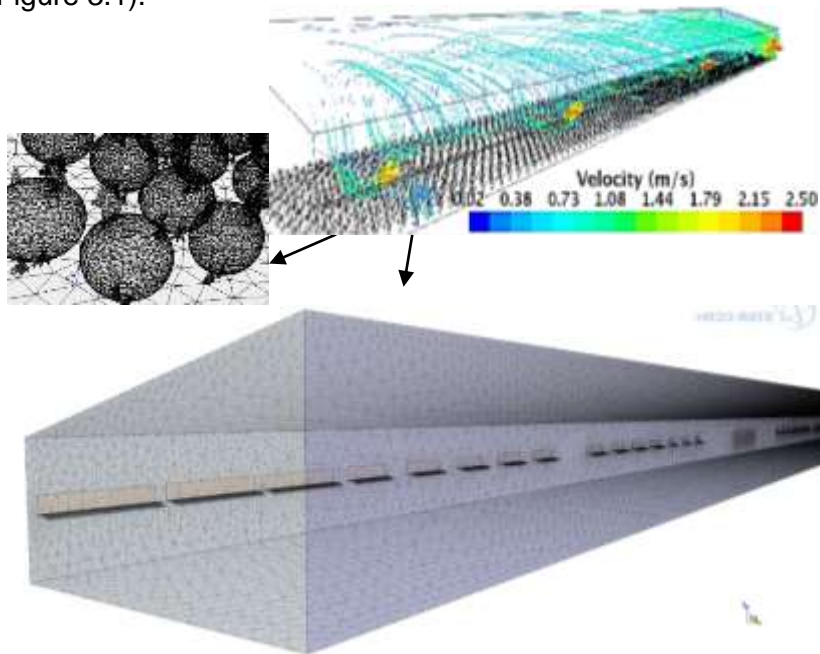


Figure 3.1. Fully poultry building mesh including the animals.

3.3.3 Turbulence models

As shown in Table 3.1, the turbulent models commonly used to analyse the air velocity, temperature, ammonia and carbon dioxide concentration in livestock buildings of broilers, pigs and cows are the Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) models. RANS use mathematical techniques to predict mean air flow conditions and to calculate the average surface from a scalar transfer (Li et al., 2016). In this article, the authors compare several closure turbulence models to solve these non-linear equations that affect the results of air movement and temperature. Current RANS turbulence models used for this

purpose are the standard k- ϵ , the Renormalization-group (RNG) k- ϵ , the Realizable k- ϵ and the Reynolds stress model (RSM). The RNG k- ϵ and the Realizable k- ϵ predict well the conditions of the air flow (Tong et al., 2013) in 1:12.5 scaled models. RNG and RKE models have similar results for all the meshes while standard k- ϵ (SKE), standard k- ω (SKW) and shear stress transport k- ω (KWSST) models are grid-dependent.

Regarding to the consulted references, the standard k- ϵ turbulence describes ventilating flow-field with high accuracy, easy convergence and computational stability (Norton et al., 2010). Sometimes, this model can be inadequate because it assumes an isotropic turbulent viscosity (Harral and Boon, 1997) and in small scale domains it needs more simulation time for the final results. As referred, in the case of floor opening fully open a fluctuation of 16.7% is found in comparison to RKE, RNG, SKW, and KWSST models (Tong et al., 2013).

The Renormalization-group RNG k- ϵ turbulence model was developed to solve inaccuracies in the standard k- ϵ turbulence models; the dissipation rate and the effect of rotational flows on the turbulence is in this case well represented. In naturally ventilated broiler buildings, Lee (2007) compared the RNG k- ϵ with other turbulence models. In this study (Lee et al., 2007), they quantify the different errors: a 21% in the RNG k- ϵ turbulence model, a 19.6% in Reynolds stress turbulence model, a 20.8% in the Standard k- ϵ turbulence model and 10.9% in Realizable k- ϵ turbulence model. Seo (2009) found the highest accuracy when using the RNG k- ϵ turbulence model with a minimum error of -6.2% (Seo et al., 2009). The turbulence model RNG k- ϵ , was recommended for predicting airflow patterns, air velocities near of cold and hot wall, for the transport of pollutants in large rooms. It allows to predict flows with big streamline curvature (for example in recirculation airflow phenomena in swine buildings or cows) and to calculate the heat flux generated by the birds since it is similar to the experimental results (Kwon et al., 2015; Tong et al., 2013; Lee et al., 2007).

As shown in Figure 3.1, the realizable k- ϵ turbulence model is the most recommended in the consulted literature to describe the

turbulence and the velocity distribution (Osorio et al., 2013). This turbulence model satisfies certain mathematical constraints on the Reynolds stresses, and it is consistent with the physics of turbulent flows. Unfortunately, RSM requires additional memory and calculating time because of the increased number of the transport equations for Reynolds stresses (Lee et al., 2007).

In the different poultry building types, the effectiveness of ventilation relies on the location of inlet windows and exhaust fans, as well as the presence of air diffusers and curtains inside the building. In this way, ventilation systems and the nature of the ventilation (natural or mechanical) (Cao et al., 2014) affects the size model in the airflow patterns, in the temperature stratification. Thus, the relationship between the whole building domain and each air inlet opening is of relevant importance, as it defines the path of the airflow streams (Kwon et al., 2015).

3.4 Conclusion

As regards to the consulted references, many measured results that have been obtained in real and small scale. Validation in published studies show a general agreement with the CFD results. From the literature, it can be concluded that scale models may help in conducting more efficient research on farm design, because they give an idea of the structure of the farm and fluid behaviour. Scaled models also help in representing particular aspects of the farm, for example focusing on the animal heat transfer. Full scale CFD models also confirm that these analyses perform satisfactorily under real farm conditions.

3.5 References

- Bjerg, B. (2016). CFD prediction of the effective temperature in the laying area of pig pens with partly solid floor. CIGR-AgEng conference, Aarhus- Denmark. Pp. 1–6.
- Blanes-Vidal, V., Guijarro, E., Balasch, S. and Torres, A. G. (2008). Application of computational fluid dynamics to the prediction of airflow in a mechanically ventilated commercial poultry building. Biosystem Engineering.

100(1): 105–116.

- Bustamante, E., García-Diego, F.-J., Calvet, S., Estellés, F., Beltrán, P., Hospitaler, A. and Torres, A. (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., Torres, A. and Hospitaler, A. (2015). Measurement and numerical simulation of air velocity in a tunnel-ventilated broiler house. *Sustainability*. 7(2): 2066–2085.
- Cao, G., Awbi, H., Yao, R., Fan, Y., Sirén, K., Kosonen, R. and Zhang, J. (2014). A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings. *Build. Environ.* 73: 171–186.
- Gebremedhin, K. G. and Wu, B. X. (2003). Characterization of flow field in a ventilated space and simulation of heat exchange between cows and their environment. *Journal of Thermal Biology*. 28(4): 301–319.
- Guerra-Galdo, E., Calvet, S., López, A. and Estellés, F. (2016). El diseño de las instalaciones de pollos de carne y su influencia en las condiciones de confort de los animales. *ITEA*. 112: 405–420.
- Harral, B. B. and Boon, C. R. (1997). Comparison of predicted and measured air flow patterns in a mechanically ventilated livestock building without animals. *Journal Agricultural Engineering Research*. 66(3): 221–228.
- Hoff, S. J., Janni, K. A. and Jacobson, L. D. (1992). Three-dimensional buoyant turbulent flows in a scaled model, slot-ventilated, livestock confinement facility. *Agricultural and Biosystems Engineering*. 35(2): 671–686.
- Kwon, K., Lee, I., Zhang, G. Q. and 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. *Biosyst. Eng.* 136: 51–68.
- Lee, I., Sase, S. and Sung, S. (2007). Evaluation of CFD accuracy for the ventilation study of a naturally ventilated broiler house. *JARQ.* 41(1): 53–64.
- Li, H., Rong, L., Zong, C. and Zhang, G. (2016). A numerical study on forced convective heat transfer of a chicken (model) in horizontal airflow. *Biosystem Engineering.* 150: 151–159.
- Li, H., Rong, L. and Zhang, G. (2016). Study on convective heat transfer from pig models by CFD in a virtual wind tunnel. *Computers and Electronics in Agriculture.* 123: 203–210.
- Mistriotis, T. J. (1997). Computational Fluid Dynamics as a tool for the analysis of ventilation and indoor microclimate. *Netherlands Journal of Agricultural Science.* 45: 81–96.
- Mostafa, E., Lee, I.-B., Song, S.-H., Kwon, K.-S., Seo, I.-H., Hong, S.-W., Hwang, H.-S., Bitog, J. P. and Han, H.-T. (2012). Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation system. *Biosystem Engineering.* 112(4): 293–303.
- Norton, T., Grant, J., Lenehan, J. J., Fallon, R. J. and Sun, D. (2003). Dynamics (CFD). *Biosystems Engineering.* 139–180.
- Norton, T., Grant, J., Fallon, R. and Sun, D. W. (2010). A computational fluid dynamics study of air mixing in a naturally ventilated livestock building with different porous eave opening conditions. *Biosystems Engineering.* 106(2): 125–137.
- Norton, T., Grant, J., Fallon, R. and Sun, D. W. (2010). Assessing the ventilation performance of a naturally ventilated livestock building with different eave opening conditions. *Computers and Electronics in Agriculture.* 71(1): 7–21.

- Oliveira Rocha, K. S., Ferreira Tinôco, I. de F., Helvecio Martins, J., Osorio Saraz, J. A. and Arêdes Martins, M. (2014). Modeling and simulation of internal environment conditions in high-density poultry houses with ventilation using computational fluid dynamics. International Conference of Agricultural Engineering. Zurich 6-10 July, 2014. Pp 1–8.
- Osorio Saraz, J. A., Ferreira Tinôco, I. D. F., Oliveira Rocha, K. S., Âredes Martins, M. and Oliveira de Paula, M. (2011). Modeling and experimental to estimate the energy balance for a poultry house with misting cooling. *Dyna*. 78(170): 167–174.
- Osorio Saraz, J. A., Âredes Martins, M., Oliveira Rocha, K. S., Silva Machado, N. and Ciro Velasques, H. J. (2013). Use of Computational Fluid Dynamics to simulate temperature distribution in broiler houses with negative and positive tunnel type ventilation systems. *Revista U.D.C.A Atualidade y Divulgação Científica*. 16(1): 159–166.
- Osorio, R., Guerra, L., Barreto, L. and 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.
- Rojano, F., Bournet, P.-E., Hassouna, M., Robin, P., Kacira, M. and Choi, C. Y. (2015). Modelling heat and mass transfer of a broiler house using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*. 136: 25–38.
- Rong, L., Nielsen, P. V., Tong, G., Ravn, P. and Zhang, G. (2008). Computational Fluid Dynamics study on the influence dioxide of in patterns on carbon distribution scaled. *AgEng International Conference on Agricultural Engineerings*. 23-25 June 2008, Greece. Pp 1-9.
- Seedorf, J. (2013). Biological exhaust air treatment systems as a potential microbial risk for farm animals assessed with a computer simulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 93(12): 3129–3132.

- Seo, I.-H., Lee, I.-B., Moon, O.-K., Kim, H.-T., Hwang, H.-S., Hong, S.-W. and Han, J.-W. (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.
- Seo, I. H., Lee, I. B., Moon, O. K., Hong, S. W., Hwang, H. S., Bitog, J. P., Kwon, K.-S., Ye, Z. and Lee, J. W. (2012). Modelling of internal environmental conditions in a full-scale commercial pig house containing animals. *Biosystems Engineering*. 111(1): 91–106.
- Song S.-H. , Lee I.-B., Hwang H.-S., Hong S.-W., Seo I.-H., Bitog J.P., Kwon K.-S. and 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 june 2010, Québec-Canada. Pp 1–9.
- Sun, H., Stowell, R. R., Keener, H. M. and Michel, F. C. (2002). Two-Dimensional Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling of air velocity and ammonia distribution in a high-rise hog building. *Agricultural Engineering Building*. 45(5): 1–10.
- Tong, G., Zhang, G., Christopher, D. M., Bjerg, B., Ye, Z. and Cheng, J. (2013). Evaluation of turbulence models to predict airflow and ammonia concentrations in a scale model swine building enclosure. *Computers & Fluids*. 71: 240–249.
- Wu, W., Zhai, J., Zhang, G. and Nielsen, P. V. (2012). Evaluation of methods for determining air exchange rate in a naturally ventilated dairy cattle building with large openings using computational fluid dynamics (CFD). *Atmospheric Environment*. 63: 179–188.
- Wu, W., Zhang, G., Bjerg, B. and Nielsen, P. V. (2012). An assessment of a partial pit ventilation system to reduce emission under slatted floor – Part 2: Feasibility of CFD

prediction using RANS turbulence models. *Computers and Electronics in Agriculture*. 83: 134–142.

Zajicek, M. and Kic, P. (2013). Rural Development 2013. In *The SIXTH International Scientific Conference Rural Development 2013*. *AKADEMIJA*. 6: 151–156.

Capítulo 4: CFD model for ventilation assessment in poultry houses with different distribution of windows

Eva H. Guerra-Galdo¹, Salvador Calvet Sanz¹, Fernando Estellés Barber¹, P. Amparo López- Jiménez ²

¹ Institute of Animal Science and Technology, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n. 46022 Valencia. Spain

² Hydraulic and Environmental Engineering Department. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n. 46022 Valencia. Spain

An adapted version of this chapter has been published as:
International Journal of Energy and Environment (2015), 6(5):
411-424

Abstract

The design of structures for animal husbandry has energy and environmental implications. Particularly, the design of broiler houses should consider the comfort of animals in different situations, which is crucial for their proper development. Building geometry and distribution of fans and windows determine critically the ventilation flows and temperature distribution. The use of fluid analysis techniques can be of valuable help in the initial phases of the design of farms, because potential alternatives may be explored. In this study, Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations were used to evaluate the ventilation and temperature distribution in three tunnel, mechanically ventilated broiler houses with identical geometry but different distribution of inlet windows and exhaust fans. The three distributions were: 1) Tunnel (fans at the end of the building); 2) Semi-tunnel (fans at the middle of the building); and 3) Improved Semi-tunnel (with improved window distribution). For each distribution, air velocity and temperature at the height of the broilers are evaluated at different outdoor conditions. The Index of Temperature and Velocity (ITV) was used as an indicator of animal comfort. Improved semi-tunnel presented more homogeneous values of velocity and air temperature, with average velocity of 0.89 ± 0.30 m/s and average temperature of $23.37 \pm 0.79^{\circ}\text{C}$. This distribution had the highest comfort area considering air velocity and temperature (88.45% and 94.52% of the area, respectively). The lowest average ITV corresponded to tunnel type ($23.24 \pm 1.54^{\circ}\text{C}$) but the highest proportion of comfort zone considering ITV ($\text{ITV} < 25$) corresponded to the improved semitunnel (90.35% of the area). The three configurations maintained a productive environment of ITV. The simulation results were similar to the literature indications for velocities and temperatures at animal level.

Keywords: Ventilation, Computational Fluid Mechanics, Poultry, Index of Temperature and Velocity.

4.1 Introduction

The application of Computational Fluid Dynamics (CFD) allows considering complex mathematical models based on the equations of fluid dynamics, numerical methods and algorithms that simulate fluids behavior in 3D spaces. These techniques have been used since 1960 in the aerospace industry, and were implanted in 1980 as a fundamental tool applied to the prediction of fluid flow. Currently CFD applies in other areas of engineering to evaluate the behavior of climatic variables such as ventilation, heat and mass transfer, air conditioning, chemical reactions, dispersion and transfer of internal and external pollutants emitted in plant and animal structures (Bjerg et al., 2013).

CFD simulations easily allow modelers to evaluate different design configurations, especially when different alternatives are a priori embedded within the same computational domain and mesh (Montazeri and Blöcken, 2013). Nowadays, CFD techniques are used to analyze airflow distribution in ventilated buildings. This ventilation can be either natural (induced by wind, thermal buoyancy or both) or mechanical (forced by exhaust fans). In the case of livestock buildings, the type and design of ventilation has significant impacts on indoor air quality, thermal comfort animals and energy efficiency (Norton et al., 2007).

Particularly, in the last decade CFD techniques were used in the poultry sector to analyze the distribution of air velocity and turbulence intensity. Authors as Bustamante et al. (2013); Osorio et al. (2012); Wu et al. (2012); Blanes et al. (2008) and Lee et al. (2007), represented the convective heat and mass transfer processes to assess changes in ventilation structures in livestock houses. However, other researchers (Roy et al., 2002; Norton et al., 2010; Seo et al., 2009) evaluated the dispersion of internal and external contaminants as the carbon dioxide (CO₂), ammonia (NH₃) (Bjerg et al., 2013; Mostafa et al., 2012) and volatile organic compounds (VOC). Due to implications for energy consumption and environmental conditions, these studies are becoming of relevance for manufacturers and producers.

Animal comfort is crucial for the correct development of a farm industry, and these conditions depend on the internal indoor environmental of the building. Sandoval et al. (2006) mentions that there is clear evidence that modern breeds selected for intensive production have lost their adaptability to varying environments, thus becoming more susceptible to the biophysical effects derived from adverse environments (Sørensen et al., 2000).

In regions exposed to warm climate conditions, broiler buildings are frequently ventilated by means of cross or tunnel mechanical ventilation systems (Blanes-Vidal et al., 2008; Tao and Xin 2003). However, inadequate ventilation systems can cause high mortality rates as warm air is accumulated inside all or part of the poultry building. In these cases, gas concentrations or humidity can also increase dangerously at the broilers height.

Thus, the environmental control in poultry buildings requires a proper control of environmental factors (temperature, humidity, radiation and air velocity), physical factors (space, light, sound and pressure) and social factors (number of broilers per farm). For these reasons, all these aspects must be taken into account when designing a farm, together with the local weather conditions and economic characteristics of the farm. These aspects are further described below.

4.1.1 Air velocity and ventilation rate

The selection of the ventilation rate depends on animal type and size, and is directly related to differences in internal and external temperatures in the building. Farm design must be also considered because heat flows also depend on the thermal resistance through the walls and floor (depending on the overall coefficient of heat transfer to the perimeter of the structure and the same area), the sensitive heat generated by lights and internal equipment (Simmons et al., 1994).

The building design must ensure a uniform distribution of air flow, not exceeding particular maximum velocity limits, to maintain thermal comfort of the broilers. Particularly, this airflow should

not affect the homoeothermic condition of animals under extreme temperatures (Lott et al., 1998; Yahav et al., 2001).

Maintaining a homogeneous velocity inside a building is desirable to achieve a proper productivity. However, according to Blanes-Vidal et al. (2008); Bustamante et al. (2013); Osorio et al. (2012), the uniformity of the air velocity in the area occupied by broilers is modified by different reasons:

- The presence of animals on the farm influence the indoor environment of the poultry building due to the release of convective heat,
- The air inlets and outlets distribution affect the mixture, circulation and air renewal inside the building.
- The air may be physically obstructed: higher density of animals decreases the airflow at broiler level, which reduces heat dissipation from the body to the air. This also reduces air quality due to inadequate air exchange, increases ammonia concentrations, and reduces access to water and feed (Atilgan, 2006).

Insufficient airflow may also cause migration of broilers to better ventilated areas, thus contributing to increased mortality and a production decrease (Bjerg et al., 2013; Feddes et al., 2003). Air velocity is also related to the perception of temperature. Higher air velocity increases sensible heat loss and reduce latent heat loss in broilers exposed at temperatures of 29.5 and 35°C (Simmons et al., 1994).

4.1.2 Temperature

The thermal environment affects the health and productive development of the broilers. The temperature distribution is affected by air streams and determines the thermal environment inside the poultry house. Therefore, the heat generated inside the poultry house should be considered when designing the climate control systems in order to maintain a suitable temperature. Temperature should be kept within certain limits for normal operations of the physiological activities of broilers. These

limits define a thermoneutral zone (Olanrewaju et al., 2010; Xin et al., 1994; Ponciano et al., 2013) which is defined as the temperature ranges at which animals devote the minimum physiological resources to cope with the environment. Lower and higher environmental temperatures affect sensible and latent heat production rates, and eventually produce heat stress which have negative effect on economy of production and animal welfare, demonstrating changes in the cardiovascular system (Yahav and Hurwitz, 1996) and endocrine activity (Yahav, 2009).

4.1.3 Temperature Humidity and Velocity Index -THVI

Both temperature, velocity and humidity interrelate in the animal response and therefore are crucial to determine the comfortable environment for the animals. Both parameters are unified in the Temperature Humidity and Velocity Index (THVI), formula proposed by Tao and Xin (2003). These authors describe the response of the body temperature of broilers under heat stress interaction with environmental factors dry bulb temperature from 35 to 41°C, and dew point from 19.4 to 26.1°C and air velocity from 0.2 to 1.2 m/s. These factors influence the body temperature of the animal, defined as normal, warning, danger and emergency when body temperature increases at 1, 2.5, 4 and more than 4°C.

As mentioned, the environment management within the poultry house is then of paramount importance. For this reason, this paper aims to use a methodological analysis to characterize comfort in poultry house using three CFD simulations with different designs of poultry building, changing window locations, mechanically ventilated with different boundary conditions of velocity and temperature.

4.2 Materials and Methods

4.2.1 Farm description: geometry and configuration of windows.

The geometry of the house building was defined according to usual dimensions of commercial farms. Building dimensions were 15 m wide, 120 m long and 3 m high with flat roof. Eight fans of diameter 1.40 m (airflow 38,072, m³/h) and two fans of diameter 1.10 m (13,406 m³/h) were considered in order to exhaust air from the building. Fans create a negative pressure forcing air to enter through inlet windows of 0.9 m x 0.4 m. Different distributions of windows and fans in the house building were considered as variation factors.

