



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE NAVES EN LA CRÍA DE POLLOS DE ENGORDE

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGÍSTER EN EFICIENCIA ENERGÉTICA

NOMBRE DEL AUTOR

Ing. Ramiro Eduardo Morejón Tobar
ramiro.morejon@epn.edu.ec

DIRECTOR:

Ing. Víctor Hugo Hidalgo Díaz, D.Sc.
victor.hidalgo@epn.edu.ec

FECHA

Quito, mayo de 2017

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Ramiro Eduardo Morejón Tobar, bajo mi supervisión.

Ing. Víctor Hugo Hidalgo Díaz, D.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, Ramiro Eduardo Morejón Tobar, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Ing. Ramiro Eduardo Morejón Tobar

DEDICATORIA

A mi familia Alexandra, Isabel y Mikaela.

AGRADECIMIENTO

La vida misma está matizada por dificultades que solo la Fe puede ayudarnos a superar, ha sido La virgen de El Quinche quien ha renovado la mía por lo que en primer lugar dejo patente mi agradecimiento.

A mi familia porqué calladamente han apoyado las aspiraciones de mi trabajo y han sobrellevado los sinsabores de esta consecución. De manera particular para Alexandra, mi esposa, que ha dedicado su tiempo y valioso contingente para revisar lo hecho en este trabajo.

A mi director, quien de una manera sencilla pero efectiva, contribuyó para que el trabajo que desarrollé en su clase y se haya convertido en el elemento central de mi trabajo.

ÍNDICE

Certificación	ii
Declaración.....	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimiento.....	v
Índice	vi
Índice de Figuras	viii
Índice de Tablas	x
Resumen	xi
Abstract	xii
Simbología Utilizada	xiii
Presentación.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Importancia de la producción avícola en el Ecuador	
1.2. Características de los métodos de producción a gran escala	6
1.3. Producción en galpones abiertos	10
1.4. Producción en galpones cerrados o de túnel.....	11
2. Sistemas energéticos utilizados en galpones de túnel.....	13
2.1. Sistema de calefacción	15
2.1.1. Calentadores de GLP (gas licuado de petróleo).....	16
2.1.2. Calentadores de diesel.....	21
2.1.3. Calentadores eléctricos.....	22
2.2. Estructura y componentes del sistema.....	24
2.2.1. Descripción de los galpones	
2.2.2. Operación de los sistemas de ambiente controlado	26
2.3. Ventilación mínima	28
2.3.1. Cálculo de extractores para ventilación mínima	
2.3.2. Ejemplo de cálculo de número de extractores	30
2.4. Ventilación transicional.....	31

2.4.1	Ejemplo de cálculo de número de extractores	33
2.5.	Ventilación de túnel	
2.6.	Enfriamiento evaporativo.....	35
2.7.	Iluminación.....	39
3.	Modelamiento de los sistemas energéticos	41
3.1.	Descripción de sujeto de estudio	
3.2.	Protocolo de captura de datos.....	42
3.2.1.	Temperatura	
3.2.2.	Humedad	46
3.2.3.	Velocidad del viento	
3.3.	Modelación de los sistemas energéticos	47
3.3.1.	Extractores.....	49
3.3.2.	Metabolismo de la aves.....	53
3.3.3.	Paneles húmedos	55
3.3.4.	Estructura del galpón	60
3.3.5.	Ventoleras.....	61
3.3.6.	Infiltración.....	63
3.3.7.	Humedad relativa en el interior del galpón	69
3.3.8.	Vapor de agua producido por los pollos	70
3.3.9.	Vapor de agua agregado por la pared húmeda	71
3.3.10.	Vapor de agua que ingresa por infiltración y ventoleras	73
3.3.11.	Vapor de agua retirado por los extractores.....	74
3.4.	Validación de los modelos	
4.	Metodología de evaluación y parámetros de operación de un galpón	87
4.1.	Desarrollo de una propuesta basada en modelos	
4.2.	Aplicación de los modelos en galpones abiertos y de túnel.....	90
4.3.	Evaluación de resultados.	95
5.	Conclusiones y recomendaciones	98
	Referencias bibliográficas	107
	Anexo I. Parámetros de simulación.....	114
	Anexo II. Datos técnicos de componentes del sistema	123
	Anexo III. Datos técnicos de los instrumentos utilizados	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Evolución de la producción de proteína animal	5
Figura 1.2.	Curva de crecimiento de la raza ROSS 308.....	9
Figura 2.1.	Efecto del factor de conversión	14
Figura 2.2.	Evolución de la genética mejorada.....	15
Figura 2.3.	Calentador de GLP infrarrojo	17
Figura 2.4.	Registro de la temperatura externa (azul), interna (Rojo).....	17
Figura 2.5.	Calentador de diesel KONGSKILDE	22
Figura 2.6.	Calentador auto contenido diesel Munters	22
Figura 2.7.	Vista de calentador eléctrico de tubos de cuarzo	23
Figura 2.8.	Vista interna de un galpón abierto con bebederos y comederos automáticos	25
Figura 2.9.	Vista exterior de los extractores de un galpón de túnel	26
Figura 2.10.	Instalación del aislante del techo.....	27
Figura 2.11.	Diagrama de un galpón de túnel completo	28
Figura 2.12.	Estructura de un panel de celulosa	37
Figura 2.13.	Caída de presión en el panel húmedo.....	38
Figura 3.1.	Termómetros de alcohol rojo utilizados	43
Figura 3.2.	Termómetros infrarrojos ST-380a	43
Figura 3.3.	Registadores de temperatura y humedad Log Tag	44
Figura 3.4.	Registrador de CO2 humedad y temperatura EXTECH SD-800.....	45
Figura 3.5.	Medidor de temperatura, WBGT y humedad EXTECH HT30	46
Figura 3.6.	Sensores de humedad Big Herdsman HTV597	46
Figura 3.7.	Anemómetro SM-18 SKYMATE	47
Figura 3.8.	Bloque o segmento longitudinal del modelo galpón.....	49
Figura 3.9.	Descripción y dimensiones de los extractores.....	50
Figura 3.10.	Extractor de 50 pulgadas	50
Figura 3.11.	Capacidad vs presión.....	52
Figura 3.12.	Calor producido por los pollos	54
Figura 3.13.	Curvas de caída de presión y saturación en función de la velocidad.....	56
Figura 3.14.	Descripción y dimensiones de la pared húmeda	57
Figura 3.15.	Temperatura y humedad de salida de un panel de celulosa.....	58
Figura 3.16.	Descripción y dimensiones de las ventoleras (inlet)	62
Figura 3.17.	Detalle de las aberturas en las cortinas.....	63

Figura 3.18.	Modelo de las fuentes y drenaje de humedad	70
Figura 3.19.	Vapor de agua producida por los pollos	71
Figura 3.20.	Dimensiones del galpón	77
Figura 3.21.	Valores medidos y calculados de la velocidad para la operación de dos (2) extractores y la pared húmeda	78
Figura 3.22.	Valores medidos y calculados de la velocidad para la operación de seis (6) extractores y la pared húmeda	79
Figura 3.23.	Detalle de uniones defectuosa en aislante	80
Figura 3.24.	Foto del borde de la pared húmeda. Observa la ranura por la luz que se filtra por la unión de la PH y la pared de soporte.	80
Figura 3.25.	Efecto de disminución de la temperatura en la pared húmeda	81
Figura 3.26.	Humedad Interna y externa sobre la pared húmeda.....	81
Figura 3.27.	Efecto de panel evaporativo observado en la carta psicrométrica	82
Figura 3.28.	Datos tomados para evaluar la ecuación de la velocidad en el galpón.....	83
Figura 3.29.	Modelo no lineal comportamiento del galpón	84
Figura 4.1.	Velocidades para tres mallados A (0,01), B (0,1) y C (0.2) metros	92
Figura 4.2.	Valores y posición relativa de la velocidad en un extractor de 50 pulgadas.....	94
Figura 4.3.	Estadísticas de los elementos del mallado para el caso A.	95
Figura 4.4.	Resultados obtenidos por M. Dagtekin y otros	96
Figura 5.1.	Uso de la carta psicrométrica para evaluar temperatura de bulbo húmedo.....	100
Figura 5.2.	Perfil de velocidad en la pared húmeda	104
Figura 5.3.	Datos del perfil de velocidad obtenido con ANSYS	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Temperatura y humedad de crianza según la edad de las aves	7
Tabla 2.1. Cuadro comparativo sobre la selección del modo de operación	31
Tabla 2.2. Ciclos de operación de la ventilación en un galpón de túnel.....	35
Tabla 3.1. Capacidad de los extractores de 50 pulgadas y presión.....	51
Tabla 3.2. Coeficientes conducción para elementos de la estructura	61
Tabla 3.3. Valores medidos y de la carta psicrométrica.	82
Tabla 4.1. Velocidades sobre los extractores medidas en m/s. en mallado A, B y C.	93
Tabla 4.2. Velocidades sobre las ventoleras medidas en m/s. en mallado A, B y C.....	94
Tabla 5.1. Temperaturas internas y de las cubiertas con y sin aislante instalado	99
Tabla 5.2. Cuadro comparativo de consumo de combustible y energía para calentar el área de recepción.	101
Tabla 5.3. Datos utilizados para simulación con el modelo no lineal.....	105
Tabla 5.4. Resultados de temperatura en la salida según modelo no lineal	106

RESUMEN

El presente trabajo se ha desarrollado como respuesta a las expectativas que supone la migración de la industria avícola con una producción parcialmente tecnificada a una producción agroindustrial con elevadas tasas o densidades de pollos (número de pollos por metro cuadrado). Los sistemas de ventilación de túnel han sido adoptados para contrarrestar las condiciones del clima que repercuten fuertemente en los índices de producción. Se ha verificado que la velocidad del aire es un parámetro que determina la temperatura en el interior del galpón de ambiente controlado o de túnel. Sin embargo, se ha observado que existe una reducción significativa de la velocidad del aire a lo largo del galpón. Se ha desarrollado un modelo matemático analítico que introduce la denominada ranura equivalente debido a que no es posible cuantificar la cantidad de aire que se infiltra por agujeros y grietas producto de defectos de construcción, acentuados en los casos de reacondicionamiento de infraestructura existente. La ranura equivalente se ha concebido de forma lineal y constante a lo largo del galpón. La expresión de la velocidad obtenida ha sido ajustada y validada utilizando datos tomados en un galpón que utiliza un sistema de ventilación de presión negativa y cortinas de polietileno para cerrar las paredes del galpón. Las aberturas en los bordes de la cortina se estiman a través de la ranura equivalente. La expresión de la velocidad se ha empleado para modificar el modelo propuesto por V.F. Carvalho y otros en 2008 [34] que es a su vez una adaptación del modelo reportado por Louis D. Albright en su libro “Environment Control for Animals and Plants” (Control del medioambiente para animales y plantas). Se ha considerado volúmenes de control de longitud variable no lineal, que están determinados por la velocidad en cada punto. La evaluación de la ranura equivalente se ha realizado utilizando la herramienta “Solver” de Excel. El cálculo de la temperatura de salida en función del número de extractores, densidad de pollos por metro cuadrado y las dimensiones del galpón se ha realizado utilizando la herramienta MatLab. Un modelo 2D en ANSYS ha permitido explicar la presencia de flujos cruzados y remolinos que han sido observados en sitio y efectos de pérdida de velocidad en la pared húmeda que han sido incorporados al modelo matemático desarrollado.

Palabras clave: Ambiente controlado, Modelo matemático, Paneles evaporativos, Ranura equivalente.

ABSTRACT

This work has been developed to study some of the effects that occur on broiler housing technology transition from natural ventilation to tunnel ventilation. In order to overcome climate impact on mass production, air removal rate has been set at one minute for tunnel ventilation. Air speed is the main parameter on keeping temperature lower enough to avoid chicken heat stress and dead. Due to holes and other uncontrolled air entrances, air speed drops along the broiler house. A mathematical derivation is been done to compute air speed considering a linear structural equivalent gap. This feature takes in account all unknown air entrances. The equivalent gap is used in a nonlinear mathematical model to compute the air temperature at the extractor fans which is based on the model proposed by V.F. Carvalho et al 2008 [34] whom adapted from the one develop by Louis D. Albright in his book "Environment Control for Animals and Plants". The nonlinear model computes each n-control volume through the velocity equation developed with the equivalent gap. Excel tools such as "Solver" had been used to determine the equation constants of the velocity expression by fitting to experimental data. The mathematical model input data are the number of fans, number of chicken, outside temperature and bird house dimensions which are fed to a Mat Lab routine to compute the air temperature leaving the broiler house. An ANSYS 2D model has been develop and validated to compare acquired data to explain some unusual air speed drops and whirlwinds. The 2D model also has shown important exponential air speed fall reducing evaporative wall efficiency.

Keywords: Climate control, evaporative cooling, Mathematical model, Equivalent gap.

SIMBOLOGÍA UTILIZADA

ρ densidad del aire 1,22 $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

$\Phi_{Extractor}$ diámetro de los extractores

\forall_{PH} volumen de aire por unida de tiempo $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

\forall_c volumen de control

\forall_{ex} volumen de aire de un extractor por segundo $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

\forall_{exh} volumen de aire de un extractor por hora $\left[\frac{m^3}{h}\right]$

\forall_{inf} volumen de aire que se infiltra por unida de tiempo $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

A_{PH} área de pared húmeda $[m^2]$

A_S área de la superficie caliente $[m^2]$

A_c área de crianza $[m^2]$

A_{ex} área del extractor $[m^2]$

A_g área de sección transversal del galpón $[m^2]$

A_i área de una ventolera $[m^2]$

A_{inf} área de las entradas o función de infiltración $[m^2]$

A_{rec} área de recepción de los pollos bebe $[m^2]$

A_s área de la superficie de control

C_p calor específico del aire 1,005 $\left[\frac{KJ}{Kg K}\right]$

D_g ancho del galpón $[m]$

H_{PH} altura del panel $[m]$

H_{PH} altura del panel $[m]$

H_g	altura del galpón [m]
H_g	altura del galpón [m]
H_i	altura de las ventoleras [m]
L_{PH}	largo de la pared húmeda [m]
L_{ex}	tamaño del extractor [m]
L_g	largo del galpón [m]
L_i	longitud de las ventoleras [m]
Q_T	calor transferido [KJ]
Q_{rec}	calor requerido para la recepción [KJ]
Q_e	calor retirado por los extractores [KJ]
Q_p	calor generado por los pollos [KJ]
Q_h	calor que ingresa por la pared húmeda [KJ]
Q_i	calor debido a la infiltración [KJ]
Q_t	calor debido a la estructura [KJ]
Q_l	calor debido a las ventoleras [KJ]
T_∞	temperatura de bulbo seco del aire en el exterior [C]
T_G	temperatura de globo negro [C]
T_{bs}	temperatura de bulbo seco [C]
T_{eh}	temperatura de bulbo húmedo del aire en el exterior [C]
T_{es}	temperatura de bulbo seco del aire en el exterior [C]
T_{ss}	temperatura de bulbo seco del aire en el interior [C]
c_{pr}	costo de producción
d_p	densidad $\left[\frac{\text{pollos}}{m^2} \right]$
f_c	factor de conversión de las aves
m_a	masa de aire $\left[\frac{Kg}{s} \right]$

m_{rec}	masa de aire en área de recepción [Kg]
n_e	número de extractores
n_i	número de ventoleras
p_{45}	precio de un saco de 45 kilogramos de alimento [dólares]
p_e	peso promedio de un pollo [Kg]
p_p	precio en pie de un pollo en la granja $\left[\frac{\text{dólares}}{\text{Kg}}\right]$
p_{pb}	precio del pollo bebe [dólares]
p_r	período de operación de los extractores [min]
\vec{v}	velocidad del aire
v_{PH}	velocidad del aire que a través del panel $\left[\frac{m}{s}\right]$
v_{ex}	velocidad lineal del aire en el extractor $\left[\frac{m}{s}\right]$
v_g	velocidad del aire en el galpón $\left[\frac{m}{s}\right]$
v_i	velocidad del aire en las ventoleras $\left[\frac{m}{s}\right]$
h	coeficiente de transferencia de calor $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
η	propiedad intensiva masa
E	energía generada por cada pollo en una hora $\left[\frac{KJ}{h * \text{pollo}}\right]$
N	propiedad extensiva masa
r	valor de la lectura en resistencia óhms
t	tiempo
ΔPa	presión estática [Pascuales]
ΔT	diferencia de temperatura [K]
Δt	intervalo de tiempo [s]
Δx	longitud [m]

DESARROLLO DE UN MODELO MATEMÁTICO PARA LA EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE NAVES EN LA CRÍA DE POLLOS DE ENGORDE

PRESENTACIÓN

La producción avícola a gran escala se realiza en naves o galpones con infraestructura y equipamiento variado. La condiciones climáticas son factor principal que se considera para ubicar los planteles avícolas, esto, en razón de que la crianza de los pollos de engorde requiere de bien establecidas condiciones del ambiente al interior del galpón; por ejemplo, las temperaturas a nivel de las aves en las varias etapas (semanas) del proceso son un estándar en la industria. Otros factores de productividad tales como: ciclo de crecimiento, mejoras genéticas, márgenes de utilidad y la ubicación geográfica en forma particular han impulsado a esta industria al desarrollo de sistemas de ambiente controlado que permitan las producción en latitudes donde los climas extremos se presentan (Canadá, Alemania, etc.), de igual forma en nuestro país, sin que el clima llegue a los extremos de temperatura de los países septentrionales, se perciben marcadas diferencias en los lugares cálidos como la costa y oriente comparadas con la serranía.

Los sistemas de producción en nuestro país siguen siendo en muchos casos de tipo artesanal. El uso de galpones abiertos con cortinas y cubiertas de acero galvanizado, donde las condiciones del tiempo inciden de manera sustantiva en la producción. El estrés térmico que sufren las aves cuando pasan de temperaturas externas de 10 grados centígrados en la noche a temperaturas de 50 grados a la mitad del día, producen daños al sistema renal por ejemplo. El uso de calefactores reduce en forma notable las variaciones de temperatura en la noche. En el día la ventilación natural se aprovecha para que las temperaturas no alcancen niveles letales para las parvadas.

En algunos casos se ha incorporado a la estructura sistemas de aislamiento térmico que permita mejorar las condiciones al interior de galpón. El aislamiento térmico reduce de manera notable el efecto de la radiación calórica de las cubiertas acero galvanizado en el día tanto en ambientes de costa como de sierra. Otro factor es el calor producido por las aves que es prácticamente despreciable en las primeras semanas y se vuelve preponderante al final de la crianza.

Con todas éstas premisas, la utilización de ambientes controlados que incorporen sistemas energéticos para proporcionar calor a las aves, extraer calor y mejorar las condiciones del aire al interior del ambiente de crianza es la tendencia creciente en la industria. Los sistemas de calefacción en su mayoría operados con gas licuado de petróleo (GLP) ó diesel se presentaban como una alternativa efectiva y conveniente desde todo punto de vista para suministrar calor al sistema. La extracción de calor se consigue con la instalación de sistemas de ventilación de alta o baja presión que permiten reducir el estrés térmico de las aves, siendo éste sistema también utilizado para mejorar la calidad del aire a través del sistema ventilación mínima. De esta manera se ha conseguido mejorar de forma sustancial el ambiente de producción.

Los sistemas instalados en muchos casos son evaluados desde la perspectiva de la producción, por ejemplo. Si las parvadas alcanzan los pesos requeridos a las edades establecidas se puede concluir que el sistema opera adecuadamente. Esta visión es adecuada cuando la rentabilidad está dentro de los márgenes esperados. Por otra parte, cuando los resultados no son consistentes y varían con la época del año, se puede concluir que no se cuenta con un ambiente de producción que esté en capacidad de contrarrestar las condiciones del clima. El registro de parámetros de temperatura y humedad permiten establecer estas condiciones.

No hay que perder de vista que todas las mejoras mencionadas y los ajustes en el proceso de producción tendientes a procurar ambientes más estables y por ende una producción más consistente, tiene una estrecha relación con el manejo y uso de la energía. Este trabajo estudiará los sistemas energéticos utilizados en la producción de pollos de engorde y la relación con los parámetros de crianza mediante el desarrollo de un modelo matemático que se enfoque en las condiciones de la ventilación de túnel. Esto permitirá predecir y mitigar los efectos del estrés térmico que ha provocado cuantiosas pérdidas.

Objetivo general

Establecer un modelo matemático para la evaluación de los parámetros de operación de naves en la cría de pollos de engorde desde la perspectiva de uso eficiente de la energía.

Objetivos específicos

Describir el proceso de crianza de pollos de engorde en ambientes controlados (túnel) y una breve reseña de la industria.

Analizar los sistemas energéticos relacionados con la tecnología de ambiente controlado (túnel).

Registrar con ayuda de instrumentos de medición, parámetros de temperatura, humedad, velocidad y presión en una infraestructura de ambiente controlado (túnel).

Elaborar modelos de los sistemas energéticos y validación de los modelos utilizando los datos de los parámetros físicos registrados.

Establecer los puntos de operación de los sistemas energéticos a partir de los modelos obtenidos.

Analizar el impacto del uso de los modelos en la producción y confort de las aves en los ambientes controlados.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Importancia de la producción avícola en el Ecuador

La producción avícola no artesanal se ha desarrollado de manera continua desde hace 4 décadas en nuestro país, introduciendo tecnología y mejoras en la genética de las aves, producción de alimento y sistemas de crianza para los pollos de engorde; según afirma el Dr. Mario E. López N. precursor de la avicultura tecnificada en el Ecuador, Presidente en múltiples ocasiones de AMEVEA (Asociación de Médicos Veterinarios Especialistas en Avicultura del Ecuador, fundada en 1982) cuando fue consultado sobre el tema durante el desarrollo del presente trabajo. La incorporación de sistemas de ambiente controlado ha sido la respuesta del sector agropecuario a la demanda de la sociedad, los emprendimientos han seguido la tendencia mundial de la actividad. La figura 1.1 muestra la evolución de los mercados consolidados a nivel mundial sobre el origen de la proteína animal en la dieta de la población del planeta. Los datos muestran que la producción de pollos supera a la de vacunos a partir de 1994 y a la de cerdos, que consistentemente fue mayor a la de vacunos y pollos, a partir del 2011, FAO [61]. El impacto de esta tendencia es descrito y analizado por Salazar, S., [75]. El estudio realizado refleja la tendencia de crecimiento de la producción y masivo consumo de carne de pollo como una fuente más económica de proteína animal.

La proteína animal ha sido asociada con la carne roja, sin embargo la producción vacuna requiere de grandes áreas de crianza y prolongados períodos para la cosecha o faena del ganado. Este debate y análisis ha tenido como resultado que la proteína que se obtiene de las aves (pollos de engorde) es la más adecuada considerando términos de poder alimenticio, costo de producción y ciclo de cosecha. Durante muchos años la investigación se concentró en las mejoras genéticas de las aves de engorde, impulsadas por la captación del mercado de la proteína a nivel mundial, haciendo necesario ambientes de producción con mayor agregado tecnológico. Por otra parte la creciente difusión de este segmento productivo llevó a la instalación en granjas de cría de pollos de engorde en todas las latitudes y en todos los climas. Como en otras áreas de los procesos industriales, algunos países han desarrollado sistemas de producción que se adaptan a sus condiciones geográficas y de clima. Estos sistemas han sido introducidos en el Ecuador con bastante éxito gracias a la experiencia y la visión emprendedora de algunos avicultores, como es el Dr. López.

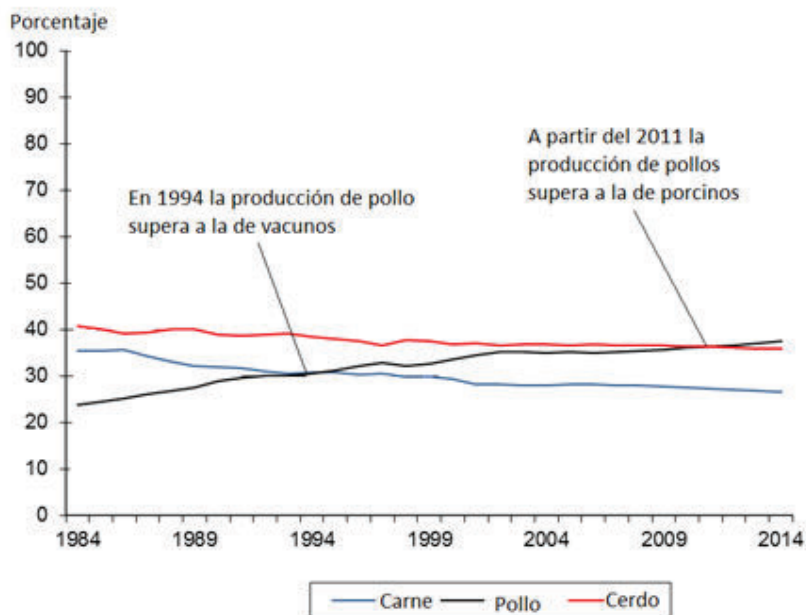


Figura 1.1. Evolución de la producción de proteína animal, (Fuente: Perspectivas agrícolas, OCDE-FAO, 2005-2014)

La producción según reporta el CONAVE (Corporación Nacional de Avicultores del Ecuador) en 2007 [76] es mayoritariamente informal y poco tecnificada. Un importante segmento de la producción se realiza en galpones abiertos en la serranía ecuatoriana por lo que las bajas temperaturas del día y principalmente de la noche y madrugada, precisan del uso de sistemas de calefacción. Los equipos para la calefacción típicamente emplean GLP (Gas Licuado de Petróleo) como combustible.

Cambios en la legislación produjeron una pérdida importante de competitividad de este sistema de producción debido a que el costo de la energía para la calefacción de los galpones se vio incrementado. El Acuerdo Ministerial No. 105, publicado en el Registro Oficial No. 145 de 9 de agosto del 2007 autorizó la utilización de GLP para uso industrial. Este hecho, produjo un impacto severo en la rentabilidad de este nicho de la producción. Tan fuerte fue este impacto que una gran cantidad de productores iniciaron planes de migración de sus operaciones a climas más cálidos.

La producción en galpones abiertos en climas templados sin variaciones de temperatura importantes es deseable y efectiva para densidades de aves en el orden de 8 aves por metro cuadrado. La calefacción debe mantenerse por unos pocos días y el calor corporal del ave es suficiente para afrontar las condiciones del resto de la crianza. No muchos lugares presentan además de estas características climáticas, la accesibilidad y servicios necesarios para la producción.

La producción en climas cálidos y húmedos es el común denominador de los sitios de crianza en el Ecuador. Altura por debajo de los 1000 metros sobre el nivel del mar, favorece el metabolismo de las aves. La radiación solar contribuye de manera conjunta con el calor corporal a elevar la temperatura al interior de los galpones haciendo que en galpones abiertos la muerte de las aves (síndrome de muerte súbita que “se reportó por primera vez en Canadá en 1975 por Briden y Ridel”), es producto del estrés calórico que ha sido estudiado y documentado ampliamente por De Basilio en su trabajo sobre éste tema [62]. Por estas razones la industria ha incursionado en los sistemas de ambiente controlado (túnel) para mejorar la productividad, incrementando la densidad de aves entre 12 y 14 por metro cuadrado manteniendo las condiciones al interior dentro de los parámetros recomendados Cobb-Vantress Inc.[1].

1.2 Características de los métodos de producción a gran escala

La investigación sobre la crianza de pollos de engorde se ha realizado en una diversidad de áreas y campos de la ciencia relacionados al tema. Avances en la genética, han dado origen a razas de aves cuyos factores de conversión superan en mucho a variedades silvestres. Siendo la alimentación otro factor decisivo de la industria, los investigadores han dedicado sus esfuerzos a mejorar la formulación del alimento para cada etapa de crecimiento. La bioseguridad y las vacunas representan otro pilar de la actividad en su conjunto. Todo lo anterior ha coadyuvado para que esta actividad alcance prominencia en la industria alimenticia a nivel mundial.

Para satisfacer la creciente demanda, los planteles avícolas (granjas de aves para engorde) han crecido en tamaño, permitiendo incrementar el número de pollos que se producen. Cifras publicadas en los años 2013 y 2014 por directivos de PRONACA y CONAVE dan cuenta de unos 250 millones de pollos por año en nuestro país. (El Telégrafo, viernes 15 de noviembre del 2013 y estadísticas CONAVE para el 2013)

La producción avícola a gran escala se realiza en naves o galpones cuya edificación y equipamiento responden al modelo de negocio de cada empresa. Objetivos o metas de crecimiento se utilizan para responder a las preferencias de los consumidores, adaptándose a través de la innovación tecnológica. Sin embargo, de manera independiente de los objetivos o metas de crecimiento, el proceso de cría de pollos de engorde responde a parámetros que están más relacionados con la raza y el entorno en el que se desarrollan las aves. Los objetivos de crecimiento se consiguen conjugando

parámetros tales como: la raza, la formulación del alimento, el programa de vacunas, la bioseguridad, procesos internos de administración y no menos importante es el ambiente de crianza.

Los pollos de engorde requieren de bien establecidas condiciones de temperatura, humedad y calidad del aire al interior del galpón para desarrollar su potencial genético y conseguir una elevada conversión de alimento en carne, en períodos cada vez más cortos. La temperatura a nivel de las aves en las varias etapas (semanas) del proceso son un estándar en la industria Cobb-Vantress Inc.[1] Aviagen Inc. [2]. Toda la literatura técnica sobre el tema coincide en rangos de temperatura y humedad como los apropiados para aprovechar el potencial genético de las aves.

Tabla 1.1. Temperatura y humedad de crianza según la edad de las aves.

Edad en Días	Temperatura	Humedad	Temperatura	Humedad
0 a 3	32-33	30-50%	31 a 33	40-60%
3 a 7	29-30	40-60%	30 a 32	40-65%
7 a 14	27-28	50-60%	29 a 31	50-65%
14 a 21	24-26	50-60%	27 a 29	50-65%
21 a 28	21-23	50-65%	24 a 27	50-65%
28 a 35	19-21	50-65%	22 a 24	50-70%
35 a 42	18	50-70%	18 a 22	50-70%
42 a 49	17	50-70%	18	50-70%
	Cobb		Hubbard	

(Fuente: Cobb-Vantress Inc[1] y Hubbard[3]).

La tabla 1.1, muestra la temperatura y la humedad relativa reportada por dos productores de aves con genética modificada Cobb-Vantress Inc.[1], Aviagen Inc.[2] y Hubbard[3]. Los datos muestran pequeñas diferencias, sin embargo se puede establecer que los pollos de raza “Hubbard” se desarrollan en ambientes un poco más calientes que los “Cobb” o “Ross”. El rango de temperatura y humedad en cualquier caso se encuentra entre los 33 y 18 grados centígrados, en tanto que la humedad relativa entre 30% y 70%. Los sistemas de ambiente controlado deberán ser ajustados para proporcionar la temperatura objetivo según la raza y la edad de las aves.

Los parámetros de temperatura y humedad como objetivo para conseguir una mejor producción están fuertemente ligados a las condiciones climáticas. La producción

avícola en latitudes con climas extremos ha impulsado el desarrollo de sistemas de ambiente controlado, con el uso de aislantes térmicos y sistemas de ventilación (presión positiva y negativa). En nuestro país, las condiciones del clima sin ser tan severas como en otros países, representan un reto ya que se perciben marcadas diferencias en los lugares cálidos como la costa y oriente comparadas con la serranía.