The comparison between three designs (Figure 4.1) was carried out analyzing the air velocity, temperature distribution and their interaction on the broiler zone in terms of uniformity, suitability, and the stability. The Tunnel (T) design had open windows on both lateral sides which allow air entrance for approx. 2/3 of its length and all fans were located in the front of building house. This tunnel is commonly used to achieve high air velocities in the same direction. The Semi-tunnel (ST) configuration consisted in changing the location and distribution of the fans and blocks of windows. In this case all fans were located at both sides in the middle of the building, thus avoiding excessively long air paths inside the building. Finally, the Improved Semi-tunnel (IST) configuration, which had identical fan distribution as ST, but differed in window distribution. Particularly, in this geometry windows were not regularly distributed but decrease progressively when approximating to the fans.



Figure 4.1. Tunnel (T), Semi-tunnel (ST) and Improved Semi-tunnel (IST) configuration. Only half building is presented because symmetry was applied to CFD calculation.

4.2.2 Computational fluid dynamics

4.2.2.1 Computational Fluid Dynamics applied for simulating the air movement

The commercial CFD code StarCCM+ by CD-Adapco (version 9.004.009) was used. The CFD technique numerically solves the Navier-Stokes equations within each cell of the computational domain. Streamlines of fluid using numerical algorithms were solved, calculating complex simulations of turbulent flows, thermal distributions, air velocity and convection inside the buildings (Launder and Spalding, 1974).

The solved equations of Fluid Dynamics applied in a geometrical domain are described, considering turbulence. A discrete manner is applied for calculating variables, at the nodes of a particular mesh and later represented. The continuity or mass conservation equation solved by the software used is expression (4.1).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v} = S_m \quad (4.1)$$

Where ρ is the fluid density, \vec{v} is velocity and S_m represents the mass source contained in the control volume. Furthermore, momentum equation is considered by equation (4.2).

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \rho(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.2)$$

Where p is the static pressure, $\vec{\tau}$ the stress tensor defined in expression (3) and the gravitational (g) and outer forces (F) defined on the control volume, respectively. In (4.3) μ is the eddy viscosity and I is the unit tensor. A third term is considered for taking into account the effect of the expansion of volume.

$$\vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \vec{v} I \right] \quad (4.3)$$

4.2.2.2 Computational Characteristics

All calculations were performed with a 2.4 GHz processor, RAM memory 8 GB. The numerical method was solved by the finite volume technique with tetrahedral volume mesh. Thus, a grid independence study has been performed to find optimize number of cells for which the solution is independent. Seven different mesh sizes were tested ranging from 1.0 m to 0.1 m, obtaining from 19 208 to 890 363 control volumes for the larger and finer mesh sizes, respectively. For the 0.4 m mesh case, about 1.5 hours CPU time was needed to finish and for the fine mesh case, about 12 hours CPU. Convergence was evaluated after 5000 iterations and we adopted as convergence criterion the mean square error (RMS) value equal or lower than 10^{-5} , as recommended by CFX (2003) and COST (2004).

4.2.3 Boundary conditions

In the present model, once the volume was discretized in the mesh, the numerical models were chosen for the representation. 2D steady state model was implemented, with constant density fluid flow and second order segregated flow. The CFD analysis was carried on under a steady state. The gravity model was implemented, as it permits the inclusion of the buoyancy source terms in the momentum equations when using the segregated flow model. K-Epsilon turbulence model was used for representing turbulence, to predict velocity flow rate and the temperature distribution in the poultry house, evaluating the viscosity from a relationship between the turbulent kinetic energy (k) and dissipation of turbulent kinetic energy (ϵ) (Lee et al., 2007; Launder and Spalding, 1974; Evola and Popov, 2006). The entire domain was defined as a single fluid region (air). The geometry indicated above enclosed a volume domain in space defined by boundaries. A boundary is each surface that surrounds and defines a region in the model. After different initial trials, a symmetry plane was defined as a boundary condition. The three configurations were modeled considering the boundary conditions of the outlet velocities, and the solid surface boundary conditions (table 4.1). Identical materials were selected for all

geometries among the usually recommended for broiler houses. Air velocity was calculated from fan performance (considering that all fans are in operation) and a single outdoor temperature was considered. The production of sensible heat was estimated from CIGR equation (Pedersen and Sällvik, 2002), corresponding to animals of 5 weeks of age and 2.5 kg of body weight. This heat production was introduced in the model as a uniform flux of sensible heat from the concrete floor.

Table 4.1. Boundary conditions specifications.

Surface	Type	Properties
Windows	Outlet pressure	Outdoor temperature 21.5°C
Fan center or 1.10 m	Velocity inlet	Velocity and direction (-3.92 m/s) Internal temperature 22°C
Fan side or 1.40 m		Velocity and direction (- 6.87 m/s) Inside temperature 22°C
Ceiling polystyrene sandwich panel (¹ e = 5 cm, ² λ = 0.033 W/m °K)		³ U = 0.58 W /m ² °K
Concrete walls consists Precast concrete (e = 20 cm; λ = 0.45 W /m °K), plaster cement (e = 4 cm; λ= 0.4 w/m °K), insulating polyurethane (e = 2 cm; λ = 0.04 W/m °K)	Wall	U = 0.81 W /m ² °K
Concrete floor (e = 2 cm; λ = 2.5 W/m °K), insulating polystyrene (e=1.5 cm; λ= 0.046 W/m °K)		⁴ Heat flux sensible 101.94 W/m ²
Side wall symmetrical	Symmetry plane	

Where ¹e is thickness; ²λ is thermal conductivity W/m °K; ³U is thermal transmittance W/m² °K, ⁴Production of sensible heat $\Phi_s = 0.61\Phi_{total} - 0.228 * t^2$, W; Φ_s is sensible heat production; Φ_{total} is total heat dissipation animal in animal houses, t is internal temperature - International Commission of Agricultural Engineering, 2002

4.2.4 Analysis of results

Theoretical comfort of animals was evaluated according to temperature, wind speed and ITV. To analyze the ITV formula proposed by Tao and Xin (2003) was adapted considering constant relative humidity (100%) to determine the effect of temperature and velocity on the broiler comfort. It can be expressed as follows:

$$ITV = t_{db} * V^{-0.058} \quad (4.4)$$

Where t_{db} is the dry bulb temperature °C, V is velocity m/s, defined in expression (4.4).

According to the equations proposed by these authors, an optimal ITV was considered to be within the range 18-25°C (Olanrewaju et al., 2010; Schiassi et al., 2008), outside these values we considered that animals would be in discomfort. We calculated that broilers can accelerate heat stress for 24 hours with ITV higher than 30.11°C. ITV higher than 32.56°C and 35.5°C involve a critical thermal environment for broilers for 6 hours and 1 hour, respectively.

Therefore, we analyzed the CFD results to obtain averages standard deviations and spatial distributions of air velocity (m/s), temperature (°C), and ITV at 0.20 m height (broiler height) and 1.4 m too observe the behavior of air flow in different planes. The distribution and proportion of area in which animals could be subjected to discomfort due to improper temperatures (higher than 25°C or lower than 18°C) was determined (Baêta and Souza, 1997; Estrada and Márquez, 2005). An air velocity comfort range between 0.5 and 2.0 m/s was established (Yahav et al., 2001; Lacy and Czarick, 1991) and ITV was thus calculated considering the limit for heat stress indicated above (higher than 30.11°C). Finally, the three configurations analyzed in this study were compared.

4.3 Results and discussion

4.3.1 Sensitivity analysis

According to the calculation with various mesh sizes, it was observed that all mesh sizes predicted the velocity at 0.20 m height with similar results. The maximum range of variation of the simulated data is lower than 13.61% of the mean velocity for mesh 0.4 m with 122289 cells, 102150 tetrahedral volume elements and 303589 internal faces (table 4.2), as shown for each configuration in figure 4.3, 4.4 and 4.5, which is acceptable

according to literature (Guohong et al., 1999). Figure 4.2 shows the independence between the mean velocities in the simulations with different mesh sizes. The mesh size has been changed from 1.0 to 0.1 m. With mesh sizes smaller than 0.1 m mean velocity at 0.2 m high becomes constant, which is also considered a signal that the sensitivity analysis is satisfactory. The convergence criterion of RMS lower than 10^{-5} was accomplished for different mesh sizes.

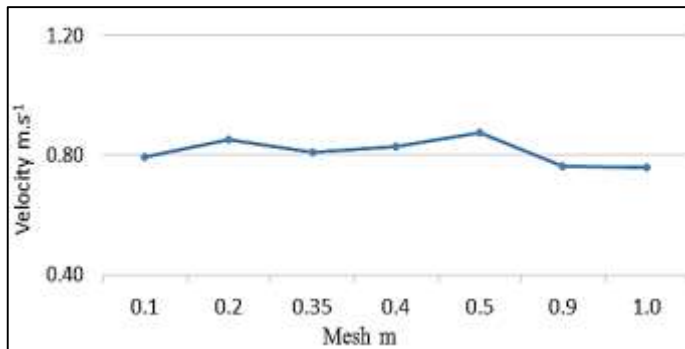


Figure 4.2. Mean velocity versus different mesh sizes.

Table 4.2. Volume mesh characteristics with mesh size 0.4 m.

Characteristics	Tunnel	Semi-tunnel	Improved Semi-tunnel
Number of cells	100585	102150	103245
Number of internal faces	298035	303589	306669
Number of vertices	119796	122289	123158

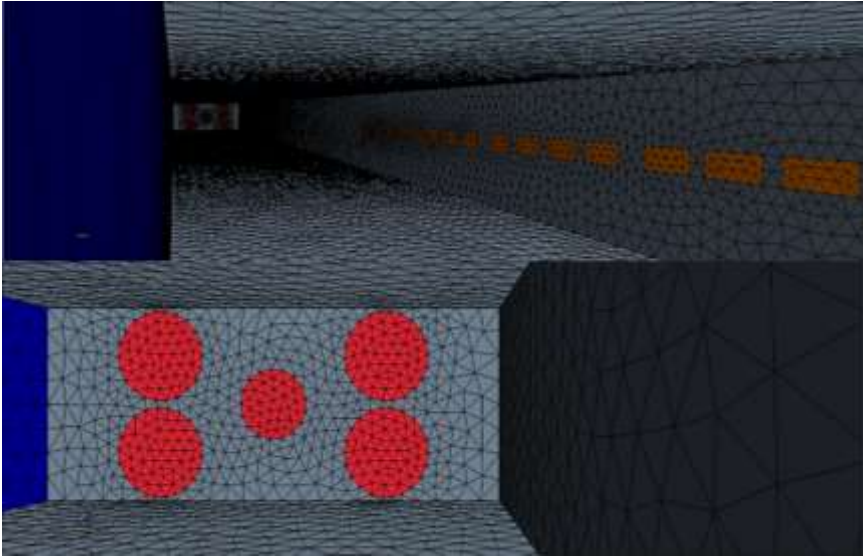


Figure 4.3. Tunnel Mesh

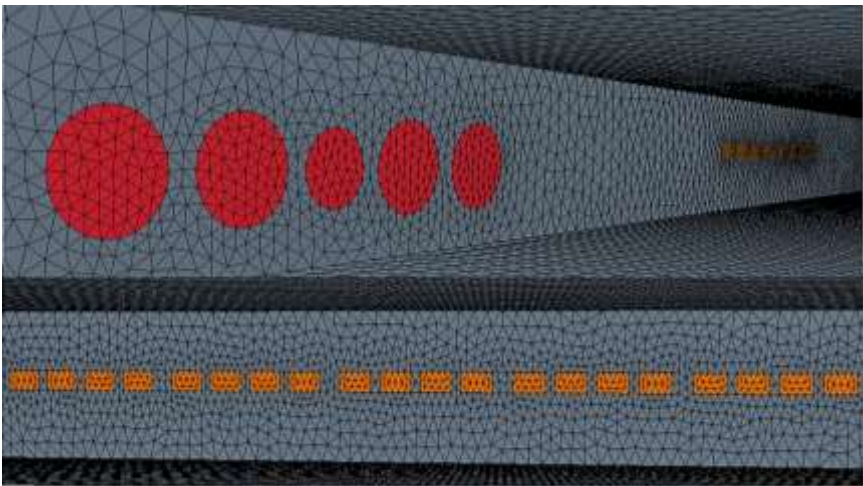


Figure 4.4. Semi-tunnel Mesh

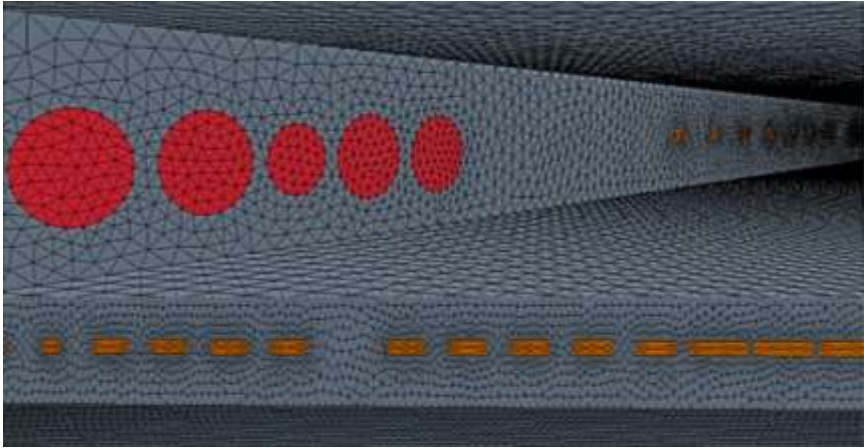


Figure 4.5. Improved Semi-tunnel Mesh

4.3.2 Velocity

The distribution of air velocity (magnitude and direction) at 1.4 m height is represented in Figure 4.6. As seen, in all configurations the presence of windows affected flow patterns. In all configurations, as expected, higher velocities were found near exhaust fans, whereas lower velocities occurred in the extreme walls of the building. As air enters the building through the windows, airflow is progressively accelerated, but as expected, velocity magnitude is lower in configurations ST and IST than in tunnel configuration.

Considering the velocity vectors in a 1.4 m height plane, the air velocity increases at the nearest windows to the fans, whereas the lowest air velocity was found in the extreme wall of the poultry house (0.03 m/s). The airflow in the poultry house space is being accelerated progressively, and the air velocity values increase with windows nearest to the exhaust fans, concentrating the air flow in the center of the building. In the case of IST, velocity vectors are more uniform than in ST, observing that windows distributed in blocks of two or three consecutive windows have more uniform velocity vectors than the window distribution in ST.

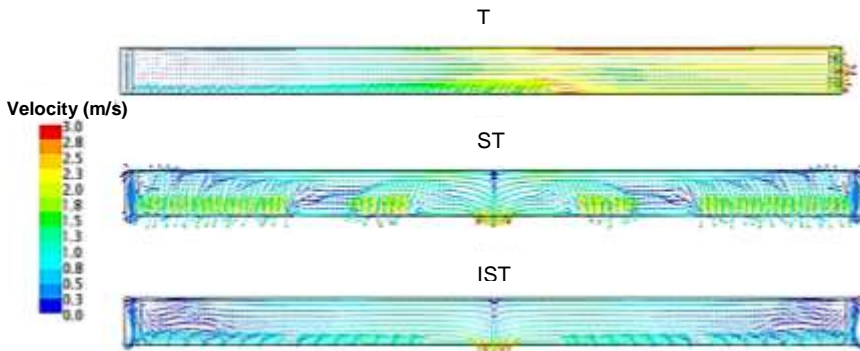


Figure 4.6. Velocity vector distributions 1.4 m height plane: Tunnel (T), Semi-tunnel (ST) and Improved Semi-tunnel (IST) configuration.

In tunnel the walls tend to divert the airflow from the side wall towards the center of the farm, resulting higher velocities towards the center of the poultry building and lower velocities near the side walls (Figure 4.7). In this work, the mean air velocity at the height of the broilers was 1.54 ± 0.74 m/s. According to Yamamoto (2005) a total air exchange should be done every 1 min 15 s through the entire length the building at high velocities (which is from 1.77 to 2.0 m/s). This velocity could provide a better environment for broilers mainly in warm periods, compensating to the addition of sensible heat generated by the broilers themselves. According to Simmons et al. (1994), at about 2 m/s of air velocity total heat loss remains relatively constant if temperature increases, but below 0.5 m/s broilers are more exposed to heat stress.

As shown in table 4.3, the average air velocity at the height of the broilers in ST and IST is 0.83 ± 0.32 and 0.89 ± 0.30 m/s respectively. We also observed a higher percentage of area with air velocity ranging between 0.5 and 2.0 m/s (80.05% and 88.45% in ST and IST, respectively). On the contrary, in the Tunnel configuration only a 49.95% of the area achieves velocities between 0.5 and 2.0 m/s, while 50.05% of area has air velocities higher than 2.0 m/s, particularly near the fans.

Therefore, ST shows the highest proportion of surface with air velocity between 0.5 and 2.0 m/s. According to Blanes-Vidal et

al. (2008) the air velocity at the height of the broilers predicted by the CFD simulation was 0.54 ± 0.22 m/s in a cross mechanically ventilated broiler building. However, the air velocity obtained in this study is within the ranges provided by Bustamante et al. (2013), who found similar results of air velocity both in CFD simulations (0.60 ± 0.56 m/s) and in direct measurements (0.64 ± 0.54 m/s) in poultry building with tunnel mechanical-ventilation. Also our values are similar with Feddes et al. (2003), who found levels of air speed between 0.32 and 0.82 m/s. Finally, this fulfills the recommendations by Yahav et al. (2001), who suggest velocities from 1.5 to 2 m/s when broilers are under very hot conditions (about 35°C).

Table 4.3. Average \pm standard deviation air velocity (m/s) in the three configurations, comfort and discomfort area (m² and %) at 0.2 m of floor.

Configuration	Average velocity (m/s)	Discomfort		Comfort	
		m ²	%	m ²	%
Tunnel	1.54 ± 0.74	450.48	50.05	449.51	49.95
Semi-tunnel	0.83 ± 0.32	179.53	19.95	720.47	80.05
Improved Semi-tunnel	0.89 ± 0.30	103.94	11.55	796.06	88.45

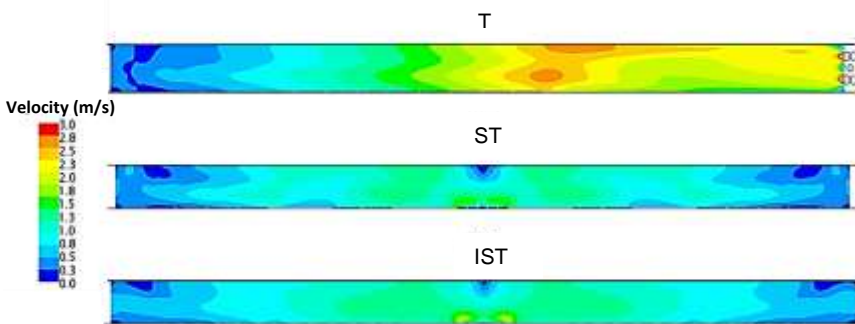


Figure. 4.7. Tunnel (T), Semi-tunnel (ST), Improved Semi-tunnel (IST) configuration velocity modulus: plane z: 0.2 m.

4.3.3 Temperature

The average temperature at the height of the animals by CFD in Tunnel (Figure 4.8) is $23.55 \pm 1.01^{\circ}\text{C}$, and has comfort area of 91.37% with temperatures between 18 and 25°C according Baeta and Souza (1997), Tinôco (2001) and Olanrewaju et al. (2010). However, Xin et al. (1994) found in tunnel ventilation type at bird-level, lengthwise temperature gradients distribution across the building poultry, with the center slightly warmer (1.8°C) than the sides, which is similar to the temperature gradients found by Osorio et al. (2012).

The air temperature increases as it travels throughout the poultry house due to the addition of sensible heat produced by the broilers of 2.5 kg (21.11 W/animal), however if air velocity changes, the broilers modifies the production of sensible heat. Increasing air velocity makes the animals increase the sensible heat loss, which is needed to cope with high temperatures. However, the energy used for removing heat is not available for growth and, as a result, the growth rate may be altered. According to Simmons et al. (1994) for broilers in fifth week of age with ambient temperature of 29°C and air velocity increasing from 1.01 to 3.05 m/s, the loss of sensible heat increases from 1.19 to 2.09 W/kg and the sixth week of age from 1.30 to 2.33 W/kg. On the contrary, latent heat loss decreases from 2.89 to 2.09 W/kg and 2.59 to 2.30 W/kg for the two respective groups of age. Consequently, the animals spend less metabolic energy to remove excess heat at higher air velocity (Dozier et al., 2006). Xin et al. (1994), found temperature ranging from 24.9 to 29.6°C with an average of 28.1°C , and higher temperature near the ridge or ceiling of the poultry house than near the floor. The operation of the tunnel is efficient as long as the ambient temperature doesn't exceed 32°C because at higher temperatures the heat introduced by ventilation can't be compensated with the effect of air velocity (Egüez et al., 2007).

In the semi-tunnel the temperature decreases as a consequence of the different configuration of air velocity, and was on average $23.45 \pm 0.82^{\circ}\text{C}$. The comfort area of temperature at 0.2 m above

floor level was 93.03%, concentrating the largest amount of hot air in the central part of the building. Besides, in the improved semitunnel configuration air entrances were distributed more homogeneously, as well as temperature at the height of the broilers (Marrufo et al., 1999). IST had the lowest average temperature (23.37 ± 0.79 °C) of the three configurations analyzed, and the greatest comfort area (94.52% of total surface). Contrarily, the tunnel configuration had a discomfort area of 8.63% (table 4.4). The average temperature obtained in this study are similar to Mostafa et al. (2012), who found 23.86°C at the height of the broilers, and also were in accordance with Blanes-Vidal et al. (2010), who found the minimum temperature of 23.5°C and the maximum of 26.3°C in the poultry house. On the contrary, Xin et al. (1994) found bird-level average temperature of 29.3°C and described a higher vertical temperature gradient in conventional model compared with tunnel model from the bird-level to the 3 m height. Finally, Medeiros (2001) obtained greater yield with temperature range from 21 to 29 °C, air velocities from 1.5 to 2.5 m/s, and broilers from 21 to 42 days showed higher performance with temperatures between 21 and 27 °C with air velocities between 0.5 and 1.5 m/s.