20 años atrás, los sistemas de producción en nuestro país eran más bien de tipo artesanal. Galpones abiertos de estructura de madera con cortinas y cubiertas de acero galvanizado, donde las condiciones del tiempo incidían de manera sustantiva en la producción. El estrés térmico que sufren las aves cuando pasan de temperaturas externas de 10 grados centígrados en la noche a temperaturas de 30 o 35 grados a la mitad del día, producen daños al sistema renal por ejemplo. El uso de calefactores reduce en forma notable las variaciones de temperatura en la noche. En el día la ventilación natural se aprovecha para que las temperaturas no alcancen niveles letales para las parvadas. La ubicación geográfica, el clima y las condiciones naturales adecuadas hacían de un lugar el apropiado para edificar los galpones.

El crecimiento de la frontera urbana determinó que muchas de las granjas deban dejar estos lugares con climas templados y trasladarse a sitios con climas más fríos o bien más calientes. Sistemas de calefacción en su mayoría operados con gas licuado de petróleo (GLP) o con diesel se presentaban como una alternativa efectiva y conveniente para suministrar calor a las aves. Para los lugares cálidos, el calor se combate con la instalación de sistemas de ventilación de alta o baja presión que permiten reducir el estrés térmico de las aves, siendo también utilizado para mejorar la calidad del aire a través del sistema de ventilación mínima. De esta manera se ha conseguido mejorar de forma sustancial el ambiente de producción.

Los sistemas instalados en todos los casos son evaluados desde la perspectiva de los índices de producción. Si las parvadas alcanzan los pesos requeridos a las edades establecidas se puede concluir que el sistema opera adecuadamente. Esta visión es adecuada cuando la rentabilidad está dentro de los márgenes esperados. Debido a que las tasas de retorno de las inversiones suelen ser muy bajas en esta actividad, las mejoras tecnológicas y de procedimientos no se las puede evaluar con facilidad. Otro factor que conspira en este sentido es la variabilidad de los resultados que se relaciona con la edad de la cosecha, sobre todo cuando se ha sobrepasado el valor máximo de convertibilidad.

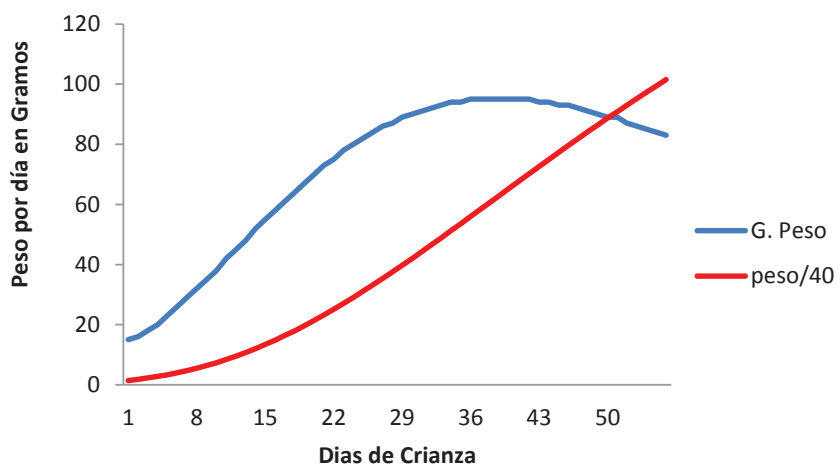


Figura 1.2. Curva de crecimiento de la raza ROSS 308,

(Fuente: 308 Performance Objectives Aviagen Inc.[4])

La figura 1.2, muestra la ganancia de peso en gramos por día y el peso de un ave. Se puede notar que a partir del día 43 la ganancia de peso empieza a disminuir reduciendo así el factor de conversión. Este hecho sugiere que la evaluación del desempeño de un galpón de ambiente controlado no se deba realizar solo por los resultados finales que dependen de la edad de faenado o cosecha. No es objetivo de este trabajo analizar la rentabilidad del negocio de producción de pollos de engorde, sino la de evaluar el sistema de ambiente controlado con el propósito de mejorar el uso de la energía en este proceso.

Por otra parte, cuando los resultados no son consistentes y varían con la época del año, se puede concluir que la producción carece de un sistema de ambiente controlado que esté en capacidad de contrarrestar las condiciones del tiempo en el exterior del galpón. La correlación entre los reportes del INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) y los resultados de las parvadas es un indicador de esta condición. El establecimiento de un histórico de los parámetros de temperatura y humedad permite establecer las condiciones para una mejor explotación de la actividad.

Estudios de carácter científico investigativo realizados en Brasil (clima cálido húmedo), Arabia Saudita (clima cálido seco), Estados Unidos [12, 13] (clima caracterizado por fríos y secos inviernos, cálidos y húmedos veranos) han concluido que la utilización de climas controlados basados en la tecnología de túnel (ambientes cerrados con sistemas de climatización) son la solución más adecuada.

No hay que perder de vista que todas las mejoras mencionadas y los ajustes en el proceso de producción tendientes a procurar ambientes más estables y por ende una producción más consistente, tiene una estrecha relación con el manejo y uso de la energía. Este trabajo estudiará los sistemas energéticos utilizados en la producción de pollos de engorde, la relación con los parámetros de crianza con el propósito de establecer recomendaciones sobre el dimensionamiento y operación desde la perspectiva de usos de la energía de forma eficiente.

1.3 Producción en galpones abiertos

Los galpones abiertos se caracterizan por no contar con paredes laterales. En muchas ocasiones el piso es de tierra y rodeados por una malla que impide que las aves abandonen el lugar. Los dispensadores de comida y agua suelen ser operados de forma manual, es decir que los trabajadores depositan el alimento directamente de los sacos en los denominados comederos. En algunos casos se ha llegado a la automatización de los sistemas de comida y agua.

La cubierta está concebida para proteger a las aves del sol y la lluvia. Se utiliza planchas de fibrocemento o zinc. La elección de los materiales depende más del presupuesto que del beneficio tecnológico que podrían aportar, por lo que, las aves deberán soportar las condiciones ambientales de la zona en la que se realice la edificación.

En el Ecuador existe una gran variedad de climas y sub climas en las diferentes regiones. Los productores de aves buscan los sitios más favorables para la edificación de las granjas avícolas. No siempre se puede encontrar el lugar con la temperatura apropiada, con barreras naturales para el viento, con diferenciales de temperatura entre la noche y el día adecuadas.

En los galpones abiertos se utiliza de forma intensiva cortinas de yute que se instalan en cantidad, extensión y posición de acuerdo con la edad de las aves. Así, los pollos bebe se reciben en espacios más pequeños que se consiguen ubicando cortinas entre el techo y el piso en el interior del galpón. La ventilación se logra moviendo las cortinas y es la experiencia en el manejo de las aves la que determina el bienestar y desarrollo de la parvada.

En los primeros días se instalan calentadores para que el ambiente interior alcance la temperatura de 33 grados centígrados requerida a esta edad. Las cortinas entonces se utilizan para permitir la ventilación. Por lo que se debe mantener un cuidado casi permanente. Una alteración importante de las condiciones ambientales respecto a las recomendadas podría alterar en forma permanente la salud de las aves, cuyos

resultados solo se verán cuando los pollos alcancen edades entre los 30 a 48 días. Índices elevados de mortalidad y pobres índices de conversión.

Fenómenos naturales como el viento pueden ser utilizados para ventilar los galpones con pollos en edad adulta debido al calor que genera su metabolismo. Un viento excesivo por otra parte puede ser nocivo. En este caso las cortinas exteriores servirán para proteger a las aves de esta condición. La ausencia de viento también puede ser contraproducente. Durante un día cálido las aves podrían sofocarse por el calor producido por sus propios cuerpos cuando pollos de 5 a 6 libras ocupan un galpón con una densidad de 10 a 12 pollos por metro cuadrado. Por esta razón, encontrar las mejores condiciones para cada época del año resulta una intrincada tarea.

En suma, la producción en galpones abiertos dependerá más de la ubicación del galpón, las condiciones del clima y la experiencia de las personas al cuidado de las aves que las mejoras genéticas y la formulación del alimento.

1.4 Producción en galpones cerrados o de túnel

En la sección anterior se ha insistido en la influencia del clima sobre los índices de productividad de un lote o parvada. La crianza de pollos de engorde no sería posible en latitudes donde los inviernos alcanzan temperaturas por debajo de los cero grados y cercanas a los cuarenta grados en el verano. Para sobrellevar las citadas condiciones, los galpones cerrados están diseñados con el uso intensivo de barreras térmicas que disminuyen de forma sensible los efectos del ambiente exterior.

Sistemas adicionales deberán reemplazar al viento que ventila de forma natural los galpones abiertos ya que los aislantes impiden que el calor entre o salga del recinto. Durante los primeros días de crianza los aislantes mantendrán el calor entregado por los calentadores haciendo el trabajo más eficiente. Sin embargo, estos mismos aislantes impedirán que el calor de las aves sea retirado con facilidad dado que las paredes laterales de los galpones cerrados están constituidas de muros de bloque, ladrillo u otro material. La ausencia de ventanas también limita la entrada de la luz solar. De allí el nombre de galpones cerrados.

La temperatura interna producto del calor producido por las aves en este caso amenaza su vida. Cuando la temperatura se eleva, se produce el estrés térmico que afecta los índices de producción y cuando la temperatura bordea los 40 grados se produce la muerte súbita. En los galpones cerrados o de Túnel se debe manejar de forma adecuada el calor para que no acontezca lo descrito. Para aquello se instalan potentes extractores

con capacidades de desplazamiento elevadas en rangos de 20.000 a 40.000 metros cúbicos por hora.

Aire del exterior reemplaza al del interior por lo que se requiere que esté a una temperatura alrededor de 20 a 25 grados centígrados. Valores que no se obtiene de manera natural en cualquier época del año. Por esta razón, en climas cálidos como los de Ecuador, se instalan sistemas de enfriamiento evaporativo que han probado ser muy convenientes dados los volúmenes de aire y rangos de temperatura.

Toda vez que se consiga mantener un ambiente interior a la temperatura y humedad recomendadas con ligeras variaciones, se podrá explotar de manera sustantiva las características genéticas de las aves y producir en cualquier época del año o latitud del planeta.

2. Sistemas energéticos utilizados en galpones de túnel

Los galpones para la crianza de pollos de engorde deben proporcionar a las aves las condiciones necesarias para un adecuado desarrollo en un período de tiempo entre los 42 y 50 días. Estas condiciones potencializan la genética de las aves procurando obtener un mayor rendimiento en términos del factor de conversión de alimento, en otras palabras desde el punto de vista comercial un kilogramo de alimento consumido debe revertirse en una cantidad mayor de peso corporal. El precio de un saco de 45 kilogramos de alimento es de aproximadamente 25 dólares americanos en tanto que el precio del pollo en pie según las estadísticas del CONAVE en el 2016 se ubica en 0,9 dólares la libra. En este valor están incluidos los costos de producción y comercialización, por lo que el precio a nivel del productor se ubica en 0,75 dólares.

p_e peso promedio de un pollo [Kg]

p_{pb} precio del pollo bebe [dólares]

p_p precio en pie de un pollo en la granja [$\frac{\text{dólares}}{\text{Kg}}$]

f_c factor de conversión de las aves

p_{45} precio de un saco de 45 kilogramos de alimento [dólares]

c_{pr} costo de producción

$$\text{Utilidad Neta} = p_e * \left(p_p - f_c * \frac{p_{45}}{45} \right) - c_{pr} - p_{pb} \quad \text{EC. (2. 1)}$$

El peso que alcancen las aves depende de las condiciones de crianza, es decir del ambiente en el galpón. Los sistemas de calefacción, ventilación mínima, ventilación de transición, ventilación túnel y los sistemas auxiliares tales como: las líneas de alimento y agua, bombas de recirculación de los paneles húmedos determinarán en último término el rendimiento reflejado en el factor de conversión. El costo de producción está asociado con los servicios de energía eléctrica, agua potable, transporte, salarios, insumos, seguros, amortización del capital, impuestos, etc. Que depende de cada granja y del modelo de negocio utilizado.

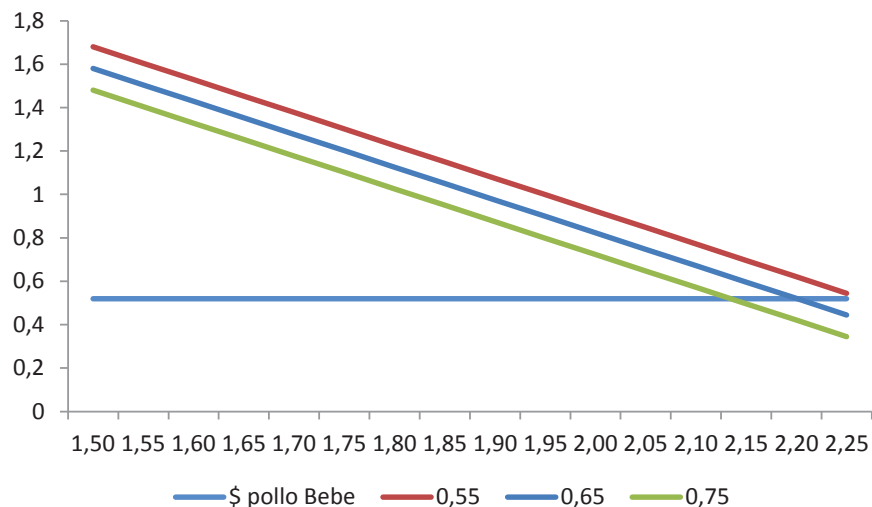


Figura 2.1. Efecto del factor de conversión, (Fuente: Autor)

La gráfica muestra la variación de la utilidad bruta en función de factor de conversión, la línea horizontal azul corresponde al precio del pollo bebe, se puede desprender que una pobre conversión por encima de 2,125 no cubriría este valor. El factor de conversión es el producto de variables tales como la mortalidad que depende de la salud y bienestar de las aves. El programa de vacunas, las buenas prácticas de bioseguridad de la mano con una temperatura y humedad estables que mejoran las condiciones para conseguir un peso adecuado en un menor número de días.

Las condiciones del ambiente influyen significativamente en los hábitos y horarios de las aves, éstas no se alimentan cuando la temperatura es muy alta por lo que no ganan peso. Por el contrario si está muy frio utilizan el alimento para producir el calor metabólico y así compensar el calor que no reciben del ambiente y por ende no ganan peso. Una producción óptima mantiene la temperatura estable para que las aves se alimenten y conviertan en peso la mayor cantidad de alimento. La formulación es otro factor que influye en el desarrollo, ya que, como todo ser vivo, los pollos pasan por etapas bien definidas de crecimiento. No tendrán el mismo tratamiento las aves de postura que las reproductoras, éstas últimas deberán producir huevos fértiles. Los pollos de engorde han sido genéticamente mejorados para desarrollar pechugas más grandes como se puede observar en la gráfica obtenida de la revista "Poultry Science".

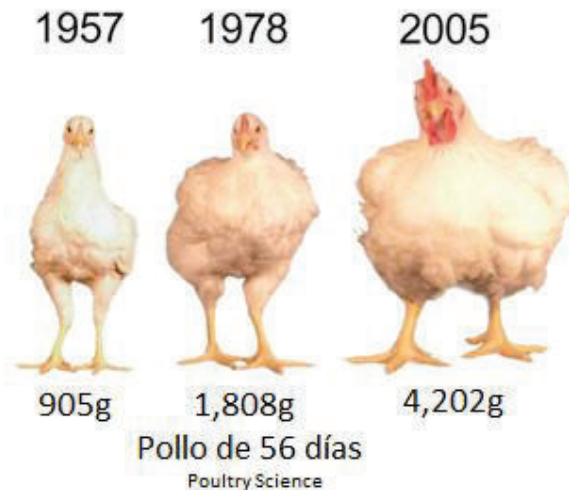


Figura 2.2. Evolución de la genética mejorada, (Fuente: Poultry Science)

Las aves modernas presentan características mejoradas respecto de sus predecesoras como se muestra en la figura 2.2. En la década de los 60's los pollos requerían más de 60 días para alcanzar un peso de adecuado, en tanto que 20 años más tarde el período de producción había sido mejorado. Ha tomado 40 años de desarrollo y manipulación genética para lograr aves que en tan solo 49 días de edad, se obtenga pollos adultos con rendimientos de 2 a 1, es decir que por cada dos kilos de alimento se obtiene 1 kilo de carne. Los sistemas de ambiente controlado utilizan sistemas que como es natural requieren energía para conseguir los objetivos de crianza señalados en la tabla 1.1. A continuación, se describen los sistemas energéticos más relevantes del proceso, tanto por la gran demanda de recursos como por su impacto en la producción.

2.1 Sistema de calefacción

Con base en las observaciones realizadas en la granja YURAZNUCO ubicada en 2.300 metros de altura en el sector del Ilaló, en los primeros días de la crianza, los pollos de engorde tienen pesos por debajo de los 100 gramos y la cantidad de calor corporal no es suficiente para mantener la temperatura objetivo de 32 y 33 grados centígrados correspondientes a esta edad. El sistema utiliza sistemas de calefacción que sumados a la reducción del área de producción, permiten mantener la temperatura al interior en los niveles deseados. Este sistema se utiliza solo por unos pocos días.

Los sistemas de calefacción que se utilizan en la industria suelen ser alimentados con GLP o Diésel, los primeros para producir calor radiante obtenido a partir de superficies típicamente cerámicas que entran en contacto directo con la flama a 600 grados

centígrados del GLP. Estas superficies adquieren un color rojizo que produce la calefacción por radiación. Los calefactores operados con Diésel utilizan un intercambiador de calor que aísla la combustión del Diésel, del aire que se calienta y es empujado por un ventilador.

2.1.1 Calentadores de GLP (gas licuado de petróleo)

Existen dos tipos o clase de calentadores de gas. Los calentadores infrarrojos y los de convección. Los primeros pueden presentarse en variadas formas, por ejemplo: aquellos que consisten en campanas de tol galvanizado que hace las veces de reflector, el que en su centro cuenta con un plato cerámico el cual está expuesto a la flama directa de un quemador de GLP. El calor de la flama lleva al plato cerámico a una temperatura alrededor de 600 grados centígrados, adquiriendo un color rojizo que las caracteriza. Este tipo de calentador puede suministrar entre 47.477,51 a 26.376,39 [KJ] por hora dependiendo de su tamaño y está diseñado para cubrir áreas entre 30 y 80 metros cuadrados. Debido a que la densidad de pollos en la primera semana es en el orden de 100 por cada metro cuadrado. En forma empírica se estila utilizar una criadora grande o calentador de gas por cada 5.000 pollos y unos 3.000 cuando se usan las de menor tamaño.

La crianza de unas 15.000 aves requeriría una 3 criadoras grandes o unas 15 pequeñas, es decir 137.157,26 [KJ] por hora o unos 131.881,98 [KJ] por hora si se utilizan las más pequeñas. Las pérdidas de calor por paredes, piso, cortinas y principalmente el techo hacen que se deba sobre dimensionar los requerimientos.

A_{rec} área de recepción de los pollos bebe [m^2]

H_g altura del galpón [m]

ρ densidad del aire 1,22 $\left[\frac{Kg}{m^3} \right]$

C_p calor específico del aire 1,005 $\left[\frac{KJ}{Kg \ K} \right]$

T_{∞} temperatura de bulbo seco del aire en el exterior [C]

T_{ss} temperatura de bulbo seco del aire en el interior [C]

m_{rec} masa de aire en área de recepción [Kg]

Q_{rec} Calor requerido para la recepción [KJ]

$$V_{rec} = A_{rec} * H_g [m^3] \quad \text{EC. (2. 2)}$$

$$m_{rec} = V_{rec} * \rho [Kg] \quad \text{EC. (2. 3)}$$

$$\Delta T = T_{SS} - T_{\infty} [C] \quad \text{EC. (2. 4)}$$

$$Q_{rec} = C_p * m_{rec} * \Delta T [KJ] \quad \text{EC. (2. 5)}$$

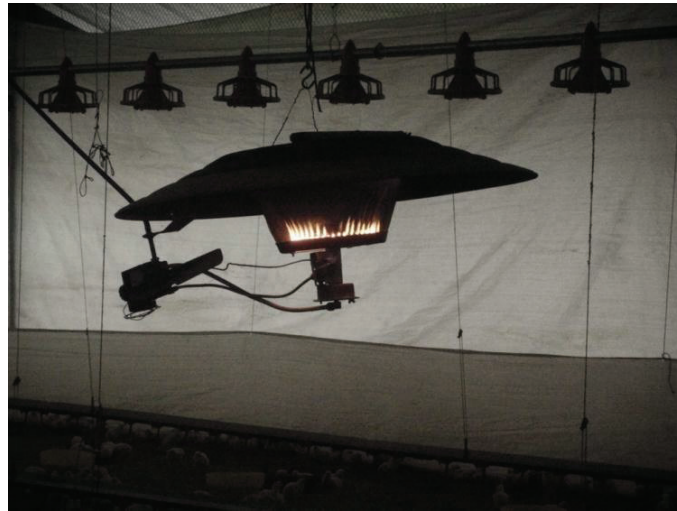


Figura 2.3. Calentador de GLP infrarrojo, (Fuente: Autor)

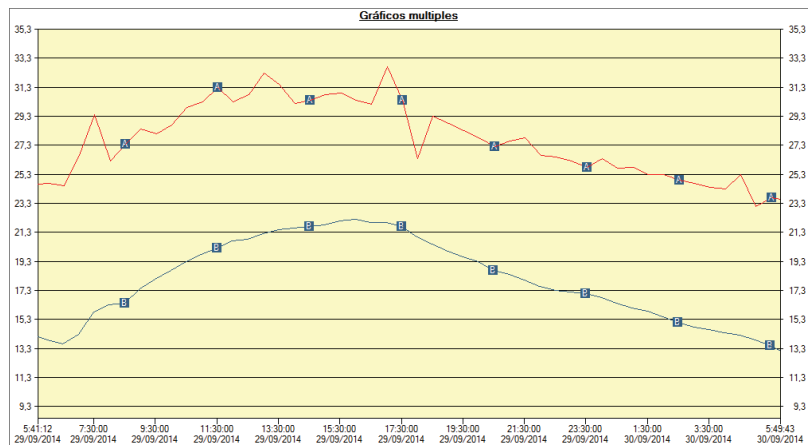


Figura 2.4. Registro de la temperatura externa (azul), interna (Rojo), (Fuente: Autor)

En las granjas de la serranía se utilizan este tipo de calentadores de GLP. La figura 2.4 muestra los registros obtenidos el 29 de septiembre del 2014 durante el tercer día de la parvada, la temperatura exterior se presenta en azul y en el interior del galpón en rojo. Se puede observar que la máxima temperatura externa es de 22,2 grados centígrados registrada a las 16:00 horas y la mínima de 13,1 grados centígrados a las 6:00 horas en el exterior. En estas mismas horas el interior se halla a 30,1 y 23,7 grados centígrados respectivamente. Una diferencia de 7,9 grados centígrados en el día y 10,6 grados centígrados en la noche. El flujo de GLP se ajusta en el día y la noche para mantener una temperatura adecuada a la edad de crianza. Es durante la noche que los calentadores de GLP operan a su capacidad nominal. Se ha observado que la temperatura de la cubierta de zinc es de 40 grados centígrados y la campana del calentador a 200 grados centígrados. El ejemplo siguiente permite establecer las pérdidas de calor en un ambiente de serranía con el uso de calentadores de GLP. Para ello se considera que:

$$T_{\infty} = 13,1 [C]$$

$$A_{rec} = 120 [m^2]$$

$$H_g = 2,8 [m]$$

$$T_{ss} = 23,7 [C]$$

$$V_{rec} = 120 [m^2] * 2,8 [m] = 336 [m^3]$$

$$m_{rec} = 336 [m^3] * 1,22 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] = 409,92 [Kg]$$

$$Q_{rec} = 409,92 [Kg] * 1,05 \left[\frac{KJ}{Kg K} \right] * 10,6 [K] = 4.562,40 [KJ]$$

La cifra de 4.562,4 [KJ] sugiere que un calentador de GLP sería capaz de incrementar la temperatura del ambiente al valor deseado en poco tiempo (aproximadamente 15 minutos) ya que el calor entregado se reporta en 26.376,40 [KJ] en 1 hora. Sin embargo, esto no ocurre así. Las pérdidas deben ser significativas, por lo que, en el año 2014, se realizó un estudio en una granja de la sierra en la que se estableció que el consumo de gas en un período de 10 horas con 10 calentadores instalados fue de 45 Kg. El estudio consistió en pesar los cilindros de gas industrial cada hora con los calentadores encendidos. Este estudio entregó un consumo promedio de 0.45 Kilogramos de GLP por

hora lo que corresponde a 0,841 litros por hora en tanto que las especificaciones de los calentadores en la compañía Shenandoah es de 1,02 litros por hora. Se realizará el ejemplo utilizando los datos del fabricante ya que los obtenidos en el estudio si bien no difieren de manera significativa, no han sido realizados en un número suficiente como para determinar una conclusión generalizada, en tanto que, se debe presumir que el fabricante ha realizado sus mediciones por un prolongado período de tiempo y con un mayor número de equipos. El calentador GSTC-F-GLP (D.S 026.94.E.M) de la compañía Shenandoah reporta las siguientes características

$$\frac{\text{Consumo}}{\text{hora}} = 0,27 \text{ gph } (1,02 \left[\frac{l}{h} \right])$$

$$\text{Poder calórico Neto GLP} = 10.830 \left[\frac{K \text{ cal}}{Kg} \right] = 45.312,72 \left[\frac{KJ}{Kg} \right]$$

$$\rho_{GLP} = 0,535 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

$$\text{Potencia}_{GLP} = \text{consumo} * \text{Poder calórico} [KW] \text{ o } \left[\frac{KJ}{h} \right] \quad \text{EC. (2. 6)}$$

$$\text{Consumo}_{GLP} = 1,02 \left[\frac{l}{h} \right] * 0,535 \frac{[g]}{cm^3} * 1000 \left[\frac{cm^3}{l} \right] = 545,7 \left[\frac{g}{h} \right]$$

$$\text{Potencia}_{GLP} = 0,5457 \left[\frac{Kg}{h} \right] * 45.312,72 \left[\frac{KJ}{Kg} \right] = 24.727,15 \left[\frac{KJ}{h} \right]$$

$$\text{Potencia}_{GLP} = 6,8686 \left[\frac{KJ}{s} \right] \text{ o } [KW]$$

$$\text{Potencia}_{GLP} = 23.436,81 \left[\frac{BTU}{h} \right] = 6,51 \left[\frac{BTU}{s} \right]$$

Por lo tanto, el calentador de GLP utilizado entrega 23.436,81 [BTU] o 24.727.15 [KJ] respecto de los 25.000 [BTU] o 26.376,40 [KJ] especificados en su catálogo. Por otra parte, se señaló que la temperatura medida utilizando un termómetro infrarrojo en la campana y el techo arrojó como resultado 200 y 40 grados centígrados respectivamente.

$$h \quad \text{coeficiente de transferencia de calor} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$$A_S \quad \text{área de la superficie caliente} [m^2]$$

$$\Delta T \quad \text{diferencia de temperatura} [K]$$

$$Q_T = h * A_S * \Delta T [KJ] \quad \text{EC. (2.7)}$$

$$A_{cubierta} = 120 [m^2]$$

$$T_{\infty} = 13,1 [C]$$

$$T_{cubierta} = 40 [C]$$

$$h = 18,88 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$$\Delta T = (40 + 273,15) [K] - (13,1 + 273,15) [K] = 26,92 [K]$$

$$Q_{perdido} = 18,88 \left[\frac{W}{m^2 K} \right] * 26,92 [K] * 120 [m^2] = 60.957,86 [W]$$

El coeficiente de transferencia de calor que de acuerdo con Cengel, Y., (2012) puede encontrarse entre 2 y 25 vatios por metro cuadrado por cada grado de diferencia en la temperatura, se puede estimar considerando lo siguiente. Durante el estudio del consumo de GLP se observó además que el interior del galpón pasó de la temperatura ambiente a una mayor según se ha reportado en un lapso de aproximadamente 10 minutos. Considerando que los 10 calentadores entregan una potencia de 68,69 [KW], que el aire en el interior del galpón requiere 4.637,20 [KJ] para alcanzar una adecuada temperatura interior, como se ha manifestado, las pérdidas por la cubierta serán la diferencia entre lo requerido y lo entregado.

$$Q_{entregado} = Q_{requerido} + Q_{perdido} \quad \text{EC. (2. 8)}$$

Se ha utilizado la herramienta de solución del “EXCEL” para determinar el calor perdido en un valor de 60,95 kilovatios. El valor del coeficiente de transferencia de calor de 18,88 vatios por metro cuadrado por cada grado equilibra la ecuación 2.7 y establece un 88,74% de pérdidas. Este índice de pérdidas en gran parte es el factor que ha motivado a la industria a moverse a sitios más cálidos.

2.1.2 Calentadores de diésel

Los calentadores de Diésel queman este combustible en una cámara y mediante convección entregan el calor al aire que es empujado por un ventilador al área de recepción de los pollos. Este tipo de calentador es capaz de suministrar entre 131.014,73 a 302.214,42 [KJ] por hora. En la sección anterior se estableció que para obtener las condiciones necesarias para proporcionar una temperatura adecuada se utilizan 10 calentadores de 24.727,14 [KJ] por hora, lo que se conseguiría con un solo calentador de esta capacidad o mayor en similares condiciones.

Los calentadores de la empresa KONGSKILDE con potencia térmica de 70 kilovatios o 251.999,99 [KJ] por hora entregaría un poder calórico similar a los 247.271,43[KJ] por hora de los calefactores de GLP. El consumo de GLP para los 10 calentadores sería 5,457 kilogramos por hora en tanto que el calentador de diésel utilizaría 6,61 kilogramos por hora según el fabricante. De acuerdo con el decreto 799 los precios del GLP y diésel para uso industrial serán fijados en forma mensual. En el mes de noviembre del 2016 se situaron en 0,673952 y 1,643245 dólares respectivamente por lo que el uso de GLP desde el punto de vista de costo del combustible fuera de los impuestos y transporte, sería el más adecuado.

La figura 2.6 y 2.7 muestran los calentadores de diésel en los que se puede observar la estructura compacta y los ductos de entrada y salida del aire, así como el ducto de salida de los gases de combustión y la salida de aire caliente en la parte frontal.



Figura 2.5. Calentador de diesel KONGSKILDE, (Fuente: Autor)



Figura 2.6. Calentador auto contenido diesel Munters, (Fuente: Catalogo Munters)

2.1.3 Calentadores eléctricos

Los sistemas eléctricos utilizan calefacción infrarroja la cual fue desarrollada hace unos 70 años y ha sido utilizado de forma exitosa en industrias. Cámaras de pintura o de curación de revestimientos, hornos, etc. La radiación infrarroja se puede enfocar en los lugares en los que se requiere. Su instalación es similar al de una bombilla eléctrica y se puede controlar de manera relativamente sencilla con el uso de la electrónica de potencia la cantidad de energía y calor.

La radiación es el mecanismo por el cual se consigue entregar el calor y por ende la longitud de onda que se utilice será un factor relevante. Los materiales utilizados en la fabricación de los tubos y la resistencia eléctrica determinarán las características. Dado que los tubos fabricados típicamente en cuarzo radian en forma uniforme en los 360 grados, se utiliza reflectores de metales pulidos para dirigir la radiación infrarroja. Pérdidas por convección se producen en los espejos así contruidos. Tazas de

conversión entre el 60% y 80 % respecto de la energía eléctrica suministrada se pueden lograr con estos dispositivos.