Table 4.4. Average \pm standard deviation temperature (°C) in the three configurations, comfort and discomfort area (m² and %) at 0.2 m of floor.

Configuration	Average temperature (°C)	Discomfort		Comfort	
		m ²	%	m ²	%
Tunnel	23.55 \pm 1.01	77.67	8.63	822.33	91.37
Semi-tunnel	23.45 \pm 0.82	62.69	6.97	837.31	93.03
Improved Semi-tunnel	23.37 \pm 0.79	49.30	5.48	850.70	94.52

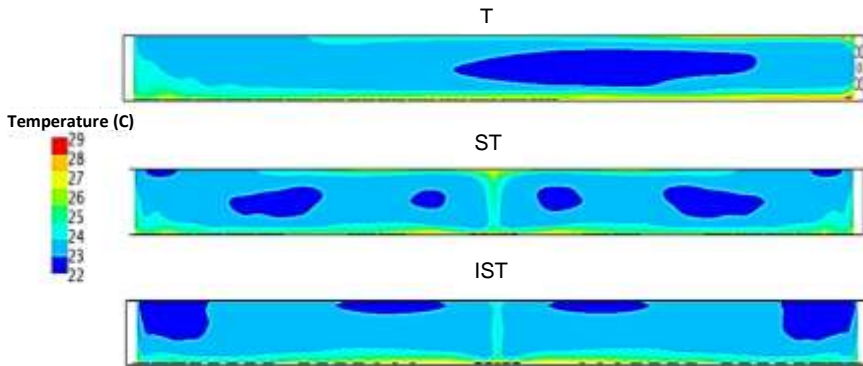


Figure 4.8. Temperature distribution the Tunnel (T), Semi-tunnel (ST) and Improved Semi-tunnel (IST) configuration at 0.2 m height plane.

4.3.4 Index of Temperature and Velocity – ITV

In the tunnel configuration, the average ITV at 0.2 m height was 23.24 ± 1.54 °C (table 4.5), observing higher values in the opposite extreme to the fans in the building. This is a consequence of the low air velocity and high exchange of sensible heat in these areas. The outside air in the current model (21.5°C) reduces the increase of temperature inside the poultry house, which depends on the location of the fans and distributions of windows. In the figure 4.9 it can be observed that in the semi-tunnel (average ITV of 23.85 ± 1.18 °C) the higher ITV was registered at the center of the poultry building, which concentrates the heat produced by broilers in the building through the exhaust fans. However, in the improved semi-tunnel (average ITV 23.64 ± 0.98 °C) the distribution of ITV was more homogeneous as a consequence of the distribution of inlet windows and fans. This distribution achieved the highest comfort zone according to ITV (90.35% of total area has ITV below 25°C).

Table 4.5. Average \pm standard deviation ITV ($^{\circ}\text{C}$) in the three configurations and area (m^2) at 0.2 m of floor.

Configuration	Average ITV ($^{\circ}\text{C}$)	Expressed in m^2 area ITV			
		Discomfort	24 hours	6 hours	1 hour
		ITV >25 ($^{\circ}\text{C}$)	ITV >30.11 ($^{\circ}\text{C}$)	ITV >32.56 ($^{\circ}\text{C}$)	ITV >35.5 ($^{\circ}\text{C}$)
Tunnel	23.24 \pm 1.54	145.51	0.27	0.0	0.0
Semi-tunnel	23.85 \pm 1.18	141.94	1.58	0.04	0.01
Improved Semi-tunnel	23.64 \pm 0.98	86.78	0.44	0.05	0.01

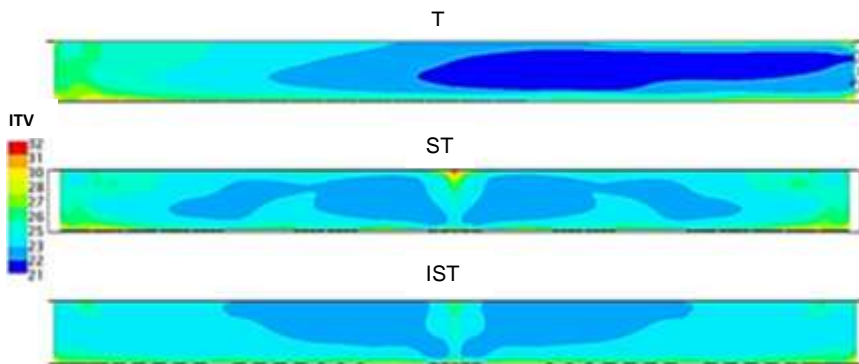


Figure 4.9. ITV model distribution the Tunnel (T), Semi-tunnel (ST) and Improved Semi-tunnel (IST) configuration.

Considering the previous results, tunnel ventilation system is frequently used for hot and humid climates by turbulent flow and the sensitivity of the energy that is important in the lateral direction to form a tunnel of high velocity flow that goes through the poultry building and helps the system birds to cool off with a greater loss of sensible heat, removing the warm air inside the farm and improving index of temperature and velocity to maintain a productive environment.

4.4 Conclusion

Determining comfort in poultry farms is a complex task, which can be assessed with the use of computational fluid dynamics modeling. In this paper a methodology to quantify the parameters controlling the comfort of the animals is presented. This methodology is implemented for designing buildings with adequate conditions for animal welfare characteristics. Three different poultry house designs were analyzed using CFD. These simulations are useful for investigating the behavior of the location of windows and fans and their effect on the parameters of comfort. A system that aims to improve the mechanical ventilation for depression has been analyzed to improve comfort broilers of six weeks with 2.5 kg. The results of the three case studies are compared to determine the effect of temperature. Some conclusions can be achieved:

The CFD shows the calculation of turbulent model predicting the air flow and the fields of temperature, which can be used for various practical purposes.

The poultry building improved using the semi-tunnel configuration. At 0.20 m more homogeneous values of average velocity of 0.89 ± 0.32 m/s and air temperature of $23.37 \pm 0.79^\circ\text{C}$ with greater comfort area of velocity 88.45% and temperature 94.52%. Although ITV is lower on average using the tunnel type ($23.24 \pm 1.54^\circ\text{C}$), the comfort zone is highest with IST (90.35% of total area with ITV lower than 25°C), These results suggest that the improved semi-tunnel configuration may perform better than the tunnel and semi-tunnel.

4.5 References

- Atilgan A., H. K. (2006). Cultural energy analysis on broilers reared in different capacity poultry houses. *Italian Journal of Animal Science*. 5: 393–400.
- Baêta, F. C. and Souza, C. F. (1997). Environment in rural buildings - animal comfort. Viçosa. Editora UFV. Pp 246.

- Bjerg, B., Cascone, G., Lee, I.-B., Bartzanas T., Norton T., Hong, S.-W., Seo, Il-H., Banhazi, T., Liberati, P., Marucci, A. and Zhang, G. (2013). Modelling of ammonia emissions from livestock buildings ventilated naturally. Part 2: CFD modelling. *Biosystems Engineering*. 116: 259–275.
- Blanes-Vidal, V., Balasch, S. and Torres, A. G. (2008). Application of computational fluid dynamics to the prediction of air flow in to mechanically ventilated commercial poultry building. *Biosystems Engineering*. 100(1): 105–116.
- Blanes-Vidal, V., Guijarro, E., Nadimi, E. S. and Torres, A. G. (2010). Development and field test of an on-line computerized instrumentation system for air velocity, temperature and differential pressure measurements in poultry houses. *Journal of Agricultural Research* 8(3): 570–579.
- Bustamante, E., García-Diego, F.-J., Calvet, S., Estellés, F., Beltrán, P., Hospitaler, A. and Torres, A. G. (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.
- CFX. (2003). “CFX 5 Solver Models” Diddcot Oxfordshire: CFX.
- COST (2004). Cost Action 14: Recommendations on the use of CFD in predicting Pedestrian Wind Environment. Bruxelles: COST.
- Dozier III, W. A., Purswell, J. L. and Branton, S. L. (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. *Journal of Applied Poultry Research*. 15: 362–366.
- Egüez, G. R., Davila, J. and Vasconez, C. D. (2007). Automation of the breeding poultry A-1 of Broilers of Iasa. Quito. Pp 109.

- Estrada, M. M. and Márquez, M. G. S. (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.
- Evola, G. and Popov, E. V. (2006). Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. *Energy and Buildings*. 38: 491–501.
- Feddes J., J. R., Emmanuel, E. J., Zuidhof, M. J. and Korver, D. R. (2003). Ventilation rate, air circulation, and bird disturbance: effects on the incidence of cellulitis and broiler performance. *Journal of Applied Poultry Research*. Res. 12: 328–334.
- Guohong, T., Guoqiang, Z., Christopher, D. M., Bjerg, B., Zhangying, Y. and Cheng, J. (1999). Evaluation of turbulence models to predict airflow and ammonia concentrations in a scale model swine building enclosure. *Journal Computers & Fluids*. 74(3): 267–274.
- Lacy, M. and Czarick, M. (1991). Ventilating poultry houses on cold days. *Poultry Digest*. 50: 68–69.
- Lauder, B. E. and Spalding, D. B. (1974). The numerical computational of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 3: 269–289.
- Lee, I-B., Sase, S. and Sung, S-H. (2007). Evaluation of CFD accuracy for the ventilation study of a naturally ventilated broiler house. *Japan Agricultural Research Quarterly*. 41 (1): 53–64.
- Lott, B. D., Simmons, J. D. and May, J. D. (1998). Air velocity and high temperature effects on broiler performance. *Poultry Science*. 77: 391–393.
- Marrufo, V. D., Quintana, J. and Castaneda, S. M. P. (1999). Effect of positive pressure ventilation on performance of broilers booths for seven weeks in natural environment. *Veterinaria México*. 30(1): 99–103.

- Medeiros C., M. (2001). Adjustment models and determination of environmental heat productivity index broilers. Master's thesis. Universidade Federal de Viçosa-Brasil. Pp 95.
- Montazeri, H. and Blöcken, B. (2013). CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis. *Building and Environment*. 60: 137–149.
- Mostafa, E., Lee, I.-B., Song, S.-H., Kwon, K.-S., Seo, I.-H., Hong, S.-W., Hwang, H.-S., Bitog, J. P. and Han, H.-T. (2012). Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside building broiler fitted with duct ventilation system. *Biosystems Engineering*. 112(4): 293–303.
- Norton, T. R., Sun, D. W., Grant, J., Fallon, R. and Dodd, V. (2007). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Bioresource Technology*. 98: 2386–2414.
- Norton, T. R., Grant, J., Fallon, R. and Sun, D.-W. (2010). Computational fluid dynamics study of air mixing in a naturally ventilated livestock building with different porous eave opening conditions. *Biosystems Engineering*. 106: 125–137.
- Olanrewaju H., A., Purswell, J.L., Colier, S. D. and Branton, S. L. (2010). Effect of ambient temperature and light intensity on physiological reactions of heavy broiler chickens. *Poultry Science*. 89(12): 2668–2677.
- Osorio S., J. A., Martins M., A., Marín O., L. Z., Damasceno F., A. and Velasquez H., J. C. A. (2012). Review about the use of Computational Fluid Dynamics (CFD) in broiler house. *Dyna*. (175): 142–149.

- Pedersen, S. and Sällvik, K. (2002). 4th Report of Working Group on Climatization of Animal Houses. International Commission of Agricultural Engineering, Section II. Pp 45.
- Sandoval, G. L., Revidatti, F., Terraes, J. C., Fernandez, R. J., Asiain, M. V. and Sindik, M. (2006). Productive variables in male chickens reared under different semi heavy thermal conditions. Magazine FAVE - Veterinary Science. 5 (1-2): 49–55.
- Schiassi, L., Tadayuki, Y. J., Leandro, F., Alves, D. F. and Monteiro, Y. S. (2008). Fuzzy methodology to evaluate the increase in temperature body in broilers. Engenharia na agricultura. Viçosa, MG. 16(2): 180–191.
- Seo, I.-H., Lee, I.-B., Moon, O.-K., Kim, H.-T., Hwang, H.-S., Hong, S.W., Bitog, J., Yoo, J.- I., Kwon, K.-S., Kim, Y.-H. and Han, J. W. (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, J. D., Lott, B. D. and May, J. D. (1994). Heat loss from broiler chickens subjected to various air velocities and ambient temperatures. Applied Engineering in Agriculture. 13(5): 665–669.
- Sørensen, P., Su, G. and Kestin, S. C. (2000). Effects of age and stocking density on leg weakness in broiler chickens. Poultry Science. 79: 864–870.
- Tao, X. and Xin, H. (2003). Temperature-Humidity -Velocity Index for market-size broilers. Agricultural and Biosystems Engineering. 46 (2): 491–497.
- Tinôco, I. F. F. (2001). Poultry industry: new concepts of materials, designs and construction techniques available for Brazilian poultry. Brazilian Journal of Poultry Science, Campinas. 3(1): 1–26.

- Wu, W., Zhang, G., Bjerg, B. and Nielsen, P. V. (2012). An assessment of to partial pit ventilation system to reduce emission under slatted floor part 2: Feasibility of CFD prediction using turbulence RANS models. *Computers and Electronics in agriculture*. 83: 134–142.
- Xin, H., Berry, I. L., Tabler, G. T. and Barton, T. L. (1994). Temperature and humidity profiles of broiler houses experimental with conventional and tunnel ventilation systems applied. *Engineering in Agriculture*. 10(4): 535–542.
- Yahav, S. and Hurwitz, S. (1996). Induction of thermotolerance in male broiler chickens by temperature conditioning at an early age. *Poultry Science*. 75: 402–406.
- Yahav, S., Straschnow, A., Vax, E., Razpakovski, V. and Shinder, D. (2001). Air velocity alters broiler performance under harsh environmental conditions. *Poultry science*. 80(6): 724–726.
- Yahav, S. (2009). Alleviating heat stress in domestic fowl: different strategies. *Poultry Science*. 65(4): 719–732.
- Yamamoto, M. M. (2005). The evaluation of the conditions of the internal environment in the production of two commercial broiler sheds, ventilation and differentiated population density. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de engenharia agricultural. Tese de Doutorado. Campinas. Pp 244.

Capítulo 5: Computational Fluid Dynamics analysis applied to engineering and design of poultry farms

Eva H. Guerra-Galdo¹, Fernando Estellés Barber¹, Salvador Calvet Sanz¹, P. Amparo López-Jiménez²

¹ Institute of Animal Science and Technology, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n. 46022 Valencia. Spain.

² Hydraulic and Environmental Engineering Department. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n. 46022 Valencia. Spain.

An adapted version of this chapter has been published as:
International Journal of Energy and Environment (2016), 7(4):
269-282

Abstract

The shape of the poultry and the distribution of its elements (roof, windows distribution, and window opening) influence the velocity and temperature distribution inside the building and therefore the thermal comfort of the broilers. Considering these components, Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to analyze the environmental conditions of 3 poultry buildings: tunnel (T), semi-tunnel (ST) and improved semi-tunnel (IST). These three buildings had the same dimensions but differed in the relative position of fans and windows. This study modelled the effect of different configurations of roof (flat or gable roof) and window design (with or without flap plate) on the distribution of temperature, air velocity and Index of Temperature and Velocity (ITV) at animal level (0.20 m above the ground). Simulations were conducted for summer and winter conditions. In summer conditions, configuration IST with gable roof without flap plate had lowest air velocity 0.72 ± 0.27 m/s and average temperature ($22.9\pm 0.9^{\circ}\text{C}$) whereas tunnel configuration with gable roof and flap plate had lowest ITV ($22.94\pm 1.30^{\circ}\text{C}$ on average). In winter conditions, IST configuration with flat roof had lowest average air velocity (0.24 m/s), whereas the highest temperature corresponded to semi-tunnel with gable roof without flap plate of the slot opening ($19.35\pm 2.67^{\circ}\text{C}$). Finally, the lowest ITV corresponded to tunnel without flap plate and gable roof configuration ($19.14\pm 3.57^{\circ}\text{C}$). According to the CFD simulations, in three configurations the variables analyzed were within the comfort ranges reported for animals inside buildings.

Keywords: Broiler building, Computational Fluid Dynamics, Temperature, Velocity, Comfort.

5.1 Introduction

The growing demand for animal protein has increased in accordance with population growth. For this reason, genetic selection produces permanent changes in the production of broilers, including feed efficiency and growth, but also the tolerance for changing environmental conditions. In this sense, in order to take advantage of the productive potential of broilers, we must control the environment throughout the year, and provide adequate environmental parameters of temperature 21-23°C (Abreu et al., 2011), air velocity 1.5-2.0 m/s (Yahav et al., 2001; Wiley, 2012) and humidity 60-65% (Mazanowski, 2011) at the end of the growing period. To manage these factors, the livestock farm should be appropriately designed and operated for different stages of development and seasons.

The farm engineering design affects its performance in terms of production and profitability, by providing an optimum environmental control to enhance productivity. To achieve such optimization, the use of technology is necessary to adapt to summer conditions. This technology includes the use of different ventilation systems as well as other engineering strategies such as internal water misting (Osorio et al., 2013), different sizes and positions of air inlets; and lowering the roof all along the poultry building to increase air velocity (Bjerg et al., 2002; Wisate et al., 2013). In winter conditions, however, the need is to maintain an appropriate temperature and at the same time to exhaust the noxious gases. To obtain a higher uniformity of environmental conditions at the broiler zone, design proposals include installing multiple openings (Kwon et al., 2015), using both sidewall and ceiling air inlets (Mostafa et al., 2012); or using chimney inlets with diffuser and a side-up outlet at the eave (Seo et al., 2009).

To predict the thermal response of animals to different installation designs and operations, simulations of realistic conditions must be done by means of the use of computational fluid dynamics (CFD) based on numerical solutions. By doing so, air properties, airflow conditions, heat and mass sources can be simultaneously

represented. The final objective is to predict the temperature distribution in the broilers production environment, as well as the gas concentration and other physical properties of particular livestock buildings (Mostafa et al., 2012; Bustamante et al., 2015; Osorio et al., 2013; Norton et al., 2009).

CFD simulations can be used by designers as a virtual laboratory to take decisions. Therefore, the hypothesis of this study is based on the variation of certain design elements of the farm: number and location of fans operating (Bustamante et al., 2015); inlet and outlet surface of the openings (Mostafa et al., 2012); wind velocity and direction considerations, the temperature differences between the indoor and outdoor environment (Seo et al., 2009); shape of the roof of the building; relative position and size the slots opening height and flap plate angle at the air inlet window (Wisate et al., 2013; Norton et al., 2009; Kwon et al., 2015; Álvarez M., 2009). The influence of equipment installation and the presence of birds (Oliveira et al., 2014; Bjerg et al., 2013) could be considered as well.

Therefore, the main objective of this study is to simulate by means of CFD analysis, different configurations of poultry house in summer and winter conditions by analyzing three different geometry proposals. Parameters under analysis will be changed: (roof slope, window distribution and slot openings) to evaluate changes in temperature and ventilation patterns inside the farm and demonstrating the capability of the simulation software to be used as a tool for comparison between different designs.

5.2 Materials and Methods

5.2.1 Farm description: geometry and configuration of windows.

The geometry of three broiler building has been considered: Classical tunnel type (T), semi-tunnel (ST) and improved semi-tunnel (IST), all them measuring 15 m wide, 120 m long, 3 m high walls and differing in roof shape (flat roof or gable roof of 5 m ridge height, Figure 5.1) as description in Table 5.1.

Different fans were considered to be in operation for summer and winter conditions. The air was exhausted from the building during the summer period by means of eight fans of 1.40 m diameter (airflow 38,072 m³/h) and two fans of 1.10 m diameter (13,406 m³/h). These exhaust fans created a negative pressure forcing air to enter through inlet windows of 0.9 m x 0.4 m. At the same time, different distributions of windows with or without flap plates were considered. In the winter period a different distributions of fans was considered, using only two fans of 1.10 m diameter (13,406 m³/h), with different distributions of windows adopting fixed flap plate angles of the slots.

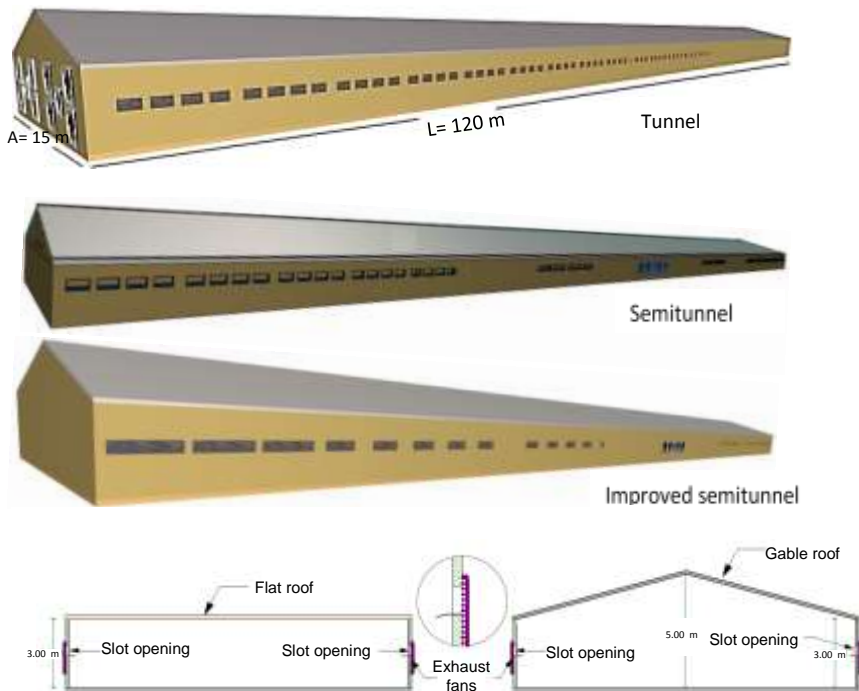


Figure 5.1. Tunnel (T), Semi-tunnel (ST) and Improved Semi-tunnel (IST) configurations.

5.2.1.1 Description broiler building in summer

An outside temperature of 21.5°C was considered for summer conditions and then, the three configurations (T, ST and IST) were compared. For each design, changes were simulated in the distribution of windows and fans, roof shape (flat and gable) and slot opening with or without flap plate, as described in Table 5.2. In the three configurations we used flat roof (f), but only slot opening without flap plate was considered (S/O Tf_s, S/O STf_s and S/O ISTf_s), as well as flaps in the window openings (F/P) with a 90° angle (F/P Tf_s, F/P STf_s and F/P ISTf_s). The same configurations were used for gable roof (g), without flaps (S/O Tg_s, S/O STg_s, S/O ISTg_s) and with flaps (F/P Tg_s, F/P STg_s, F/P ISTg_s).

5.2.1.2 Description broiler building in winter

During the winter period (outdoor temperature 5°C) we considered a lower ventilation rate using two exhaust fans. We considered the three configurations mentioned before (T, ST and IST) with flat roof (f), both considering slot open windows (S/O Tf_w, S/O STf_w, S/O ISTf_w), and considering flap plate (8° angle) (F/P Tf_w, F/P STf_w, F/P ISTf_w). For gable roof, similar configurations were tested (S/O Tg_w, S/O STg_w, S/O ISTg_w). As shown Table 5.2, geometries were simulated for any configuration either in summer and winter conditions.

To model incidence flap plate angle we used ISTg_w configuration and windows opened gradually at six different flap plates angles in the slots openings (90°, 35°, 16°, 8°, 5°, 1°) (Figure 5.2).

Table 5.1. Distribution of fans and windows in the three configurations.

Tunnel (T)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fourteen groups of slot openings on lateral sides in groups of four windows ▪ Separation of 0.60 m between groups ▪ 50m wall free of windows ▪ 10 exhaust fans distributed vertically in the front axis.
Semi-tunnel (ST)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Seven groups of slot openings on lateral sides in groups of four windows ▪ Separation of 0.60 m between windows ▪ Separation of 10 m between group windows the same characteristics ▪ 5 Fans in the central axis defining a symmetry plane
Improved Semi-tunnel (IST)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Long side had three groups of windows together. ▪ Groups were of 3, 2 or 1 window according to distance to fans. ▪ 5 exhaust fans uniformly distributed at the center of the building defining a symmetry plane.

Table 5.2. Description of elements in the different analyzed geometries.

Elements	Design	Description
Roof	Flat (f)	Flat roof rectangle geometry at 3.0 m height the ground.
	Gable (g)	The height of the side walls were 3.0 m and roof top 5.0 m.
Windows Opening	Slot opening (S/O)	Rectangle windows of 0.4 x 0.9 m, had height of the side walls 1.40 m.
	With Flap plate (F/P)	Flap plate in the rectangle slot opening of section, the flap had curvy of 40 cm with 90° angle.

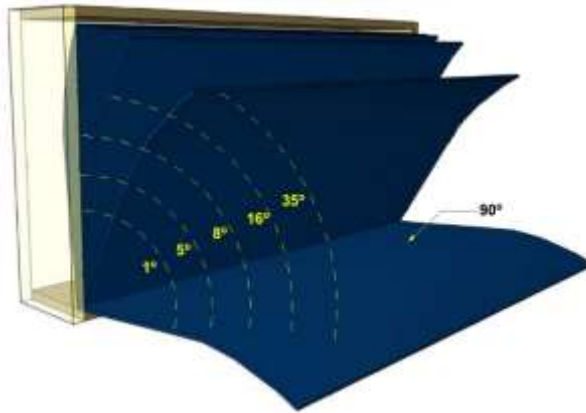


Figure 5.2. Different angles of slot opening with flap plate.

5.2.2 Computational fluid dynamic techniques

CFD simulations were used to analyze indoor environmental conditions according to the configurations of the ventilation system. These were computed for the T and ST configurations and then compared to the standard design (tunnel), both in winter and summer conditions. A half-section of the building was used as the three-dimensional computational domain with a symmetric wall.

Three-dimensional CFD grids were generated by StarCCM+ by CD-Adapco software (version 9.004.009). The CFD numerically solves the Reynolds-averaged form of the Navier–Stokes equations (Lauder and Spalding, 1974) within each cell in the domain, was used for the design of geometry, mesh structures tetrahedral of 0.4 m, the mesh was refined in the flaps of the slot opening from 0.01-0.2 m. The partial differential equations of the mass, momentum, and energy conservative equations were used to determine the fluid and energy transfers (Lee et al., 2000). Eqs. (5.1)– (5.3) listed below are the mass, momentum and energy conservation equations solved in CFD simulations (Lauder and Spalding, 1974). The measured data from theoretical information from the literature, were used for the initial and boundary conditions of the CFD model. The post- processor, was used for visualization of the air flow.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \vec{v} = S_m \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \rho(\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (5.2)$$

$$\bar{\tau} = \mu \left[\left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \vec{v} I \right] \quad (5.3)$$

Where ρ is the fluid density, kg/m³; \vec{v} is velocity; m/s and S_m is mass source, kg/m³; t is time, s; τ the stress tensor, Pa; g gravitational; \vec{F} is external force vector and I is the unit tensor, N m⁻³ and T is air temperature for the livestock building, °C.

In the present study, the Realizable k- ϵ model was decided to be used as it satisfies certain mathematical constrains on the Reynolds stresses, and it is consistent with the physics of turbulent flows (Lee et al., 2007). The input data for the CFD models are presented in table 5.3, the sensible heat production of the broiler was determined using Eq (5.4) (Pedersen and Sällvik, 2002). The effects of buoyancy in the model were activated.

$$\Phi_s = 0.61 \Phi_{total} - 0.228 * t^2 \quad (5.4)$$

Where Φ_s is sensible heat production; Φ_{total} is total heat dissipation animal in animal houses, t is internal temperature.

The external air temperature, (21.5°C in summer and 5°C in winter), air velocities at the exhaust fans and solid surfaces were used as the initial boundary conditions, as shown in Table 5.3. For each of the three geometries changes in the geometry were applied regarding the distribution of windows, fans, roof shapes and flaps angles of slot opening. The heat production was introduced in the model as a uniform flux of sensible heat from the concrete floor. Furthermore, the temperature and air velocity calculated at broiler-level were obtained for each CFD model and then statistically analyzed to determine the optimum options

regarding temperature, air velocity, and comfort area using the index of temperature and velocity (ITV). As depicted in (Guerra-Galdo et al. 2015) ITV can be expressed as:

$$ITV = t_{db} * V^{-0.058} \quad (5.5)$$

Where t_{db} is the dry bulb temperature °C, V is air velocity m/s, defined in expression (5.5).

Comfortable limits were for ITV values within the range 18-25°C, and outside this interval the animals would be in discomfort therefore ITV higher than 30.1°C can accelerate heat stress for 24 hours and for ITV higher than 32.6°C and 35.5°C broilers have a critical thermal environment for 6 hours and 1 hour, respectively.

Table 5.3. Input data used for the CFD simulations.

Surface	Type	Properties
Windows	Outlet pressure	Summer: Outdoor temperature 21.5°C Winter: Outdoor temperature 5 °C
Fan center or 1.10 m	Velocity inlet	Velocity and direction (-3.92 m/s) Internal temperature 22°C
Fan side or 1.40 m		Velocity and direction (- 6.87 m/s) Internal temperature 22°C
Ceiling polystyrene sandwich panel (¹ e = 5 cm, ² λ = 0.033 W/m °K)		³ U = 0.58 W /m ² °K
Concrete walls consists: Precast concrete (e = 20 cm; λ = 0.45 W/m °K), plaster cement (e = 4 cm; λ= 0.4 W/m °K), insulating polyurethane (e = 2 cm; λ = 0.04 W/m °K)	Wall	U = 0.81 W /m ² °K
Concrete floor (e = 2 cm; λ = 2.5 W/m °K), insulating polystyrene (e=1.5 cm; λ= 0.046 W/m °K)		Heat flux sensible 101.94 W/m ²
Side wall symmetrical	Symmetry plane	

Where ¹e is thickness; ²λ is thermal conductivity W/m °K; ³U is thermal transmittance W/m² °K (adapted from Guerra-Galdo et al., 2015).

There, we combine Table 5.1 and Table 5.2, obtained 4 simulations for each poultry building (T, ST and IST) there were 12 in summer (21.5°C) and 12 in winter (5°C) (Table 5.4), a total number of 24 simulations were run.

Table 5.4. Simulations of Tunnel (T), Semi-tunnel (ST) and Improved Semi-tunnel (IST) configurations with different elements geometric.

Configuration	Type roof	Windows opening	
		Slot opening (S/O)	with flap plate (F/P)
Tunnel (T)	Flat (f)	S/O Tf _{s,w}	F/P Tf _{s,w}
	Gable (g)	S/O Tg _{s,w}	F/P Tg _{s,w}
Semi-tunnel (ST)	Flat (f)	S/O STf _{s,w}	F/P STf _{s,w}
	Gable (g)	S/O STg _{s,w}	F/P STg _{s,w}
Improved Semi-tunnel (IST)	Flat (f)	S/O ISTf _{s,w}	F/P ISTf _{s,w}
	Gable (g)	S/O ISTg _{s,w}	F/P ISTg _{s,w}

Where subindex *s* represent summer simulations and *w* represents winter simulations.

5.3 Results and discussions

5.3.1 Effect of roof shape

All parameters were estimated at a height of 0.2 m (animal level). The roof shapes have an accelerating effect on air velocity as a consequence of the reduced section. However, this accelerating effect differs from one roof shape to another. When comparing flat and gable roof positions to each other, it can be noticed that the highest maximum increase in stream wise velocity occurred on flat roof in summer. However, in winter the highest air velocity occurred with gable roof with flaps plate in the slot opening (8° angle). According to Sosa (1999) roof shape is important for natural ventilation and using gable roof takes advantage of better dynamics effect on wind ventilating interior environment. However, Norton (2009) observed that during wind dominated ventilation the most over-ventilated regions in all buildings are situated closest to the gable walls. This is due to the incoming flow forming a boundary-layer flow at the gable wall as a result of the Coanda effect (Newman B., 1961; Wille and Fernholz, 1965). The formation of a Coanda jet depends on aerodynamic and

geometric parameters related to the inlet jet, the Reynolds number, and the distance of the inlet opening from the lateral wall (Awbi H., 1991; Moureh and Flick, 2005). As a direct result of this phenomenon, the indoor airspeeds are increased closest to the gable wall (Norton et al., 2009). Some studies focused on buildings with a gable roof and asymmetric opening positions can be consulted in the references; Peren (2014) found that for wind-driven cross-ventilation, the airflow rate increases when increasing the roof inclination angle with more of 18° compared with flat roof. Also, Kindangen (1997), observed that roof height has a strong influence on the indoor airflow in buildings with wind-driven natural ventilation. Under mechanical ventilation, however, the effect of the roof configuration has not been studied in depth and the main effects reported are based on reducing the section to increase air velocity, which is particularly interesting for summer conditions.

The results in summer (Table 5.5) indicate that tunnel configuration had on average higher air velocity at animal level using flat roof (S/O T_{fh}) (1.54 ± 0.74 m/s) than using gable roof (1.10 ± 0.49 m/s). These values were similar to Bustamante (2015), who found at broiler level (0.25 m), higher average air velocity both using CFD (1.59 ± 0.68 m/s) and by means of direct measurements (1.55 ± 0.66 m/s). This system showed a uniform air exchange through the whole extent of the barn at high velocities in the same direction using negative pressure forced ventilation, but lower velocity in the semi-tunnel (ST) and improved semi-tunnel (IST) configurations.

The S/O T_h configuration had a comfort area attending to air velocity (values ranging from 0.5-2.0 m/s) which was 49.9% with flat roof and raised until 86.2% when gable roof was considered. The area with air velocity over 2.0 m/s was highest (36.78%) when considering flat roof S/O. However, in general terms ST and IST configuration decreased the proportion of area at comfort velocity ranges (0.5-2.0 m/s) when gable roof was installed, independently of the presence or absence of flaps. These two configurations had the highest proportion of area with

air velocity within the range 0.5-1.0 m/s but the lowest with velocities higher than 1.5 m/s.

Table 5.5. Average \pm standard deviation velocity (m/s), comfort area (%) at 0.20 m of floor in summer of Tunnel (T), Semi-tunnel (ST) and Improved Semi-tunnel (IST) configuration.

Configuration	Roof type	Flap plate	Proportion of area attending to velocity (%)						Average (m/s)
			<0.5 (m/s)	0.5-1.0 (m/s)	1.0-1.5 (m/s)	1.5-2.0 (m/s)	>2 (m/s)	0.5-2.0 (m/s)	
Tunnel (T)	Flat	No	13.27	15.94	12.85	21.15	36.78	49.95	1.54 \pm 0.74
		Yes	9.10	27.86	17.45	17.77	27.82	63.08	1.37 \pm 0.66
	Gable	No	13.24	31.02	24.95	30.23	0.57	86.19	1.10 \pm 0.49
		Yes	11.84	26.87	28.00	32.75	0.53	87.62	1.15 \pm 0.48
Semi-tunnel (ST)	Flat	No	18.30	47.47	33.83	0.40	0.00	80.05	0.83 \pm 0.32
		Yes	16.66	60.26	22.00	0.82	0.25	83.09	0.78 \pm 0.29
	Gable	No	27.40	60.64	11.14	0.73	0.10	72.50	0.77 \pm 0.30
		Yes	19.23	51.22	28.62	0.81	0.12	80.65	0.82 \pm 0.32
Improved Semi-tunnel (IST)	Flat	No	11.55	47.71	39.58	1.16	0.00	88.45	0.89 \pm 0.31
		Yes	16.56	64.59	18.13	0.58	0.14	83.30	0.77 \pm 0.26
	Gable	No	23.03	63.49	12.55	0.81	0.13	76.84	0.72 \pm 0.27
		Yes	17.95	54.53	26.55	0.79	0.19	81.86	0.79 \pm 0.31

The T, ST, IST configurations with gable roof had the highest proportion of area in a comfort zone regarding to temperature (range from 18-25°C). However, when using with flat roof S/O we increased the proportion of area in the range 23-24°C. In contrast, using flat roof F/P and gable roof with or without flap plate increased the proportion of temperatures within the range 22-23°C. Tunnel configuration using flat roof F/P had higher area (12.0%) of temperature higher 25°C in comparison with ST and IST, whereas IST gable roof and flaps provided lower average temperature at animal level (22.90 \pm 0.92°C) than when considering a flat roof (table 5.6).

The tunnel using gable roof type had the highest comfort area at broiler height regarding the index of temperature and velocity (ITV ranging from 22 to 25°C) and this area was lowest with flat roof. Also, flat roof with flap plate increased area of ITV lower than 22°C (35.22%). Tunnel gable roof F/P had on average the lowest ITV (22.94±1.30°C), but in contrast the IST configuration had higher comfort area considering ITV when compared with T and ST configurations (table 5.7).

Table 5.6. Average ± standard deviation temperature (°C), comfort area (%) at 0.20 m of floor in summer of Tunnel (T), Semi-tunnel (ST) and Improved Semi-tunnel (IST) configuration.

Configuration	Roof type	Flap plate	Proportion of area attending to temperature (%)						Average (°C)
			<22	22-23	23-24	24-25	>25	18-25	
			(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	
Tunnel (T)	Flat	No	0.00	30.98	52.31	8.08	8.63	91.37	23.55±1.01
		Yes	5.46	61.80	12.92	7.85	11.97	88.03	23.18±1.31
	Gable	No	0.89	66.91	20.20	6.15	5.85	94.15	22.96±0.90
		Yes	3.68	63.91	18.87	5.88	7.66	92.82	22.96±1.0
Semitunnel (ST)	Flat	No	0.00	33.19	50.88	9.03	6.91	93.03	23.45±0.82
		Yes	5.48	49.43	22.79	11.42	10.89	89.11	23.24±1.22
	Gable	No	0.71	57.00	26.61	9.38	6.30	93.70	23.09±0.95
		Yes	1.97	60.92	23.33	7.21	6.57	93.43	23.14±1.0
Improved Semitunnel (IST)	Flat	No	0.00	33.56	53.79	7.17	5.48	94.52	23.37±0.79
		Yes	3.38	54.08	24.58	10.99	6.97	93.03	23.15±1.09
	Gable	No	3.98	61.03	22.47	8.11	4.41	95.59	22.93±0.9
		Yes	6.16	60.11	22.18	6.83	4.71	95.29	22.90±0.92

Table 5.7. Average \pm standard deviation ITV ($^{\circ}\text{C}$), comfort area (%) at 0.20 m of floor in summer of Tunnel (T), Semi-tunnel (ST) and Improved Semi-tunnel (IST) configuration.

Configuration	Type roof	Flap plate	Proportion of area attending to ITV (%)					Average ($^{\circ}\text{C}$)
			<22 ($^{\circ}\text{C}$)	22-25 ($^{\circ}\text{C}$)	25-30 ($^{\circ}\text{C}$)	>30 ($^{\circ}\text{C}$)	18-25 ($^{\circ}\text{C}$)	
Tunnel (T)	Flat	No	27.05	56.79	16.11	0.05	83.83	23.24 \pm 1.54
		Yes	35.22	52.75	12.02	0.01	87.97	22.96 \pm 1.52
	Gable	No	9.25	82.06	8.67	0.02	91.32	23.01 \pm 1.20
		Yes	14.76	75.73	9.50	0.02	90.48	22.94 \pm 1.30
Semitunnel (ST)	Flat	No	0.00	85.75	14.06	0.19	84.23	23.85 \pm 1.17
		Yes	3.32	77.89	18.75	0.04	81.27	23.71 \pm 1.51
	Gable	No	0.53	83.85	15.57	0.05	84.38	23.6 \pm 1.49
		Yes	11.56	74.63	13.65	0.17	86.18	23.44 \pm 1.48
Improved Semitunnel (IST)	Flat	No	0.00	90.36	9.59	0.05	90.36	23.64 \pm 0.98
		Yes	1.48	83.48	14.60	0.44	84.96	23.61 \pm 1.39
	Gable	No	2.09	85.59	12.23	0.08	87.69	23.51 \pm 0.9
		Yes	11.78	76.33	11.79	0.09	88.11	23.35 \pm 1.35

In the winter period outside temperatures was set to 5 $^{\circ}\text{C}$ in the three configurations. The use of gable roof increased slightly air velocity at animal level (table 5.8) and compared to flat roof, it showed on average air velocity (S/O T_{g_w} 0.31 \pm 0.07 m/s). Air velocity was lowest for S/O IST f_w (0.24 \pm 0.05 m/s). ST and IST configuration increased comfort area in terms of temperature using flat roof, but this was lowest with gable roof (velocities of 0.1-0.3 m/s), IST presented the lowest area of velocities within the range 0.3-0.5 m/s.

The S/O tunnel gable roof model showed the lowest average temperature (17.83 \pm 3.25 $^{\circ}\text{C}$), where ST gable roof S/O had the highest (19.35 \pm 2.67 $^{\circ}\text{C}$) (Table 5.9). We also observed that the area with temperature lower than 18 $^{\circ}\text{C}$ and in the range 18-25 $^{\circ}\text{C}$ was lowest in tunnel configuration (T), and higher in ST and IST. In cold season Seo (2009) observed in a conventional model temperature of 21.5 $^{\circ}\text{C}$ at 0.20 m height. Also, Mostafa (2012) found for a standard design an average temperature in the broiler zone of 23.9 $^{\circ}\text{C}$. As expected, the lowest temperature was located

close to the inlet slots and the highest temperature was located close to the exhaust fans by dragging sensible heat loss.

In our analysis, the tunnel gable roof S/O configuration showed on average lower proportion of area with ITV in the comfort interval (18-25°C) and ITV was on average 19.14±3.57°C. We also observed that tunnel with gable roof had more area with ITV lower than 18°C and ITV in the range 25-30. The S/O ST gable roof configuration had highest average ITV (20.81±2.86°C) and area of ITV in the comfort interval (93.04%), as show table 5.10.

Table 5.8. Average ± standard deviation velocity (m/s), comfort area (%) at 0.20 m of floor in cold of Tunnel (T), Semi-tunnel (ST) and Improved Semi-tunnel (IST) configuration.

Configuration	Roof type	Flap plate	Proportion of area attending to velocity (%)				Average (m/s)
			<0.1 (m/s)	0.1-0.3 (m/s)	0.3-0.5 (m/s)	>0.5 (m/s)	
Tunnel (T)	Flat	No	0.61	59.19	40.20	0.00	0.27±0.09
		Yes	1.09	69.90	29.01	0.00	0.25±0.09
	Gable	No	0.86	39.36	59.77	0.01	0.31±0.07
		Yes	1.46	53.14	45.40	0.00	0.28±0.08
Semi-tunnel (ST)	Flat	No	1.54	70.05	28.40	0.00	0.26±0.07
		Yes	1.65	70.68	27.66	0.00	0.26±0.08
	Gable	No	0.36	50.98	48.58	0.08	0.29±0.06
		Yes	0.72	52.96	46.30	0.02	0.28±0.06
Improved Semi-tunnel (IST)	Flat	No	0.99	86.85	12.15	0.01	0.24±0.05
		Yes	2.45	81.25	16.30	0.00	0.24±0.06
	Gable	No	0.21	72.23	27.27	0.28	0.27±0.05
		Yes	1.04	77.85	21.11	0.00	0.26±0.06

Table 5.9. Average \pm standard deviation temperature ($^{\circ}\text{C}$), comfort area (%) at 0.20 m of floor in cold of Tunnel (T), Semi-tunnel (ST) and Improved Semi-tunnel (IST) configuration.