La temperatura de operación será otro factor a ser tomado en consideración ya que se puede obtener tubos radiantes que operan a temperatura que pueden encontrarse entre los 450 y 2200 grados centígrados dependiendo del material de la resistencia eléctrica. La oxidación de los terminales es el resultado de las altas temperaturas por lo que en algunos casos se debe utilizar sistemas de enfriamiento de aire o agua para mantener y prolongar la vida útil del sistema.

En el orden de 5000 horas es la vida útil de los calefactores eléctricos, que operando 24 horas al día en un clima frío permitiría usarlos por 208 días. Debido a que se requiere de unos 20 días de la crianza con calefacción, el juego de calentadores requerirá ser cambiado después de 10 parvadas o lotes. De forma regular, considerando el tiempo de crianza entre 45 a 50 días, los períodos de crianza y limpieza del galpón es posible tener de 4 a 5 lotes por año por lo que los calentadores deberán reemplazarse cada 2 años. Lo anterior unido a la fragilidad de los filamentos podría hacer que esta alternativa no sea viable.

La figura 2.8 muestra la estructura física de un calentador de tubos radiantes de cuarzo en la que se advierte la estructura de soporte, el reflector y los tubos propiamente dichos.



Figura 2.7. Vista de calentador eléctrico de tubos de cuarzo, (Fuente: Understanding Infrared Heating, Heraeus Noblelight [45])

2.2 Estructura y componentes del sistema

2.2.1 Descripción de los galpones

La edificación de naves o galpones para la crianza de aves de engorde y la introducción de mejoras en el equipamiento se realiza siguiendo los parámetros recomendados por los vendedores del equipo a ser instalado. Las empresas dedicadas a la comercialización de insumos para producción avícola hacen referencia a las recomendaciones contenidas en la documentación proporcionada por los proveedores de aves reproductoras con genética mejorada. Existe en el mercado ecuatoriano una variedad de proveedores de sistemas de ambiente controlado (túnel) cuyas características no son idénticas. Los sistemas de control basan sus decisiones en la temperatura, humedad y presión en algunos casos.

La temperatura es el principal indicador del bienestar animal. En los climas cálidos y húmedos, como los de la costa y el oriente ecuatorianos, la radiación solar, la humedad y la altura sobre el nivel del mar (presión) determinan condiciones ambientales con temperaturas superiores a las recomendadas para la crianza en algunos casos. El calor corporal de las aves eleva aún más la temperatura al interior de los galpones haciendo que en ausencia de una ventilación adecuada se produzca el estrés calórico que puede provocar la muerte súbita de las aves según De Basilio [62]. Como se indicó, los sistemas de ambiente controlado (túnel) permiten mejorar la productividad, incrementando la densidad de 8 aves por metro cuadrado a 12 y 14 manteniendo las condiciones al interior dentro de los parámetros recomendados Cobb-Vantress Inc.[1].

En nuestro país, se comercializan principalmente razas producidas por Cobb-Vantress Inc. (Cobb), Aviagen Inc. (Ross 308) Y Grupo Grimaud (Hubbard). No obstante las diferencias que se observa en la curva de crecimiento, los rangos de temperatura y humedad caen dentro de valores que se puede considerar un estándar de la industria y las diferencias en la crianza de razas mencionadas se ajustan en la configuración de parámetros en el equipo controlador del ambiente.

Un galpón de ambiente controlado es una estructura de acero (negro o galvanizado) como la que se puede observar en la figura 2.9, cuyas dimensiones oscilan entre los 100 y 120 metros de largo, 12 a 15 metros de ancho y unos 3 a 3,5 metros de alto. Las paredes pueden ser de bloque de cemento de 15 a 20 centímetros de espesor, o una combinación de pared y cortina de poliamidas (por ejemplo Nylon) con revestimiento de polietileno. La imagen corresponde a esta última condición, los espacios abiertos serán

cerrados usando cortinas. La cubierta, generalmente de tol galvanizado de 0,3 a 0,4 milímetros de espesor.



Figura 2.8. Vista interna de un galpón abierto con bebederos y comederos automáticos,
(Fuente: Autor)

El sistema de ambiente controlado está constituido de extractores en un número suficiente para cumplir con los objetivos de tiempo para el reemplazo parcial o total del aire caliente en el interior con aire fresco al interior del galpón manteniendo la velocidad del aire por debajo de los 3,5 m/s recomendados por “Hubbard”[71] o los 2,5 metros por segundo que “Cobb” [1] . Una pared de celulosa concebida para bajar la temperatura del aire que la atraviesa mediante un proceso de enfriamiento evaporativo directo (EED). Entradas de aire como ventoleras (Inlets) y compuertas controladas para permitir el ingreso de aire al recinto de manera controlada. Un sistema electrónico con sensores de temperatura, humedad y presión que utilizando la información de estos dispositivos (sensores), activa los extractores, abre o cierra las ventoleras (inlets) y compuertas para alcanzar la humedad y temperatura objetivo. Se omite sensores de velocidad del aire en razón de que la infiltración se considera nula, en otras palabras el galpón debe ser totalmente hermético. El ajuste de la apertura de compuertas y ventoleras (inlets) en combinación con el accionamiento de los extractores requiere que se conozca las dimensiones y características de cada elemento constitutivo para establecer los parámetros de operación y la programación de los controladores del ambiente.



Figura 2.9. Vista exterior de los extractores de un galpón de túnel, (Fuente: Autor)

2.2.2 Operación de los sistemas de ambiente controlado

El número de extractores, compuertas (cortinas) y ventoleras (inlets) determina la capacidad instalada que permitirá controlar el ambiente al interior del galpón. La figura 2.10, muestra una vista exterior de un galpón de túnel en el que se puede advertir la presencia de los extractores instalados. En las subsiguientes secciones se describe de manera sucinta los diferentes estados y la operación de los sistemas empleados en ambiente controlado.

En los sistemas de ventilación artificial de presión negativa, se estima el número de extractores considerando el volumen del galpón, la capacidad de cada extractor para desplazar una masa de aire por minuto teniendo como meta el período de intercambio del aire al interior del galpón. Se han establecido tres escenarios, el primero denominado Ventilación Mínima, el cual se define como: “La cantidad mínima de ventilación (volumen de aire) requerida para mantener el potencial genético de las aves” [60], y un segundo denominado Ventilación Transicional, el cual se ha concebido como mecanismo entre la ventilación mínima y de túnel. Finalmente la denominada ventilación de túnel que permite controlar la temperatura cuidando la velocidad del aire sobre las aves.

Adicionalmente, se instala revestimientos de material aislante térmico sobre todo en las cubiertas de tol galvanizado, los parámetros y formas de instalación no siempre responden a un estudio de las condiciones del clima de la zona y los temporales que se presentan en ella. En este contexto, la evaluación desde el punto de vista termodinámico, toma en consideración factores como la temperatura de la zona, la humedad, el nivel de insolación, tipo de edificación, características de aislantes térmicos,

sistemas de ventilación, densidad de aves, entre otros, los que servirán para establecer cambios en los procesos de crianza y modificaciones en la infraestructura de forma sistemática.



Figura 2.10. Instalación del aislante del techo, (Fuente: Autor)

Tanto los sistemas de ventilación como los de calefacción, según sea necesario para mantener el confort de las aves, utilizan energía que se obtiene de la red eléctrica y combustibles (GLP, Diesel, etc.) que inciden en la productividad. Todo lo expuesto, sugiere que la evaluación y manejo de los parámetros energéticos para conseguir el confort de las aves (productividad) será el principal objetivo de este trabajo. Los resultados de los análisis y las recomendaciones que se deriven de éste, permitirá influir en el rendimiento de esta actividad productiva.

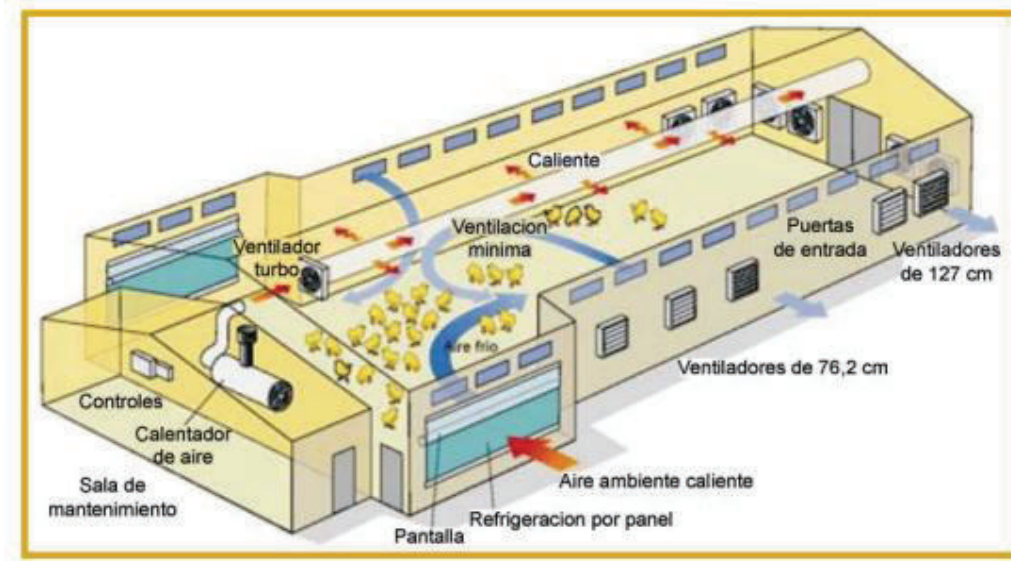


Figura 2.11. Diagrama de un galpón de túnel completo,

(Fuente: Selecciones Avícolas [26])

2.3 Ventilación mínima

La calidad del aire al interior del galpón está ligada al contenido de partículas de polvo suspendidas que de manera general provienen del material de la cama (cascarilla de arroz de un espesor de 7 a 10 centímetros) y del polvo que se produce como parte del alimento al ser depositado en los platos. Otros contaminantes del aire son el CO_2 generado por el proceso metabólico de las aves y en los casos en los que se utilice calentadores de flama directa (éstos además reducen la cantidad de oxígeno). En los estados más avanzados de la crianza, los desechos de las aves en combinación con el material de la cama producen amoníaco según señala Jerez, S. B., y otros [23] y sugiere la utilización de biomembranas o cortinas para reducir olores y otros contaminantes. Por otra parte Bracho, M., y otros [39] concluye que la calidad del aire se mejora con el incremento de la velocidad del aire en las fases en las que se trata de reducir el calor generado por las aves, lo cual ocurre después de la tercera semana.

La ventilación mínima tiene por objeto el mejoramiento de la calidad del aire y se realiza permitiendo que aire fresco o exterior ingrese al galpón a través de ventoleras ubicadas a lo largo del galpón. Los sistemas de control realizan esta fase del proceso accionando un extractor o dos en intervalos de 5 minutos, sin exceder los 10 minutos Cobb-Vantress Inc.[1]. Un ciclo del 20% se recomienda para este sistema, es decir en 5 minutos de ciclo, los extractores son accionados por 1 minuto, mientras las ventoleras se hallan

abiertas. Se recomienda también que si la calidad del aire se ve afectada, se incremente el tiempo de operación de los extractores.

2.3.1 Cálculo de extractores para ventilación mínima.

El número de extractores requeridos para la ventilación mínima depende de las dimensiones del galpón y la capacidad de los extractores. La ecuación 2-3, produce un número real adimensional que corresponde al número de extractores. Las fracciones en el resultado se podrían lograr con el uso de variadores de velocidad, sin embargo se puede aproximar al entero superior siempre que no se observe un efecto negativo en el comportamiento de las aves. Del mismo modo se puede aproximar al inmediato inferior si la calidad del aire no se ve afectada.

H_g altura del galpón [m]

L_g largo del galpón [m]

P_g ancho o profundidad del galpón [m]

V_g volumen del galpón

n_e número de extractores

p_r período de operación [s]

v_{ex} velocidad lineal del aire en el extractor $\left[\frac{m}{s}\right]$

$$V_g = L_g * P_g * H_g \quad \text{EC. (2.9)}$$

$$V_{gc} = \frac{V_g}{p_r} \quad \text{EC. (2.10)}$$

$$n_e = \frac{V_{gc}}{v_{ex}} \quad \text{EC. (2.11)}$$

2.3.2 Ejemplo de cálculo de número de extractores

$$L_g = 100 [m]$$

$$P_g = 12 [m]$$

$$H_g = 2,8 [m]$$

$$v_{ex} = 29200 \left[\frac{m^3}{h} \right] = 486,66 \left[\frac{m^3}{min} \right] = 8,11 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$p_r = 5 [min]$$

$$V_g = 100 * 12 * 2,8 = 3360 [m^3]$$

$$V_{gc} = \frac{3360 [m^3]}{5 [min]} = 672 \left[\frac{m^3}{min} \right]$$

$$n_e = \frac{672 \left[\frac{m^3}{min} \right]}{486,55 \left[\frac{m^3}{min} \right]} = 1,38$$

El número calculado es de 1,38 extractores. Los extractores utilizados requieren una potencia de 1,1 [KW] que operando en un ciclo de trabajo del 20% correspondería a 220 [W]. Es evidente que no es posible conseguir en la realidad 1,38 extractores, se deberá considerar 1 o 2 extractores. La utilización de un extractor disminuye la capacidad al 72,5%. Esta disminución se puede compensar incrementando el período de operación en un factor de 1,38 o un incremento del 38%. El tiempo del ciclo debería ser entonces de 6,9 minutos (7 minutos) y se mantendría el ciclo de trabajo en 20%. Una segunda alternativa sería que se accionen 2 extractores. El tiempo del ciclo se podría reducir en un factor de 1,45 lo que se proyectaría con un tiempo de 3,45 minutos (4 minutos). Para los ciclos de operación se ha redondeado el inmediato superior debido a que los equipos utilizados en galpones de ambiente controlado utilizan solo parámetros en números enteros respecto del tiempo en minutos.

La tabla 2.1 muestra el consumo acumulado en un período de 30 días cuando se utiliza 1 o 2 extractores. Considerando el número de ciclos de operación por día 206 para 1 extractor y 360 cuando se utilizan 2, se calcula el tiempo total de operación de los

extractores en un día y la potencia requerida. Los resultados de la tabla muestran que será 75% más costoso trabajar con un número mayor de extractores que extender los períodos de operación.

Tabla 2.1. Cuadro comparativo sobre la selección del modo de operación

Extractores		20%	Horas/día	Potencia/día	30 días
1	1,1 Kw/h	220 W/h	6,86 h	7,55 Kw	226,38 Kw
2	2.2 Kw/h	440 W/h	6,00 h	13,20 Kw	396,00 Kw

(Fuente: Autor)

La ventilación mínima se utiliza por un período que varía dependiendo de las condiciones climáticas. Las parvadas requieren de calor externo hasta que su calor corporal permite suspender los calefactores, hecho que ocurre en aproximadamente 3 semanas. La ventilación mínima introduce un volumen de aire del exterior a temperatura ambiente. En los casos en los que se utiliza calentadores de Diesel el aire exterior es calentado y empujado por un ventilador al interior del galpón. La ventilación mínima no es necesaria ya que el sistema de presión positiva del calentador no solo que entrega el calor necesario sino que introduce aire limpio en el área de recepción. Una limitación en este período constituye la adecuada extracción del aire contaminado y vapor de agua producido por las aves.

En ocasiones la ventilación mínima es utilizada para controlar la temperatura durante el día cuando la temperatura ambiente es similar a la temperatura objetivo de la edad de crianza, siempre y cuando el calor generado por el pollo no sea importante. Es decir en las primeras semanas de la crianza.

2.4 Ventilación transicional

Como se indicó en la sección anterior, la ventilación mínima se utiliza por espacio de dos a tres semanas, tiempo en que las aves han alcanzado pesos entre 700 y 800 gramos. Con estas edades y pesos los pollos generan calor suficiente para mantener las condiciones en un estado favorable, en otras palabras la ventilación debe orientarse a mantener el aire limpio y extraer vapor de agua principalmente.

El objetivo de esta ventilación es realizar el intercambio del aire al interior del galpón, disminuir la temperatura sin que se generen altas velocidades a través de las aves. Los manuales de crianza según las razas recomiendan que esta velocidad se mantenga entre 2,5 y 3,5 metros por segundo Cobb-Vantress Inc.[1], Aviagen Inc.[2] y Hubbard[3]. Adicionalmente, trabajos como el de Luck, B. G., y otros [20] en los que se estudia el

efecto de la velocidad del aire al interior del galpón sugieren que ésta varía más radicalmente en galpones más largos que en los más cortos. Se ha observado en sitio que las aves se acuestan y dejan de comer cuando la velocidad del aire es muy alta.

La ventilación transicional está caracterizada por ser el paso de la ventilación mínima a la ventilación de túnel. Las ventoleras y extractores son parte esencial que define la ventilación mínima. La compuerta o cortina que permite el paso de aire por la pared de celulosa se abre, en tanto que las ventoleras se cierran. Esta acción del sistema de control cambia la configuración del sistema de ventilación debido a que el área de la pared de celulosa es significativamente mayor que la de todas las ventoleras juntas, por tanto el intercambio de aire se realiza en menor tiempo.

Cuando la temperatura externa sea similar a la temperatura objetivo o menor, la ventilación de transición realizada a una edad entre tres y cuatro semanas de crianza será suficiente para mitigar los efectos del calor producido por las aves y el calor producido por la radiación del sol sobre las paredes y el techo. El paso del aire a través de la pared de celulosa cuando está seca, no modifica la temperatura por lo que se depende enteramente de la relación entre la temperatura objetivo y la temperatura ambiente externa.

Si bien el objetivo principal de la pared de celulosa es reducir la temperatura mediante un efecto evaporativo del agua que se hace circular por ella, durante la ventilación de transición la reducción de la temperatura no es significativa debido a que la pared está seca. Sin embargo, de lo antes mencionado, en lugares donde la humedad relativa es muy alta, la pared está humedecida por el agua en el ambiente lo que producirá una disminución de la temperatura.

La ventilación de transición se plantea como meta reemplazar el aire en el galpón en un período no mayor a 2 minutos. Además se debe procurar que la corriente de aire corra principalmente en la parte más alta del galpón evitando que las aves perciban en forma directa el aire más frío. Es en este período alrededor de la cuarta semana que las aves terminan de emplumar por lo que no están del todo preparadas para enfrentar las corrientes de aire.

2.4.1 Ejemplo de cálculo de número de extractores

$$p_r = 2 \text{ [min]}$$

$$v_{ex} = 486,55 \left[\frac{m^3}{min} \right]$$

$$v_{gt} = \frac{3360 \text{ [m}^3\text{]}}{2 \text{ [min]}} = 1680 \left[\frac{m^3}{min} \right]$$

$$n_e = \frac{1680 \left[\frac{m^3}{min} \right]}{486,55 \left[\frac{m^3}{min} \right]} = 3,45$$

De forma similar que en la ventilación mínima, se puede optar por utilizar 3 o 4 extractores. Para 3 extractores el incremento del período del 15% y el uso de 4 extractores una reducción del período del 14%. Dada que la variación es semejante se debería optar por la de menor consumo de energía eléctrica. Es importante señalar que el número de extractores utilizados en cada fase no es crítico, por tanto su cálculo constituye una estimación. La aproximación en exceso o defecto dependerá de las condiciones de la estructura del galpón.

2.5 Ventilación de túnel

Este esquema de ventilación se basa en concepto de temperatura efectiva producida por el enfriamiento evaporativo y el viento. Existen dos mecanismos de enfriamiento evaporativo directo e indirecto. El primero consiste pasar aire caliente sobre una superficie húmeda, el agua absorbe el calor del aire y se evapora. La energía requerida para evaporarse es tomada del aire y éste se enfría.

El cambio de aire es crítico para la operación del galpón de túnel; el metabolismo de las aves produce calor, vapor de agua y como producto residual el amoníaco los mismos que deben ser extraídos. La temperatura en el interior debido al metabolismo de las aves en las semanas 5 y 6 hace subir más de un grado centígrado en un minuto. Durante una prueba realizada el 2 de enero del 2017 a las 17:00 con pollos de 34 días, se observó que apagando los extractores, la temperatura pasó de 28 grados centígrados a 30 grados en espacio de 2 minutos y 30 segundos. El experimento se repitió en tres ocasiones con idénticos resultados. Debido a que el aire solo puede contener tanto vapor

de agua como el de saturación, este sistema opera de mejor manera en condiciones donde la humedad relativa es baja.

$$p_r = 1 \text{ [min]}$$

$$\phi_{\text{Extractor}} = 1,27 \text{ metros}$$

$$v_g \quad \text{velocidad del aire en el galpón} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$V_{gt} = \frac{3360 \text{ [m}^3\text{]}}{1 \text{ [min]}} = 3360 \left[\frac{m^3}{min} \right]$$

$$n_e = \frac{3360 \left[\frac{m^3}{min} \right]}{486,66 \left[\frac{m^3}{min} \right]} = 6.9$$

$$v_g \quad \text{velocidad del aire en el galpón} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$V_{gt} \quad \text{volumen que atraviesa la sección transversal del galpón} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$A_g = P_g * H_g \quad \text{EC. (2.12)}$$

$$V_{gt} = A_g * v_g \quad \text{EC. (2.13)}$$

$$n_g = \frac{V_{gt}}{v_{ex}} \quad \text{EC. (2.14)}$$

$$A_g = 12 * 2,8 = 33,6[m^2]$$

$$V_{gt} = 33,6 [m^2] * 2,5 \left[\frac{m}{s} \right] = 84 \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$n_e = \frac{84 \left[\frac{m^3}{s} \right]}{8,11 \left[\frac{m^3}{s} \right]} = 10.35$$

Tabla 2.2. Ciclos de operación de la ventilación en un galpón de Túnel.

Tipo de ventilación	Ciclo [minutos]	Ciclo de trabajo	Velocidad del aire [m/s.]	Ventoleras	Pared Húmeda
Calefacción (Diesel)			--		
Ventilación Mínima con calefacción	5-8	20%	--	Si	No
Ventilación Mínima	5-8	20%	--	Si	No
Ventilación Transicional	2	100%	--	Si	Si
Ventilación de Túnel	1	100%	2,5	No	Si

(Fuente: Autor)

2.6 Enfriamiento evaporativo

Como se ha señalado en las secciones anteriores, las aves pasan por varias etapas o fases en su desarrollo. Procesos metabólicos que los zoólogos describen detalladamente, se reflejan en condiciones o requerimientos para la adecuada crianza. Como señala Pires de Moraes, S., y otros [15], los pollos experimentan estrés por calor a partir de los 21 días o 3 semanas. En esta edad han alcanzado un peso que les permite generar suficiente calor que no solo hace innecesaria la utilización de calefactores sino que el calor producido por los pollos, sumado al de un ambiente cálido hacen imprescindible la utilización de sistemas de enfriamiento del aire.

Se debe considerar que las áreas de producción están en el orden de 1.000 metros cuadrados y volúmenes de aire de 3.000 metros cúbicos. Las enormes masas de aire deben reemplazarse en períodos muy cortos producto de una alta densidad de aves. Galpones para pollos de engorde puede alojar 20.000 aves o más.

Los sistemas de enfriamiento deben responder a la demanda sin que los costos conviertan a esta alternativa en un sistema poco práctico. El enfriamiento evaporativo se presenta como la mejor alternativa ya que aprovecha el calor que se toma del aire y es absorbido por el agua para evaporarse. Este proceso incrementa la cantidad de vapor de

agua y por consiguiente la humedad relativa se incrementa. Los lugares cálidos con humedad relativa baja son los más apropiados para la utilización de estos sistemas según Palmer, J., [17] quien describe dos métodos, el de enfriamiento indirecto y el método de enfriamiento por evaporación directa.

El primero utiliza un intercambiador de calor para reducir la temperatura del aire y requiere de un ventilador para ese efecto. El uso de un sistema cerrado no introduce más humedad. Se caracteriza por ser un proceso adiabático ya que el cambio en la temperatura se produce por una variación en la presión. Los fabricantes sitúan la efectividad en un rango entre 60% y 70%. El intercambiador de calor y la velocidad del aire influyen significativamente. En algunos casos se utiliza sistemas de recirculación de aire para incrementar la eficiencia del sistema ya que el aire en el recinto está a una menor temperatura que el exterior.

El método de enfriamiento evaporativo directo consiste en pasar el aire en forma directa sobre una superficie húmeda de manera que el aire disminuye su temperatura debido a que entrega calor al agua, y ésta se evapora. Los sistemas comerciales utilizan paneles de celulosa corrugada. La figura 2.13 muestra una vista lateral del panel de celulosa de la empresa MUNTERS. Los ángulos indican la orientación de dos paredes contiguas la una corre a 15 grados respecto del flujo del aire y la otra a 45 grados. Cada fabricante presenta alternativas de espesor del panel que pueden ser de unos 10, 15 y 20 centímetros.

El agua que es suministrada por una pequeña bomba desde un depósito es rociada en la parte superior y humedece al panel. Cuando caen en el panel chorros de agua, se deslizan por los canales de las hojas corrugadas a la vez que es absorbida por la celulosa. Tomará un tiempo que todo el panel esté húmedo. El agua que drena del panel se recolecta en un canal que lo lleva de vuelta al depósito reduciendo así el consumo de agua.

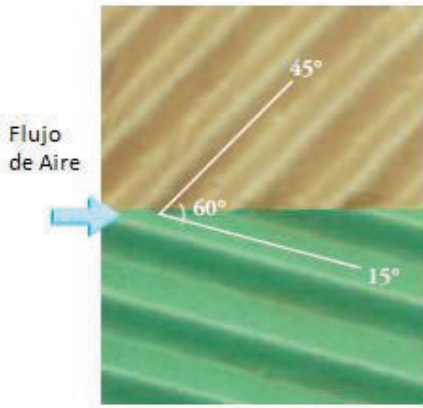


Figura 2.12. Estructura de un panel de celulosa, (Fuente: Catalogo Munters [57])

El aire en el caso de los galpones con ventilación de túnel atraviesa la pared húmeda debido a la presión negativa que producen los extractores. Un diferencial de presión se produce en la pared, y dependerá de la velocidad del aire, la densidad y la estructura de los paneles. Los fabricantes proporcionan en su publicidad las características técnicas de los paneles.

Las características presentadas por el fabricante del panel MUNTERS CELdek 7060-15 muestran una caída de presión; que para una velocidad del aire de 1,5 metros por segundo, la caída de presión en el panel de 15 centímetros de espesor, es de 15 pascales. La figura 2.14 muestra el registro de presión diferencial. La medida es entre la entrada de baja presión en el interior del cuarto de la pared húmeda y el de alta presión en el exterior. La lectura es de 21 pascales, el instrumento utilizado es un Dwyer Mark II. Cabe señalar que no se conoce el origen de los paneles instalados y que los paneles de PERIcool para esta misma velocidad reportan entre 20 y 25 pascales. Como se ha señalado la configuración constructiva de los paneles determinara su operación en sitio.



Figura 2.13. Caída de presión en el panel húmedo, (Fuente: Autor)

Una ventaja de este sistema constituye la utilización del aire del exterior en su totalidad, debido a que las aves no solo producen calor sino también amoníaco y mucho polvo. El amoníaco es el resultado de los desechos que se acumulan en la cama y el polvo se produce tanto en los comederos como en la cama. Durante la ingesta del alimento sobre todo en edades maduras las aves en forma frenética se aproximan a los comederos levantando el polvo del piso y el alimento suelto en los platos. También debido a desafíos territoriales las aves agitan fuertemente sus alas y arremeten sobre los rivales levantando mucho polvo. Finalmente en ocasiones la muerte de algunas aves está acompañada de un fuerte aleteo que contribuye a levantar el polvo de la cama. La ventilación de túnel no solo permite bajar la temperatura sino también mejorar la calidad del aire puesto que retira el polvo y amoníaco.

La humedad se incrementa lo que es positivo en ambientes secos, sin embargo en los climas húmedos esta condición puede resultar en precipitación de agua en la cama. Una cama mojada afecta la salud de las aves e incrementa la producción de amoníaco.

Estudios realizados en climas mediterráneos Dagtekin, M., y otros [30] en 2010 concluyeron que la mayor eficiencia se obtiene a velocidades del aire de 0,5 y 1 metro por segundo, ya que para velocidades superiores el aire deja el panel antes de que alcance la saturación. Durante pruebas de laboratorio realizadas por Dagtekin, M., y otros [29] se experimentó con velocidades entre 1,6 y 5,6 metros por segundo se determinó que la mayor eficiencia se produce con una velocidad de 3,2 metros por segundo, logrando 80% o más. El caudal de agua sobre el panel de 4 litros por minuto por metro cuadrado produjo de 6,7 y 5,6 grados centígrados de diferencia evaporando entre 0,078 y 0,210 litros por minuto por cada metro cuadrado. Los artículos y las referencias permiten concluir que una mayor eficiencia se obtiene cuando el aire pasa

por el panel como un flujo laminar lo que ocurre típicamente a bajas velocidades, sin embargo dependerá de la geometría del panel y sus dimensiones.

Se reporta el uso con éxito de paneles evaporativos de planchas de metal galvanizado, Alodan, M. y Al-Faraj, A., [42]. Paneles corrugados de 50 x 70 centímetros bañados por agua que cae de una cubierta con agujeros de 1,2 milímetros, consiguiendo eficiencia en el orden del 73% al 89%. La temperatura promedio a la entrada de 38 grados centígrados y humedad del 11%, en tanto que en la salida se reporta una temperatura promedio de 21 grados centígrados y humedad del 70%. Una disminución de temperatura de 17 grados en promedio.

Otras alternativas de implantación corresponden al uso de evaporadores de geometría cilíndrica que según Rogdakis, E., y otros [11] que consiguen eficiencia estimada superior al 80%, su trabajo reporta valores de hasta 89,6% con el uso de una compleja geometría cilíndrica. Temperatura de 24,94 grados centígrados se obtuvieron con temperatura de entrada de 37,5 grados centígrados y 30,8% de humedad relativa.

2.7 Iluminación

La iluminación influye de manera importante en el desarrollo y productividad de las aves de engorde. En esta sección se presentará de manera sucinta el trabajo de Schwean-Lardner y Classen [66] ya que su investigación aborda temas como la formulación del alimento, razas o estirpes de pollo, sexo de las aves enfocado en el rendimiento de las aves a la edad de faena.

El estudio reporta 14, 17, 20 y 23 horas de luz por día con un solo periodo de oscuridad y registros de peso y consumo de alimento en los días 1, 7, 31, 38 y 48 que corresponde a la primera semana, cuarta, quinta y sexta semanas de crianza, según se puede advertir el trabajo referido de Aviagen. Los resultados muestran que 20 horas por día impactan positivamente en el crecimiento, en tanto 17 horas mejoran la salud animal por lo que la luz en este intervalo es el más apropiado en toda la crianza. Trabajos en ahorro de energía en granjas avícolas realizados por Oviedo-Rondón, E., [10] reportan entre 20 y 40 luxes durante la primera semana y de 5 luxes para el resto del período.