Configuration	Type roof	Flap plate	Proportion of area attending to temperature (%)						Average ($^{\circ}\text{C}$)
			<18 ($^{\circ}\text{C}$)	18-20 ($^{\circ}\text{C}$)	20-22 ($^{\circ}\text{C}$)	22-25 ($^{\circ}\text{C}$)	>25 ($^{\circ}\text{C}$)	18-25 ($^{\circ}\text{C}$)	
Tunnel (T)	Flat	No	56.47	16.60	10.82	15.03	1.08	42.45	18.05 \pm 3.25
		Yes	56.94	16.51	10.56	15.00	0.99	42.07	18.27 \pm 2.97
	Gable	No	60.15	13.59	10.76	14.83	0.68	39.18	17.83 \pm 3.25
		Yes	61.09	13.20	10.43	14.63	0.65	61.74	17.99 \pm 3.03
Semi-tunnel (ST)	Flat	No	42.10	23.57	17.91	14.91	1.52	56.39	18.85 \pm 2.91
		Yes	43.05	23.57	17.37	14.39	1.62	55.33	18.84 \pm 2.86
	Gable	No	32.76	26.22	21.94	18.46	0.61	66.63	19.35 \pm 2.67
		Yes	36.22	24.42	20.46	18.11	0.78	63.0	19.25 \pm 2.68
Improved Semi-tunnel (IST)	Flat	No	46.58	18.89	14.11	17.27	3.16	50.26	18.57 \pm 3.58
		Yes	47.35	22.07	13.85	14.97	1.77	50.88	18.45 \pm 3.24
	Gable	No	35.98	25.43	19.67	18.15	0.77	63.25	19.16 \pm 2.81
		Yes	37.00	26.08	18.91	17.34	0.67	62.33	19.10 \pm 2.74

Table 5.10. Average \pm standard deviation ITV ($^{\circ}$ C), comfort area (%) at 0.20 m of floor in cold of Tunnel (T), Semi-tunnel (ST) and Improved Semi-tunnel (IST) configuration.

Configuration	Type roof	Flap plate	Proportion of area attending to ITV (%)					Average ($^{\circ}$ C)	
			<18 ($^{\circ}$ C)	18-22 ($^{\circ}$ C)	22-25 ($^{\circ}$ C)	25-30 ($^{\circ}$ C)	>30 ($^{\circ}$ C)		18-25 ($^{\circ}$ C)
Tunnel (T)	Flat	No	41.84	31.31	14.61	12.14	0.10	87.77	19.55 \pm 3.80
		Yes	39.42	33.99	14.49	12.00	0.09	87.91	19.88 \pm 3.42
	Gable	No	45.52	31.31	14.27	8.84	0.05	91.11	19.14 \pm 3.57
		Yes	45.64	31.00	13.70	9.58	0.07	90.35	19.4 \pm 3.32
Semi-tunnel (ST)	Flat	No	26.44	41.06	22.60	9.68	0.22	90.10	20.43 \pm 3.31
		Yes	25.78	43.03	20.48	10.41	0.30	89.30	20.44 \pm 3.25
	Gable	No	19.50	45.68	27.85	6.96	0.00	93.04	20.81 \pm 2.86
		Yes	20.93	44.83	26.69	7.54	0.00	92.46	20.76 \pm 2.86
Improved Semi-tunnel (IST)	Flat	No	31.86	34.25	21.04	12.36	0.49	87.15	20.21 \pm 3.97
		Yes	31.04	38.95	19.79	9.93	0.29	89.78	20.1 \pm 3.55
	Gable	No	20.79	45.05	26.12	8.04	0.00	91.96	20.68 \pm 3.03
		Yes	20.05	47.10	25.32	7.53	0.00	92.47	20.66 \pm 2.88

5.3.2 Analysis with inlet flaps

The main function of ventilation is to allow the exchange of air with the outside, which contributes to control indoor temperature, moisture and the concentration of pollutant gases. Air inlets are essential in defining the direction of the incoming airflow, and in maintaining the thermal condition into the animal occupied zone by providing sufficient inlet air velocity. Changing the size of the slot opening or the type of inlet affected the direction and magnitude of inlet air velocity both in winter and summer simulations (Kwon et al., 2015). The flaps plates direct inlet air velocity inwardly as shown Figure 5.3. When windows have no flaps the velocity is accelerated and directed downward immediately after passing through the opening. As predicted by Karava and Stathopoulos (2012), the air flow trajectory lowered when windows are close to fans as a consequence of the higher depression (Figure 5.4). These variations depended the geometry of the openings, while the pressure coefficients depend on the overall geometry of the building, the location of the windows in the building itself, and the wind incidence on the building (Demmers et al., 2001).

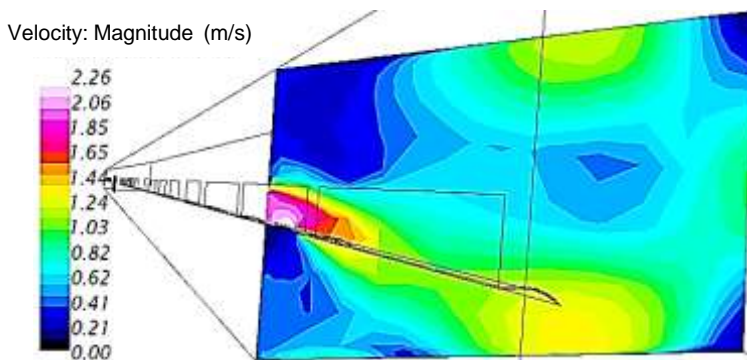


Figure 5.3. Windows first started building F/P

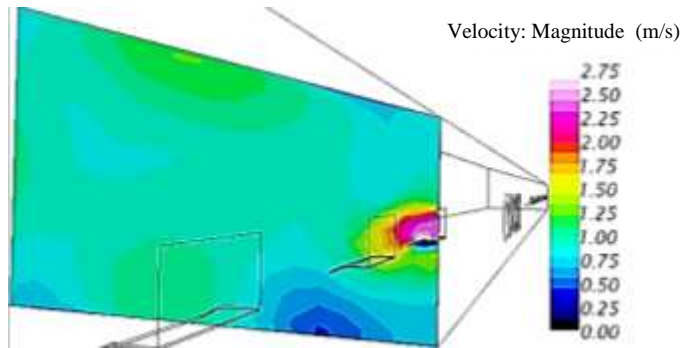


Figure 5.4. Windows close to fans F/P

During the summer period, the IST S/O configuration using flat roof showed the highest proportion of area at comfort regarding air velocity (0.5-2.0 m/s). In this case, no flap plates were considered and air entered directly without obstacle. This effect was less evident when using gable roof. The effect of considering flap plates in T, ST and IST configuration was a decrease of the proportion of the area at temperatures between 23 and 24°C. ISTG_s configuration showed the highest proportion of area at comfort regarding temperature (18-25°C). Similarly, the addition of flaps increased the area of ITV < 22°C in all configurations.

In winter period, the flap plate in the inlet windows increased the air velocity of the incoming air. According to Rufes (1999) when the inlet is located higher in the wall, the flap plate with different deflection angle directed the incoming air stream across the ceiling, regardless of the outlet. This will govern the direction of the indoor air stream and this will be independent of the outlet opening position.

In Figure 5.5 it is shown that the use of flap plates in winter conditions regulate air flow rate in vertical projection on walls and roof producing a phenomenon adhesion of air on the surface due to the existence lower pressures in the space comprised between surface and air flow (Escorihuela et al., 1983). Therefore, the increasing velocity gradient at the walls was completely attributable to the augmentation of the airflow rate (Van Overbeke et al., 2014).

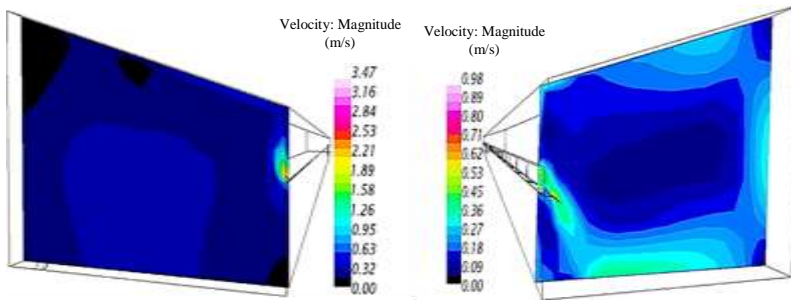


Figure 5.5. Effect of flap angle (1° , left and 90° , right) on air velocity.

In all configurations (T, ST and IST) the flap increased the area of air velocity within the range 0.1-0.3 m/s and decreased area with velocities of 0.3-0.5 m/s. However, the effect of flap plate in the IST flat roof model decreased the proportion of area with velocities from 0.1 to 0.3 m/s and increased it when using gable roof. We also observed that the flap plate at the inlet windows increased the area of temperature $<18^\circ\text{C}$ and decreased with temperature $18\text{-}25^\circ\text{C}$ for T and ST configurations. In contrast, IST configuration increased the area of temperatures between 18 and 20°C , and decreased the area between 20 and 25°C .

5.3.3 Effect slot opening angle

The IST configuration registered a slight variation in the average in air velocity at animal level (0.26 m/s) when considering different angles from 90° to 1° at 0.20 m of floor (table 5.11). The velocity was highest the inlet and decreased gradually when the stream entered the building next to the roof. The center of the stream continued moving at a similar velocity to the entrance, while the outer edges of the stream are slowed down by friction and turbulent mixing with the surrounding air. The flap plate angle of 16° registered the highest area of velocities between 0.1-0.3 m/s at animal level, whereas the angle 90° increased the area with air velocities between velocities 0.3-0.5 m/s. There were small differences in pressure distribution. The warm air has less density and ascended, which facilitated the cold air inlet by to drop due to the higher density and mix with the rest of the air (Bruce, 1982). Therefore, air close to the ceiling mixes with the

fresh incoming air before it reaches to the broiler zone. However, the differential pressures did not seem to affect air velocity at 0.2 m above floor level of the broiler house (Blanes-Vidal et al., 2007).

Table 5.11. Average \pm standard deviation velocity (m/s), comfort area (%) at 0.20 m of floor in winter for IST configuration for different window opening angles.

Flap plate angle	Comfort area velocity (%)				Average (m/s)
	<0.1 (m/s)	0.1-0.3 (m/s)	0.3-0.5 (m/s)	>0.5 (m/s)	
1°	1.10	72.79	26.11	0.00	0.26 \pm 0.07
5°	1.10	76.17	22.73	0.00	0.26 \pm 0.06
8°	1.04	77.85	21.11	0.00	0.26 \pm 0.06
16°	0.63	81.06	18.31	0.00	0.26 \pm 0.05
35°	0.18	74.78	25.05	0.00	0.26 \pm 0.05
90°	1.19	69.26	28.76	0.79	0.27 \pm 0.08

Logically, the largest air velocity happened when small inlets and large outlets were simultaneously considered. The total force is acting on a small area and forcing air through the opening at a high pressure. This effect was lower when flaps were open (Figure 5.5). If the inlet opening is large, air velocity will be lower as a consequence of the higher section, but the airflow rate increases in any case. Also, Kwon (2015) observed that changing the opening angle affected the distance travelled by the incoming cold air before mixing with the rest of the air. This indicated that the initial angle of the window flaps could influence the mixing behavior of cold and warm air, and therefore affecting the resulting inside air temperature at animal level.

Regarding the conditions potentially experimented by the animals, reducing the opening (1°) involved the highest average temperature at animal level (on average 20.28 \pm 2.5 °C, see Table 5.12). This also involved a more homogeneous distribution of temperature and ITV (Table 5.13). On the contrary, opening the

window flaps (90°) increased the area with temperature lower than 18°C, which is related to increased losses of sensible heat in winter conditions. The average temperatures obtained in this study are similar to those reported by Song (2010), who found 19.7±1.21 °C in a tunnel configuration using flaps and described similar behavior of inlet air flow depending on windows characteristics.

Table 5.12. Average ± standard deviation temperature (°C), and distribution of area regarding different velocity intervals (%) at 0.20 m of floor in winter for IST configuration for different window opening angles.

Flap plate angle	Comfort area temperatura (%)						Average (°C)
	<18 (°C)	18-20 (°C)	20-22 (°C)	22-25 (°C)	>25 (°C)	18-25 (°C)	
1°	25.76	25.32	24.44	23.06	1.41	72.82	20.28±2.5
5°	38.44	23.84	18.80	18.24	0.67	60.89	19.00±2.93
8°	37.00	26.08	18.91	17.34	0.67	62.33	19.10±2.74
16°	36.14	25.54	19.15	18.50	0.67	63.19	19.16±2.82
35°	34.92	25.24	20.23	18.74	0.87	64.21	19.26±2.81
90°	40.46	30.49	20.41	8.62	0.03	59.66	18.70±2.26

Table 5.13. Average \pm standard deviation ITV ($^{\circ}$ C), comfort area (%) at 0.20 m of floor in winter of IST with flap plate angle of slot opening different model.

Flap plate angle	Comfort area ITV (%)						Average ($^{\circ}$ C)
	<18 ($^{\circ}$ C)	18-22 ($^{\circ}$ C)	22-25 ($^{\circ}$ C)	25-30 ($^{\circ}$ C)	>30 ($^{\circ}$ C)	18-25 ($^{\circ}$ C)	
1 $^{\circ}$	10.18	42.64	34.98	12.20	0.00	87.80	21.74 \pm 2.74
5 $^{\circ}$	22.56	43.51	25.42	8.51	0.00	91.49	20.56 \pm 3.11
8 $^{\circ}$	20.05	47.10	25.32	7.53	0.00	92.47	20.66 \pm 2.88
16 $^{\circ}$	19.57	45.72	26.14	8.57	0.00	91.43	20.74 \pm 3.01
35 $^{\circ}$	18.84	44.65	28.16	8.34	0.00	91.66	20.84 \pm 2.99
90 $^{\circ}$	20.03	54.70	22.80	2.46	0.00	97.63	20.22 \pm 2.42

5.4 Conclusions

The CFD results demonstrate the performance of different distribution of elements for summer and winter conditions. The relative position of windows and fans, the roof shape, and inlet window properties were studied. All these parameters affected the distribution and homogeneity of ambient parameters (temperature, air velocity and ITV). In general terms, the IST configuration provided better results for summer conditions due to a better distribution of air velocity. Roof type (flat or gable roof) also affected wind distribution and using flat roof tended to increase wind velocity. Finally, reducing window opening increased the homogeneity of ambient parameters at animal level, which is considered to be of particular interest under winter conditions. Increasing window opening also increased the average air velocity at animal level and decreased the ambient temperature, which is undesirable under winter conditions. Further validation of the different models and comparisons with

CFD is the next step. Nevertheless, this tool can be used to simulate and optimize different ventilation systems.

5.5 References

- Abreu, V., Abreu, P. de, Jaenisch, F., Coldebella, A. and Paiva, de D. P. (2011). Effect of floor type (dirt or concrete) on litter quality, house environmental conditions, and performance of broilers. *Revista Brasileira de Ciência Avícola* 13(2): 127–137.
- Álvarez, M. A. J. (2009). Estudio de las características geométricas y del comportamiento aerodinámico de las mallas antiinsectos utilizadas en los invernaderos como media de protección vegetal. Tesis doctoral. Universidad de Almería.
- Awbi, H. (1991). *Ventilation and Buidling*. Spon Press. London and New York.
- Bjerg, B., Svidt, K., Zhang, G., Morsing, S. and Johnsen, J.O. (2002). Modeling of air inlets in CFD prediction of airflow in ventilated animal houses. *Computers and Electronics in Agriculture*. 34: 223–235.
- Bjerg, B., Liberati, P., Marucci, A., Guoqiang, Z., Banhazi, T., Bartzanas, T., Cascone G., Lee I.-B. and Norton, T. (2013). Modelling of ammonia emissions from naturally ventilated livestock buildings. Part 2, air change modelling. *Biosystems Engineering*. 116: 246–258.
- Blanes-Vidal, V., Fitas, V. and Torres, A. (2007). Differential pressure as a control parameter for ventilation in poultry houses: Effect on air velocity in the zone occupied by animals. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 5(1): 31–37.
- Bruce, J. M. (1982). Ventilation of a model livestock building by thermal buoyancy. *Transactions of the ASAE*. 25(6): 1724–1726.

- Bustamante, E., García-Diego, F.-J., Calvet, S., Torres, A. and Hospitaler, A. (2015). Measurement and numerical simulation of air velocity in a tunnel-ventilated broiler house. *Sustainability*. 7(2): 2066–2085.
- Demmers, T., Phillips, V., Short, L., Burgess, L., Hoxey, R. and Wathes, C. (2001). 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(1): 107–116.
- Escorihuela, J., Esteban, J. L., Futos, J. M., Olaya, M. and Torroja, B. (1983) Bases para el diseño solar pasivo. GRAFIMAD Madrid.
- Guerra-Galdo, E. H., Calvet, S. S., Estellés, B. F. and López-Jiménez, P. A. (2015). CFD model for ventilation assessment in poultry houses with different distribution of windows. *International Journal Energy and Environment*. 6 (5): 411–424.
- Karava, P. and Stathopoulos, T. (2012). Wind-induced internal pressures in buildings with large façade openings. *Journal of Engineering Mechanics*. 138(4): 358–370.
- Kindangen, J., Krauss, G. and Depecker, P. (1997). Effects of roof shapes on wind-induced air motion inside buildings. *Building and Environment*. 32: 1–11.
- Kwon, K., Lee, I., Zhang, G. Q. and 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.
- Launder, B. E. and Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 3: 269–289.

- Lee, I. B., and Short, T. (2000). Two-dimensional numerical simulation of natural ventilation in a multi-span greenhouse. *Transactions of the ASAE*. 43(3): 745–753.
- Lee, I., Sase, S. and Sung, S. (2007). Evaluation of CFD accuracy for the ventilation study of a naturally ventilated broiler house. *Japan Agricultural Research Quarterly*. 41: 53–64.
- Mazanowski, A. (2011). Modern broiler chicken production. Ed. Pro Agricola. Gerzwald. 246.
- Mostafa, E., Lee, I.-B., Song, S.-H., Kwon, K.-S., Seo, I.-H., Hong, S.-W., Hwang, H.-S., Bitog, J. P. and Han, H.-T. (2012). Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside building broiler fitted with duct ventilation system. *Biosystems Engineering*. 112 (4): 293–303.
- Moureh, J. and Flick, D. (2005). Airflow characteristics within a slot-ventilated enclosure. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 26(1): 12–24.
- Newman, B. G. (1961). The deflection of plane jets by adjacent boundaries-Coanda effect. In *Boundary Layer and Flow Control* (ed. G. V. Lachmann). Pergamon. 1: 232–264.
- Norton, T., Grant, J., Fallon, R. and Sun, D.W. (2010). Assessing the ventilation performance of a naturally ventilated livestock building with different eave opening conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*. 7(1): 7–21.
- Oliveira Rocha, K. S., Ferreira Tinôco, I. de F., Helvecio Martins, J., Osorio Saraz, J. A. and Arêdes Martins, M. (2014). Modeling and simulation of internal environment conditions in high-density poultry houses with ventilation using computational fluid dynamics. *International Conference of Agricultural Engineering*. Zurich 6-10 July, 2014. Pp 1–8.
- Osorio H., R., Ferreira T. I. de F., Osorio S., J. A., Oliveira R., K. S. and Guerra G., L. M. (2013). Modeling of the thermal environments in shed negative pressure tunnel type of

- chicks. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 66 (2): 7085–7093.
- Pedersen, S. and Sällvik, K. (2002). 4th Report of Working Group on Climatization of Animal Houses. International Commission of Agricultural Engineering, Section II. Denmark. Pp 1–45.
- Peren, J. I., Van Hooff, T. and Leite B., C. C. (2014). Blocken B. CFD analysis of cross-ventilation of a generic isolated building with asymmetric opening positions: impact of roof angle and opening location. *Building and Environment*. Pp 1–21.
- Rufes, M. P. (1999). *Difusión del aire en locales*. Ediciones CEAC. Barcelona.
- Seo, I. H., Lee, I. B., Moon, O. K., Kim, H.T., Hwang, H. S., Hong, S. W., Bitog, J., Yoo, J. I., Kwon, K. S., Kim, Y. H. and Han, J. W. (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.
- Song, S.-H., Lee, I.-B., Hwang, H.-S., Hong, S.-W., Seo, I.-H., Bitog, J.P., Kwon, K.-S. and 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). Pp 1–10.
- Sosa G., M. E. (1999). *Ventilación natural efectiva y cuantificable. Comfort térmico en climas cálidos-húmedos*. Universidad Central de Venezuela. Gráficas León S.R.L. Pp 177.
- Van Overbeke, P., Pieters, J. G., De Vogeleer, G. and Demeyer, P. (2014). Development of a reference method for airflow rate measurements through rectangular vents towards application in naturally ventilated animal houses: Part 1:

Manual 2D approach. *Computers and Electronics in Agriculture*. 106: 31–41.

Wiley O., J. (2012). Improving commercial broiler attic inlet ventilation through data acquisition coupled with CFD analysis. Mississippi State University. Thesis. Pp 1–108.

Wille, R. and Fernholz, H. (1965). Report on the first European Mechanics Colloquium, on the Coanda effect. *Journal of Fluid Mechanics*. 23(4): 801–819.

Wisate, C., Suntivarakorn, R. and Winitchai, S. (2013). Improvement of air change rate efficiency for a broiler house with multi inlet system. *Advanced Science Letters*. 19(9): 2699–2702.

Yahav, S., Straschnow, A., Vax, E., Razpakovski, V. and Shinder, D. (2001). Air velocity alters broiler performance under harsh environmental conditions. *Poultry science*. 80 (6): 724–726.

Capítulo 6: Validation of CFD modelling of an experimental poultry house with heat sources

Abstract

Environmental conditions inside livestock buildings play a crucial role in terms of animal wellbeing and performance. The management of ventilation is key to control heat and pollutants balances in the barn. The design of the ventilation configuration is key to achieve these goals. Computational fluid dynamics arise as a major tool to improve livestock buildings designs. An experimental facility representing the section of a broiler building was used to test the effect of different air inlet configurations on air velocity and temperature. Three different inlet heights were tested: 0.64 m, 1.24 m and 1.82 m above of floor at two ventilation rates (40 and 100%). Three black cardboard boxes with luminaries were used to represent heat sources. Air velocity and temperature values were measured at three different locations (1, 5.56 and 8 m from the air inlet wall) and two heights (0.2 and 1.4 m). Air velocities were also simulated using computational fluid dynamics tools. Results showed a reasonable agreement (RMSE below 20%) in most validation points in terms of air velocity magnitude with variation in terms of direction. For most cases, differences in terms of air velocity and temperatures registered at animal level were not affected by inlet location, despite medium height inlets provided a higher homogeneity of results. Air velocity at animal level was neither affected by ventilation rate. By contrast, air temperatures at animal level were lower when higher ventilation rates were considered. No clear recommendations for air inlet location can be drawn from these results.

6.1 Introduction

Providing animals with appropriate environmental conditions is a requirement to ensure animal welfare and to reach a proper livestock production. This is particularly critical in intensive systems, such as broiler production. Achieving the necessary thermal comfort for animals arises as one of the main challenges for the farmer, since there are three main factors involved: air temperature, air humidity and air velocity. Furthermore, for broilers these requirements vary with animal age. At the end of the rearing cycle of broilers it is known that temperature should be around 19-20°C (Xin et al., 1994; Estrada-Pareja et al., 2007), relative humidity should be kept between 60 and 65% (Mazanowski, 2011) and air velocity must be kept at less than 2.0 m/s (Yahav et al., 2001). Providing these conditions may be challenging for part of the year in a wide range of regions.

Besides climatic conditions in the farm surroundings, the characteristics and operation of the buildings in which the animals are kept; are essential to control these climatic factors. Thus, the structure of the building, ventilation system, fans distribution, air inlets size, opening angle and orientation, thermal characteristics of the building, etc. must be optimized to ensure air and thermal exchanges (Hartung, 1994; Bjerg et al., 2013; Cao et al., 2014; Rojano et al., 2016). An appropriate design of the building, adapted to climatic conditions is crucial for the performance of animals.

Computational Fluid Dynamics (CFD) has been traditionally used as a tool to improve the design of agricultural buildings. In poultry houses, CFD has been widely used to model the distribution of air velocity inside the building, and the use of this tool is increasing to analyse also temperature, humidity, hazardous gases and particulate matter distribution patterns (Blanes-Vidal et al., 2008; Mostafa et al., 2012; Bustamante et al., 2013, 2015; Osorio et al., 2015; Oliveira et al., 2014; Rojano et al., 2016). Different ventilation systems for poultry buildings have been evaluated using CFD, mainly for mechanical ventilation, in relation to the position of air inlets and outlets (Bustamante et al.,

2015; Kic et al., 2009; Mostafa et al., 2012; Blanes-Vidal et al., 2007; Bustamante et al., 2013; Zajicek et al., 2012; Kwon et al., 2015). The use of air diffusers (Seo et al., 2009; Song et al., 2010), the effect of curtains (Osorio et al., 2013, 2015), or the performance of heating systems (Rojano et al., 2015) have been also considered. Natural ventilation performance has also been addressed using CFD techniques (Oliveira et al., 2014; Osorio et al., 2015).

In mechanically ventilated poultry buildings, the position and orientation of air inlets plays a crucial role to achieve optimal thermal conditions (Kwon et al., 2015). Modelling and validating these alternatives would be of highest value to optimize the design of broiler buildings. Thus, the main aim of this work is to evaluate the effect of different inlet positions and opening areas on air velocity and temperature distribution in an experimental room, representing a section of a mechanically ventilated poultry building. CFD modelling and validation through direct measurements were developed and a heating surface simulating broilers sensible heat production was also placed in the room.

6.2 Materials and Methods

6.2.1 Experimental set-up

The present experiment was developed at the Environmental Laboratory in the Institute of Animal Science and Technology of the Universitat Politècnica de València in Valencia, Spain. This laboratory is integrated in a room (11.5 m length, 4.5 m width and 2.9 m height with flat roof) representing a section of a transversal, mechanically ventilated poultry building. A set of 12 orientable air inlets (Figure 6.1) were distributed in three rows (four windows per row) at different heights (0.64 m, 1.24 m and 1.82 m for the lowest, middle and higher one respectively) in one of the lateral walls. The room was also equipped with 6 variable speed exhaust fans (Model Exafan EU-56, 13600 m³/h each of nominal airflow rate), in two rows of 3 fans each, located at the opposite wall of the air inlet windows. Fans and windows could

be set at any combination in order to simulate different ventilation conditions.

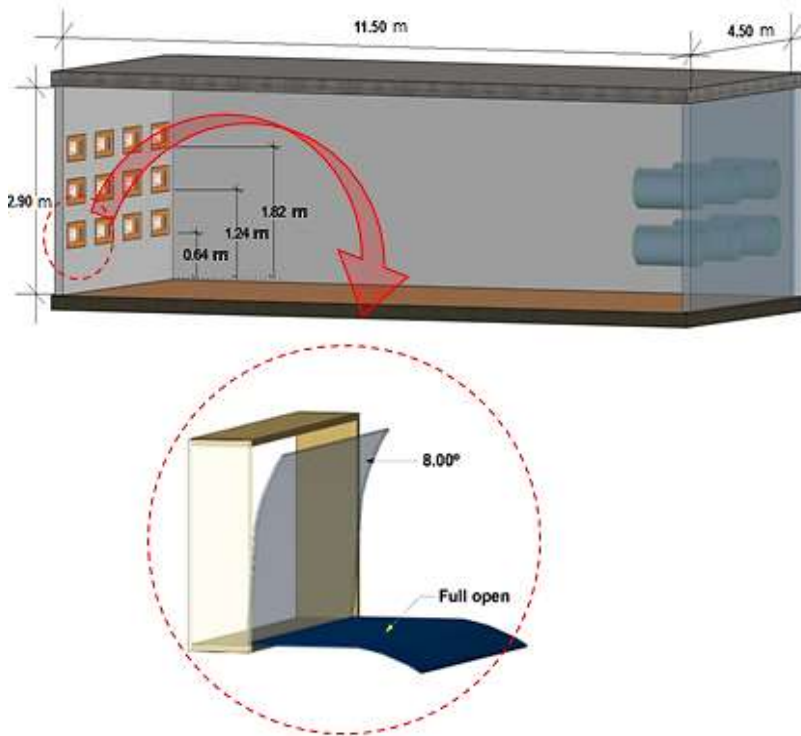


Figure 6.1. Laboratory design at full-scale with different opening angle window.

A total of six combinations (Case 1 to 6) of fans and window openings were tested (Table 6.1). In all experiments the central fan at the lower row of fans was used, which was located at a height of 0.52 m. For cases 1 to 3 the exhaust fan operated at 40% capacity and three inlet air configurations were established, consisting each of a row of windows with opening angle 8° (either the lower, Case 1, the middle, Case 2, or the upper, Case 3, row). For cases 4 to 6 the fan operated at 100% capacity; three inlet air configurations at these conditions were set by completely opening windows of each row (Cases 4, 5 and 6 for lower, middle and upper rows respectively) at each case. All configurations allowed a negative pressure ventilation system with a pressure

drop of 20 Pa, which was checked for each test with a differential pressure transducer (Setra model 267, Mass, USA, range 0-100 Pa, precision 1 Pa). The ventilation capacity of the fan was measured using a hot-wheel anemometer according to ASHRAE (2001).

Individual heat sources were simulated using three cardboard cylinders of 0.20 m diameter and 0.20 m height. Inside each cylinder settled a heat was produced by a 116 W - 230 V clear halogen bulb, representing a surface temperature body produced by an animal, (Wathes and Clark, 1981; Mitchell, 1985; Li et al. 2016). Cylinders were located at the central axis of the experimental room and luminaire inside cylinder were turned on during the experiment, at distances 1, 5.56 and 8 m from the air inlet wall (Cylinders A, B and C), as indicated in Figure 6.2.

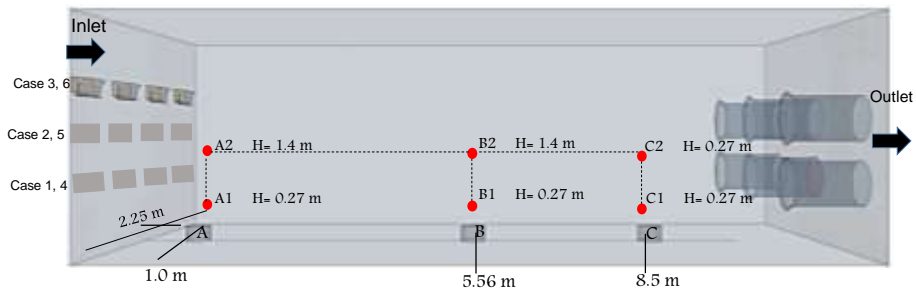


Figure 6.2. Laboratory disposition if inlets and outlets, and disposition of heated cylinders and measurement points.

6.2.2 Experimental data acquisition

All measurements were conducted under steady-state conditions. Temperature and air velocity were measured at six locations in all configurations. Measurement points were located at two heights above each of the three heated cylinders. Measurement points A1, B1 and C1 were located at expected animal level at 0.27 m height above cylinders A, B and C, respectively; similarly, measurement points A2, B2 and C2 were located at 1.40 m height, as shown in Figure 6.2. Air velocity was measured using a three-dimensional ultrasonic anemometer

(model 81000 R.M. Young Company, accuracy of $\pm 1\%$ and wind direction $\pm 2^\circ$). After 5 minutes, it was considered that steady-state conditions of temperature and air velocity were established, measurements air velocity was determined during 30 s at each position with a frequency of 0.03 Hz, and finally the three average components of wind velocity (u, v, w) were obtained. Data were processed and stored using a laptop Acer, Intel Pentium, 1.6 GHz processor and 496 MB of RAM. The room air temperature value was registered with eight temperature sensors (Hobo U13-012, Pocasset, Mass. USA) located at the six measurement points, as well as at the inlet and outlet air.

6.2.3 Numerical modelling and computational domain

CFD techniques were used to solve the Navier-Stokes equation (Launder and Spalding, 1974). As a result, the velocity and temperature profiles were calculated. Eqs. (6.1) to (6.3) represent the mass, momentum and energy conservation equations solved in CFD simulations:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \vec{v} = S_m \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \rho(\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\nabla p + \nabla \bar{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (6.2)$$

$$\bar{\tau} = \mu \left[\left(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \vec{v} I \right] \quad (6.3)$$

Where ρ is the fluid density, \vec{v} the air velocity and S_m is mass source, t is time, τ the stress tensor, μ is the eddy viscosity, g is the gravitational constant, \vec{F} is external force vector, T is air temperature for the livestock building, $^\circ\text{C}$ and I is the unit tensor contained in the control volume.

In order to solve these equations, finite volumes method was implemented (Tu et al., 2008; Oliveira et al., 2014). A mesh based on tetrahedral elements of 0.4 m and refined in the windows (0.01-0.3 m) and fan (0.06-0.2 m) was created. The

mesh was generated by StarCCM+ from CD-Adapco software (version 10.04.011). According to a previous sensitivity analysis conducted by Guerra et al. (2015) this mesh was considered to provide an adequate discretization. Calculations had various grid sizes, ranging from 311,260 control volumes in Case 1 to more than 500,000 control volumes in Case 6 (Table 6.1). The model was solved in a 3D space under steady state conditions, considering incompressible ideal gas at segregated fluid temperature and the turbulence k- ϵ model was selected according to previous references in similar studies (Guerra et al., 2015, 2016).

Table 6.1. Summary of the cases evaluated in the study, including the operation conditions and the mesh design.

Cases	Operation conditions				CFD modelling		
	Fan operation	Window opening	Window location	Differential pressure (Pa)	Number of cells	Number of interior faces	Number of vertices
Case 1	40%	8°	Lower	20	311,260	927,097	378,477
Case 2	40%	8°	Middle	20	368,277	1,097,264	432,583
Case 3	40%	8°	Upper	20	372,483	1,109,882	438,992
Case 4	100%	Fully open	Lower	20	415,607	1,246,225	510,977
Case 5	100%	Fully open	Middle	20	491,774	1,443,088	634,890
Case 6	100%	Fully open	Upper	20	506,281	1,512,491	607,339

6.2.4 Boundary conditions

Boundary conditions were established according to measured data (Table 6.2). Ventilation flow was measured from exhaust fan velocity measures (8.74 ± 0.08 m/s for 100% operation and 4.12 ± 0.06 m/s for 40% operation). Air inlets were considered an outlet pressure, where the atmospheric pressure was established at 0 Pa.

Table 6.2. Boundary conditions used in the analysis and sources conditions.

Region	Condition	Value
Air inlet	Constant pressure	Atmospheric pressure
	Environment temperature	Measured (sensor Hobo U13-012)
Air outlet	Constant velocity	Cases 1, 2, 3: 4.12 m/s
		Cases 4, 5, 6: 8.74 m/s
Wall	Smooth surface	Heat transfer coefficient: $0.81 \text{ W / m}^2 \text{ K}$
	No-slip wall Convection	
Ceiling	Smooth surface	Heat transfer coefficient: $0.58 \text{ W / m}^2 \text{ K}$
	No-slip wall Convection	
Floor	Smooth surface	Heat transfer coefficient: $1.66 \text{ W / m}^2 \text{ K}$
	No-slip wall Convection	
Heat sources	Smooth surface	Measured temperature (infrared camera)
	No-slip wall	

6.2.5 Comparison between measured and simulated data: error estimation

The comparison study is performed by means of error estimation based on RMSE (root mean squared error) of the results obtained from the CFD simulations and experimental data of air velocity and temperature measured at each point in a radius of 0.05 m (Stavarakakis et al., 2012). Any comparison was made with obtained magnitudes along the center of the building in terms of velocity-vector fields.

To obtain the percentage error between actual and simulated values, the following expression for error was then used:

$$RMSE_{[\%]} = \sqrt{\frac{\sum^n (X \text{ measured} - X \text{ simulated})^2}{n}} * 100\%$$

Where X is either the air velocity or the temperature, and n is the number of measured vs. simulated pairs.

6.3 Results and discussion

6.3.1 Air velocity

The measured and modelled air velocity in the six measurement points, for the different measurement cases, is shown in Table 6.3. Also, the distribution of simulated air velocity magnitude at the central longitudinal plane of the building is shown in Figure 6.3.

The comparison between measured and modelled values at the measurement points are also indicated in Table 6.3. Modelled values tended to underestimate measured values, particularly in some studied cases (e.g. Cases 1 and 2) and measurement points (e.g. measurement point A2). Very close correspondence (less than 10% divergence) between measured and modelled values was found however in Case 2. In general, relative differences lower than 20% were found for situations excluding Cases 1 (A1, C1, 2, point) and Case 2. RMSE values of modelled vs. measured air velocity are presented in Table 6.3 highest values might be caused by the turbulence generated by the windows located at a lower position. Cases 2 and 3 presented

lower RMSE values at animal height, probably as a lower effect of turbulence due to the higher location of air inlets. For 100% ventilation, RMSE values were lower than for 40% ventilation, particularly at animal height positions. In these conditions there was a good agreement between the numerical simulation and the measured values, except for measurement point A1 in cases 4, 5 and 6, in which measured values were considerably higher than modelled ones.

In all measurement points and all window distributions, increasing ventilation from 40% to 100% increased measured air velocity, except for measurement point B1 for cases 2 to 5 and 3 to 6. For fans operating at 40% capacity, the highest values of air velocity were found at location B1 and B2. However, at 100% fan operation highest velocities were found at points A1 and A2.

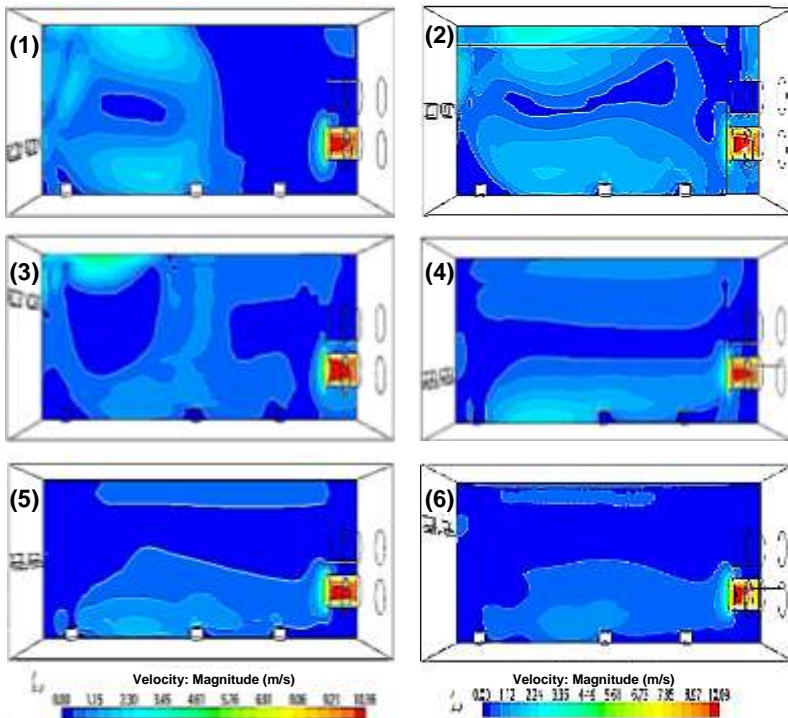


Figure 6.3. Simulated air velocity distribution in the central longitudinal plane at different fan and window configurations. Case (1), case (2), case (3), case (4), case (5), case (6).

Table 6.3. Measured (average \pm standard deviation) and modelled values of air velocity at the measurement points, expressed in m/s. Deviations of modelled respect to measured values are also indicated as a percentage.

Item	Point	Ventilation 40%			Ventilation 100%		
	Inlets row open	Lower	Middle	Upper	Lower	Middle	Upper
	Point	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Measured (m/s)	A1	0.27 \pm 0.05	0.31 \pm 0.11	0.31 \pm 0.06	0.52 \pm 0.21	0.50 \pm 0.17	0.62 \pm 0.10
	A2	0.42 \pm 0.17	0.25 \pm 0.03	0.23 \pm 0.04	0.45 \pm 0.11	0.52 \pm 0.16	0.55 \pm 0.05
	B1	0.44 \pm 0.14	0.41 \pm 0.15	0.46 \pm 0.13	0.79 \pm 0.22	0.33 \pm 0.08	0.39 \pm 0.04
	B2	0.31 \pm 0.12	0.38 \pm 0.12	0.30 \pm 0.08	0.51 \pm 0.19	0.45 \pm 0.13	0.39 \pm 0.04
	C1	0.28 \pm 0.04	0.35 \pm 0.07	0.27 \pm 0.05	0.44 \pm 0.16	0.51 \pm 0.15	0.46 \pm 0.04
	C2	0.25 \pm 0.10	0.29 \pm 0.09	0.27 \pm 0.08	0.42 \pm 0.15	0.30 \pm 0.08	0.30 \pm 0.05
Modelled (m/s)	A1	0.21	0.22	0.27	0.15	0.44	0.19
	A2	0.48	0.28	0.11	0.41	0.36	0.36
	B1	0.44	0.42	0.45	0.79	0.35	0.41
	B2	0.3	0.42	0.33	0.49	0.45	0.47
	C1	0.11	0.36	0.21	0.51	0.46	0.49
	C2	0.1	0.28	0.29	0.33	0.32	0.34
RMSE (%)	A1	24.97	29.29	12.1	27.53	13.23	1.68
	A2	13.16	13.12	51.1	7.22	11.41	34.29
	B1	0.93	2.31	3.46	0.31	7.5	2.67
	B2	4.03	11.82	8.94	4.03	0.61	19.45
	C1	61.09	1	20.45	16.31	8.69	4.57
	C2	60.57	2.52	5.24	22.01	3.51	13.28

Cases 1 and 4: windows located at 0.64 m height
Cases 2 and 5: windows located at 1.24 m height
Cases 3 and 6: windows located at 1.82 m height

If looking at results at animal level (points A1, B1 and C1) different results are discussed (Figure 6.4). On the one hand, when considering low ventilation rates (Cases 1-3), which might be extrapolated to winter conditions or housing young animals, air velocity should be expected to be low at animal level (Points A1, B1 and C1). According to the results, on average, when considering all measurements at animal level, no differences are found between different inlet configurations. Nevertheless, if

looking at individual measuring points, little differences are found for measuring points A1 and B1, while for C1, the highest air velocity is achieved when air inlets at middle height are operating (Case 2). Regarding the homogeneity of air speed profiles at the three locations, the lowest variability is found for Case 2, which, according to these results, might result in the most recommendable configuration for winter conditions. On the other hand, when dealing with high ventilation rates (Cases 4-6), opening lower inlets led to higher air speed at animal level at point B1, not finding significant differences for the other two sampling points. Homogeneity of average air speeds among all three points was similar for all cases. In this case, no advantages are found over different configurations in terms of air speed at animal level.