En una instalación típica de galpones con tecnología de túnel se instalan focos incandescentes para cubrir un área entre 16 y 20 metros cuadrados, es decir un total de 60 focos. El sistema de control de iluminación utiliza un controlador de iluminación que modifica el ángulo de conducción de un dispositivo rectificador (DIAC diodo para corriente alterna). Las lámparas tienen una potencia nominal de 60 [W]. Un flujo luminoso típico de 15 luxes por vatio, produce 900 luxes. Para cubrir un área de 20

metros cuadrados la densidad será de aproximadamente 45 luxes, por tanto una potencia instalada de 3.600 [W] para la primera semana operando 17 horas. A partir de la segunda semana se requiere la décima parte de la luminosidad.

La reducción del requerimiento energético en iluminación se lograría con el uso de lámparas LED con rendimientos de 150 luxes por vatio o lámparas de fluorescentes de balastro electrónico con rendimiento de 100 luxes por vatio. La reducción esperada sería de entre 7 y 10 veces. Por otra parte el control de la luminosidad requeriría de instalaciones significativamente diferentes y complejas respecto de las utilizadas. Es decir unos 400 [W] sería el requerimiento en lugar de los 3,6 [KW] .

3. Modelamiento de los sistemas energéticos

3.1 Descripción de sujeto de estudio

En los capítulos precedentes se estableció los parámetros de operación en la crianza de pollos de engorde. Además se realizó una descripción y la formulación correspondiente a las fuentes de calor y humedad. En forma tabulada se presentó los materiales que usualmente se emplean en la edificación de la infraestructura que permite establecer la crianza en ambiente controlado.

Los datos que se utilizaron para definir y evaluar los modelos de este trabajo fueron obtenidos en las instalaciones de la empresa GRANINTORG. Las instalaciones de esta empresa están ubicadas en el sector de Pedro Vicente Maldonado a 15 Km de la población de Celica. El sector referido se localiza en las estivaciones occidentales de la cordillera de los Andes y se caracteriza por una exuberante vegetación subtropical. El plantel se encuentra a 400 metros sobre el nivel del mar.

Originalmente la granja fue edificada utilizando los métodos, dimensiones y características utilizadas en galpones abiertos. Los objetivos de desempeño y productividad destacaron en los primeros lotes o parvadas gracias a un clima más cálido y una mayor presión atmosférica que garantiza el metabolismo de las aves y también prevaleció la genética en estas condiciones.

El calor natural del ambiente en la zona y el producido por las aves, llevó a la instalación de ventiladores para vencer el efecto de la temperatura, siguiendo las recomendaciones para manejo en condiciones calurosas Cobb-Vantress Inc.[1], y el denominado efecto viento analizado por Luck, B. D., y otros [20] en galpones de 12,19 metros de ancho por 121,9 metros de largo con paredes de cortina similares a los observados para este trabajo. En varias ocasiones los ventiladores no fueron capaces de contrarrestar los efectos señalados y una cantidad importante de la producción se perdió debido a la muerte súbita de las aves. Que como se señala en los manuales de crianza de Cobb-Vantress Inc.[1] y Aviagen Inc.[2], a una temperatura de aproximadamente 40 grados centígrados los pollos simplemente mueren en un par de minutos.

Los hechos brevemente descritos motivaron la adopción de sistemas de enfriamiento evaporativo. Palmer J.D.,[17] describe los elementos constitutivos y las características de

los sistemas de enfriamiento por evaporación directo e indirecto. Estos sistemas pueden ser utilizados separadamente o en conjunto. Se los utiliza en sitios tales como Nuevo México para escuelas y edificios comerciales. En lugares con bajos niveles de humedad relativa como el centro de Atenas en Grecia según Rogdakis, E. D., [11], o en forma general en climas mediterráneos según afirma Dagtekin, M.,[30].

Los sistemas de enfriamiento evaporativo instalados en el galpón número dos, los extractores y las ventoleras serán evaluados utilizando datos de temperatura, humedad y velocidad del aire, serán medidos o registrados utilizando una serie de dispositivos y sistemas de adquisición de datos. Los registros permitirán validar los resultados del modelo analítico y se contrastarán con los obtenidos en la simulación simulaciones.

3.2 Protocolo de captura de datos

En esta sección se presenta los dispositivos utilizados y los métodos empleados para obtener la información en sitio de temperatura, humedad y velocidad del aire. La temperatura se constituye en el parámetro que revela en forma directa e indirecta el escenario o entorno en el que se desarrollan las aves o pollos de engorde durante el ciclo de producción que dura aproximadamente unos 48 días. Los transductores utilizados en la industria son termistores es decir resistencia que varían con la temperatura y se instalan en el galpón a una altura de 40 centímetros del suelo, en número que varía entre 3 y 4. Por su parte la humedad es registrada con dispositivos electrónicos en base de efectos capacitivos que aprovechan de las propiedades del aire como dieléctrico y el efecto que produce la humedad. La velocidad del aire se registra con el uso de anemómetros, que no son más que rodets calibrados para responder al flujo del aire y la velocidad de rotación será proporcional a la velocidad del aire que los impulsa.

3.2.1 Temperatura

Para la medición de temperatura se ha utilizado una variedad de instrumentos tales como: termómetros de alcohol por su rango y la velocidad en que se puede observar la variación de la temperatura. Termómetros infrarrojos que permiten medir en lugares alejados como techos por ejemplo. Termistores que resultan versátiles a la hora de montarlos y requieren pocos cuidados, es decir muy robustos.

Los termómetros de alcohol utilizados corresponden al 55000P150-qp de PromoLab., operan en el rango de -20 a +150 grados centígrados con una resolución de un grado centígrado. Ideal para medir la temperatura del aire en el interior y exterior. Con un paño húmedo sobre el bulbo es posible medir las temperaturas de bulbo húmedo. Se utilizó la

carta psicrométrica de los Ingenieros Ortega M. y Peña A. (1996) [74] para contrastar las lecturas de humedad relativa de otros sensores e instrumentos.

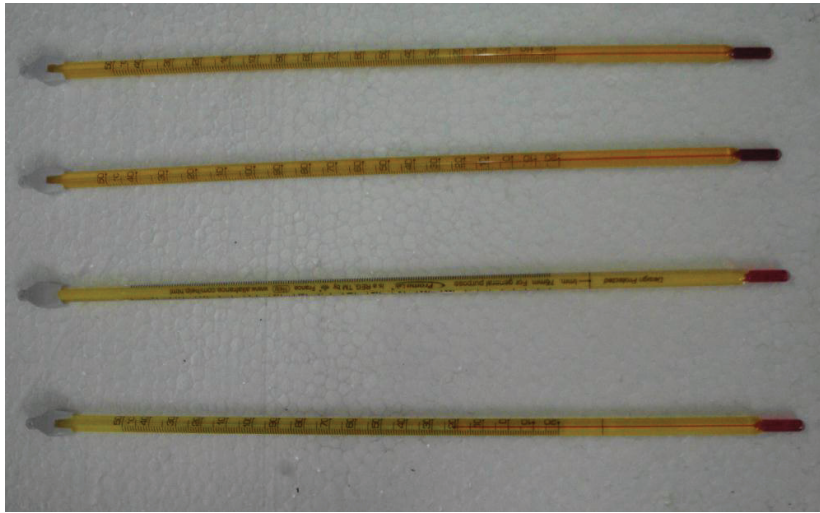


Figura 3.1. Termómetros de alcohol rojo utilizados, (Fuente: Autor)

La pistola infrarroja modelo ST 380-a de la empresa HDE con un rango entre -32 a +380 grados centígrados y resolución de 0,1 grados, se utilizó para medir las superficies calientes como techos, paredes y pisos. Se utilizó para medir la temperatura externa de las aves y todos los puntos poco accesibles.



Figura 3.2. Termómetros infrarrojos ST-380^a, (Fuente: Autor)

Los termistores son resistencias óhmicas que varían con la temperatura, su característica es no lineal por lo que requieren el uso de sistemas de acondicionamiento de señal. Estos dispositivos se utilizaron para medir parámetros de temperatura en la cubierta, paredes, exterior e interior. El sensor de temperatura es suministrado por la empresa Chore-Time con los equipos de control de clima (número de parte 40741). Debido a que no se cuenta con una curva del fabricante, se utilizó termómetros de bulbo y cubos de agua para obtener la curva de temperatura-resistencia de los sensores. La expresión se obtuvo utilizando el ajuste de curvas de EXCEL con los datos obtenidos en forma simultánea con un termómetro de alcohol. Las lecturas se contrastaron también con el termómetro infrarrojo.

r valor de la lectura en resistencia óhms

$$T_{bs} = -23,03 * \ln(r) + 79,95 \quad \text{EC. (3.1)}$$

Se ha recurrido a otros sistemas de registro de temperatura, entre los que se encuentran sistemas de adquisición de datos de la empresa “Log Tag Recorders”. Se ha utilizado el registrador TRIX-8 que permite almacenar datos de temperatura en un rango de temperatura de -40 a +80 grados centígrados con resolución menor al 0,1 grados. De la misma empresa se utilizó el registrador HAXO-8 que además de temperatura, registra humedad del 0 al 100% con una resolución menor al 0,1%.



Figura 3.3. Registradores de temperatura y humedad LogTag, (Fuente: Autor)

El registrador SD800 de la empresa “EXTECH” que mide parámetros como CO₂, humedad y Temperatura. Los registros de CO₂ se realizan entre 0 y 4.000 partes por millón con una resolución de una parte por millón. La temperatura en un rango de entre 0 y 50 grados centígrados con resolución de 0,1 grados. La humedad en un rango de 10 al 90% y resolución de 0,1%. Este instrumento está orientado a medir calidad del aire en recintos tales como escuelas y hospitales. Se utilizó para realizar un estudio sobre la producción de CO₂ cuando se utiliza calentadores de GLP de combustión directa.



Figura 3.4. Registrador de CO₂ humedad y temperatura EXTECH SD-800, (Fuente: Autor)

El equipo HT30 de la empresa “EXTECH” está concebido para parámetros de humedad, temperatura ambiente y temperatura de bulbo negro en ambientes interiores y exteriores. A partir de los datos de temperatura y humedad determina el índice WBGT (Wet Bulb Globe Temperature) o índice de temperatura de globo húmedo. La temperatura de bulbo negro permite determinar el efecto de las fuentes radiantes como el sol o calentadores cerámicos infrarrojos. El índice WBGT ha sido desarrollado para establecer el efecto del calor, la humedad y la radiación solar y sus efectos sobre todo para las actividades que se realizan al aire libre. Permite establecer la temperatura de bulbo húmedo que está directamente relacionada con el calor sensible.



Figura 3.5. Medidor de temperatura, WBGT y humedad EXTECH HT30, (Fuente: Autor)

3.2.2 Humedad

En adición a los registradores HT30 y SD800 que permiten medir la humedad relativa se utilizó sensores HTV597 suministrados por la empresa “Big Herdsman” como parte del equipamiento de los sistemas de ambiente controlado. Estos sensores entregan un voltaje entre 0 y 10 voltios proporcional a la humedad relativa en el rango de 0 a 100% con un error de 5%. Se contrastaron de las lecturas con los instrumentos más precisos para validar los resultados.



Figura 3.6. Sensores de humedad Big Herdsman HTV597, (Fuente: Autor)

3.2.3 Velocidad del viento

Para medir la velocidad del viento se utilizó el equipo SM-18 “SKYMATE” de la empresa “Weather Hawk” que permite medir velocidades entre 0,5 y 89 milla por hora con +/-3%

de error. Lo que representa 0,22 a 39,78 metros por segundo. Y temperaturas entre -15 y 50 grados centígrados con error de +/- 0,6.



Figura 3.7. Anemómetro SM-18 SKYMATE, (Fuente: Autor)

3.3 Modelación de los sistemas energéticos

Los sistemas de ambiente controlado objeto de este desarrollo presentan fuentes de calor interno (las aves) y externo. Las fuentes externas se presentan de varias formas: en los climas cálidos la temperatura ambiental puede ser mayor que la temperatura objetivo de producción, el calor que se deriva de la radiación solar en forma directa sobre las naves o galpones y el calor producido por sistemas de calefacción sobre todo en los climas fríos o en horas de la noche.

El equilibrio térmico alrededor de las temperaturas objetivo se consigue en algunos casos mediante el intercambio natural del aire en el interior del galpón aprovechando las corrientes de aire, el control de cortinas, ubicación y diseño del galpón. Esto, siempre que las condiciones de la zona sean favorables.

En este trabajo, se analiza el caso de la producción en zonas cálidas por lo que, a diferencia de una producción más bien artesanal de crianza, deberá adoptarse sistemas de ventilación forzada. Lo último requiere que energía en forma de trabajo se incluya en el proceso. El desarrollo de un modelo matemático que considere las principales variables y los fenómenos inherentes al balance de calor, permitirá, evaluar los galpones de producción avícola y sus sistemas de soporte.

Seguidamente se presenta las principales componentes para el análisis del balance de calor que están presentes en condición de equilibrio térmico considerando las fuentes y los drenajes (pérdida) de calor. La cantidad de calor que entra debe ser igual a la cantidad de calor que sale. El desequilibrio de ésta relación se traduce en un incremento o disminución de la temperatura. [ASHRAE 1977]. Se considerará también que algunas de las fuentes de calor o drenajes no son tan importantes como otras, es decir se las puede considerar despreciables respecto de otras que tiene una mayor influencia en el resultado final.

La tasa de flujo de calor corresponde a la cantidad de calor por unidad de tiempo que un sistema entrega o drena. El flujo de calor en un espacio definido o volumen de control considera: la cantidad de calor que entra o es generada, la cantidad de calor que se pierde, la tasa o rapidez en la que el calor es retirado del volumen de control y la capacidad del intercambiador de calor si existe o es requerido.

El proceso de crianza de pollos de engorde por su naturaleza requiere mantener una temperatura y humedad objetivo durante las diversas etapas. El calor que entra al sistema proviene de: los calentadores de aire, sean estos de gas, eléctricos o diésel, descritos en el capítulo 2 del presente trabajo. El calor producido por el metabolismo de las aves. Las condiciones climáticas, principalmente el producido por la radiación solar, dependiendo de la orientación del galpón y los materiales de aislamiento influyen en la tasa en la que el calor entra o sale.

En los sistemas de ambiente controlado (túnel) para mantener el calor necesario, la temperatura y humedad objetivo se utiliza sistemas y equipos concebidos de manera específica para suministrar calor cuando se lo requiere o extraer calor cuando la temperatura sobrepasa los límites establecidos. Procurando siempre mantener las condiciones objetivo de crianza.

El análisis y modelación se realizará considerando el flujo de calor y vapor de agua al interior del galpón. Cada flujo será caracterizado para identificar los parámetros que modifican o regulan el flujo de calor. Dichos parámetros deberán ser cuantificados dentro de los modelos.

Flujos de calor en un Galpón

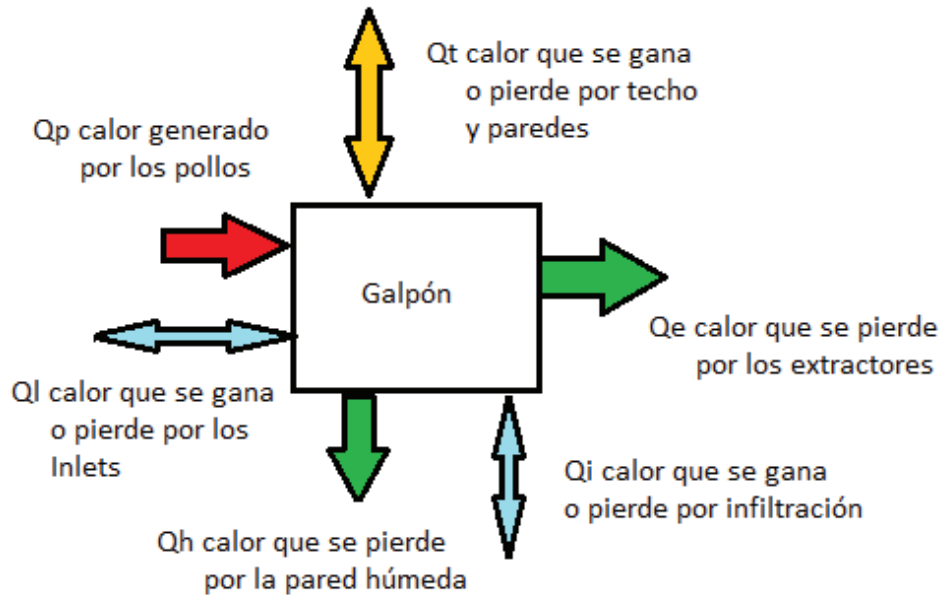


Figura 3.8. Bloque o segmento longitudinal del modelo galpón, (Fuente: Autor)

La figura 3.8 muestra los flujos de calor identificados, Q_p y Q_t no reflejan flujos de masa debido a que Q_p responde al metabolismo de las aves y Q_t al medio ambiente. Q_l , Q_h , Q_i y Q_e se producen debido a flujos de masa de aire con diferentes características que depende del dispositivo utilizado o la forma en que ingresan o salen del galpón. Seguidamente se describe cada una de las fuentes y/o drenajes de calor ordenados por su importancia en el proceso:

3.3.1 Extractores

Q_e . Se define como la cantidad de calor que pierde el galpón por efecto de los extractores. Dada la naturaleza del proceso, los extractores retiran una masa de aire que depende de las características y número de extractores que estén en operación, la cantidad de calor será una función que se evaluará conocida la temperatura del aire, la humedad relativa, velocidad del aire y el área por la que pasa la masa de aire extraída.

Los extractores utilizados en las instalaciones operan a velocidad constante y desplazan volúmenes de aire que depende de su diseño particular. Se ha observado que en las instalaciones de los galpones se han utilizado los extractores recomendados por la literatura sobre la crianza de pollos, y corresponden a extractores de “50 pulgadas

energy Saving Cone Fan – 2013 model” de la empresa Bigherdman cuyas características obtenidas y certificadas en el laboratorio BESS Lab. de la Universidad de Illinois se reportan. La figura 3.9 muestra la ubicación de los extractores en la pared del galpón a una altura de 40 centímetros del suelo y un espaciamiento entre ellos de 10 a 20 centímetros. Se localizan en forma lateral en un extremo de la nave.

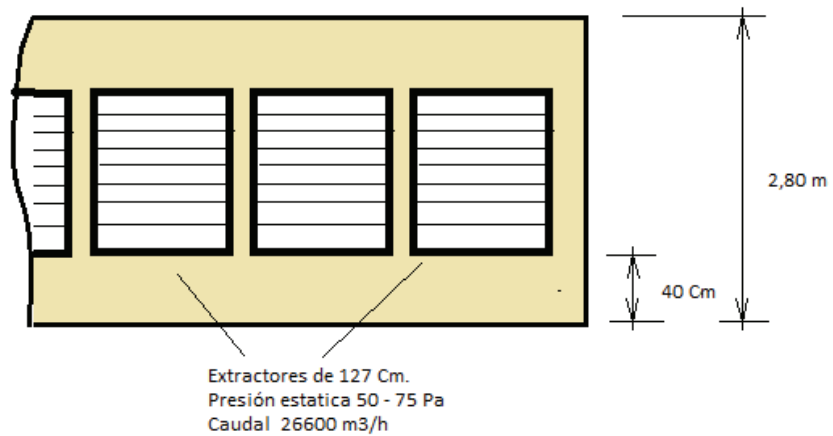


Figura 3.9. Descripción y dimensiones de los extractores, (Fuente: Autor)

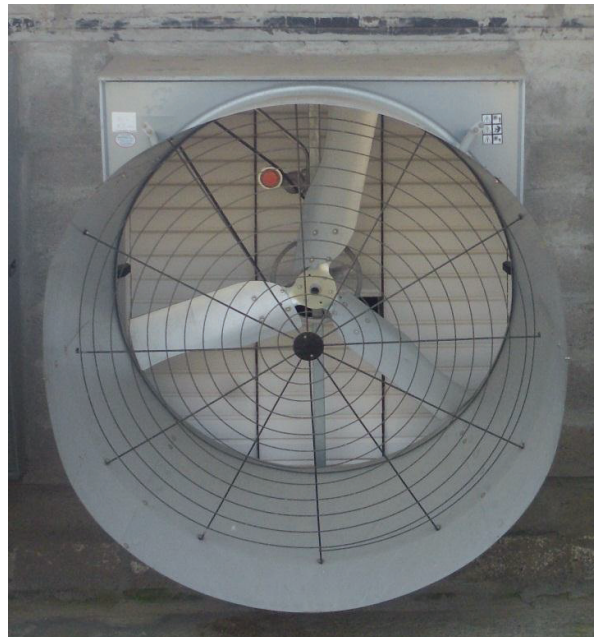


Figura 3.10. Extractor de 50 pulgadas, (Fuente: Autor)

Tabla 3.1. Capacidad de los extractores de 50 pulgadas y presión

Nombre	Potencia	Presión estática	Pa	0	12	25	37	50	62	75	# BESS
50" modelo 2013 Extrac	1,1KW	Capacidad	m ³ /h	46500	44400	41900	39400	36600	33300	27300	1407 2
		ad	cfm	27400	26200	24600	23200	21500	19600	16100	
		Eficiencia	m ³ /hw	30,1	28,8	25,6	23,6	21,5	19,3	16,1	
			cfm/w	17,7	16,4	15,0	13,9	12,6	11,4	9,5	

(Fuente: Catalogo Big Hederman)

Se han realizado mediciones en sitio con los extractores instalados utilizando equipos de medición. La presión estática se ha registrado utilizando el equipo de marca "Dwyer MARK II" modelo M 700PA en el que se ha registrado una presión negativa de 43 Pascales medidos en la entrada de aire del extractor. De la misma forma se ha medido la velocidad de aire desplazado utilizando un anemómetro marca "SKYMATE" modelo SM-18 con el que se ha registrado a la velocidad en puntos localizados cada 20 cm sobre ejes ubicados cada 45 grados. La velocidad media es de $v_{ex} = 4.91$ m/s que para un área de $A_{ex} = 1.629$ m², lo que conduce a un volumen de $v_{ex} = 7,919$ m³/s o 28.509,62 m³/h.

L_{ex} tamaño del extractor [m]

A_{ex} área del extractor [m²]

v_{ex} volumen desplazado por un extractor $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

v_{ex} velocidad lineal del aire en el extractor $\left[\frac{m}{s}\right]$

$$A_{ex} = L_{ex}^2 [m^2] \quad \text{EC. (3.2)}$$

$$v_{ex} = A_{ex} * v_{ex} \left[\frac{m^3}{s}\right] \quad \text{EC. (3.3)}$$

Ejemplo:

$$A_{ex} = 1.27 [m] * 1.27 [m] = 1.629 [m^2]$$

$$v_{ex} = 4,91 \left[\frac{m}{s}\right] * 1,628 [m^2] = 7,919 \left[\frac{m^3}{s}\right]$$

El efecto de presión negativa en el galpón modifica ligeramente la masa de aire desplazado por los extractores. Las observaciones realizadas en relación a la presión y volumen permiten corroborar los datos reportados por el fabricante, certificados por el laboratorio BESS Lab de la Universidad de Illinois. Se presenta un valor medido ligeramente menor que el reportado. La figura 3.11 corresponde a la curva de operación de los extractores utilizados en el galpón de estudio. Se ha obtenido la curva de tendencia utilizando la herramienta de "EXCEL" que permite establecer el volumen desplazado por el extractor en función de la presión medida.

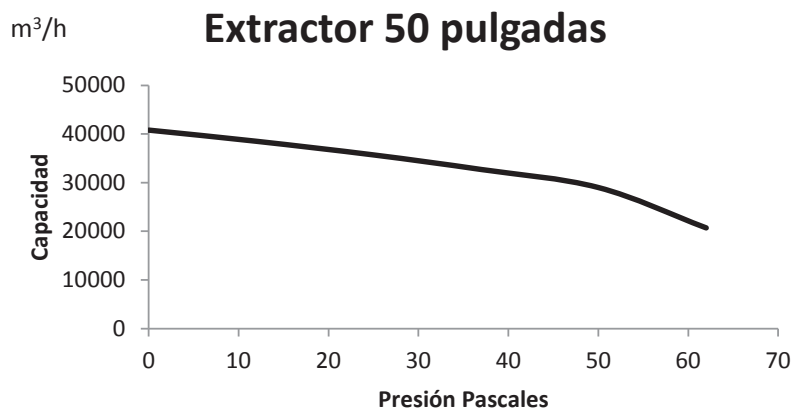


Figura 3.11. Capacidad vs presión, (Fuente: Autor)

$$\forall_{exh} \quad \text{volumen de aire de un extractor por hora} \left[\frac{m^3}{h} \right]$$

$$\forall_{ex} \quad \text{volumen de aire de un extractor por segundo} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$\Delta Pa \quad \text{presión estática [Pascales]}$$

$$n_e \quad \text{número de extractores}$$

$$C_p \quad \text{calor específico del aire } 1,005 \left[\frac{KJ}{Kg \ K} \right]$$

$$\rho \quad \text{densidad del aire } 1,24 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$T_{ss} \quad \text{temperatura de bulbo seco del aire en el interior [C]}$$

$$V_{exh} = -0.114 * \Delta Pa^3 + 6.743 * \Delta Pa^2 - 302.18 * \Delta Pa + 40953 \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad \text{EC. (3.4)}$$

$$V_{ex} = \frac{1}{3600} * V_{exh} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad \text{EC. (3.5)}$$

$$Q_e = \frac{1}{3600} * \rho * C_p * n_e * V_{ex} * (273.15 + T_{ss}) * \Delta t [KJ] \quad \text{EC. (3.6)}$$

$$Q_e = \rho * C_p * n_e * A_{ex} * v_{ex} * (273.15 + T_{ss}) * \Delta t [KJ] \quad \text{EC. (3.7)}$$

La masa de aire desplazada o extraída contiene aire y vapor de agua a la temperatura interna de la nave o galpón y se constituye en el más importante sumidero de calor que dependerá de la cantidad de extractores que se encuentren en operación y las características del aire desplazado como se deduce de la ecuación 3.6.

3.3.2 Metabolismo de las aves

Qp, es el calor que genera el metabolismo de las aves al interior del galpón. Además de la cantidad de aves, la edad del pollo o el peso es el parámetro que determina la producción de calor. Se deberá considerar la mortalidad en razón de que el número de aves disminuirá con los días de producción. Este calor no involucra desplazamiento de masa de aire.

El trabajo realizado por Feddes, J y otros [9] concluye en su estudio que el calor producido por pollo se puede establecer a partir de la expresión propuesta y que se presenta seguidamente, así como el gráfico de la figura 3.12 correspondiente que revela un incremento de la cantidad de calor con la edad del pollo. Este hecho debe ser tomado en consideración en la evaluación del balance térmico.

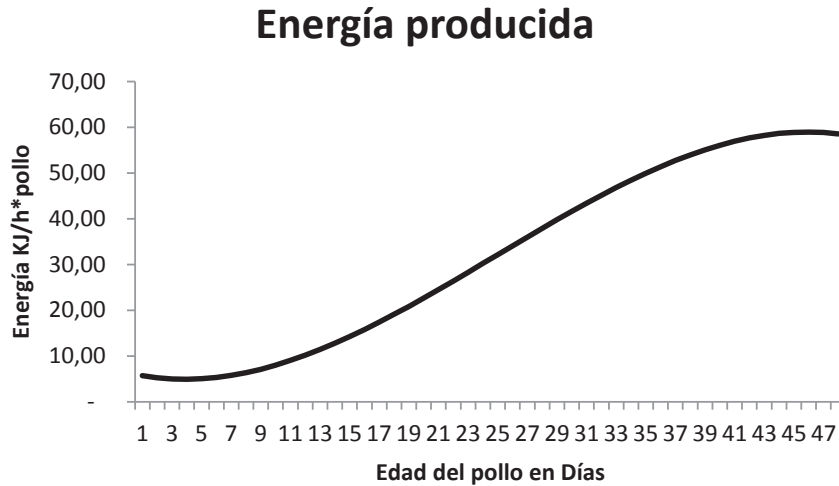


Figura 3.12. Calor producido por los pollos,
(Fuente: Autor utilizando la ecuación de Feddes, J y otros [9])

d días de crianza

E energía generada por cada pollo en una hora $\left[\frac{KJ}{h * pollo} \right]$

$$E \left[\frac{KJ}{h * pollo} \right] = 6,38 - 0,782 * d + 0,109 * d^2 - 0,00146 * d^3 \quad \text{EC. (3.8)}$$

El número de pollos por unidad de área o densidad de pollos se establece según las recomendaciones de Aviagen [2] en 13 pollos por metro cuadrado.

D_g ancho del galpón [m]

A_c área de crianza [m^2]

d_p densidad $\left[\frac{pollos}{m^2} \right]$

Δx longitud [m]

Δt intervalo de tiempo [s]

E energía generada por cada pollo en una hora $\left[\frac{KJ}{h * pollo}\right]$

D_g ancho del galpón [m]

A_c área de crianza [m^2]

d_p densidad $\left[\frac{pollos}{m^2}\right]$

Δx longitud

$$A_c = D_g * \Delta x [m^2] \quad \text{EC. (3.9)}$$

$$\# \text{ de pollos} = A_c * d_p \quad \text{EC. (3.10)}$$

$$Q_p = E * A_c * d_p * \Delta t [KJ] \quad \text{EC. (3.11)}$$

$$Q_p = D_g * d_p * \{6,38 - 0,782 * d + 0,109 * d^2 - 0,00146 * d^3\} * \Delta x * \Delta t [KJ] \quad \text{EC. (3.12)}$$

3.3.3 Paneles húmedos

Q_h , corresponde al calor que se pierde o más propiamente dicho el calor que entra debido a la masa de aire que ingresa al galpón a través del sistema de los paneles húmedos. En este caso se presume que la temperatura externa siempre será menor que la interna debido a que este sistema está concebido para disminuir la temperatura en el interior del galpón.

Este se constituye en el elemento central del sistema de ventilación transicional y de túnel. Está implantado con una pared de celulosa corrugada la que es humedecida por una corriente de agua a través de aspersores ubicados en la parte superior. Los paneles de celulosa se construyen juntando láminas de celulosa corrugada siguiendo ángulos bien definidos para las ondas del corrugado. Esta forma de ensamblaje modifica ligeramente las características del panel resultante. La pérdida de presión y el porcentaje

de saturación dependen entonces de los ángulos, el espesor y la velocidad del aire que atraviesa los paneles.

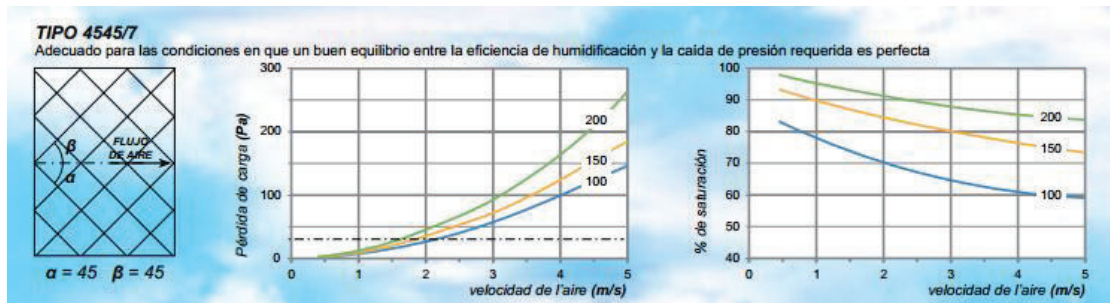


Figura 3.13. Curvas de caída de presión y saturación en función de la velocidad,

(Fuente: Catalogo PeriCool [70])

La figura 3.14, muestra las dimensiones de la pared húmeda instalada, con una longitud de 18 metros en cada lado del galpón y una altura de 1,5 metros. Se instala a una altura de 80 centímetros respecto al piso de manera que la entrada de aire no esté a la altura del pollo.