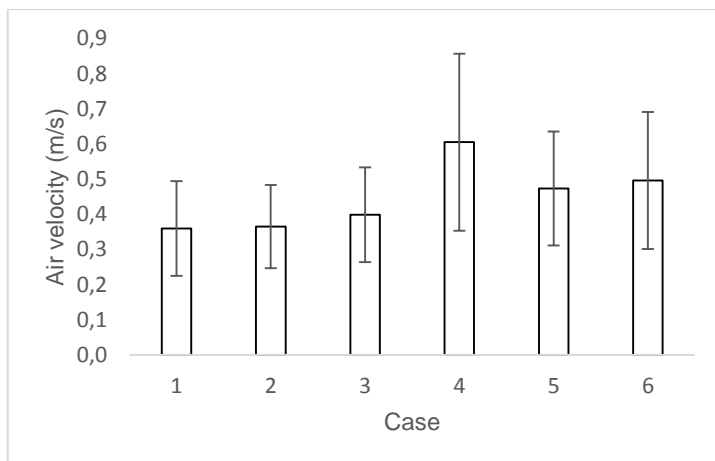


Figure 6.4. Average air velocities (m/s) recorded at animal level for different cases studied. Error bars represent standard deviations.

6.3.2 Air temperature

The registered air temperature in the six measurement points, for the different measurement cases, is shown in Table 6.4. In all measurement points and all window distributions, decreasing ventilation from 40% to 100% decreased measured air temperature, except for measurement point B1 for case 5 (in contrast with case 2). The highest values of air temperature were

found at location case 3 B1 y C1 for fans operating at 40% capacity, due heat loss by radiation and convection of the boxes. However, at 100% fan operation highest temperatures were found at points case 5 B1.

Attending to air temperatures measured at animal level at the low ventilation rate (Cases 1-3), slight differences are found at measuring points A, B and C. Despite for point A, temperatures seem to be reduced when increasing inlet height, the opposite trend is observed for point B. Point C did not present a clear pattern. Setting air inlets at medium height (Case 2) seems to provide higher homogeneity of results among the measured points. When increasing ventilation rate (Cases 4-6), measured temperatures decreased on average with respect to Cases 1 to 3. If looking at individual points, the only effect is observed for point B that reached higher temperatures for Case 5 (medium height of inlets). Attending to average temperatures at animal level (Figure 6.5), differences were found only when increasing ventilation rates, resulting in a reduction of temperature. No effect of inlet configuration was observed. According to these results, no clear recommendations can be drawn regarding air inlet configuration.

Table 6.4. Average \pm standard deviation of air temperature at the measurement points, expressed in $^{\circ}\text{C}$.

Item	Ventilation 40%			Ventilation 100%			
	Open row	Lower	Middle	Upper	Lower	Middle	Upper
	Point	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Measured ($^{\circ}\text{C}$)	A1	15.84 \pm 1.84	15.14 \pm 0.38	14.78 \pm 0.30	13.27 \pm 0.51	12.91 \pm 0.57	13.49 \pm 0.59
	A2	14.49 \pm 0.28	14.88 \pm 0.09	14.59 \pm 0.13	14.29 \pm 0.23	13.82 \pm 0.20	13.78 \pm 0.24
	B1	15.35 \pm 0.41	15.26 \pm 0.66	16.40 \pm 0.57	13.13 \pm 0.72	15.40 \pm 1.47	13.97 \pm 0.88
	B2	14.77 \pm 0.25	14.64 \pm 0.18	14.88 \pm 0.30	13.89 \pm 0.23	13.93 \pm 0.40	13.92 \pm 0.28
	C1	16.48 \pm 1.89	15.91 \pm 1.56	16.67 \pm 2.07	13.70 \pm 1.15	12.92 \pm 0.49	13.56 \pm 0.65
	C2	14.90 \pm 0.15	14.91 \pm 0.26	15.04 \pm 0.23	14.29 \pm 0.17	14.31 \pm 0.20	14.20 \pm 0.21

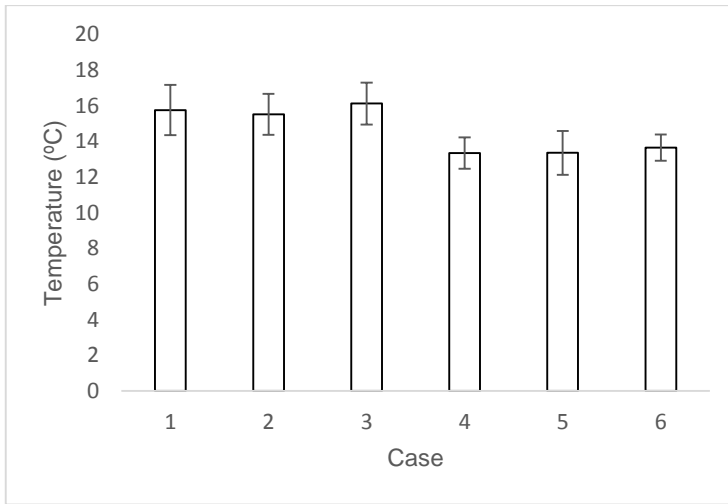


Figure 6.5. Average air temperatures (°C) recorded at animal level for different cases studied. Error bars represent standard deviations.

6.4 Conclusion

An experiment in which the effect of air inlet position on air velocity and temperature at different ventilation rate levels was conducted in an experimental building. The CFD simulation presented a satisfactory agreement with measured values in terms of air velocity. The effect of different air inlet height modified air patterns in the room, but not significant differences were found at animal level either for average air velocity or temperature. For most of cases studied, air inlets at medium height resulted in higher homogeneity for temperature and air velocity at animal level.

6.5 References

- ASHRAE. (2001). ASHRAE Fundamentals Handbook e Printed edition. Atlanta, Georgia: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc.
- Bjerg, B., Liberati P. and Marucci, A. (2013). Modelling of ammonia emissions from naturally ventilated livestock

buildings: Part 2, air change modelling. *Biosystems Engineering*. 116(3): 246–258.

Blanes-Vidal, V. , Fitas, V. and Torres, A. (2007). Differential pressure as a control parameter for ventilation in poultry houses: Effect on air velocity in the zone occupied by animals. *Spanish Journal of Agricultural Research*. 5(1):31–37.

Blanes-Vidal, V., Pebble, Balasch, S. and Torres, A. G. (2008). Application of computational fluid dynamics to the prediction of air flow in to mechanically ventilated commercial poultry building. *Biosystems Engineering*. 100 (1):105–116.

Bustamante, E., García-Diego, F.-J., Calvet, S., Estellés, F., Beltrán, P., Hospitaler, A. and Torres, A. G. (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., Torres, A. and Hospitaler, A. (2015). Measurement and numerical simulation of air velocity in a tunnel-ventilated broiler. *Sustainability*. 7(2): 2066–2085.

Cao, G., Awbi, H., Yao, R., Fan, Y., Sirén, K., Kosonen, R. and Zhang, J. (2014). A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings. *Building and Environment* 73:171–86.

Estrada-Pareja, M., Márquez-Girón, S. M. and Restrepo, B. L. (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.

Guerra-Galdo, E. H., Calvet, S. S., Estellés, B. F. and López-Jiménez, P. A. (2015). CFD model for ventilation assessment in poultry houses with different distribution of

- windows. *International Journal of Energy and Environment*. 6(5): 411–424.
- Guerra-Galdo, E. H., Estellés, B. F., Calvet, S. S. and López-Jiménez, P. A. (2016). Computational Fluid Dynamics analysis applied to engineering and design of poultry farms. *International Journal of Energy and Environment*. 7(4): 269–282.
- Hartung, J. (1994). Environment and animal health. In: *Livestock housing* (Wathes C M; Charles D R, eds), Cambridge-UK. Pp 25–48.
- Kic, P. and Zajíček, M. (2009). Air streams in building for broilers. *Echnika V Podmienkach Trvalo Udržateľného Rozvoja. Medzinárodná Vedecká Konferencia. PLAVNICA*. 20-22 Mayo. Pp 57–61.
- Kwon, K., Lee, I., Zhang, G. Q. and 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.
- Lauder, B. E. and Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 3: 269–289.
- Li, H., Rong, L., Zong, C. and Zhang, G. (2016). A numerical study on forced convective heat transfer of a chicken (model) in horizontal airflow. *Biosystems Engineering*. 150:151–159.
- Mazanowski A. (2011). *Modern broiler chicken production*. Ed. Pro Agricola. Gerzwald, 246.
- Mitchell, M. A. (1985). Measurement of forced convective heat-transfer in birds e a wind-tunnel calorimeter. *Journal of Thermal Biology*. 10(2): 87–95.
- Mostafa, E., Lee, I.-B., Song, S.-H., Kwon, K.-S., Seo, I.-H., Hong, S.-W., Hwang, H.-S., Bitog, J. P. and Han, H.-T.

- (2012). Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside building broiler fitted with duct ventilation system. *Biosystems Engineering*. 112(4): 293–303.
- Odriozola M., M. (2008). Equipamiento y metodología para la realización de auctorías de ventilación y calidad de aire interior. Universidad del País Vasco. Pp 1-75.
- Oliveira Rocha, K. S., Ferreira Tinôco, I. de F., Helvecio Martins, J., Osorio Saraz, J. A. and Arêdes Martins, M. (2014). Modeling and simulation of internal environment conditions in high-density poultry houses with ventilation using computational fluid dynamics. *International Conference of Agricultural Engineering*. 6-10 July, Zurich. Pp 1-8.
- Oliveira Rocha, K. S. O., Martins, J. H., Martins, M. A., Tinôco F., Ilda de Fátima, Saraz Osorio, J. A., Lacerda Filho, A. F. and Fernandes, M. L. H. (2014). Modeling and simulation of the transient response of temperature and relative humidity sensors with and without protective housing. *Plos One*. 9(5): 1–8.
- Osorio H., R., Ferreira T., I. de F., Osorio S., J. A., Oliveira R., K. S. and Guerra G., L. M. (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 S., J. A., Barreto, M. L., Guerra G., L. M. and Barbari, M. (2015). CFD modeling of the thermal environment in a negative pressure tunnel ventilated broiler barn during the first week of life. *Conference: 7th European Conference on Precision Livestock Farming*, at University of Milan-Italy. Pp 1–8.
- Rojano, F., Bournet, P.-E., Hassouna, M., Murat Kacira, P. R. and Choi, Ch. (2015). Modelling heat and mass transfer of a broiler house using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*. 136: 25–38.

- Rojano, F., Bournet, P.-E., Hassouna, M., Murat Kacira, P. R. and Choi, Ch. (2016). A 3D CFD model to assess the impact of the wind direction on the internal climate of a naturally ventilated poultry house. CIGR-AgEng conference. 26-29 Jun, Aarhus-Denmark. pp 1–8.
- Seo, I. H., Lee, I. B., Moon, O. K., Kim, H. T., Hwang, H. S., Hong, S. W., Bitog, J., Yoo, J. I., Kwon, S., Kim, Y. H. and Han, J. W. (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.
- Song, S.-H. , Lee, I.-B., Hwang, H.-S., Hong, S.-W., Seo, I.-H., Bitog, J. P., Kwon, K.-S. and 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 June 2010, Québec, Canada. Pp. 1–9.
- Stavarakakis, G. M., Zervas, P. L., Sarimveis, H. and Markatos, N. C. (2012). Optimization of window-openings design for thermal comfort in naturally ventilated buildings. *Applied Mathematical Modelling*. 36: 193–211.
- Tu, J., Guan H., Y. and Chaoqun, L., (2008). *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. 2da edition. Butterworth-Heinemann. Pp 435.
- Xin, H., Berry, I. L., Tabler, G. T. and Barton, T. L. (1994). Temperature and humidity profiles of broiler houses experimental with conventional and tunnel ventilation systems applied. *Engineering in Agriculture*. 10(4): 535–542.
- Yahav, S., Straschnow, A., Vax, E., Razpakovski, V. and Shinder, D. (2001). Air velocity alters broiler performance under harsh environmental conditions. *Poultry science* 80(6): 724–726.

Zajicek, M. and Kic, P. (2012). Improvement of the broiler house ventilation using the CFD simulation. *Agronomy Research Biosystem Engineering Special. 1*: 235–242.

Capítulo 7: Discusión General y Conclusiones

7.1 Discusión general

Este capítulo tiene por objeto analizar los resultados obtenidos desde una perspectiva global. En esta tesis se han revisado los factores ambientales que intervienen en el confort térmico de las aves, se ha documentado el uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD) como metodología de análisis y diseño de granjas avícolas, y se ha descrito el efecto de la escala real en la validación de una simulación virtual de CFD con medidas directas. La validación ha permitido evaluar el funcionamiento de una nave considerando diferentes alturas de ventana con una fuente de calor constante, y con distintas tasas de flujo de ventilación. Así pues, la información obtenida en esta tesis contribuye a evaluar modelos de granjas avícolas modificando los elementos constructivos de una nave avícola.

7.1.1 El confort ambiental de los pollos de engorde

Definir los niveles de confort de los pollos es esencial para dimensionar correctamente la climatización de una granja. Sin embargo, tal y como se ha revisado en el capítulo 2 de esta tesis, los autores no siempre concuerdan con un dato absoluto. Esto se debe principalmente a que los indicadores establecidos en la bibliografía se basan en evaluaciones del rendimiento productivo cuando los animales son expuestos a diferentes combinaciones de temperatura ambiental, velocidad de aire y humedad relativa. A su vez, dicha respuesta es variable con la edad y peso de los animales. De acuerdo con la revisión realizada se puede establecer que el rango de confort para pollos estará determinado por esta relación a tres bandas entre la temperatura, la velocidad y la humedad del aire en el ambiente interior de la explotación (Lott et al., 1998; Medeiros et al., 2001; Simmons et al., 2003; Wiley et al., 2012).

Los rangos de temperatura y humedad propuestos por los manuales comerciales (Aviagen, 2010) y los estudios en granja con animales tienden moverse en valores similares (Figura 7.1). La mayoría de estudios (Olanrewaju et al., 2010; Dozier et al., 2006; Medeiros et al., 2001) incluyen valoraciones de temperaturas por encima de las recomendaciones de las casas comerciales, en combinación con diferentes grados de humedad relativa y niveles de ventilación. En general, diversos trabajos indican que puede conseguirse un nivel de productividad y confort adecuado a temperaturas ligeramente más altas que los valores recomendados a través de un adecuado nivel de ventilación. Debido a esta variabilidad, se ha considerado como temperatura óptima el rango entre 18 y 25°C (Simmons et al., 2003; Estrada et al., 2007; Olanrewaju et al., 2010). Igualmente, existe cierto consenso en establecer como valores de velocidad de aire adecuados el rango entre 0,5 y 2 m/s, y establecer como límites inferior y superior de humedad relativa el 40% y el 80%, respectivamente.

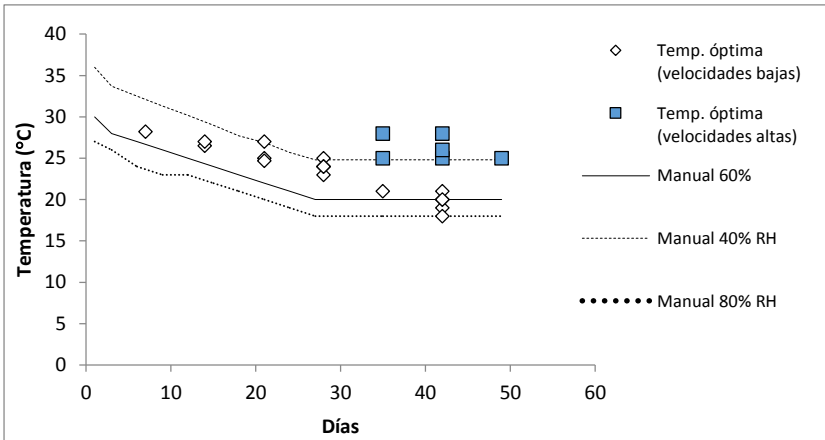


Figura 7.1. Comparación de temperaturas óptimas propuestas por los autores y el manual de pollos Ross (2010) variando humedades relativas

Puede concluirse que la combinación de los factores de temperatura, humedad y velocidad de aire determinan un amplio

abanico de condiciones ambientales en las que el pollo puede desarrollar su potencial productivo. Así, por ejemplo, el índice de temperatura, humedad y velocidad (ITHV) recoge parte de esta realidad al combinar el efecto de estos factores. Precisamente el manejo de estos tres factores constituye la vía mediante la cual se puede mejorar la situación ambiental de una granja avícola de carne.

7.1.2 Aplicaciones de CFD en granjas

Determinar las condiciones de temperatura, humedad relativa y velocidad de aire en granjas comerciales puede suponer una tarea compleja. Adicionalmente, no es posible realizar medidas sobre nuevos diseños en fase de proyecto o condiciones ambientales cambiantes. La simulación virtual que ofrece la CFD permite superar esta barrera.

La CFD es una herramienta de cálculo que describen los procesos físicos a través de complejas ecuaciones de Navier-Stokes, resolviendo las ecuaciones de conservación de masa, energía y momento (Ntinis et al., 2014; Damasceno et al., 2011), permitiendo localizar las áreas críticas de velocidad, temperatura y humedad dentro de la granja. El tamaño y tipología de malla pueden influir en los resultados de un modelo, encontrándose promedios similares entre la malla fina e intermedia en un dominio de granja que presenta una geometría de forma sencilla. En cambio cuando incluimos animales dentro de la geometría se necesita una malla más fina para definir la superficie de los animales implicando mayor memoria RAM, tiempo computacional y horas de licencia (Kwon et al., 2015; Li et al., 2016). En estos casos, cuando se refina la malla del dominio se ha obtenido que los resultados experimentales son semejantes a los obtenidos mediante CFD (Tong et al., 2013).

También influye en los resultados de la CFD el tipo de modelo turbulento, siendo diferente debido a las particularidades de las condiciones de contorno de diferentes diseños. Los autores han utilizado mayoritariamente el modelo standard $k-\epsilon$ turbulento para analizar los patrones de flujo de aire, distribución de la temperatura y concentración de amoníaco (Li et al., 2016).

Los modelos a escala de una granja permiten evaluar situaciones de ventilación visualizando la geometría de la granja en su conjunto. Sin embargo, tal como se ha indicado en el Capítulo 3, el tamaño de la nave modelizada influye en los resultados del ensayo, y por lo tanto es necesario realizar comparaciones de modelos numéricos y físicos a escala real (Mueller et al., 2015). Esto permite evaluar las distintas características como son las corrientes de los fluidos, la influencia del material de construcción, modificaciones del diseño, o la ubicación de ventanas y ventiladores. El uso del modelo virtual CFD permite por tanto optimizar tiempo, espacio, costes y analizar las condiciones de estructura y ambiente en una situación real, previa validación de los resultados obtenidos.

Las granjas avícolas de carne han sido ampliamente analizadas mediante CFD, tanto las ventiladas naturalmente como las que utilizan medios mecánicos. Los estudios han analizado la dirección de las corrientes de aire y la distribución de temperaturas con diferente distribución de ventiladores, entradas y salidas de aire. Muchos de ellos incluyen validaciones con equipos de medida de gran sensibilidad (velocímetro de imagen de partículas, PIV, o anemómetros ultrasónicos). Uno de los modelos de nave más estudiados es el diseño tipo túnel o de ventilación longitudinal. En él se ha observado que, a pesar de incrementar la velocidad media de aire en su conjunto, el aire se desvía hacia el centro de la nave, disminuyendo la velocidad cerca de las paredes y al inicio de la nave (Osorio et al., 2013).

Los autores coinciden en que la distribución estructural de las entradas y salidas de aire de la nave determinan la trayectoria del mismo, y de forma indirecta la distribución de velocidad de aire, temperatura, concentración de amoníaco o ITHV a la altura de los animales. De hecho, esta distribución es la que determina la creación de microambientes dentro de una nave ganadera. El principal objetivo en el diseño de una explotación será, por tanto, maximizar la proporción de la superficie de la granja en la que las condiciones de temperatura, humedad relativa y velocidad del aire son compatibles con el confort y el bienestar de los animales.

La climatización de granjas avícolas es particularmente relevante en climas cálidos. Adicionalmente, en climas con alternancia estacional entre períodos cálidos y frescos complica el diseño, ya que la nave debe proporcionar las condiciones adecuadas durante todo el año. La generación de zonas muertas o de escasa ventilación puede incrementar mortalidad de los animales, siendo mayor el riesgo cuando más alejados se encuentren las ventanas de los ventiladores (Yamamoto, 2006). El calor se acumula a la salida de una granja dependiendo de la temperatura exterior, de la emisión de calor de los animales, la resistencia térmica de las paredes y el suelo (dependiendo del coeficiente de transferencia de calor del perímetro de la estructura) del calor generado por las luces y equipos internos y de la actividad física de los animales. Por tanto, las instalaciones de climatización de las granjas deben permitir evacuar el calor desprendido en el interior de las instalaciones, al mismo tiempo que ofrece las condiciones ambientales adecuadas de los animales en el conjunto de su geometría.

Con carácter general, la validación de las simulaciones CFD, incluida la validación realizada en el Capítulo 6 de la tesis, tuvieron valores similares a las medidas realizadas. En la mayoría de los casos estudiados no se considera la superficie de los animales por las limitaciones que se presentan al medir con aves, observándose que los resultados CFD cambian de velocidad promedio cuando considera dentro del dominio la geometría de los animales, obstaculizando el flujo de aire y disminuyendo la velocidad de aire a la altura de los pollos (Blanes-Vidal et al., 2008). Considerar a los animales en las simulaciones puede tener algunas consecuencias como una inadecuada calidad de aire a nivel del animal por el poco intercambio de aire, la menor disipación de calor hacia el ambiente, el incremento de la humedad y la concentración de amoníaco. Por el contrario, los análisis realizados en ausencia de pollos son más sencillos de modelizar pero tienden a incrementar la velocidad de aire a nivel de los pollos.

7.1.3 Validación en escala real de las simulaciones CFD

A nivel de validación, los resultados por simulación numérica realizados en el Capítulo 6 de esta Tesis fueron similares a las mediciones realizadas dentro del edificio, existiendo algunas alteraciones en la dirección de los vectores por la turbulencia y corrientes que se genera en algunas zonas del edificio (Sakamoto y Matsuo, 1980), o bien por las variaciones de promedio de velocidad de aire en las entradas (Harral y Boon, 1997).