La velocidad del aire sobre la pared húmeda dependerá de la velocidad del aire al interior del galpón la que se ha establecido para la ventilación de túnel en 2,5 m/seg. El área de la sección transversal del galpón se estableció en 33.6 metros cuadrados y la masa de aire volumen de aire en 84 metros cúbicos por segundo.

L_{PH} largo de la pared húmeda [m]

H_{PH} altura del panel [m]

A_{PH} área de pared húmeda [m²]

v_{PH} velocidad del aire que a través del panel $\left[\frac{m}{s}\right]$

L_g largo del galpón [m]

H_g altura del galpón [m]

D_g ancho del galpón [m]

A_g área de sección transversal del galpón [m²]

v_g velocidad del aire en el galpón $\left[\frac{m}{s}\right]$

$$A_{PH} = 2 * L_{PH} * H_{PH} [m^2] \quad \text{EC. (3.13)}$$

$$A_g = D_g * H_g [m^2] \quad \text{EC. (3.14)}$$

$$v_{PH} = \frac{A_g * v_g}{A_{PH}} \left[\frac{m}{s}\right] \quad \text{EC. (3.15)}$$

Ejemplo:

$$A_{PH} = 2 * 18 * 1,5 = 54 [m^2]$$

$$A_g = 12 [m] * 2,8 [m] = 33,6 [m^2]$$

$$v_{PH} = \frac{33,6 [m^2] * 2,5 \left[\frac{m}{s}\right]}{54 [m^2]} = 1,5 \left[\frac{m}{s}\right]$$

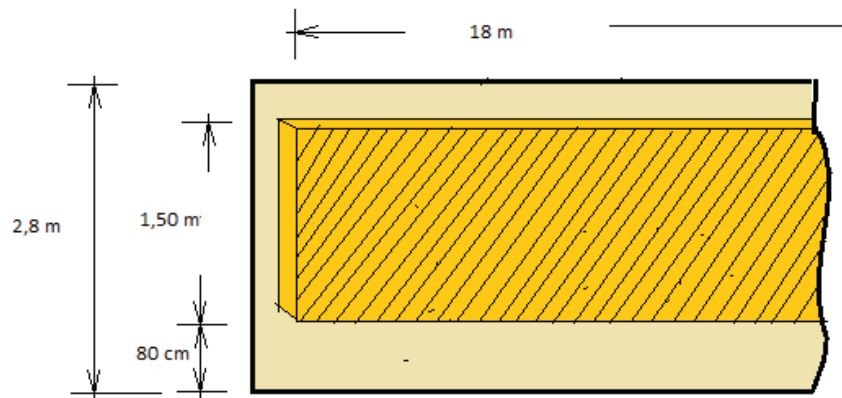


Figura 3.14. Descripción y dimensiones de la pared húmeda, (Fuente: Autor)

La eficiencia de panel húmedo ha sido evaluada en trabajos realizados por Dağtekin y otros [30] en los que se concluye que los paneles de celulosa son los más apropiados para climas cálidos y secos. También en su trabajo Dağtekin sostiene que la mayor eficiencia, sobre el 80%, se obtiene para una velocidad de 3,2 metros por segundo con temperatura del aire entre 32 y 34 grados centígrados, sin embargo estos parámetros no serían aplicables debido a que las velocidades recomendadas por los genetistas no superan los 2,5 metros por segundo. La eficiencia de enfriamiento de un panel húmedo se determina a partir de las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo en las caras de la pared.

T_{es} temperatura de bulbo seco del aire en el exterior [C]

T_{ss} temperatura de bulbo seco del aire en el interior [C]

T_{eh} temperatura de bulbo húmedo del aire en el exterior [C]

$$\eta = \frac{T_{es} - T_{ss}}{T_{es} - T_{eh}} * 100 \% \quad \text{EC. (3.16)}$$

		Humedad externa relativa (%)										
		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
Temperatura externa °C	Temperatura °C/ % de humedad después del panel evaporativo											
	15	5.2° 81.3%	5.8° 82.9%	6.4° 84.3%	7° 85.7%	7.6° 87%	8.1° 88.2%	8.7° 89.4%	9.2° 90.5%	9.8° 91.5%	10.3° 92.5%	10.3° 93.4%
	20	8.3° 80.1%	9° 81.9%	9.8° 83.6%	10.5° 85.1%	11.2° 86.5%	11.9° 87.8%	12.6° 89.1%	13.2° 90.2%	13.9° 91.3%	14.5° 92.3%	15.1° 93.3%
	25	11.2° 79%	12.1° 81%	13° 82.8%	13.9° 84.5%	14.8° 86%	15.6° 87.5%	16.4° 88.8%	17.2° 90%	17.9° 91.1%	18.7° 92.2%	19.4° 93.2%
	30	13.9° 77.8%	15.1° 80.1%	16.2° 82.1%	17.3° 84%	18.3° 85.6%	19.3° 87.1%	20.3° 88.5%	21.2° 89.8%	22° 91%	22.9° 92.1%	23.7° 93.1%
	35	16.6° 76.7%	18° 79.2%	19.4° 81.5%	20.7° 83.5%	21.9° 85.3%	23° 86.9%	24.1° 88.3%	25.2° 89.6%	26.2° 90.9%	27.1° 92%	28° 93%
	40	19.2° 75.6%	20.9° 78.4%	22.5° 80.9%	24° 83%	25.4° 84.9%	26.7° 86.6%	28° 88.1%	29.2° 89.5%	30.3° 90.8%	31.4° 91.9%	32.4° 93%
	45	21.8° 74.5%	23.8° 77.7%	25.7° 80.4%	27.4° 82.7%	29° 84.7%	30.5° 86.4%	31.9° 88%	33.2° 89.4%	34.5° 90.7%	35.7° 91.9%	36.8° 93%
50	24.3° 73.5%	26.7° 77%	28.8° 79.9%	30.8° 82.3%	32.6° 84.4%	34.3° 86.3%	35.9° 87.9%	37.3° 89.3%	38.7° 90.6%	40° 91.8%	41.2° 92.9%	

Note: La tabla hace referencia al modelo 4545/7 de espesor 150 mm con una velocidad de cruce de aire de 1.5 m/s.

Figura 3.15. Temperatura y humedad de salida de un panel de celulosa,

(Fuente: Catálogo en línea de PeeriCol)

v_{PH} velocidad del aire a través del panel $\left[\frac{m}{s}\right]$

C_p calor específico del aire 1,005 $\left[\frac{KJ}{Kg \ K}\right]$

ρ densidad del aire 1,24 $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

L_{PH} largo de la pared húmeda [m]

H_{PH} altura del panel [m]

A_{PH} área de pared húmeda [m²]

m_a masa de aire $\left[\frac{Kg}{s}\right]$

\forall_{PH} volumen de aire por unidad de tiempo $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

T_{PH} temperatura de bulbo seco del aire en la salida del panel [C]

Δt intervalo de tiempo [s]

$$A_{PH} = 2 * L_{PH} * H_{PH} [m^2] \quad \text{EC. (3.17)}$$

$$\forall_{PH} = A_{PH} * v_x \left[\frac{m^3}{s}\right] \quad \text{EC. (3.18)}$$

$$m_a = \rho * \forall_{PH} \left[\frac{Kg}{s}\right] \quad \text{EC. (3.19)}$$

$$Q_h = \rho * C_p * \forall_{PH} * (273.15 + T_{PH}) * \Delta t [KJ] \quad \text{EC. (3.20)}$$

$$Q_h = \rho * C_p * A_{PH} * v_{PH} * (273.15 + T_{PH}) * \Delta t [KJ] \quad \text{EC. (3.21)}$$

$$Q_h = 2 * \rho * C_p * L_{PH} * H_{PH} * v_{PH} * (273.15 + T_{PH}) * \Delta t [KJ] \quad \text{EC. (3.22)}$$

3.3.4 Estructura del Galpón

Qt, está relacionado con estructura, es decir la geometría y los materiales del galpón permiten que el calor se gane o pierda. El flujo del calor dependerá de la diferencia de temperatura entre el interior y exterior. Se ganará calor cuando la temperatura exterior sea mayor que la interior y se perderá calor cuando la temperatura interior sea mayor que la temperatura exterior, hecho que ocurre en la noche en climas cálidos.

En el trabajo realizado por Moreno, F., [63] se establece los coeficientes globales de transferencia de calor basados en las publicaciones contenidas en el capítulo 28 (Fundamentals Handbook ASHRAE, 1997). Para paredes y techos el documento de ASHRAE reporta el trabajo experimental realizado por Harris y McQuiston (1988) que considera una estructura tipo que consta del agregado de varios materiales de características homogéneas y sugiere que los valores de los coeficientes se pueden obtener de las tablas en las que se reportan.

En su publicación S. Gil, y otros [65] sostiene que la transferencia efectiva de calor se puede estimar a través de una contante “K”, la que se puede calcular poniendo a la sombra una placa del material en estudio una vez que ha sido calentada por el sol a una temperatura mayor que la temperatura ambiente.

T temperatura de la placa [C]

T_0 temperatura de los alrededores [C]

T_∞ temperatura en la lejanía [C]

m_p masa de la placa [Kg]

C_p calor específico $\left[\frac{J}{Kg \text{ } ^\circ K} \right]$

$$\frac{dT}{dt} + kT = kT_0 + \frac{A}{m_p C_p} \varepsilon I_{gnd} = kT_\infty \quad \text{EC. (3.23)}$$

Tabla 3.2. Coeficientes conducción para elementos de la estructura

Elemento estructural	$\frac{J}{s\ m^2\ ^\circ C}$	$\frac{BTU}{h\ ft^2\ ^\circ F}$
Paredes	0,4381	0,2500
Ventanas	0,6514	0,3717
Techo	0,2795	0,1595
Puertas	0,5356	0,3056
Piso	0,8377	0,4780
Particiones	0,7887	0,4500
Particiones de concreto	0,4504	0,2570

(Fuente: F. Moreno, A. Portilla. "Diseño de un sistema de acondicionamiento de aire de un plantel avícola", Escuela Politécnica Nacional 2000 [63])

$T_{ext,i}$ temperatura de externa del elemento estructural [C]

$T_{int,i}$ temperatura interna del elemento estructural [C]

$$Q_t = \sum_i U_i * A_i * (T_{ext,i} - T_{int,i}) \quad \text{EC. (3.24)}$$

3.3.5 Ventoleras

QI, corresponde al calor que se gana o pierde. El aire del exterior es introducido en el galpón a través de las ventoleras (inlet) parte integral del sistema de ventilación mínima. El flujo de masa será siempre de afuera hacia adentro, sin embargo la diferencia de temperatura definirá el signo del calor. Las ventoleras son parte del ciclo de ventilación mínima, por esta razón no se las incluye en el modelo matemático de la ventilación de túnel. La calibración o ajuste de operación y una deficiente instalación producirían que no se cierren de forma hermética propiciando el ingreso de aire contribuyendo así al efecto de la infiltración que es parte fundamental del modelo. Por lo antes mencionado, en la infiltración estará contenido el calor que ingresa por las ventoleras en un día cálido.

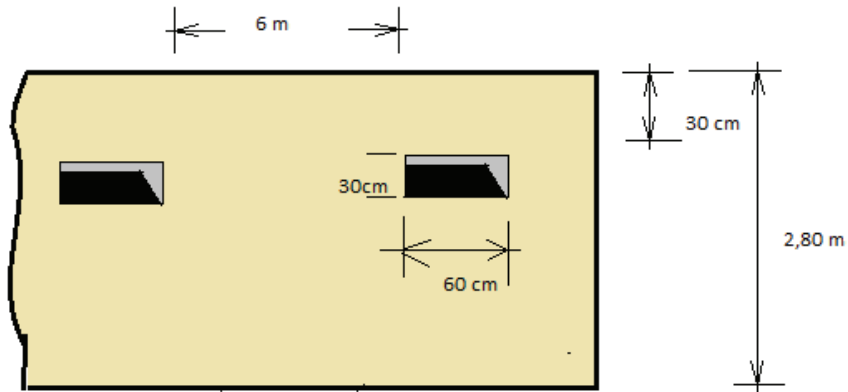


Figura 3.16. Descripción y dimensiones de las ventoleras (inlet), (Fuente: Autor)

L_i longitud de las ventoleras [m]

H_i altura de las ventoleras [m]

A_i área de una ventolera [m^2]

n_i número de ventoleras

v_i velocidad del aire en las ventoleras [$\frac{m}{s}$]

T_{es} temperatura de bulbo seco del aire en el exterior [$^{\circ}C$]

$$A_i = L_i * H_i [m^2] \quad \text{EC. (3.25)}$$

$$\forall_i = A_i * v_i \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad \text{EC. (3.26)}$$

$$Q_l = n_i * \forall_i * C_p * \rho * (273.15 + T_{es}) * \Delta t [KJ] \quad \text{EC. (3.27)}$$

$$Q_l = n_i * L_i * H_i * C_p * \rho * v_i * (273.15 + T_{es}) * \Delta t [KJ] \quad \text{EC. (3.28)}$$

3.3.6 Infiltración

Qi, la infiltración en un galpón es producto de la operación del sistema en baja presión. La estructura constructiva y los materiales permiten que aire del exterior ingrese al galpón. La diferencia de temperatura definirá el sentido del flujo de calor. La infiltración será más importante cuando la presión relativa sea menor, lo que implica que un mayor número de extractores están operando y están en capacidad de extraer una mayor cantidad de masa de aire, hecho que ocurre cuando la temperatura externa es mayor que la interna. Un mayor flujo de infiltración se produce en esta condición. Siempre se mantendrá la relación entre la masa o volumen de aire que ingresa por la pared húmeda, ventoleras e infiltración, es decir cuando un mayor volumen se desplace, se incrementará en la misma proporción en las entradas antes referidas.

Uno de los temas más complejos derivados de la estructura y equipamiento del galpón 2 de la granja avícola GRANINTORG es la determinación del parámetro de infiltración. Éste se puede estimar a partir de los materiales de construcción, sin embargo para el caso de los galpones en los que se utiliza paredes de bloque y cortinas plastificadas, la infiltración más importante se produce en las juntas de las diferentes secciones o materiales.



Figura 3.17. Detalle de las aberturas en las cortinas, (Fuente: Autor)

La figura 3.17 muestra la junta entre la estructura de la pared húmeda y el bloque de la edificación, una ranura de aproximadamente 3 centímetros que corre a lo alto del soporte de aluminio. Ranuras como ésta, pueden ser cerradas o reducidas utilizando espuma de poliuretano, sin embargo en la sección en la que las cortinas exteriores cubren la malla,

las aberturas pueden ser importantes y no siempre se puede controlar esta condición ya que el personal no siempre está pendiente de estos detalles. El proceso de reducir las ranuras o apertura se convierte en una tarea que parecería no concluir ya que el deterioro de los materiales o incidentes en el trabajo pueden ocasionar la rotura de una cortina o del material de aislamiento.

En conclusión, el valor estimado de la infiltración a partir de los materiales será fácilmente sobrepasado por los defectos de construcción o los incidentes en la estructura. La infiltración no obstante representa un elemento de pérdidas energéticas importante ya que el aire que ingresa a la estructura tendrá la temperatura del exterior y no la del sistema de enfriamiento evaporativo.

Para determinar el efecto de la infiltración de manera global se ha recurrido a métodos indirectos. La relación de las velocidades del aire que sale por los extractores y el que entra por la pared húmeda, es decir con las ventoleras cerradas, permitirá estimar el efecto de la infiltración. De manera análoga las presiones en los puntos extremos del galpón reflejarán también las pérdidas por infiltración. Cabe señalar que la velocidad tendrá pérdidas adicionales debidas a la viscosidad del fluido y la rugosidad del material.

Una solución analítica del efecto de la infiltración, permitirá estimar a través de mediciones de velocidad el efecto de la infiltración.

Propiedad extensiva de masa

N propiedad extensiva masa

n propiedad intensiva masa

t tiempo

A_s área de la superficie de control

ρ densidad del aire 1,24 $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

\vec{v} velocidad del aire

\forall_c volumen de control

$$\frac{DN}{Dt} = \oint_A n \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} - \frac{\partial}{\partial t} \int_{\forall} n \rho d\forall \quad \text{EC. (3.29)}$$

En la condición de estado estable, el aire se considerará incompresible en razón de que una vez generada la condición de presión negativa dentro del galpón ésta se mantendrá invariable y la cantidad de aire que entra será igual a la cantidad de aire que sale. Por tanto, la masa de aire que entra será igual a la que sale. De la misma forma la densidad será considerada constante. Por tanto la variación de masa en el tiempo es cero.

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV \text{ es igual a cero} \quad \text{EC. (3.30)}$$

Por tanto:

$$\oint_A \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \quad \text{EC. (3.31)}$$

Se consideran tres áreas por las cuales se produce el ingreso y salida de masa de aire. La velocidad lineal del aire que atraviesa las áreas del volumen de control analizado corresponde a: el área de los extractores por la que sale la masa de aire a una velocidad constante, el área de la sección transversal del galpón donde la velocidad que refleja la contribución de la infiltración a lo largo del galpón.

$$0 = \int_{A_1} \rho \vec{v}_1 \cdot d\vec{A}_1 + \int_{A_2} \rho \vec{v}_2 \cdot d\vec{A}_2 + \int_{A_3} \rho \vec{v}_3 \cdot d\vec{A}_3 \quad \text{EC. (3.32)}$$

si $\rho = 1$

A_{ex} área del extractor [m^2]

A_g área de sección transversal del galpón [m^2]

A_{inf} área de las entradas o función de infiltración [m^2]

v_{ex} velocidad lineal del aire en el extractor [$\frac{m}{s}$]

Los signos de los integrales se pueden establecer a partir del análisis vectorial de cada uno de los términos de la expresión. El valor del ángulo refleja la dirección del flujo.

$$\vec{v}_1 \cdot d\vec{A}_1 \leftrightarrow 0^\circ$$

$$\vec{v}_2 \cdot d\vec{A}_2 \leftrightarrow 180^\circ$$

$$\vec{v}_3 \cdot d\vec{A}_3 \leftrightarrow 180^\circ$$

El primer término de la expresión corresponde al flujo de los extractores o salidas de aire, por lo tanto el vector normal a la superficie del volumen de control y el vector de velocidad están en la misma dirección. El ángulo de 0° denota el sentido del flujo, por tanto saliendo del volumen de control. El segundo término representa la sección transversal del galpón. El ángulo muestra que el sentido del flujo está en dirección contraria al producido por los extractores, es decir, el aire entra en el volumen de control. Finalmente, el tercer término corresponde a la infiltración que es también una entrada de aire al sistema. El signo de estos dos últimos términos es contrario al de los extractores, por lo que la expresión se escribiría de la siguiente forma:

$$\int_{A_{ex}} \rho \vec{v}_{ex} \cdot d\vec{A}_{ex} = \int_{A_g} \rho \vec{v}_x \cdot d\vec{A}_g + \int_{A_{inf}} \rho \vec{v}_x \cdot d\vec{A}_{inf} \quad \text{EC. (3.33)}$$

En cada punto a lo largo del galpón, la velocidad dependerá del incremento del área total por la que pasa o ingresa el aire al galpón. Dado que el volumen se asume constante para estado estacionario y que la sección transversal no presenta obstáculo al flujo de aire, la velocidad en la sección transversal y en los puntos de infiltración es la misma.

$$\int_{A_{ex}} \vec{v}_{ex} \cdot d\vec{A}_{ex} - \int_{A_g} \vec{v}_x \cdot d\vec{A}_g - \int_{A_{inf}} \vec{v}_x \cdot d\vec{A}_{inf} = 0 \quad \text{EC. (3.34)}$$

En el segundo término la velocidad no depende de la variable de integración que es el área transversal del galpón, la que además es una constante. Para el tercer término, el área es función de la posición en el galpón si suponemos que la infiltración se produce por una abertura de dimensión constante g . El área de la ranura será igual a la abertura g multiplicada por la longitud del galpón en el punto de evaluación y la velocidad en ese punto determinará la masa de aire que ingresa por la abertura.

$$v_{inf} \quad \text{volumen de aire que se infiltra por unidad de tiempo} \quad \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

$$\forall_{inf} = g * x * v(x) \quad \text{EC. (3.35)}$$

$$v_{ex} * A_{ex} - v(x) * A_g - g \int_x x * v(x) dx = 0 \quad \text{EC. (3.36)}$$

Derivando la expresión por x.

$$\frac{d(v_{ex} * A_{ex})}{dx} - \frac{dv(x)}{dx} * A_g - g * x * v(x) = 0 \quad \text{EC. (3.37)}$$

$$A_g \frac{dv(x)}{dx} + gxv(x) = 0 \quad \text{EC. (3.38)}$$

Suponiendo que la velocidad varia en forma exponencial donde v_0 es la velocidad del aire en la sección transversal en la vecindad de los extractores.

$$v(x) = v_0 e^{-k*u(x)} \quad \text{EC. (3.39)}$$

$$\frac{dv(x)}{dx} = -kv_0 \frac{du(x)}{dx} e^{-k*u(x)} \quad \text{EC. (3.40)}$$

$$-kA_g v_0 \frac{du(x)}{dx} e^{-kx} + gv_0 x e^{-kx} = 0 \quad \text{EC. (3.41)}$$

Si se considera que la expresión de la velocidad es diferente de 0 para todo valor de posición se obtiene la ecuación 3.42.

$$-kA_g \frac{du(x)}{dx} + gx = 0 \quad \text{EC. (3.42)}$$

$$\frac{du(x)}{dx} = \frac{gx}{kA_g} \quad \text{EC. (3.43)}$$

$$\int \frac{du(x)}{dx} = \int \frac{gx}{kA_g} \quad \text{EC. (3.44)}$$

$$u(x) = \frac{1}{2} k_1 \frac{g}{A_g} x^2 + k_2 \quad \text{EC. (3.45)}$$

$\mathbf{v(x)} = \mathbf{v_0 e}^{-\frac{1}{2} k_1 \frac{g}{A_g} x^2 + c}$	EC. (3.46)
---	------------

Para $x = 0$ la velocidad es igual a la velocidad del aire en la sección transversal del galpón en la vecindad de los extractores. Por lo tanto la constante “c” debe ser igual a cero para cumplir la condición en el extremo del galpón donde se ubican los extractores.

v_g *velocidad del aire en el galpón* $\left[\frac{m}{s}\right]$

x *distancia desde los extractores ($x = 0$) hasta el punto de evaluación* [m]

$v_{(0)}$ v_g *la velocidad medida en la vecindad de los extractores* $\left(\frac{m}{s}\right)$

$v_{(L_g)}$ *velocidad medida en el final del galpón* $\left[\frac{m}{s}\right]$

$v_{inf(x)}$ *velocidad de infiltración en el punto x* $\left[\frac{m}{s}\right]$

L_g *largo del galpón* [m]

$$v(x) = v_g e^{-k \frac{g}{2A_g} x^2} \left[\frac{m}{s}\right] \quad \text{EC. (3.47)}$$

$$g = -\frac{2A_g}{k_1 L_g^2} * \ln\left(\frac{v_{(L_g)}}{v_g}\right) [m] \quad \text{EC. (3.48)}$$

$$A_{inf} = g * x [m^2] \quad \text{EC. (3.49)}$$

$$Q_{i(x)} = \rho * C_p * A_{inf(x)} * v_{inf(x)} * (273.15 + t_{es}) * \Delta t \text{ [KJ]} \quad \text{EC. (3.50)}$$

$$Q_i = \rho * C_p * (273.15 + t_{es}) * \Delta t * \int_0^{L_g} A_{inf(x)} * v_{inf(x)} \text{ [KJ]} \quad \text{EC. (3.51)}$$

$$Q_i = \rho * C_p * (273.15 + t_{es}) * \Delta t * \int_0^{L_g} g x v_g e^{-k_1 \frac{g}{2A_g} x^2} \text{ [KJ]} \quad \text{EC. (3.52)}$$

$$Q_i = \rho * C_p * (273.15 + t_{es}) * \Delta t * g v_g \int_0^{L_g} x e^{-k_1 \frac{g}{2A_g} x^2} \text{ [KJ]} \quad \text{EC. (3.53)}$$

$$Q_i = \rho * C_p * (273.15 + t_{es}) * \Delta t * g v_g \frac{e^{-k_1 \frac{g}{2A_g} x^2} - e^{-k_1 \frac{g}{2A_g} L_g^2}}{-k_1 \frac{g}{A_g}} \text{ [KJ]} \quad \text{EC. (3.54)}$$

3.3.7 Humedad relativa en el interior del galpón

El ambiente interior del galpón se nutre con flujos de aire que ingresan a través de la pared húmeda, en la que el aire no sólo disminuye su temperatura sino que gana agua en forma de vapor. Las aves producen vapor de agua cuando exhalan en la respiración y vapor de agua ingresa con flujos de aire que se filtran por aberturas y ventoleras. Cada uno de los flujos descritos se deben cuantificar en términos de volumen de aire que ingresa, sin embargo la diferencia en la temperatura de dichos flujos hace que la masa de agua en cada caso sea diferente. El análisis de la humedad relativa en este caso se deberá abordar desde la perspectiva de masa de aire y agua que se mezclan en el interior. Por su parte los extractores retirarán el aire y el agua producto de la incorporación de los flujos descritos. La figura muestra las vertientes más importantes de vapor de agua. El análisis deberá realizarse en términos de la masa de agua que cada fuente o drenaje moviliza debido a que el aire en cada caso está a una diferente temperatura.

Flujo de la humedad en un Galpón

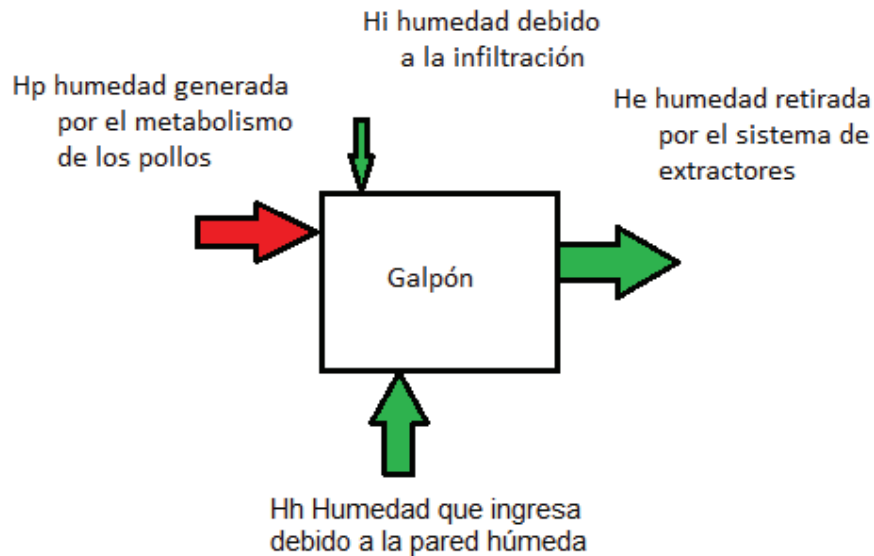


Figura 3.18. Modelo de las fuentes y drenaje de humedad, (Fuente: Autor)

3.3.8 Vapor de agua producido por los pollos

Hp. Las aves en su proceso metabólico exhalan CO_2 y vapor de agua. Este vapor de agua se incorpora al ambiente interior cambiando las condiciones de humedad al interior del galpón. Adicionalmente se tiene la humedad de la cama constituida por cascarilla de arroz que recibe los residuos producidos por las aves, la condensación de vapor de agua al interior cuando éste ocurre y eventuales derrames de los bebederos. El estudio realizado por J.J.R. Feddes y otros [9] presenta la ecuación 3.55 con la que es posible evaluar la producción de vapor de las aves en condiciones comerciales en función de la edad. El estudio entrega una masa de agua que se entrega al ambiente

d días de crianza

M_{agua} producción de vapor de agua por 1000 pollos en una hora $\left[\frac{\text{Kg}}{h * 1000 \text{ pollos}} \right]$

$$M_{\text{agua}} = 1,34 - 0,0872 * d + 0.0148 * d^2 - 0.000189 * d^3 \quad \text{EC. (3.55)}$$

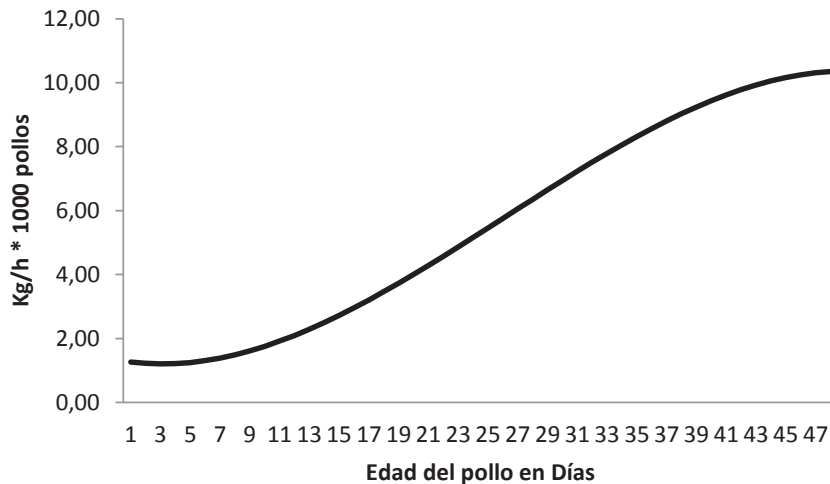


Figura 3.19. Vapor de agua producida por los pollos,
(Fuente: Autor utilizando la ecuación de Feddes, J y otros [9])

3.3.9 Vapor de agua agregado por la pared húmeda

Hh, las paredes húmedas por la naturaleza de funcionamiento agregan vapor de agua al aire que por los paneles atraviesa convirtiéndolos en una importante fuente de vapor de agua. En la figura 3.15 y sección 3.2.3 se presenta las tablas proporcionadas por los fabricantes. La humedad relativa resultante depende de la velocidad, temperatura y humedad del aire en la entrada. Así mismo se reporta una caída de presión que también se puede obtener de las curvas características.

Los valores de temperatura y humedad relativos en la salida corresponden al aire que reemplazará al que se desplaza hacia el otro extremo del galpón y saldrá con ayuda de los extractores. En este trayecto de unos 100 metros recibirá el vapor de agua que producen los pollos según se describió en la sección anterior. La humedad relativa resultante será entonces la que se obtenga de sumar la masa de agua que entra a través de los paneles húmedos y la que es añadida por respiración de las aves.

Se debe entonces determinar la masa de agua que contiene el aire en la parte interior de la pared húmeda. El trabajo presentado por C. Meruane y otros [73] es una metodología acompañada de las expresiones que permiten calcular la presión de vapor de agua y la densidad a partir de la temperatura y presión de saturación, conocida la temperatura y la humedad relativa. Siendo una alternativa más precisa la utilización de la carta Psicrométrica.

$$P_{sat} = 611 * 10^{\left(\frac{7,5 * T}{(273,15 + T)}\right)} [Pa] \quad \text{EC. (3.56)}$$

La ecuación 3.56 se utiliza para calcular la presión de saturación del vapor de agua. En tanto que la ecuación 3.57 corresponde a la presión de vapor de agua para un valor de humedad relativa dado. En la práctica se utilizará la lectura de humedad relativa de los sensores para establecer esta presión.

$$P_v = P_{sat} * HR\% [Pa] \quad \text{EC. (3.57)}$$

La expresión 3.58 determina la densidad o masa de agua por cada metro cúbico. La masa total de agua en el interior del galpón será la suma de todas las contribuciones de vapor de agua en el ambiente. La densidad de vapor de agua resultante será por tanto la suma de las densidades o la masa de vapor de agua dividida por el volumen de control.

$$\rho_v = \frac{P_v}{461 * (273,15 + T)} \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \quad \text{EC. (3.58)}$$

$$\rho_{vT} = \sum_i \rho_{vi} + \sum_j \frac{m_{vi}}{V_i} \quad \text{EC. (3.59)}$$

A partir de la densidad de vapor de agua así calculada se puede computar la presión de vapor a la temperatura del aire resultante. Esta presión en todo caso no debe ser mayor que la de saturación en cuyo caso parte del agua en forma de vapor cambiará de fase y se precipitará en forma de rocío que mojará a las aves y la cama. La expresión 3.61 entonces permite evaluar la humedad relativa en el interior del galpón como resultado del proceso descrito.

$$P_v = (461 * (273,15 + T)) * \rho_{vT} \quad \text{EC. (3.60)}$$

$$HR\% = \frac{(461 * (273,15 + T)) * \sum \rho_{vi}}{611 * 10^{\left(\frac{7,5 * T}{(273,15 + T)}\right)}} \quad \text{EC. (3.61)}$$

3.3.10 Vapor de agua que ingresa por infiltración y ventoleras

Hi, otra contribución de vapor de agua y aire seco se produce por la infiltración. El aire que entra al galpón está a la temperatura y humedad del exterior, su contribución puede ser despreciable en los casos en que la estructura del galpón sea hermética. Durante el desarrollo de este trabajo se ha insistido sobre la presencia de grietas y defectos en la estructura que en sistemas de presión negativa causan la pérdida de presión y disminución de la velocidad del aire. La cuantificación de aire producto de la infiltración no es posible utilizando los conceptos asociados con los materiales de construcción y se deberá seguir un proceso diferente ya que corresponde a una característica constructiva del galpón. En la sección 3.2.6 se establece el efecto de la infiltración y la ecuación 3.43 introduce una ranura equivalente. La que se idealiza como una función lineal para el cálculo.

El ingreso de aire húmedo a través de las ventoleras (inlets) del sistema de ventilación mínima participará y modificará la humedad al interior del galpón de manera análoga al descrito para la infiltración. El aire que ingresa está a la temperatura y humedad del exterior, de modo que, conocidas la velocidad del aire, las dimensiones de las ventoleras y su número es posible conocer el volumen de aire que ingresa.

Para determinar la contribución de vapor de agua de infiltración y ventoleras se debe establecer las áreas o secciones por las que se introduce el aire desde el exterior. Conocida la temperatura y humedad se podrá determinar la cantidad de vapor usando las ecuaciones 3.56, 3.57 y 3.58. El volumen de aire exterior que se infiltra determinará la masa de vapor de agua que se agrega.

$$V_i = A_i * v_i \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad \text{EC. (3.62)}$$

$$g = - \frac{A_g}{k_1 L_g^2} * \ln \left(\frac{v(L_g)}{v_g} \right) [m] \quad \text{EC. (3.63)}$$

$$A_{inf} = g * x [m^2] \quad \text{EC. (3.64)}$$

$$v(x) = v_g e^{-K_1 \frac{g}{A_g} x^2} \left[\frac{m}{s} \right] \quad \text{EC. (3.65)}$$

La ecuación 3.62 permite calcular el volumen de aire que ingresa por las ventoleras. La ecuación 3.63 determina la abertura equivalente a partir de las velocidades medidas en el galpón. La ecuación 3.64 corresponde al área de infiltración equivalente en función de la distancia. La ecuación 3.65 evalúa la velocidad en cada punto del galpón.

$$V_{infT(x)} = \sum_i A_i * v_{i(x)} + A_{inf} * v(x) \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad \text{EC. (3.66)}$$

$$m_{vinf} = \rho_v * V_{infT} \left[\frac{Kg}{s} \right] \quad \text{EC. (3.67)}$$

3.3.11 Vapor de agua retirado por los extractores

He, el sistema conformado por los extractores se limita a mover la masa de aire húmedo en el interior del galpón y descargarlo al exterior. Toda vez que aire húmedo es extraído, el vapor de agua será aligerado. El proceso no es instantáneo, por lo tanto es de suponer que el aire recibe la contribución descrita en las secciones anteriores. El volumen de aire extraído depende del número de extractores y su capacidad.

$$m_{ext} = \rho_v * n_{ex} * A_{ex} * v_{ex} \left[\frac{Kg}{s} \right] \quad \text{EC. (3.68)}$$

3.4 Validación de los modelos

La aplicación de los modelos matemáticos que describen el comportamiento de los sistemas en un galpón para la producción de pollos de engorde, es útil para predecir la temperatura a lo largo del galpón y así implantar las medidas necesarias para mantener el ambiente en los parámetros recomendados por los genetistas. En este trabajo se

utilizará una versión modificada del modelo propuesto por V.F. Carvalho y otros en 2008 [34] que es a su vez una adaptación del modelo reportado por Louis D. Albright en su libro “Environment Control for Animals and Plants”. La temperatura en el interior del galpón es el resultado de los flujos de calor positivos que contribuyen a incrementar la temperatura, y negativos los que restan calor al sistema. Los flujos de calor que tiene relación con el ambiente externo pueden ser en ocasiones positivos cuando la temperatura es mayor que la temperatura objetivo. Cuando la temperatura externa sea negativa contribuirán a reducir la temperatura como efecto de la pérdida de calor.

$$Q_n = Q_p - (Q_h - Q_e) \pm Q_l \pm Q_i \pm Q_t \quad \text{EC. (3.69)}$$

En el caso de los extractores, Q_e depende de la masa de aire que es descargada con una rapidez que depende del número de extractores. En tanto que Q_h corresponde a la masa de aire que ingresa por la pared húmeda con una temperatura menor y mayor contenido de vapor de agua. La diferencia expresada en términos de energía de éstas dos masas de aire a temperaturas una menor que la otra corresponde al calor real que puede compensar el producido por los pollos y otras fuentes. Desde otra perspectiva corresponde al calor inicial del galpón que se incrementará con el paso a lo largo de éste, se sumará el calor generado por los pollos, la estructura y en el caso del modelo matemático en desarrollo, el calor que aporta la infiltración.

$$Q_e = \rho * C_p * n_e * A_{ex} * v_{ex} * (273.15 + T_{ss}) * \Delta t [KJ]$$

$$Q_h = 2 * \rho * C_p * L_{PH} * H_{PH} * v_{PH} * (273.15 + T_{PH}) * \Delta t [KJ]$$

La masa y la temperatura a la que sale el aire del interior corresponde a calor extraído Q_e , que solo depende de la cantidad de extractores, ecuación 3.7. Un número insuficiente de extractores produce que el aire no se renueve con la agilidad o velocidad requerida y se calentará más por el calor entregado por los pollos y la estructura. Entonces se experimentaría un incremento en la temperatura de manera paulatina que podría llegar a la temperatura de la muerte súbita o de estrés térmico. El calor que entra con el aire frío por la pared húmeda Q_h se calcula con la ecuación 3.22.

$$Q_p = D_g * d_p * \{6,38 - 0,782 * d + 0,109 * d^2 - 0,00146 * d^3\} * \Delta x * \Delta t [KJ]$$

El modelo matemático está basado en la masa de aire que entra y sale de la estructura por lo que las dimensiones son factores o parámetros de la modelación. La construcción de los galpones no responde a un estándar de la industria sino más bien una respuesta a las metas de producción y giro del negocio. Una mayor área sin duda podrá alojar un mayor número de pollos con densidad de 10 a 14 aves por metro cuadrado. El Calor generado por los pollos Q_p se determina con la ecuación 3.11. Desde la perspectiva del modelo matemático las dimensiones definen el volumen de control que para el desarrollo de una propuesta se ha dividido en secciones de menor tamaño o volúmenes de control distribuidos. El calor Q_i establecido por la ecuación 3.54 dependerá del volumen de control. El calor entregado por la estructura Q_t que se calcula con la ecuación 3.24 también se evaluará de forma no lineal que es proporcional el tramo o bloque de estructura que contiene el volumen de control. En el modelo de ventilación de túnel no interviene Q_i ya que las ventoleras están cerradas.

Se podría pensar que una segmentación en volúmenes de control de idénticas dimensiones es lo más apropiado, sin embargo la variación de la velocidad por efecto de la infiltración sugieren que el volumen de control pueda contener toda la masa de aire que se mueve en un intervalo de tiempo. Por esta razón se ha establecido que el intervalo de distancia que da origen al volumen de control se establezca multiplicando la velocidad en el punto de interés por un intervalo de tiempo Δt que se define para la evaluación del modelo. Así, Δx será el resultado de la velocidad en el punto x por Δt como se muestra en la ecuación 3.70.

$$\Delta x = v_g(x) * \Delta t \quad \text{EC. (3.70)}$$

El volumen de control será entonces el área de la sección transversal del galpón se para las dimensiones utilizadas es de 30 metros cuadrados multiplicada por Δx . El área de producción que resulta en cada volumen de control distribuido el producto de al ancho del galpón multiplicado por Δx y contendrá un número de pollos de acuerdo con la densidad de pollos establecida. De la misma forma, la sección de longitud Δx aportará calor de manera proporcional, producto de la temperatura en techo y paredes por efecto de la transferencia de calor establecida.

La infiltración entrega calor si la temperatura exterior es mayor que la del interior del galpón. La ranura equivalente por metro se ajusta por Δx , es decir cuanto mayor sea Δx , mayor será la infiltración. La masa de aire que ingresa en forma distribuida a lo largo del

galpón se suma a la de la sección o volumen de control precedente modificando la temperatura como la masa total. Este efecto se repite una y otra vez hasta llegar al último volumen de control que contiene una masa de aire que los extractores son capaces de retirar del galpón en un tiempo Δt , que es igual a la capacidad de los extractores ya que se ha considerado el aire como un fluido no compresible.

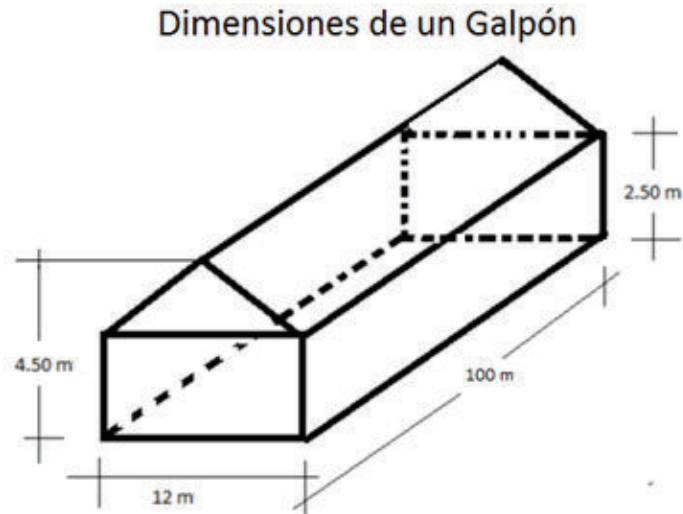


Figura 3.20. Dimensiones del galpón, (Fuente: Autor)

Las expresiones establecidas para el calor que se produce por efecto del intercambio de masa de aire no requieren ser probadas ya que corresponden a fenómenos bien estudiados y analizados en la literatura. La expresión de la velocidad en función de la abertura o ranura uniforme corresponde a un elemento nuevo y original en el análisis. En los trabajos antes realizados se presume que los galpones son muy herméticos y que este fenómeno es más bien despreciable. Seguidamente se presenta el resultado de la ecuación de 3.65 en forma comparativa con valores medidos en el galpón para condiciones que corresponde a 2 extractores y 6 extractores respectivamente.

Velocidad con 2 extractores y Panel húmedo

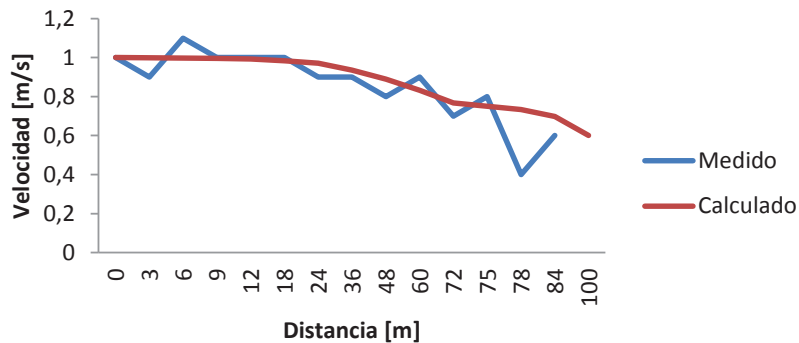


Figura 3.21. Valores medidos y calculados de la velocidad para la operación de dos (2) extractores y la pared húmeda, (Fuente: Autor)

En la figura se muestra en azul del valor medido correspondiente a las lecturas tomadas a los 6 metros, es decir en el centro del galpón. Se realizaron mediciones de velocidad cada 3 metros a lo largo del galpón, tomado datos a 3, 6, 9 metros a lo ancho. Los valores de correlación de la velocidad medida y calculada son 0,58 a los 3 metros, 0,32 a los 6 metros y 0,65 a los 9 metros. La tendencia y correlación permiten concluir que la expresión derivada en el presente trabajo permite determinar la variación de la velocidad como una función de una ranura equivalente lineal. En tanto que para 6 extractores se obtuvo una correlación de 0,81 para 3 metros y 0,94 para el centro del galpón. La figura 3.21 muestra esta tendencia.

Velocidad con 6 extractores y Panel húmedo

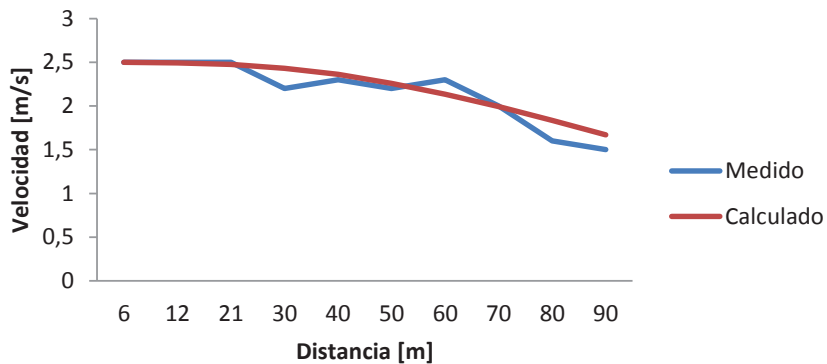


Figura 3.22. Valores medidos y calculados de la velocidad para la operación de seis (6) extractores y la pared húmeda, (Fuente: Autor)

La expresión de la ranura equivalente se estableció en 0,0000631 que determina una ranura de 0,0046 metros o aproximadamente 5 milímetros que en todo el galpón resultaría de 0,464 metros cuadrados es decir casi medio metro cuadrado. Esta cantidad no parece mucho pero permite explicar y entender lo crítico de tener aberturas en el galpón. En un galpón de túnel esto no debería ser una preocupación pues se asume que los detalles constructivos garantizan la hermeticidad, sin embargo el proceso de repotenciación y reacondicionamiento puede dejar estas grietas a lo largo de la estructura. En la foto de la figura 3.23 se advierte la unión del aislante en la que se puede observar defectos o fallar en la hermeticidad del galpón. La foto de la figura 3.24 fue obtenida de manera que las filtraciones de luz permitan verificar la presencia de una abertura o grieta en la unión del panel húmedo y las paredes de soporte. Estos hallazgos permiten verificar la presencia de aberturas que podrían parecer de poco interés, no obstante a luz de los cálculos y mediciones realizadas resulta ser predominante en el comportamiento global de la velocidad en un galpón de túnel.

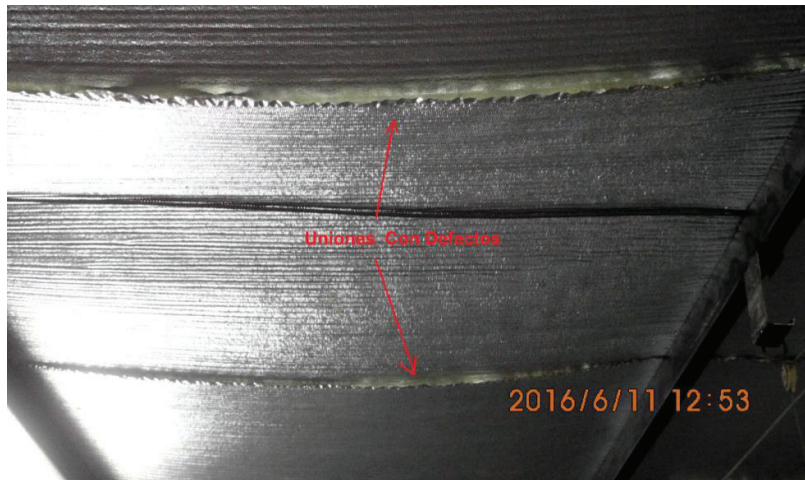


Figura 3.23. Detalle de uniones defectuosa en aislante, (Fuente: Autor)

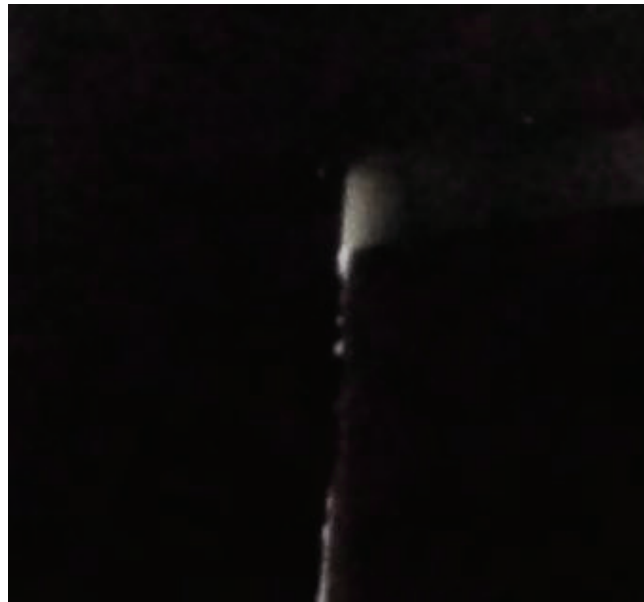


Figura 3.24. Foto del borde de la pared húmeda. Observa la ranura por la luz que se filtra por la unión de la PH y la pared de soporte, (Fuente: Autor)

La evaluación del comportamiento del panel húmedo se realizó durante un período de tiempo en el que la temperatura exterior se mantenía aproximadamente estable, lo que ocurre en el sitio entre las 14:00 y 15:00 horas. La velocidad medida sobre el panel se midió en 1,4 metros por segundo. Se observó una temperatura de 31,3 grados centígrados en promedio. Se activaron las bombas de suministro de agua a los paneles y la temperatura empezó a disminuir en forma paulatina hasta alcanzar una diferencia de 6,1 grados centígrados. La temperatura interna al inicio de la toma de datos presentaba

una diferencia de 0,8 grados efecto que se puede explicar debido a la humedad del ambiente externo que se situó durante la evaluación en 60,82% en tanto que la humedad en el interior paso de 71,1% antes de iniciar la prueba. Con el panel totalmente mojado la humedad relativa pasó a 83,3% como se muestra en la figura 3.26. La tabla que presenta uno de los fabricantes no considera (PeriCool) el rango de lecturas que se observaron. Como se ha reportado de manera insistente esta tecnología es más adecuada para ambientes cálido secos.

Temperatura interna y externa en la pared húmeda

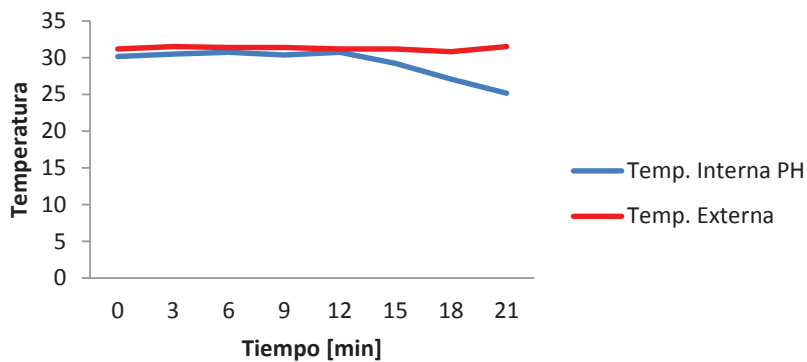


Figura 3.25. Efecto de disminución de la temperatura en la pared húmeda, (Fuente: Autor)

Humedad Relativa de la pared húmeda

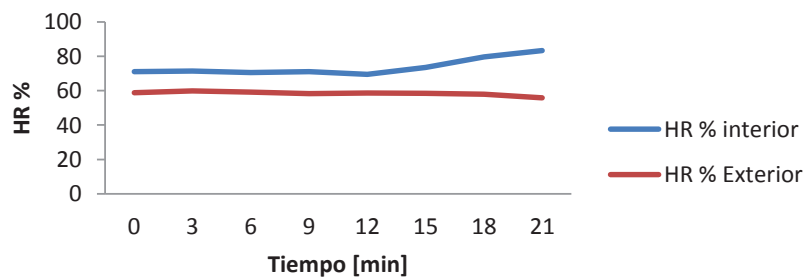


Figura 3.26. Humedad interna y externa sobre la pared húmeda, (Fuente: Autor)

Los valores medidos en la pared húmeda se presentan en la carta psicrométrica de la que se obtiene los valores de temperatura de bulbo húmedo que para el caso del punto IH permite calcular la eficiencia de saturación en 82,2% que para la velocidad durante la prueba fue de 1,4 metros por segundo que está dentro del rango que el fabricante presenta en su catálogo.

Tabla 3.3. Valores medidos y de la carta psicrométrica.

	Temperatura Bul. Sec. °C	Humedad %	Temperatura Bul. Húm. °C	Saturación%
Exterior (E)	31,28	60,82	29.72	--
Interior Seca (IS)	30,05	71,5	29.94	14.2
Interior Húmeda (IH)	25,17	83,3	23,83	82,2

(Fuente: Autor)

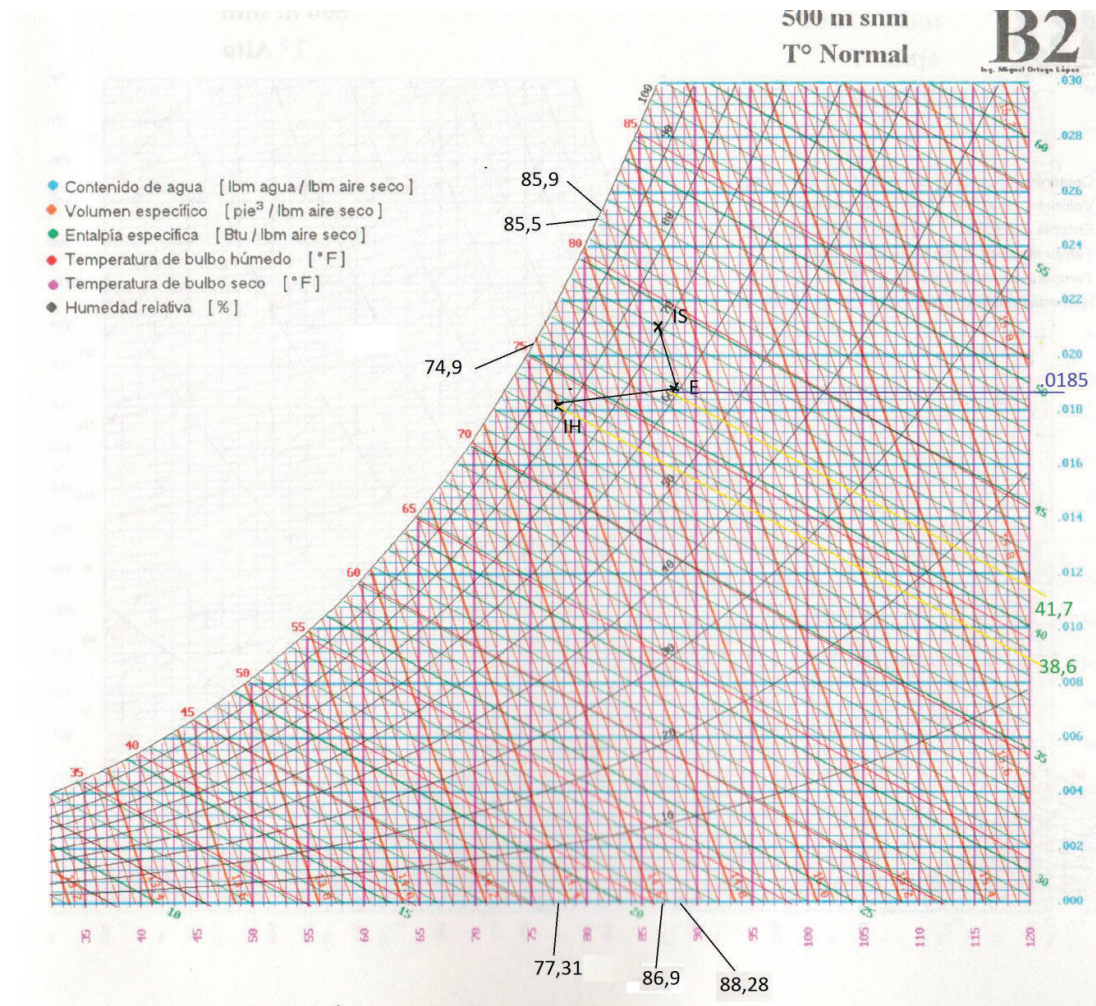


Figura 3.27. Efecto de panel evaporativo observado en la carta psicrométrica,

(Fuente: autor utilizando carta de Miguel Ortega y Adrián Peña (1996))

El punto E que corresponde al aire en el exterior al punto IH que es la salida en el interior del panel húmedo. La cantidad de calor perdido por el aire se puede establecer en base a la entalpía que pasa de 43,99 [KJ] por libra de aire seco a 40,72 [KJ] por libra de aire seco es decir una diferencia de 3,1. Esta pérdida de energía produce una disminución de 7 grados centígrados.

Para la realización del modelo matemático que consideró principalmente el efecto de la infiltración producto de los defectos o agujeros de la estructura, fallas en juntas del material de aislamiento, etc. se ha establecido dos clases de fuentes de calor. La primera corresponde a las fuentes que modifican la masa de aire. El aire enfriado por la pared húmeda ingresa al galpón una velocidad que ha sido calculada utilizando la ecuación 3.67. La referida ecuación ha sido validada mediante mediciones realizadas en sitio y con datos obtenidos en un modelo de simulación realizado en ANSYS. La masa de aire se desplaza por el galpón ocupando el espacio que deja el aire que sale por los extractores. La cantidad de aire que sale debe ser entonces igual a la que entra, sin embargo las velocidades son diferentes por ejemplo: Se ha medido en el galpón velocidades de 2,6 y 1,4 metros por segundo como se muestra en la figura 3.28. Se ha determinado que la ranura equivalente g corresponde a 0,1656 metros cuadrados por cada 17 metros cuadrados de paredes y techo, considerando que las paredes tienen una altura de 2,5 metros y el ancho del galpón es de 12 metros en un tramo longitudinal de un metro.

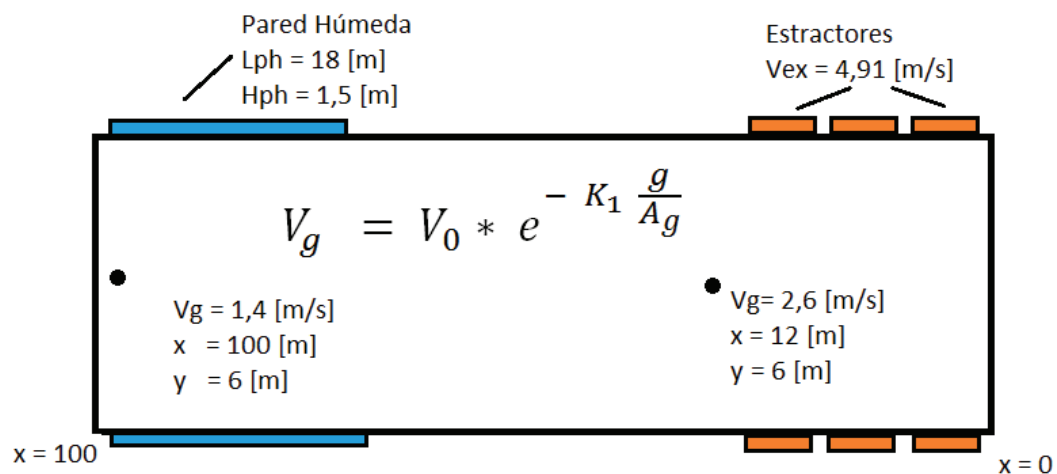


Figura 3.28. Datos tomados para evaluar la ecuación de la velocidad en el galpón, (Fuente: Autor)

El modelo ha sido concebido como una sucesión de tramos de longitud no lineal. Se ha utilizado la velocidad evaluada en cada punto para definir la dimensión de cada bloque

de manera que cada tramo o bloque tiene un área de 30 metros cuadrados obtenidos a partir de 12 metros de ancho por 2,5 metros de altura y un volumen que depende de la velocidad. Se utilizó este método para ajustar la masa de aire que se mueve en un espacio que lo contenga completamente, de otra forma debería considerarse un incremento de la presión lo que no ocurre en un sistema de ventilación de presión negativa. La temperatura inicial corresponde a la mezcla del aire que ingresa por el panel húmedo y el de la infiltración equivalente. La suma ponderada de la temperatura más el calor que aporta la estructura Q_t y las aves Q_p para cada sección será la temperatura resultante con la que pasará la masa de aire a la siguiente sección como se ilustra en la figura 3.29.

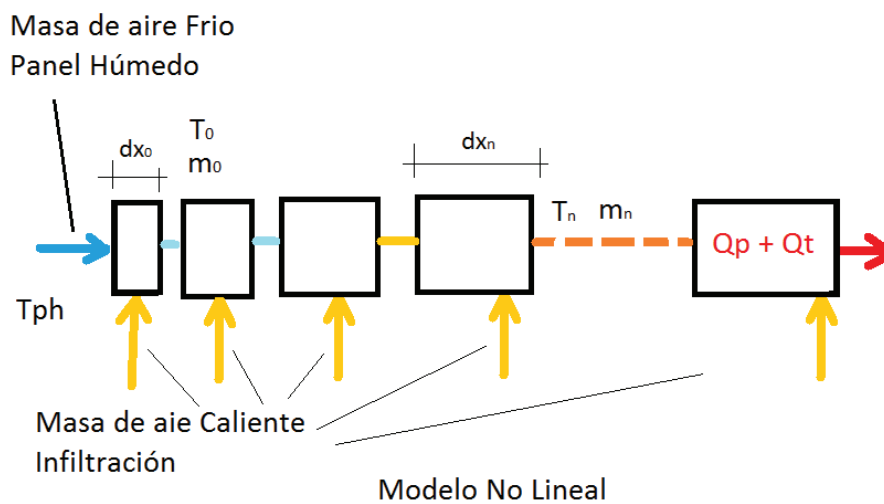


Figura 3.29. Modelo no lineal comportamiento del galpón, (Fuente: Autor)

El modelo matemático se ha nutrido de la experiencia de las visitas a las granjas, la toma de datos en sitio, la utilización de herramientas como "Solver" de EXCEL para el cálculo de constantes que ajusten las curvas de las funciones analíticas, el análisis de datos para calcular los coeficientes de correlación de los datos medidos con los producidos por elementos del modelo, la modelación geométrica en ANSYS para evidenciar efectos como los torbellinos que han sido registrados por cambios en la dirección de la velocidad en el anemómetro, EXCEL ha permitido el desarrollo del modelo para un número fijo de bloque que subsecuentemente ha permitido desarrollar un modelo matemático en MATLAB que puede ser evaluado para un número de bloques que depende intervalo de tiempo que se configure.