Puede destacarse que la modelización CFD proporcionó una aproximación adecuada del efecto del grado de abertura y la altura de las ventanas en la distribución de velocidad del aire a la altura de los animales en condiciones de invierno, lo cual es de gran utilidad de cara a establecer una ventilación más eficiente que elimine el exceso de gases y humedad que puede producirse por las menores tasas de ventilación. Pese a que no se observaron grandes diferencias en cuanto a la velocidad media a nivel de los animales, sí se encontró una mejora en cuanto a la homogeneidad de los resultados cuando las ventanas se situaron a media altura.

Por el contrario, en condiciones de mayor ventilación, con ventanas totalmente abiertas y ventilador a máximo funcionamiento, no se encontraron diferencias que justificaran una ubicación óptima para las ventanas. Por tanto, este ensayo confirma la dificultad de establecer la ubicación óptima de ventanas y ventiladores, dado que la ubicación preferente puede cambiar en función de las condiciones ambientales.

En este ensayo de validación se reemplazó los pollos por una fuente de calor alternativa constituida por cajas estáticas. Ello ha permitido simular la transmisión de calor sensible en las distintas condiciones analizadas en el ensayo. Los flujos de calor utilizados permitieron evaluar la transmisión de calor, si bien la instalación de los equipos de medida, o la actividad de los animales vivos en condiciones prácticas podrían alterar el flujo de aire y la estratificación de temperatura. En este caso, de

acuerdo a los resultados de las mediciones realizadas, parece también que situar las ventanas a media altura resulta en una mayor homogeneidad de temperaturas a nivel de los animales, al menos con tasas bajas de ventilación.

7.1.4 Modelos de nave avícola tipo

Una parte sustancial de esta tesis ha abordado la modelización de naves avícolas tipo túnel, variando elementos constructivos tales como la ubicación de ventanas, la pendiente de cubierta o la ubicación de los ventiladores.

Modelización en condiciones de verano

Considerando una temperatura exterior de 21,5°C, en los modelos de nave tipo túnel el ángulo de inclinación de la cubierta de la nave afecta en la velocidad del aire, temperatura e ITV a nivel del animal. Así, la cubierta plana incrementó la velocidad media como consecuencia de la menor sección. Sin embargo, en cubiertas a dos aguas, la redistribución de ventanas y ventiladores permite incrementar el flujo de aire y reducir las áreas de desconfort dentro de la granja como consecuencia de temperaturas exteriores crecientes. Evidentemente, la temperatura interior depende en gran medida de la temperatura exterior, con unas variaciones que oscilan de 1 a 2 °C con respecto a la temperatura exterior, en ausencia estrategias de refrigeración (Febrer et al., 2006; Abreu et al., 2011).

La diferente distribución de ventanas en los modelos Semi-túnel (ST) y semi-túnel mejorado (IST, por sus siglas en inglés) establecidos en los capítulos 4 y 5 presentan una disminución de los valores medios de velocidad, temperatura e ITV con respecto a la nave túnel. Los diseños ST e IST difieren entre ellos en la distribución relativa de ventanas, mientras que ambos se diferencian de la configuración túnel en lo que respecta a la ubicación de los ventiladores. Éstos se sitúan en las configuraciones ST e IST (por sus siglas en inglés) a mitad de la nave mientras que el túnel tiene los ventiladores ubicados en un extremo de la nave. Las naves ST e IST concentraron, por tanto, las pérdidas de calor sensible en el centro de la nave a la altura

del ventilador, permitiendo una reducción de los gradientes térmicos. Al mismo tiempo, las naves IST (por sus siglas en inglés) incrementaron el área confort de acuerdo con criterios de velocidad de aire y temperatura al tener la nave mayor número de ventanas en los lados extremos de la nave. Esto propicia un incremento del flujo de aire a nivel del animal en toda la longitud de la nave, incrementando por tanto el área sujeta a un rango de ITV entre 18 y 25°C, con respecto a la nave semitúnel.

Tal y como indican los resultados de validación, las herramientas CFD nos permitieron analizar el efecto en el clima interior de la ubicación de las ventanas. En base a las simulaciones realizadas, podríamos indicar que las ventanas ubicadas en la parte superior en los tres modelos de naves (túnel, ST e IST) llevan a una disminución de la velocidad promedio a nivel del animal, porque se incrementa el área en el rango bajo de velocidades (entre 0,5 y 1,0 m/s) y se mantiene la temperatura constante a nivel del animal, incrementando ligeramente el ITV, en comparación con las ventanas ubicadas en la parte inferior y en el medio. Por tanto, las ventanas ubicadas en la parte superior mejorarían la ventilación en invierno al renovar mejor el aire, disminuyendo la concentración de aire caliente en estratos elevados del interior de la nave, como consecuencia de la entrada de corriente de aire frío que ingresa a mayor altura de ventana.

La dirección y circulación de la entrada de aire está condicionada por el ángulo de abertura del deflector de las ventanas. Este factor también ha sido objeto de estudio de esta tesis doctoral. En caso de no existir deflector, el aire se direcciona hacia abajo por rozamiento y gravedad en dirección a la pared sin una trayectoria inicial del flujo de aire (Özcan et al., 2005). Ello origina que en el diseño con cubierta plana y sin deflector se reduzca la velocidad, y se incremente temperatura e ITV a nivel del animal, con respecto a la utilización de deflector. Sin embargo, en cubiertas a dos aguas el resultado es el contrario, ya que el uso del deflector en las ventanas incrementa el promedio de velocidad a nivel del animal por la recirculación del aire a través

del contorno de la cubierta, en comparación a las naves con cubierta de dos aguas sin deflector.

En resumen, analizando el diseño y ubicación de los elementos estructurales, la nave IST equipada con deflector en las ventanas, y con cubierta de dos aguas, presentó el mejor comportamiento desde el punto de vista de la ventilación. Este diseño permitió una distribución más homogénea en cuanto al rango de velocidades deseables cuando se ubican las ventanas en la parte superior, disminuyendo la temperatura a nivel del animal. Este diseño redujo la superficie de la nave expuesta a condiciones de des-confort, que se situaron en las paredes laterales más alejadas de los ventiladores, así como en las zonas más próximas a las paredes donde se ubicaban las ventanas.

Modelización en condiciones de invierno

Considerando una temperatura exterior de 5 °C, una cubierta a dos aguas y ventanas con ángulo de abertura de 8°, la nave tipo túnel proporciona los menores valores promedio de velocidad, temperatura del aire e ITV a nivel del animal, en comparación con los modelos ST e IST. Igualmente, el área sujeta a temperaturas de confort fue inferior en la nave túnel, como consecuencia de una menor temperatura cerca de las entradas de aire y la mayor temperatura cerca de los ventiladores por la acumulación de calor sensible de toda la nave. Igualmente, también pudo influir el intercambio térmico que ocurre en el trayecto del recorrido del flujo de aire a través de la cubierta, coincidiendo con Peren et al. (2015), quienes encontraron incremento del flujo de aire cuando el ángulo de la cubierta era superior a 18°, en comparación con la cubierta plana.

Considerando la ubicación de las ventanas en los modelos de naves tipo túnel, las ventanas ubicadas en la parte superior con ángulo de abertura de 8° podrían evitar corrientes de aire frío manteniendo la temperatura constante a nivel del animal. El mecanismo de este proceso es bien conocido y se debe al intercambio térmico entre masas de aire cuando se direcciona el flujo de aire a la cubierta, donde se acumula la masa de aire

interior más cálida. Como consecuencia, llega al nivel del animal un aire mezclado, con temperatura más deseable. En cambio, con las ventanas ubicadas en la parte inferior las aves podrían estar expuestas a velocidades del aire no aceptables en cuanto a magnitud y temperatura, lo cual afectaría a la pérdida de calor sensible. Las ventanas, a medida que se acercan al ventilador, tienen mayor expansión de aire frío, mientras las ventanas alejadas del ventilador tienen menor ingreso de temperatura de aire frío por la baja depresión (Kwon et al., 2015). Para optimizar este efecto se debe considerar el diseño aerodinámico de la entrada, ajustando la dirección de la entrada de aire de tal manera que se evitan velocidades demasiado altas cerca de la abertura (Mistriotis, 1997).

En las simulaciones realizadas en los capítulos 4 y 5 se evalúa cómo afecta el ángulo de abertura del deflector a la distribución de velocidades de aire. Esta abertura no sólo afecta al recorrido de los flujos, sino también a cómo se distribuye la velocidad a la altura del animal. Se ha obtenido que para un mismo caudal de aire, mayores aberturas de ventana (ventanas totalmente abiertas) incrementan las velocidades relativamente elevadas (entre 0,3 y 0,5 m/s), mientras que menores aberturas (ángulo de abertura 16°) aumentan la superficie de la nave sometida a velocidades más bajas (entre 0,1 y 0,3 m/s). Evidentemente, para un mismo caudal de ventilación la velocidad de aire se incrementa en las ventanas con menor ángulo de abertura, siendo menor cuando el deflector está totalmente abierto. En estas circunstancias el aire tiene poco tiempo de intercambio térmico con el aire caliente dentro de la estructura y cae directamente hacia los animales, pudiendo ser negativo en épocas de frío. Consecuentemente, las modelizaciones detectaron un incremento del área sujeta a temperaturas menores a 18°C en los casos con abertura total de ventanas, al mismo tiempo que disminuyó el área en la que el rango de temperaturas era óptimo (entre 22 y 25 °C).

Recomendaciones de diseño

La revisión de trabajos previos y los estudios de simulación y validación realizados en esta tesis doctoral contribuyen al mejor

conocimiento de los factores que afectan a los flujos de ventilación en instalaciones avícolas. Los resultados obtenidos en la tesis confirman trabajos previos en los que se ha obtenido un elevado nivel de concordancia entre los modelos CFD y las medidas de validación. Los casos de estudio propuestos, en los que se estudiaron factores de diseño tales como la pendiente de las cubiertas, el grado de abertura de ventanas, la ubicación de las mismas y la ubicación de los ventiladores, aportan criterios generales de decisión al diseño de las granjas.

Los resultados obtenidos, sin embargo, hacen referencia a unas situaciones ambientales concretas, por lo que la generalización de los resultados obtenidos debe realizarse con cautela. La gran variabilidad de condiciones ambientales y la diversidad de geometrías de naves posibles exigen la evaluación específica de cada diseño, para obtener una configuración óptima. En este ámbito, la investigación aplicada por parte de las empresas que diseñan las granjas resulta esencial, y las herramientas CFD constituyen una herramienta de apoyo de gran utilidad para establecer el diseño más adecuado en cada situación.

7.2 Conclusiones generales

Esta tesis doctoral ha evaluado mediante técnicas CFD las alternativas de diseño en la cría de pollos, con el objetivo de mejorar las condiciones ambientales en las que se crían los animales, en condiciones de clima mediterráneo. Del trabajo realizado se extraen las siguientes conclusiones:

- Reducir los efectos negativos del estrés por calor es uno de los grandes desafíos de la producción avícola de carne. El diseño de instalaciones puede contribuir a resolver este desafío. Para ello deben evaluarse alternativas que proporcionen la velocidad de aire adecuada a los animales de la forma más uniforme posible.
- Las granjas avícolas de carne han sido las más estudiadas mediante modelización CFD. Los estudios realizados incluyen una amplia variedad de escalas, y

sugieren que la dinámica de fluidos es una herramienta válida para el diseño de instalaciones.

- De acuerdo con las simulaciones realizadas, la distribución de ventanas y la ubicación de ventiladores condicionan la climatización de una granja. Además, la abertura de ventanas constituye una eficaz herramienta de manejo de la ventilación.
- Se ha propuesto un diseño de nave en semi-túnel con el cual, según las simulaciones realizadas, se pueden alcanzar mejores condiciones de confort tanto en condiciones de verano como de invierno. El diseño propuesto mejora la homogeneidad de los flujos de aire y reduce las zonas muertas.
- La validación de las simulaciones de velocidad del aire en una nave piloto ofrece resultados razonablemente próximos a las mediciones realizadas.

7.3 Líneas de investigación futuras

A través del trabajo realizado en esta tesis y del análisis de resultados y su discusión se pueden enumerar las siguientes recomendaciones de investigación:

Es necesario mejorar el conocimiento de las necesidades ambientales de los animales en función de su edad. Además, estas condiciones cambian con la constante selección genética y su interacción con la alimentación, por lo que la actualización de esta información debe ser continua. En una tendencia cada vez más clara hacia la ganadería de precisión, los diseñadores de granjas deberán conocer cada vez con más detalle las necesidades de los animales en cada momento, y evaluar las opciones tecnológicas para cumplir con esos requerimientos.

Resulta indispensable disponer de mejores herramientas para evaluar el confort ambiental de los pollos. Concretamente, hace falta disponer de un índice integrado que reúna la temperatura, humedad y velocidad del aire, y que se corresponda con la

percepción real de los animales. Las recomendaciones de manejo de los animales deberían especificarse igualmente en base a ese índice.

Debe avanzarse en la sensorización de granjas, no sólo para mejorar el control ambiental de la misma sino también para facilitar los estudios de validación. Considerando la accesibilidad creciente a la tecnología y al manejo de datos, la recopilación masiva de datos productivos, ambientales y de manejo permitiría avanzar de forma más clara hacia una mejor climatización de las granjas. El objetivo no sólo debe ser climatizar la granja en su conjunto, sino climatizar correctamente cada uno de los microambientes de una nave ganadera.

Gracias a los avances en computación, la presencia de los animales puede ser modelizada, superando así uno de los principales escollos en la modelización CFD, ya que la consideración de todos los animales conlleva la generación de muchos más elementos en las mallas y complica la solución numérica. Los animales en reposo podrían ser representados por cajones oscuros estáticos, faltando modelar animales en actividad para conocer la velocidad de aire y temperatura en diferentes horas del día. No obstante, también es necesario incorporar a los modelos CFD utilizados en granja los avances sobre los modelos turbulentos que se produzcan en esta disciplina.

Es imprescindible trabajar en la inclusión en la modelización CFD del comportamiento de la humedad del aire en las explotaciones. De este modo, sería factible modelizar la distribución de los tres principales parámetros (temperatura, humedad y velocidad de aire) con el fin de optimizar el diseño de las granjas.

Es necesario extender el uso de herramientas CFD en la investigación aplicada desarrollada por las empresas dedicadas al diseño y construcción de naves avícolas.

7.4 Referencias

- Abreu, P. G. De, Nascimento Abreu, Valéria M., Coldebella, A., Ferreira Jaenisch, R. F. and Pedroso de Paiva, D. (2011). Curtain color and lighting program in broiler production : III - thermal comfort. *Brasileira de Zootecnia*. 40(9): 2026–2034.
- Aviagen. (2010). Manual Ross, 104. Retrieved from http://es.aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/Spanish_TechDocs/Manual-del-pollo-Ross.pdf
- Blanes-Vidal, V., Guijarro, E., Balasch, S. and Torres, A. G. (2008). Application of computational fluid dynamics to the prediction of airflow in a mechanically ventilated commercial poultry building. *Biosystems Engineering*. 100(1): 105–116.
- Damasceno, F. A., F. da C. Baêta, M. Arêdes M., J. A. Osorio S., I. and Tinoco F. F. (2011). Computational Fluid Dynamics (CFD) and it's use for analysis of gas distribution inside animal production facilities. *Revista U.D.C.A. Actualidad & Divulgación Científica*. 14 (2): 83–93.
- Dozier, W. A., Purswell, J. L. and Branton, S. L. (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-Pareja, M., Márquez-Girón, S. M. and Restrepo, L. F. (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.
- Febrer, K., Jones, T. A., Donnelly, C. A. and Dawkins, M. S. (2006). Forced to crowd or choosing to cluster? Spatial distribution indicates social attraction in broiler chickens. *Animal Behaviour*. 72(6): 1291–1300.

- Harral, B. B. and Boon, C. R. (1997). Comparison of predicted and measured air flow patterns in a mechanically ventilated livestock building without animals. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 66: 221–228.
- Kwon, K.-S., Lee, I.-B., Zhang, G. Q. and 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.
- Li, H., Rong, L., Zong, C. and Zhang, G. (2016). A numerical study on forced convective heat transfer of a chicken (model) in horizontal airflow. *Biosystems Engineering*. 150: 151–159.
- Lott, B. D., Simmons, J. D., and May, J. D. (1998). Air velocity and high temperature effects on broiler performance. *Poultry Science*. 77(3): 391–3.
- Medeiros, C. M. (2001). Ajuste de modelos e determinação de índice térmico ambiental de produtividade para frangos de corte. Universidade Federal de Viçosa. Tesis. Pp 1–115.
- Mistriotis, T. J. (1997). Computational Fluid Dynamics as a tool for the analysis of ventilation and indoor microclimate. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 45: 81–96.
- Mueller, H. J., Krause, K. H., Perén, J. I., Van Hooff, T., Leite, B. C. C. and Blocken, B. (2015). Flow simulation for design of ventilation systems in animal houses. *Building and Environment*. 85: 932–936.
- Ntinias, G. K., Zhang, G., Fragos, V. P., Bochtis, D. D. and Nikita-Martzopoulou, Ch. (2014). Airflow patterns around obstacles with arched and pitched roofs: wind tunnel measurements and direct simulation. *European Journal of Mechanics B/Fluids*. 43: 216–229.
- Olanrewaju, H. A., Purswell, J. L., Colier, S. D. and Branton, S. L. (2010). Efecct of ambient temperature and light intensity

- on physiological reactions of heavy broiler chickens *Poultry Science*. 89(12): 2668–2677.
- Osorio Hernández, R., Ferreira Tinôco, I. de F., Osorio Saraz, J. A., Oliveira Rocha, K. S. y Guerra, L. M. (2013). Modelamiento del ambiente térmico y aéreo de un galpón de presión negativa tipo túnel para pollitos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 66(2): 1–7.
- Özcan, S. E., Vranken, E., Van Malcot, W. and Berckmans, D. (2005). Determination of the airflow pattern in a mechanically ventilated room with a temperature-based sensor. *Biosystems Engineering*. 90(2): 193–201.
- Perén, J. I., Van Hooff, T., Leite, B. C. C. and Blocken, B. (2015). CFD analysis of cross-ventilation of a generic isolated building with asymmetric opening positions: Impact of roof angle and opening location. *Building and Environment*. 85: 263–276.
- Sakamoto, Y. and Matsuo, Y. (1980). Numerical predictions of three-dimensional flow in a ventilated room using turbulence models. *Applied Mathematical Modelling*. 4(1): 67–72.
- Simmons, J. D., Lott, B. D. and Miles, D. M. (2003). The effects of high-air velocity on broiler performance. *Poultry Science*. 82(2): 232–234.
- Tong, G., Zhang, G., Christopher, D. M., Bjerg, B., Ye, Z. and Cheng, J. (2013). Evaluation of turbulence models to predict airflow and ammonia concentrations in a scale model swine building enclosure. *Computers & Fluids*. 71: 240–249.
- Wiley O., J. (2012). Improving commercial broiler attic inlet ventilation through data acquisition coupled. Mississippi State University. Thesis. Pp 1–108.
- Yamamoto, M. M., Nääs, I. D. A., Manzione, R. L. and Nascimento, F. F. (2006). Spatial analysis of stress

conditions inside broiler house under tunnel ventilation.
Scientia Agricola, 63:426–432.

Lista de publicaciones

Guerra-Galdo, E. H., Calvet S., S., Estellés B., F. and López-Jiménez, P. A. (2015). CFD model for ventilation assessment in poultry houses with different distribution of Windows. *International Journal of Energy and Environment*. 6(5): 411–424.

Guerra-Galdo, E. H., Estellés B., F., Calvet S., S. and López-Jiménez, P. A. (2016). Computational Fluid Dynamics analysis applied to engineering and design of poultry farms. *International Journal of Energy and Environment*. 7(4): 269–282.

Guerra Galdo, E., Calvet S., López A. and Estellés, F. (2016). El diseño de las instalaciones de pollos de carne y su influencia en las condiciones de confort de los animales. *ITEA*. 112: 405–420.

Presentaciones en congresos nacionales

Guerra-Galdo, Eva H., Calvet S., S., Estellés B., F. and López J., A. (2015). Factores ambientales de naves avícolas que influyen en el confort animal y su evaluación mediante CFD. VIII Congreso Ibérico de Agroingeniería: Retos de la nueva agricultura Mediterránea. 1 a 3 de junio de 2015, Orihuela-Algorfa. Pp 809–818.

Guerra G., Eva H., Calvet S., S., Estellés B., F. and López J., A. (2015). Evaluación de alternativas en la distribución de las ventanas para mejorar las condiciones de confort de los pollos de carne. VIII Congreso Ibérico de Agroingeniería: Retos de la nueva agricultura Mediterránea. 1 a 3 de junio de 2015, Orihuela-Algorfa. Pp 821–831.

Presentaciones en Congresos Internacionales

Guerra-Galdo, E., Estellés Barber, F., López Jiménez, A. and Calvet Sanz, S. (2016). Simulating the animals in CFD analysis of broiler buildings. CIGR-AgEng conference. Jun. 26-29, 2016, Aarhus, Denmark. Pp 1–5.

Guerra-Galdo, E., Estellés Barber, F., López Jiménez, A., García-Diego, F. J. and Calvet Sanz, S. (2016). Validation of

modelled air velocity at an enclosed environment. CIGR-AgEng conference. Jun. 26-29, 2016, Aarhus, Denmark. Pp 1–5.

Guerra-Galdo, E., Calvet Sanz, S., López Jiménez, A. and Estellés Barber, F. (2016). Simulating the thermal comfort of broilers in three designs of buildings using CFD. CIGR-AgEng conference. Jun. 26-29, 2016, Aarhus, Denmark. Pp 1–5.

Guerra-Galdo, E., Estellés Barber, F., Calvet S., S. and López Jiménez, A. (2016). Modelling of different heights of air inlet windows in broiler buildings using CFD. CIGR-AgEng conference. Jun. 26-29, 2016, Aarhus, Denmark. Pp 1–5.