El modelo utiliza como entradas parámetros de temperatura exterior (sol-air) que es la que se puede medir en forma directa del ambiente. Los flujos de infiltración ingresan a

esta temperatura. La temperatura de la pared húmeda que depende factores como la velocidad del aire, temperatura externa del aire, el espesor del panel, la humedad relativa en la entrada, el flujo de agua que humedece la pared y la ubicación en la estructura. Este parámetro ha sido asumido en base a datos registrados en sitio, sin embargo ésta temperatura debe ser mejor estimada ya que los resultados depende en gran medida de este parámetro. La validación del modelo ha tomado la lectura real sobre la pared húmeda como parámetro de simulación. Una aplicación práctica del modelo requerirá que se instale un sistema de adquisición de datos para obtener este valor en cada instante.

Si bien la infiltración equivalente que ha sido el elemento central del estudio es propia y característica de cada galpón, es evidente que éste parámetro debe ser medido. La metodología, la expresión matemática resultante y la evaluación de las constantes que caracterizan el galpón se ha mostrado y validado. Es bien cierto que no es posible observar de manera real aberturas de las dimensiones señaladas, sin embargo se a verificado en la práctica que dicha infiltración ocurre y que se produce a lo largo del galpón. Por ejemplo; los sumideros que se utilizan para las labores de lavado y limpieza son tubos de cuatro pulgadas ubicados a nivel del piso cada seis metros aproximadamente que permiten la salida del agua cuando se realiza esta tarea entre lotes. Se ha observado que estos mismos tubos quedan abiertos durante la producción reduciendo la hermeticidad del galpón operando en presión negativa. Otro ejemplo constituye el sistema de calefacción de diesel que utiliza un ducto de sesenta centímetros de diámetro que no siempre es cerrado después que ha cumplido su función. En suma, la infiltración se produce por persianas defectuosas como lo describe J. Simmons y otros [4], ventoleras pobremente calibradas y elementos fortuitos de la estructura que inciden significativamente en el desempeño del galpón de túnel. Su efecto real ha sido solventado mediante el análisis de la ranura equivalente.

El modelo ha sido desarrollado considerando que el aire es un fluido incompresible por tanto la masa o volumen que entra es el mismo que sale. Si bien se ha observado en sitio que el diferencial de presión en el extremo de los extractores presenta una reducción en la presión de 34 pascales y en la sección del panel húmedo de 20 pascales, el diferencial de presión de 14 pascales en un galpón de 100 metros considerando una disminución lineal de la presión correspondería a una diferencia de presión de 0,14 pascales por metro con un volumen de control de 30 metros cúbicos permite afirmar que no es pertinente incluir ésta condición en el modelo. Por tanto el calor extraído será en todos los casos igual al calor generado considerando el flujo del aire en el interior.

Por su parte la velocidad a la que la masa de aire se mueve en el interior si tendrá un impacto en la temperatura final. El calor producido por los pollos se ha considerado de manera uniforme del mismo modo que el calor que aporta la estructura. En la realidad esto no sucede así, los productores han identificado de manera empírica que la temperatura en la vecindad de la pared húmeda es menor que en el otro extremo donde se ubican los extractores. Por esta razón, utilizando mallas separadoras ubican a los machos de mayor tamaño cerca de la pared húmeda y las aves de menor tamaño cerca de los extractores. No obstante de estas particularidades el modelo permite establecer el incremento de la temperatura con una distribución homogénea.

El número de extractores en operación, la densidad de pollos por metro cuadrado, la temperatura ambiente y la del panel húmedo determinarán la curva de temperatura en el interior. Se debe recordar que temperaturas muy altas y velocidad elevadas reducen la ingesta perjudicando la conversión. El modelo matemático desarrollado permite predecir la curva de temperatura, la ranura equivalente y sus efectos.

4. Metodología de evaluación y parámetros de operación de un galpón

4.1 Desarrollo de una propuesta basada en modelos

La modelación se ha convertido en una herramienta muy útil para verificar el funcionamiento o comportamiento de un sistema o equipo sin que se deba construirlo. Resulta también de utilidad el uso de la simulación cuando se pretende realizar cambios en las especificaciones y modo de operación. El modelo puede ser de carácter analítico, desarrollado de manera específica para un dispositivo o podría referirse a un modelo más general que se adapte a las particularidades del objeto analizado. Los simuladores comerciales son programas de computadoras que contienen funciones y algoritmos matemáticos que permiten resolver las complejas expresiones algebraicas con las que se representan los fenómenos físicos observados en la naturaleza que tiene un comportamiento no lineal. Las soluciones se obtienen en forma numérica es decir, se realiza la evaluación de la expresión para determinados parámetros y se compara el resultado con la evaluación de esta expresión para parámetros ligeramente diferentes de los utilizados de manera preliminar a los que se conoce como condiciones iniciales.

El cálculo realizado de manera consecutiva en el que se modifica ligeramente los parámetros se conoce como ecuaciones de diferencias. El objetivo será entonces alterar las variables de manera tal que el resultado sea cada vez más consistente a lo que se denomina convergencia. Cuando la evaluación para dos conjuntos de parámetros ligeramente diferentes produce un resultado sutilmente diferente se dice que converge. El valor de la diferencia se compara con un número preestablecido denominado criterio de convergencia. Los parámetros de entrada que producen esta condición corresponden a la solución numérica.

El modelo matemático depende de los objetivos y parámetros que se desea analizar ya que el modelo se desarrolla asumiendo que algunas variables no predominantes pueden considerarse constantes para las condiciones del fenómeno analizado. Percibir que una variable o fenómeno físico debe ser incluido o no en la simulación determinará el resultado por lo que la validación es primordial. Es necesario evaluar y determinar las condiciones de entrada y salida en un sistema real para comparar los resultados de la realidad con los de la simulación. Otros parámetros en la simulación que deben considerarse son: el intervalo de tiempo y la tamaño de la malla como lo señala el Dr.

Hidalgo [77]. En este trabajo se ha considerado un intervalo de tiempo de 0,1 [s] e incrementos de longitud variables en función de la velocidad del fluido (aire) de manera tal que el volumen de control en cada intervalo permanezca constante.

Los programas de simulación comerciales como ANSYS utilizan una variedad de métodos y algoritmos que se pueden aplicar al modelo geométrico del sistema bajo estudio. Las soluciones se alcanzan evaluando ecuaciones que incluyen variables físicas como la presión, velocidad, densidad, etc. del fluido que está contenido en el volumen de control delimitado por el diagrama. En este caso, elementos de la geometría como los extractores, ventoleras y pared húmeda se especifican a partir de las características del fabricante de la mano de las mediciones u observaciones.

La sensibilidad del modelo respecto al mallado es otro elemento sustancial de la simulación. El diagrama físico es dividido en pequeños poliedros que comparten sus aristas con todos sus vecinos. Los vértices o nodos son los puntos en los que se evalúa cada ecuación del modelo. Los nodos están enlazados con otros nodos mediante las aristas de los poliedros constituyéndose en verdaderos vectores cuya dirección está determinada por la geometría. La evaluación de las ecuaciones determina la magnitud y sentido.

En conclusión, la solución se alcanza cuando evaluado la interacción de cada nodo con sus vecinos produce una condición estable o como ya se dijo converge. Un rol importante tiene el límite, en aquellos nodos que se hallan sobre los bordes en elementos geométricos del modelo se debe cumplir con las condiciones que imponen la definición del problema o los materiales que los constituyen. Por ejemplo un extractor representado por una salida de flujo másico debe cumplir con la cantidad de masa de aire especificada, sin embargo cambio en la presión o densidad condicionarán el resultado final. Otro ejemplo es la rugosidad de los materiales de paredes y otros objetos. El aire que entra en contacto con estas superficies pierde velocidad por la fricción arrastrando a los nodos directamente conectados y estos a su vez a otros que estén cercanos propagando su efecto en mayor o menor grado a todos los elementos del mallado.

La simulación es por tanto compleja e intensiva en cálculos y re-cálculos hasta encontrar una solución que satisfaga las condiciones impuestas. Las formas geométricas de los objetos bajo estudio pueden ser diversas e intrincadas por lo que dividir con poliedros plantea también la necesidad de definir el número de aristas que permita dividir de manera exacta la geometría. Los programas utilizan estrategias de mallado que conducen a la optimización de los resultados, sin embargo un pequeño detalle podría no

ser considerado, si la longitud de las aristas del diedro del mallado es mayor que la dimensión del detalle. Del mismo modo, el vértice de un ángulo muy pronunciado podría no ser incluido si el tamaño de las aristas de los poliedros utilizados es muy grande.

Siempre será deseable ajustar las dimensiones adecuadamente. Mientras más fino sea el mallado parecería que es mejor. Por otro lado el número de nodos resultantes puede crecer de forma exponencial. Cabe recordar que se debe evaluar las expresiones por cada nodo y re-calcular hasta alcanzar la convergencia. Sólo una herramienta de cómputo muy poderosa podría emprender semejante tarea para obtener resultados útiles.

Puede ser interesante conocer cómo se realizaba esta actividad antes de las computadoras y los simuladores. Pues bien un verdadero ejército de ingenieros calculaba evaluaba una pequeña porción del problema y la integraba con los cálculos realizados con sus colegas. Una tarea de dimensión colosal que podía haber tomado días o semanas tan solo para concluir que debían considerar algún otro parámetro.

La otra alternativa, el desarrollo de una solución analítica que encuentre una expresión que permita calcular el estado de las variables en cualquier posición bajo las condiciones o parámetros más diversos. Las relaciones entre las variables físicas es en ocasiones tan compleja que no es posible advertir las imbricaciones entre ellas. Un modelo analítico entonces será en forma general simple, limitado a un número reducido de variables pero muy útil y poderoso.

Para conseguir dicho modelo se debe partir de una base sólida y comprensión del fenómeno bajo estudio. Se debe asumir una serie de condiciones que dejen de lado variables cuya influencia no es significativa en el resultado final. Esto no quiere decir que no puedan alterar el resultado, esto quiere decir que su influencia es menor que la de otro parámetro. El modelo analítico tiene una gran virtud pues acerca el fenómeno más al usuario final. En ese aspecto las espectaculares gráficas y animaciones de los modelos computacionales son insuperables ya que no solo permiten ver el fenómeno en estado estable, sino que se puede conocer las condiciones en régimen transitorio.

Por su parte la naturaleza más simple de un modelo analítico podría conducir a una implantación viable y efectiva. La validación de los modelos es quizá el paso más importante. La computadora puede arrojar un resultado que si no lo corroboramos todo el trabajo pierde sentido práctico. De manera similar ocurre con la parte analítica. En suma el modelo debe ser útil.

Ha sido un objetivo primordial de este trabajo analizar el efecto de la velocidad de aire en el interior del galpón. De ésta velocidad depende la rapidez con que el aire se renueva, ésta velocidad también determina el comportamiento de los paneles húmedos y la acción de las ventoleras. Se ha podido observar a través de la observación cotidiana que los objetivos de temperatura no se logran en buena parte por que el aire no se renueva con la rapidez que se requiere. Nuevamente la velocidad del aire es el eje de estos efectos.

Si bien las pérdidas pueden ser consecuencia de los materiales de revestimiento de paredes y techos. La sola presencia de las aves y sus hábitos pueden contribuir. Ha sido el argumento principal de este trabajo que la infiltración por grietas y otros desperfectos constructivos son la principal causa.

Los resultados de la expresión analítica de la modelación introducen la denominada ranura equivalente que no es más que una representación lineal y consolidada de la infiltración. Por ejemplo, en los paneles húmedos se experimenta una reducción de presión que es reportada por el fabricante y que ha sido medida in situ. Una grieta en su estructura será camino de menor resistencia para el aire que ingresa al galpón reduciendo su efectividad. Para superar esta condición se incrementa el flujo para compensar lo perdido, cuando lo más adecuado sería cerrar esta abertura con algún material de relleno.

El efecto de la infiltración no es visible a simple vista y se tiende a pensar que aquella pequeña ranura o abertura es tan pequeña que no afectará en un recinto de dimensiones tan grandes. La expresión analítica derivada de este trabajo muestra que un área equivalente menor a un metro cuadrado distribuida de forma homogénea a lo largo del galpón produce una pérdida importante.

4.2 Aplicación de los modelos en galpones abiertos y de túnel

En los galpones abiertos está totalmente descartado el uso del modelo basado en infiltración y velocidad del aire dado que ha quedado claro que una abertura de un orden de magnitud de un metro cuadrado es capaz de producir pérdidas de velocidad importantes siendo las grietas o aberturas en la proximidad de los extractores las más importantes. Sin embargo no se descarta el analizar utilizando modelos el efecto de la convección natural y el uso de chimeneas que pudieren acelerar el aire caliente que se produce. De igual forma se ha mencionado en la sección 2.1.1 que durante la fase de recepción y las primeras semanas en ambientes de serranía sobre todo se requiere de calefactores que operan con GLP o diésel. Las pérdidas se evaluaron el rededor del 88% lo cual constituye un drenaje importante de calor y recursos. El uso de materiales de

aislamiento será entonces el tema de estudio sobre el que se ha de focalizar los esfuerzos.

Este trabajo se ha concentrado en el efecto de la velocidad en los galpones de túnel. Como ya se mencionó, una reducción en la velocidad sobre los paneles húmedos implica que el área de éstos debe incrementarse para permitir que un volumen adecuado de aire a más baja temperatura que el interior circule en el interior. La modelación permite estimar el área de este sistema.

En los trabajos reportados por Dagtekin y otros [29, 30] se concluye que la velocidad en los paneles entre 0,5 [m/s] y 1,5 [m/s] se consigue la mayor efectividad. El uso del modelo permite predecir las condiciones y número de extractores para conseguir el objetivo deseado. Sin embargo el modelo arroja valores de velocidad que superan lo establecido por los genetistas. Lo que hace poco aplicable solo subir la velocidad. Se ha observado que el pollo tiene comportamientos bien definidos en presencia de factores como la velocidad de aire, como se ha podido observar en las instalaciones GRANINTORG ubicada en el sector de Pedro Vicente Maldonado. Si la velocidad es muy alta se acuestan y dejan de comer. Por el contrario cuando la velocidad es muy baja la temperatura aumenta y el pollo deja de comer. Por lo antes mencionado llegar a una velocidad optima resulta muy conveniente dado que si el pollo come y convierte el alimento en carne, mejora la productividad.

La diferencia de velocidad entre los extremos del galpón hace que desde la perspectiva de las aves unos sitios sean mejores que otros en otras palabras más confortables. La aves tiende a moverse a los lugares donde mejor se sienten por tanto se alejan de sitios muy calientes, muy ventosos o donde hay mucha competencia por el alimento.

Se ha utilizado simulación en dos dimensiones (2D) en el programa ANSYS para identificar los patrones que tendrá la velocidad en el interior de un galpón de túnel se ha considerado tres escenarios. El primero con las ventoleras abiertas y la pared húmeda cerrada. Las ventoleras se utilizan durante la ventilación mínima en las primeras etapas de la crianza. En segundo escenario corresponde a las ventoleras abiertas y la pared húmeda abierta. Éste corresponde a la ventilación de transición que dura solo unos minutos durante el cambio entre ventilación mínima y de túnel. Finalmente, las ventoleras cerradas y la pared húmeda abierta en lo que se denomina ventilación de túnel.

Con el propósito de verificar la validez e independencia del modelo respecto al mallado, se realizó la simulación con tres mallados diferentes; el caso A con una malla de 0,05 metros, B con malla de 0,1 metros y C con 0,2 metros. La dimensión señalada

corresponde a la arista mínima del poliedro utilizado por ANSYS en el mallado. Los modelos de simulación seleccionados son el de energía y el modelo de viscosidad laminar.

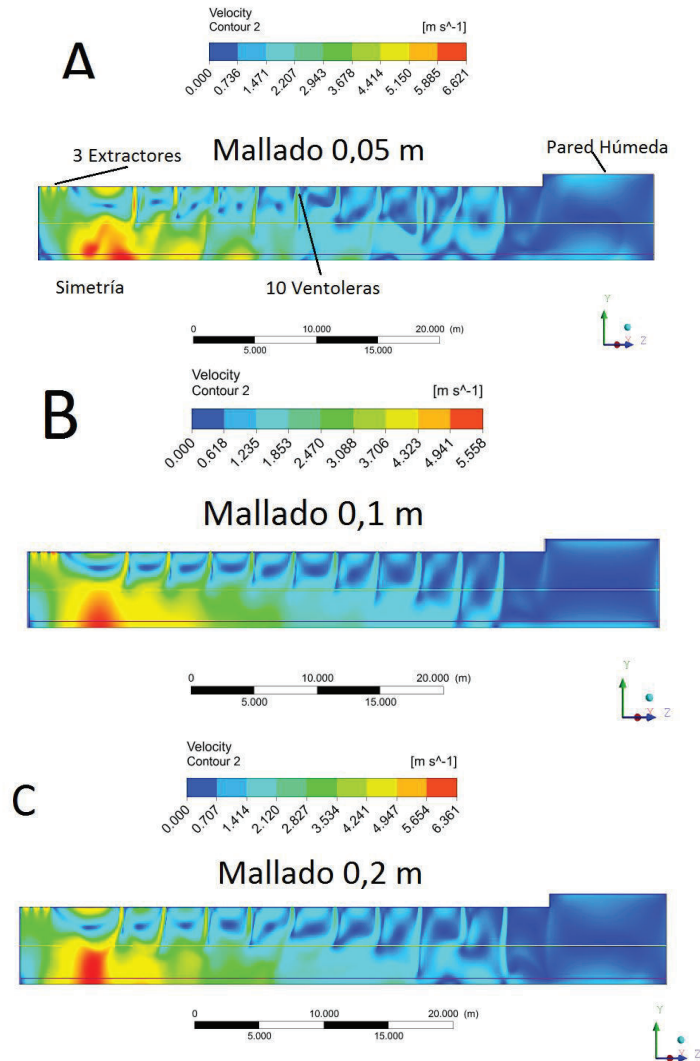


Figura 4.1. Velocidades para tres mallados A (0,01), B (0,1) y C (0.2) metros, (Fuente: Autor)

En todos los casos se puede observar el efecto de velocidad que presentan los extractores, un torbellino que se produce entre los extractores y la ventolera más cercana. Este efecto se pudo verificar en el sitio ya que en esta posición del galpón se pudo advertir velocidad del aire en el sentido longitudinal y también en el sentido transversal. En la parte central del extremo del galpón donde se halla los extractores se pudo observar una velocidad 1,1 metros por segundo en el sentido longitudinal y el sentido transversal el anemómetro giraba en un sentido y luego en el otro sentido sin que

se pudiere establecer el valor de la velocidad en este punto. Este resultado se puede observar en las gráficas A, B y C.

En un punto ubicado a 12 metros se registró una velocidad longitudinal de 2,7 metros por segundo y una transversal de 2,5 metros por segundo, que coincide con la posición del torbellino en las gráficas A, B y C. Se puede asumir con algún margen de error que la magnitud de la velocidad sería la suma vectorial de estos valores que corresponde a 3,68 metros por segundo.

En puntos ubicados a 35 y 75 metros se pudo verificar la presencia de torbellinos de menor importancia con velocidades longitudinales de 2,2 y 1,4 metros por segundo, en tanto que las velocidades transversales se situaron en 0,9 y 0,4 metros por segundo respectivamente. Lo que lleva a suponer que la presencia de los torbellinos o remolinos observados en las gráficas A, B y C corresponde a una representación efectos que se producen en situaciones reales.

Tabla 4.1. Velocidades sobre los extractores medidas en m/s. en Mallado A, B y C.

Mallado/x:y	0,9/5,9	2,40/5,9	4,0/5,9	1,0/1,0	12,0/4,0
A 0,05 metros	5,44	5,66	5,37	1,12	2,10
B 0,1 metros	5,18	5,02	5,60	1,42	2,05
C 0,2 metros	4,89	4,81	5,30	1,09	2,13
Varianza	0,05	0,13	0,02	0,02	0,00

(Fuente: Autor)

En cuanto al mallado se puede mencionar que en forma general no se aprecian variaciones importantes. La tabla 4.1 muestra datos tomados en idénticas ubicaciones en las gráficas de A, B y C en las que se puede apreciar valores similares con una varianza poco significativa, con excepción del segundo extractor en la posición 5,9:2,40 metros. Una variación importante se presenta en el torbellino en el que se observa una varianza de 0,29 valores entre 5,7 y 4,78 metros por segundo respecto al estimado de 3,68 metros por segundo obtenido en base a las lecturas en sentido longitudinal y transversal. En relación a la velocidad de los extractores, se ha medido sobre ellos una velocidad media de 4,91 metros por segundo a partir de lectura tomadas a 10 centímetros, la figura 4.2 muestra las lecturas y la posición relativa. Se puede observar una lectura de 2,8 metros por segundo que corresponde a la ubicación de la polea.

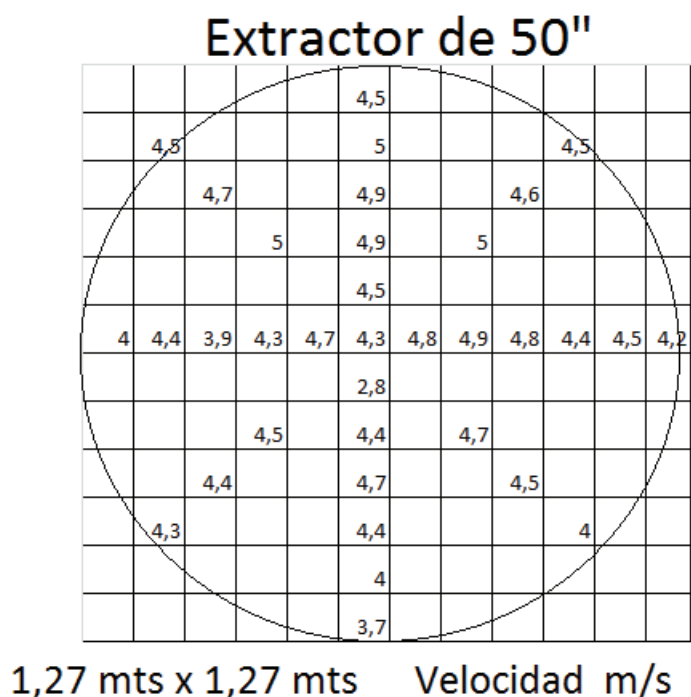


Figura 4.2. Valores y posición relativa de la velocidad en un extractor de 50 pulgadas,

(Fuente: Autor)

Tabla 4.2. Velocidades sobre las ventoleras medidas en m/s. en Mallado A, B y C.

Mallado/x:y	15,60/5,9	22,30/5,9	29,075,9	42,1/5,9	48,75/5,9
A 0,05 metros	5,05	4,79	3,61	2,61	2,73
B 0,1 metros	4,83	4,12	3,72	2,84	2,55
C 0,2 metros	4,81	4,21	3,54	2,67	2,53
Varianza	0,02	0,13	0,01	0,01	0,01

(Fuente: Autor)

De manera similar se ha obtenido las velocidades en puntos situados en las ventoleras obteniendo valores similares en cada caso y varianzas poco significativas que permiten concluir que la simulación no depende del mallado, sino también responde a la naturaleza y comportamiento de fenómeno analizado.

La figura 4.3 muestra las estadísticas de los elementos del mallado para el caso A es decir la malla de 0,05 metros. El 99,86% dentro del criterio de aspecto y el 98,97%

dentro del criterio de calidad de la malla.

Datos y gráficos de las estadísticas de la malla A (0,05 m)

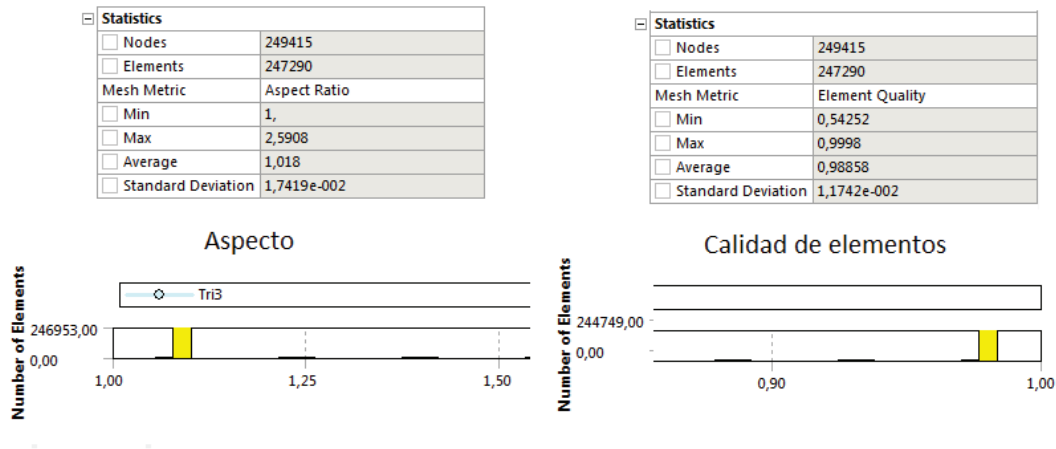


Figura 4.3. Estadísticas de los elementos del mallado para el caso A, (Fuente: Autor)

4.3 Evaluación de resultados.

Las expresiones utilizadas para evaluar el comportamiento de un galpón de túnel son las dimensiones de las estructuras existentes en una granja avícola típica. Sin embargo se debe tener cuidado de cómo se interpretan los resultados. El calor que es extraído debido a la masa de aire que sale, corresponde un volumen de aire a una temperatura mayor que la que entra a través de la pared húmeda. Esta diferencia puede ser positiva en todos los casos inclusive cuando la temperatura interna supere los 40 grados centígrados. El panel húmedo es capaz de disminuir la temperatura respecto a la temperatura exterior, no obstante de que M. Dagtekin y otros [29] concluyen que la velocidad óptima debe encontrarse entre 0,5 y 1,5 metros por segundo, también concluye que no es posible realizar un ajuste matemático al comportamiento. El vapor de agua en el aire a la entrada modifica significativamente el resultado.

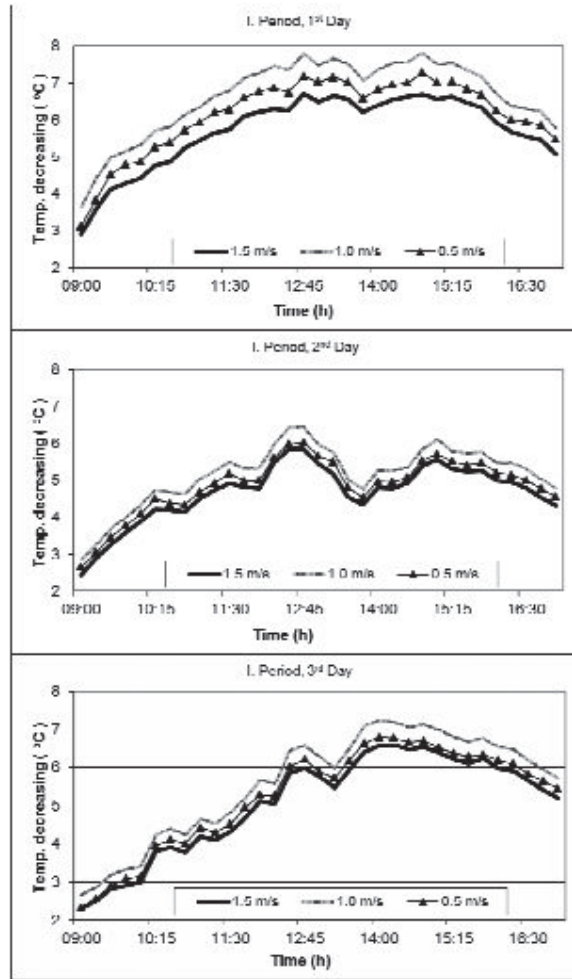


Figura 4.4. Resultados obtenidos por M. Dagtekin y otros [29], (Fuente: The effects of air velocity on The performance of pad evaporative cooling systems, African Journal of Agricultural Research Vol. 6(7), pp.1813-1822, 4 April, 2011 disponible en línea http://www.academicjournals.org/article/article1380898563_Dagtekin%20et%20al.pdf

El trabajo realizado por M. Dagtekin y otros [29] muestra la evaluación en tres diferentes días, entre las 9:00 y 17:00 horas. Se reporta una disminución que aparentemente acompaña la temperatura ambiente externa y se observa que existe un efecto de disminución mayor entre las 12:00 y 14:00 que corresponde a la mayor incidencia del sol y mayor temperatura externa. Esto sugiere que un trabajo más prolongado y la correlación con los parámetros externos requeridos. Caída presión y porcentaje de saturación es ofrecida por los fabricantes de los paneles húmedos. La figura 3.15 reporta temperaturas y humedad relativa tabuladas respecto de la temperatura y humedad del aire que entra en el panel para una velocidad de 1,5 metros por segundo. Se puede deducir que toda esta información resulta poco útil como insumo del modelo

por limitado e inconsistente desde el punto de vista matemático. La aplicación real del modelo deberá tomar estos parámetros de lecturas directas.

El modelo presentado en este trabajo sobre la evaluación de la velocidad como una función de la infiltración a través de una ranura equivalente ha mostrado ser consistente según los datos obtenidos. Muestra también que el efecto que producen aberturas en extractores no utilizados, cortinas poco herméticas, orificios de juntas de paredes, uniones del material de aislamiento y otros defectos constructivos podrían considerarse poco importantes, sin embargo perjudican de manera notable el desempeño del galpón ya que para alcanzar una adecuada velocidad sobre la pared húmeda es necesario utilizar un mayor número de extractores. Las dimensiones requeridas en los paneles se verán afectadas también.

5. Conclusiones y Recomendaciones

El sistema de calefacción de diesel y la ventilación mínima permiten mejorar la calidad del aire en el galpón. El primero introduce una masa de aire caliente en tanto que el otro introduce aire a temperatura ambiente. Debido a la ubicación del área de recepción, las cortinas internas que separan los ambientes y la localización de las ventoleras, la ventilación mínima no tendrá ningún efecto durante las primeras semanas. Se recomienda que el área de recepción cuente con extractores ubicados de manera tal que permitan la recirculación del aire. El uso de filtros de ionización y membrana biológica como sugiere Jerez, S.B., y otros [23] permitirían limpiar el aire sin perder calor entregado por el sistema de calefacción de la misma forma que se estila en locales comerciales. Esto permitirá focalizar y optimizar el uso de energía en las primeras semanas.

En la etapa en la que la ventilación mínima es principalmente utilizada, es decir la dos o tres primeras semanas, el número de extractores no es un factor esencialmente crítico. De las observaciones realizadas en el campo, la cortina utilizada para separar el área de recepción del resto del galpón hace que el aire de la sección adyacente a los extractores sea la única beneficiada por la ventilación mínima. Se aprovecharía esta etapa de la ventilación si solo las ventoleras en el área de recepción son abiertas y las restantes permanecen cerradas. El sistema no cuenta con esta capacidad por lo que se debe instalar compuertas o tapas en las entradas de las ventoleras para conseguir el efecto deseado.

El número de extractores que se utilizan en cada fase de la crianza se puede determinar en base a los objetivo de tiempo en función de la capacidad de desplazamiento de aire, sin embargo, serán las condiciones el clima y la temperatura la que determine en último término cuantos deben usarse. Es un factor muy importante en la determinación de estos parámetros el efecto que produce la infiltración. Las aberturas, grietas o simplemente una puerta mal cerrada o una cortina deficientemente instalada permiten que el aire del exterior ingrese sin que se pueda controlar su masa o temperatura la que en cualquier caso será la temperatura externa.

La tabla 5.1 muestra los datos obtenidos para cinco galpones con características similares, ubicados en la misma circunscripción. Las lecturas corresponden a temperaturas de bulbo seco, globo negro, humedad y el índice WBGT (Wet Bulb Globe

Temperature) o temperatura de bulbo húmedo ponderado que se utiliza para determinar el estrés térmico. Las temperaturas observadas en los aislantes del techo y en dos casos la temperatura de la cubierta.

Tabla 5.1. Temperaturas internas y de las cubiertas con y sin aislante instalado.

Galpón	TA [C]	T _G [C]	WBGT [C]	H%	Tt No aisl [C]	Tt aisl [C]
1	30,52	32,18	26,70	60,12	48,60	
2	28,32	27,97	24,94	68,64		27,68
3	28,22	27,74	24,85	68,49	54,00	27,34
4	30,76	30,51	26,66	63,45		40,30
5	29,19	29,41	25,70	66,04		38,61
6	31,46	31,69	26,83	58,60		41,41

(Fuente: Autor)

Las temperaturas interiores de cada galpón presentan desviaciones reducidas a lo largo del galpón por lo que se puede afirmar que son aproximadamente constantes. Las temperaturas de globo negro permiten establecer la influencia de la radiación solar en el exterior. Y de forma indirecta la temperatura de bulbo húmedo.

En el siguiente ejemplo se ha utilizado los parámetros del galpón 2 para determinar la temperatura de bulbo húmedo utilizando la TA (temperatura ambiente) de 28,32 C (82,976 F), la humedad relativa 68,64%, en la carta psicrométrica para 500 metros de altura. La figura muestra el resultado de 23,83 C.

Utilizando la expresión descrita por Kirchner, R., en su proyecto del Máster en Meteorología de la Universidad de Barcelona, se calcula a partir de WBGT de 24,94 C y la T_G (temperatura de Globo negro) de 27,97 C. Obteniendo un valor de 23,64 C con un error menor al 1% respecto al valor obtenido en la carta psicrométrica.

$$WBGT = 0,7 T_{eh} + 0,3 T_G$$

EC. 5.1

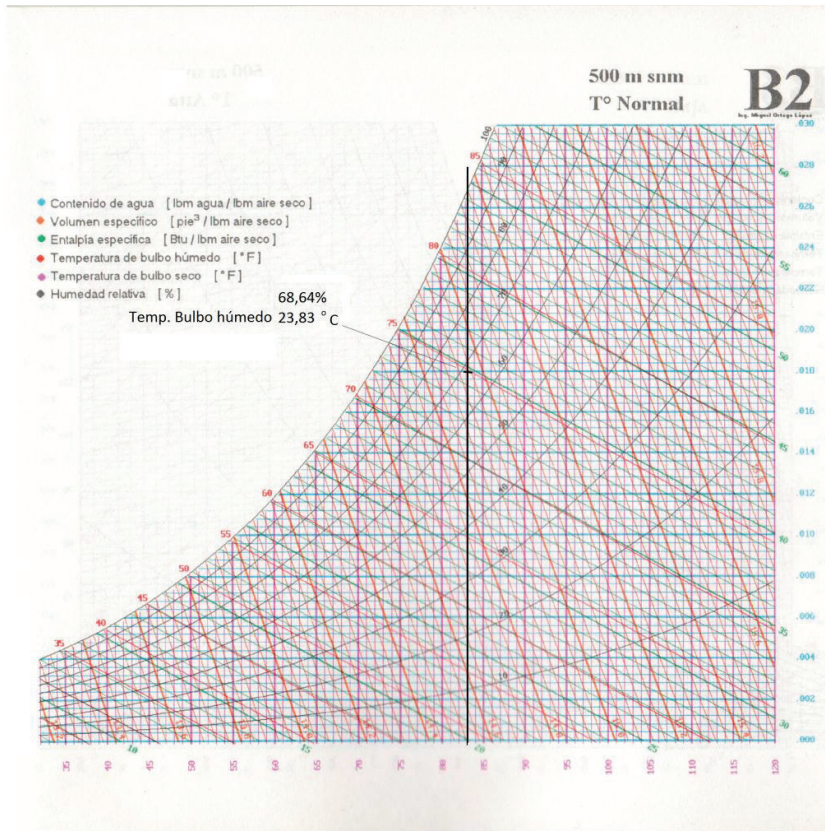


Figura 5.1. Uso de la carta psicrométrica para evaluar temperatura de bulbo húmedo, (Fuente: autor utilizando carta de Miguel Ortega y Adrián Peña (1996))

Todos los galpones con excepción del galpón 1 tienen instalado un aislante para la cubierta. El aislante térmico reflectivo está constituido por aluminio, espuma de polietileno con un espesor de 5 milímetros y aluminio. La principal diferencia radica en la forma y ubicación en la instalación. Las temperaturas registradas reflejan que los galpones 2 y 3 tienen mejor aislamiento térmico en la cubierta que los galpones 4, 5 y 6. En los galpones 2 y 3, el aislante está instalado como un cielo falso a una altura de 2,8 metros presentan una temperatura alrededor de 27,5 grados centígrados. Los galpones con aislante ubicado directamente bajo la cubierta presentan alrededor de 10 grados centígrados más. Y aquel galpón que no cuenta con aislamiento tiene unos 20 grados más. Todo esto sugiere que la instalación de los aislantes es importante y su ubicación potencializa su efecto cuando se consigue una cámara de aire entre la cubierta y el aislante.

Si se observa de manera detenida los valores de la temperatura ambiente y la de globo negro, se puede establecer que la mayor diferencia se presenta en el galpón 1. Éste galpón no cuenta con aislante y la temperatura de la cubierta es de 48,6 C, lo que

sugiere que en este caso existe una contribución por efecto de calor en forma de radiación de la cubierta.

Se puede concluir que la presencia del aislante no solo que mitiga las altas temperatura que se producen en la cubierta que pueden incidir en la temperatura ambiente final, también reducen el área transversal del galpón y por ende el volumen interior. Durante el proceso de repotenciación, la instalación del aislante como un cielo falso ha probado ser efectiva y eficiente para controlar la temperatura al interior de los galpones.

En la sección 2.1 en la que se describe la utilización del sistema de calefacción, se estableció que se requería una enorme cantidad de energía para esta actividad en el orden de los 242.66,85 [KJ] por hora. Un considerando será el costo del combustible requerido que como se advirtió anteriormente, la eliminación del subsidio del GLP cambió la rentabilidad el negocio. El diésel sigue siendo beneficiario de un subsidio por lo que su uso podría incurrir en costos adicionales en el futuro. Para el caso de calentadores eléctricos se reporta que tiene una eficiencia de conversión de 80% por lo que el requerimiento sería unos 87,5 kilovatios. De acuerdo con el decreto 799 los precios del GLP y diésel industrial en el mes de noviembre del 2016, se situaron en 0,673952 y 1,643245 dólares respectivamente, en tanto que de acuerdo con el pliego tarifario del ARCONEL del mismo 2016, el costo del kilovatio para el período de 7:00 a 22:00 horas es 0,09 dólares y para el período 22:00 a 7:00 horas de 0,072 dólares, por lo que se obtiene un precio medio de 0,081 dólares por kilovatio.

Tabla 5.2. Cuadro comparativo de consumo de combustible y energía para calentar el área de recepción.

Combustible	Potencia KW	Consumo por hora	Precio unitario Dólares	Dólares por Hora
GLP	68,68	5,457	0,673952	8,09
Diésel	70,00	6,61	1,643245	10,86
Electricidad 80%	87,50	87,5	0,081	7,09
Electricidad 60%	116,66	116,66	0,081	9,45

(Fuente: Autor)

La tabla muestra que el uso del GLP sigue siendo más conveniente que el diésel. No obstante, se deberá considerar los costos de mantenimiento, transporte y manejo ambiental a la hora de decidir por una alternativa. Además la producción de CO₂ y reducción de O₂ podría ser factor a ser tomado en cuenta. Esto constituiría motivo de un estudio más detenido. El uso de calentadores eléctricos luce como la alternativa más

sugestiva desde el punto de vista de consumo, instalación y sobre todo amigable con el ambiente ya que no genera residuos utilizando una fuente de energía renovable.

Los paneles evaporativos han mostrado ser bastante efectivos en la reducción de la temperatura del aire. Según se reporta en artículos publicados por Dagtekin, M., y otros [29, 30], la efectividad o eficiencia es mayor en los climas mediterráneos es decir cálidos secos, como en Grecia, Portugal y medio oriente. Palmer, J.D.,[17] también ha reportado su uso exitoso en Nuevo México. Su uso en los climas húmedos no es ampliamente recomendado ya que el enfriamiento evaporativo directo no solo disminuye la temperatura del aire, también incrementa la humedad el contenido de agua. En algunos casos puede llegar a valores cercanos al 100% donde ligeras variaciones de la temperatura podrían provocar la condensación. De hecho, incluso en climas de serranía (frio seco) se ha podido observar que se produce la condensación del vapor de agua en las cubiertas. La precipitación del condensado moja la cama incrementando los problemas de salud de las aves.

Otras alternativas como la propuesta de Silva Machado, N., y otros [7] que evalúa el enfriamiento de las cubiertas con agua para reducir el calor al interior de los galpones y micro aspersores en el interior durante la última semana de crianza pueden resultar efectivas. Sin embargo, se ha mencionado los resultados del uso de aislantes y la cámara de aire en el entre techo que mantiene la temperatura en el interior de manera estable, encontrándose que las condiciones en el interior del galpón depende en mayor medida del sistema de ventilación de túnel. Con ciclos de renovación del aire alrededor de 1 minuto, la temperatura y humedad serán el resultado de la contribución de las aves principalmente, por efecto de infiltración y el calor que los aislantes no estén en capacidad de contener.

Los datos obtenidos de las pruebas realizadas el 29 de enero del 2017 muestran que con una velocidad del aire a la salida de los paneles húmedos de 1,4 metros por segundo, humedad relativa de 60,8% y temperatura de bulbo seco de 31,3 grados centígrados en promedio. La humedad en el interior se mantenía estable en 71,2% y la temperatura de 30,5 grados centígrados. Por otra parte se ha podido verificar que la temperatura del aire se mantiene invariante en los extractores aun con velocidades de 5 y 6 metros por segundo. Se concluyó que diferencia de casi un grado con el panel sin agua se debe a que la humedad relativa es lo suficientemente alta para mantener la celulosa de los paneles húmeda. En similares condiciones se activó la bomba de agua de los paneles y se observó una disminución de la temperatura de 6,1 grados

centígrados y la humedad se situó en 83,3%. Se verifica el funcionamiento del panel húmedo como un método para controlar la temperatura en el interior del galpón.

Por ejemplo se puede citar los datos de los paneles de la empresa PERIcool del anexo 2, que muestran curvas de desempeño para su modelo 4545/7 similar a los instalados en la granja ubicada en el sector de Celica cantón Pedro Vicente Maldonado. Para velocidades de 1,5 metros por segundo y un espesor del panel de 15 centímetros se observa una caída de presión en el orden de 20 a 25 pascales y humedad relativa de 85%. En tanto que para los paneles instalados en la granja para la velocidad registrada de 1,4 metros por segundo se obtuvo una lectura de 21 pascales y humedad de 83,3%. La verificación de los parámetros de operación ha permitido utilizar los datos de este fabricante como referente en el desarrollo del trabajo.

De la velocidad del aire dependen varios parámetros del galpón. El modelo de velocidad desarrollado permite establecer la masa de aire que es extraída del ambiente, sin embargo para medir y contrastar esta expresión se recurrió los datos en los extremos de la nave. Los sensores de velocidad o anemómetros son instrumentos relativamente frágiles en ambiente con mucha contaminación por lo que se puede estimar la velocidad a partir de las mediciones de presión en los extremos del galpón y de los factores que caracterizan la infiltración. Siendo la infiltración el principal factor que produce la disminución de la velocidad del aire a lo largo de la estructura.

Un hallazgo adicional que se deriva de la modelación en ANSYS del problema de velocidad del aire en el interior de un galpón, consiste en la distribución de la velocidad sobre el panel o pared húmeda. La velocidad del aire no es constante en todo el panel, y más bien se reduce de forma exponencial con la distancia. La figura 5.2 muestra la simulación en la que se observa un perfil de velocidad aproximadamente constante y un torbellino cerca de la pared húmeda. Los datos obtenidos en sitio reflejan componentes de velocidad en sentido longitudinal y transversal en un sitio localizado al borde de la estructura que alberga las paredes húmedas. Esto es una evidencia adicional de que el modelo computacional realizado, refleja el comportamiento del galpón real.

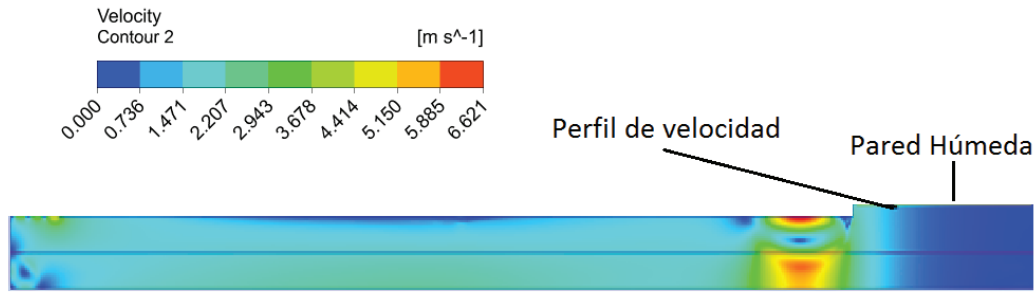


Figura 5.2. Perfil de velocidad en la pared húmeda, (Fuente: Autor)

Por su parte la figura 5.3 corresponde a los datos exportados de una línea a 10 centímetros del borde de la pared húmeda. Los datos reflejan una disminución de la velocidad en el sentido longitudinal lo que hace presumir una reducción en la efectividad de este sistema. La simulación implementada también revela que con el área de pared húmeda disponible la masa de aire que entre debe ser mucho mayor que la que los datos medidos en sitio reportan. Por esta razón se ha de considerar la velocidad real o estimada en el sentido transversal para determinar la masa de aire que efectivamente ingresa. Este resultado, es la evidencia, permite recomendar un estudio más detallado de la pared húmeda y su ubicación.

Velocidad Sobre la Pared Húmeda

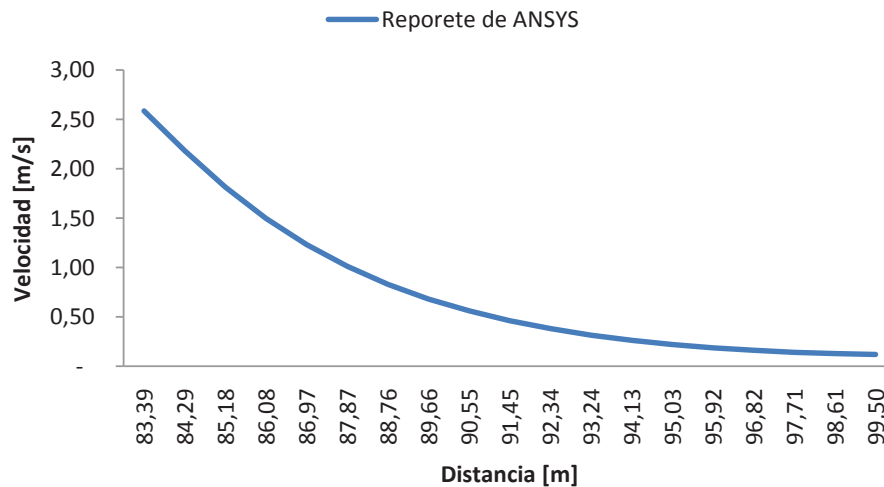


Figura 5.3. Datos del perfil de velocidad obtenido con ANSYS, (Fuente: Autor)

Una ubicación de la pared húmeda en la pared posterior del galpón permitirá un frente de presión negativa más uniforme y una velocidad aproximadamente constante sobre todo el panel. Los trabajos realizados sobre la velocidad en la pared húmeda también deberán

ser considerados para explorar la posibilidad del uso de aire forzado sobre el panel de manera que garantice la mayor eficiencia sin que esto comprometa la velocidad en el interior del galpón. El uso de esta técnica podría llevar a un dimensionamiento más eficaz de la pared húmeda.

La inclusión de instrumentación en los extractores que permita verificar su desempeño es otra línea de desarrollo que se propone como parte de este trabajo. Se ha identificado que no se realizan pruebas de eficiencia de los extractores como recomienda la literatura especializada y una reducción en su capacidad debe ser compensada con un número mayor de éstos. La instrumentación permitirá identificar de mejor forma los parámetros de operación del galpón en su conjunto.

Como se mencionó anteriormente, la pared húmeda debe contar también con instrumentación que determine las condiciones de operación y la temperatura de aire a la salida ya que de esto depende la temperatura final de aire en la salida.

Finalmente, la infiltración que ha sido identificada como el principal factor en la disminución de la velocidad que contrasta con los valores obtenidos de la simulación de ANSYS con paredes herméticas en la que la velocidad es aproximadamente constante hasta llegar a la pared húmeda. Del mismo modo la simulación en ANSYS mostró que la inclusión de entradas de aire a lo largo del galpón produce el efecto descrito y cuantificado con el modelo desarrollado. Por ello es menester poner mucha atención a los detalles constructivos y de operación. La omisión que se produce con los drenajes de agua, los borde de las cortinas, las juntas del aislante térmico del techo, agujeros en las paredes deben ser eliminados o por lo menos reducidos pues pequeñas secciones de menos de 1% producen disminución en la velocidad de más del 50%.

Utilizando el modelo no lineal desarrollado y los parámetros de dimensiones, se realizó la evaluación de la temperatura para las condiciones establecidas en la tabla 5.3. En cada caso se determinó la temperatura de salida que se reporta en la tabla 5.4.

Tabla 5.3. Datos utilizados para simulación con el modelo no lineal.

Datos para simulación					
Temperatura Exterior [C]	Text	31,2			
Temperatura en Pared Húmeda [C]	Tph	25,2			
Densidad de pollos m ⁻²	Dpollos	13	14	15	16
Número de extractores	ne	8	9	10	11
Edad [días]	edad	48			

(Fuente: Autor)

Tabla 5.4. Resultados de temperatura en la salida según modelo no lineal.

Dpollos/ne	13	14	15	16
8	31,36	31,61	31,86	32,11
9	30,98	31,20	31,43	31,65
10	30,67	30,88	31,08	31,28
11	30,43	30,61	30,80	30,98

(Fuente: Autor)

Los valores obtenidos muestran el efecto de incremento de temperatura que se produce cuando una mayor densidad de pollos por metro cuadrado es utilizada, una diferencia de 0,75 grados centígrados se puede advertir entre utilizar 13 o 16 aves por metro cuadrado. Una reducción en 1,13 grados centígrados cuando se utilizan 11 extractores en lugar de 8. Si la temperatura ambiente sube a 35 grados como es característico de la zona y el panel consigue bajar unos 6 grados centígrados como se ha observado, la temperatura del aire que sale a través del panel húmedo sería de 29 grados centígrados. Con esta temperatura en la entrada y 16 aves por metro cuadrado, la temperatura alcanzaría los 34,79 grados centígrados que pondría en graves aprietos a las aves. Una disminución de la densidad a 13 aves por metro cuadrado, produciría que la temperatura descienda a 34,23 grados centígrados. La diferencia es tan solo de medio grado centígrado con una reducción de unas 3600 aves. Esto muestra que la temperatura externa produce un efecto decisivo en la temperatura interna y la producción.

Por otra parte, una reducción de la ranura equivalente en un factor de 10 hace que la temperatura final en las mismas condiciones sea de 31,78 grados centígrados. Esto último refleja la importancia de la hermeticidad del galpón de túnel. Así mismo, el panel húmedo también deberá mejorarse para que su temperatura dependa menos de las condiciones externas.

Trabajos futuros deberán abordar la modelación de las paredes húmedas y las maneras de mantener un desempeño óptimo. Se ha podido verificar que la literatura y especificaciones presentan tablas de temperatura y humedad de entrada, las correspondientes de salida para velocidades bien definidas. La realidad es que la velocidad sobre la pared varía con la distancia cuando se dispone en forma lateral en el galpón. La simulación ha mostrado también un torbellino por efecto de una velocidad del panel no uniforme y una geometría (cajón o cuarto de la pared húmeda) que produce corrientes de aire en dirección transversal dando origen a un poco deseable torbellino que se evidenció en sitio con lecturas de velocidad en el sentido transversal del galpón.

Referencias Bibliográficas

- [1] Guía de Manejo del Pollo de Engorde, Cobb-Vantress Inc. Agosto 2008.
- [2] Manejo del Ambiente En el Galpón de Pollos de Engorde, Aviagen, Inc.,2009.
- [3] R. S. Gates, J. D. Simmons, K. D. Casey, T. J. Greis, H. Xin, E. F. WheelerC. L. King y J. R. Barnett, "Fan Assessment Numeration System (FANS) Design and Calibration Specifications", ASABE, Michigan, 2002.
- [4] J. Simmons y B. Lott, "Reduction of Poultry Ventilation Fan Output Due to Shutters", ASABE, Michigan, 1997.
- [5] J. Simmons, B. Lott y T. Hannigan, "Minimum Distance between Ventilation Fans in Adjacent Walls of Tunnel Ventilated Broiler Houses", ESABE, Michigan, 1998.
- [6] M. Silva¹, F. Baêta, I. Tinôco, S. Zolnier y A. Ribeiro, "Evaluation of a simplified model for estimating energy balance in broilers production housing", *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 11, nº 5, pp. 532-536, 2007.
- [7] N. Silva Machado, I. D. F. Ferreira Tinôco, S. Zolnier, C. Akemi Mogami, K. S. Oliveira Rocha y J. L. De Oliveira, "Evaluation of a System of Roof Cooling in Broiler Sheds in the Brazilian Central-West", ASABE, Michigan, 2008.
- [8] C. Sanz Jimeno, "Climatización Geotérmica de un Edificio", Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 2010.
- [9] J.J.R. Fedder, J.J. Leonard, y J.B. McQuitty "Broiler Heat and Moisture Production Under Commercial Conditions", Departamento de Ingenieria Agrícola, Universidad de Alberta, Edmonton, Alberta, 1983.
- [10] E. O. Ovideo-Rondón, "Ahorro energético en granjas avícolas", *XLVI Simposium Científico de Avicultura*, pp. 1-21, 2009.
- [11] E. Rogdakis, I. Koronaki, D. N. Tertipis y A. Mustafa, "An Energy Evaluation of a Maisotsenko Evaporative Cooler Based on Cylinder Geometry", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 82, pp. 347-356, 2013.
- [12] T. M. Ridolfi de Carvalho, D. J. Moura y I. Alencar Nääs, "Study of Statistical Methods in the Spatial Variability Measurement of Climatic Variables within Broiler Houses", ASABE, Michigan, 2008.

- [13] T. M. Ridolfi Carvalho, D. J. Moura, P. A. Martins Leal, J. M. Massari y K. A. Oliveira Lima, "Heat Transfer to Calculate Minimum Ventilation Rates For Broilers House", ASABE, Michigan, 2012.
- [14] J. Purswell, B. Luck y J. Davis, "Effect of Air Deflectors on Fan Performance in Tunnel-Ventilated Broiler Houses with a Dropped Ceiling", ASABE, Michigan, 2014.
- [15] S. R. Pires de Moraes, F. Da Costa Baêta, M. Barcellos Café, T. Yanagi Junior y A. L. Ribas de Oliveira, "Operational Characterization of Cooling Systems Coupled with Positive and Negative Tunnel Ventilation in Broiler Chicken Houses in Southwest of Goiás", ASABE, Michigan, 2008.
- [16] M. V. Pérez Villa y R. A. Villegas Calle, "Procedimientos Para El Manejo De Residuos Orgánicos Avícolas", Universidad de Antioquia, Medellín, 2009.
- [17] J. Palmer, "Evaporative Cooling Design Guidelines Manual for New Mexico Schools And Commercial Buildings", New Mexico Energy, Minerals and Natural Resources Department, Mexico, 2002.
- [18] G. Brown "Reducing costs and energy by replacing inefficient ventilation fans", Rural Industries Research and Development Corporation, Gobierno de Australia 2015
- [19] K. D. Casey, R. S. Gates, E. F. Wheeler, H. Xin, Y. Liang, A. J. Pescatore, y M. J. Ford, "On-Farm Ventilation Fan Performance Evaluations and Implications", Poultry Science Association, Inc. 2008
- [20] B. D. Luck, J. D. Davis y J. L. Purswell, "Effect of Measurement Density on Characterizing Air Velocity Distribution in Commercial Broiler Houses", ASABE, Michigan, 2013.
- [21] R. S. Gates, J. D. Simmons, K. D. Casey, T. J. Greis, H. Xin, E. F. Wheeler, C. L. King y J. R. Barnett, "Fan Assessment Numeration System (FANS) Design and Calibration Specifications", ASABE, Michigan, 2002
- [22] R. Kulkarni y S. Rajput, "Performance evaluation of two stage indirect/direct evaporative cooler with alternative shapes and cooling media in direct stage", *International Journal Of Applied Engineering Research*, Dindigul, vol. 1, nº 4, pp. 800-812, 2011.
- [23] S. B. Jerez, S. Mukhtar, W. Faulkner, K. Casey, M. S. Borhan y R. A. Smith, "Evaluation of Electrostatic Particle Ionization and BioCurtain™ Technologies to Reduce Air Pollutants from Broiler Houses", ASABE, Michigan, 2013.

- [24] E. Hernán Maimbil, N. Hernán Romera, N. Burgos y G. Araya, "Modelo: Proyecto de Inversión en granja de pollos," *X Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas*, pp. 1-16, 2012.
- [25] R. Gómez Girini, G. René López y J. Félix Fernández, "Metodologías Para Auditorias Energéticas en Edificios", *Seminario Nacional Universidad Tecnológica Nacional Seminario Nacional Universidad Tecnológica Nacional*, pp. 1-17, 2012.
- [26] J. Frejo, "Los paneles de refrigeración, como medio para reducir el calor", *Selecciones Avícolas*, pp. 515-518, Agosto 2005.
- [27] G. R. Egüez Dávila y J. D. Vásconez Cáceres, "Automatización del Galpón De Crianza Avícola A- 1 de Pollos Broilers del Iasa Fase I: Diseño, Simulación Y Construcción Prototipo", Escuela Politécnica del Ejército, Quito, 2007.
- [28] J. Dean y I. Metzger, *Multistaged Indirect Evaporative Cooler Evaluation*, Denver: U.S. General Services Administration - National Renewable Energy Laboratory, 2014.
- [29] M. Dağtekin, C. Karaca, Y. Yildiz, A. Başçetinçelik y Ö. Paydak, "The effects of air velocity on the performance of pad", *African Journal of Agricultural Research*, vol. 6, n° 7, pp. 1813-1822, 2011.
- [30] M. Dağtekin, C. Karaca, L. Sangün y Y. Yildiz, "Determination of the relationship among air velocity, cooling efficiency and temperature decrease at a cellulose based evaporative cooling pad", *African Journal of Agricultural Research*, vol. 5, n° 24, pp. 3477-3482, 2010.
- [31] M. Corria y I. Nääs, "Adapting A Tunnel Ventilation For High Density Broiler Production", ASABE, Míchigan, 2011.
- [32] J. M. Ciutat Lacambra, "Sistemas de Ventilación y Refrigeración para Aves", *Aragón - Ganadería*, pp. 300-303.
- [33] Y. Cengel y M. Boles, *Termodinámica*, Séptima ed., McGraw-Hill Interamericana de España, 2012.
- [34] V. Carvalho, T. Yanagi Junior, H. Xin, R. Gates, F. Alves Damasceno y S. De Moraes, "Mathematical Model for Thermal Environment and Broiler Chickens Performance Prediction in Acclimatized Housings", ASABE, Míchigan, 2008.

- [35] J. Camargo, C. Ebinuma y S. Cardoso, "Three Methods To Evaluate The Use Of Evaporative Cooling for Human Thermal Comfort", *Engenharia Térmica (Thermal Engineering)*, vol. 5, nº 2, pp. 9-15, 2006.
- [36] M. Brazales Palma y R. E. Rada Alprecht, "Estudio de factibilidad para el diseño de una organización que realice los procesos de crianza, faenamiento y distribución de pollos en los campus gustavo galindo v. y peñas de la ESPOL", Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2009.
- [37] G. Brown, "Reducing Costs and Energy by Replacing Inefficient Ventilation Fans", Rural Industries Research and Development Corporation, Australia Marzo 2015.
- [38] S. Bellés Medall, "Recursos Prácticos a Aplicar en las Granjas de Broilers Contra el Calor", *Jornadas Profesionales de Avicultura de Carne*, nº 8, pp. 1-28, 2005.
- [39] M. Baracho, I. Nääs y M. Miragliotta, "Evaluation of Broiler Housing Indoor Air Quality During Heating and During the use of Two Types of Ventilation: Natural And Tunnel", ESABE, Michigan, 2001.
- [40] T. U. S. o. America, "Laboratory Method of Testing Fans for Aerodynamic Performance Rating", American National Standards Institute, Washington , 2001.
- [41] O. Amer, R. Boukhanouf y H. Ibrahim, "A Review of Evaporative Cooling Technologies", *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 6, nº 2, pp. 111-117, 2015.
- [42] M. Alodan y A. Al-Faraj, "Design and Evaluation of Galvanized Metal Sheets as Evaporative Cooling Pads", *College of Food Sciences and Agriculture, King Saud University*, vol. 18, pp. 9-18, 2005.
- [43] D. d. S. Agroalimentaria, "Buenas Prácticas Para el Manejo, Uso, Transporte y Eliminación de la Cama Usada Y Mortalidad Avícola", Gobierno Autonomo Departamental Santa Cruz, Santa Cruz.
- [44] S. Abbouda y E. Almuhanha, "Improvement of Evaporative Cooling System", *International Journal of Latest Trends in Agriculture and Food Sciences*, vol. 2, nº 2, pp. 83-89, 2012.
- [45] Heraeus Noblelight, "Understanding Infrared Heating", Heraeus, Hanau, 2011.

- [46] Federal Ministry for Economic Cooperation and Development , “Strategic Environmental Assessment- agovernance tool for sustainable development”, BMZ, Bonn, 2011.
- [47] Ministerio de Minas y Energía República de Colombia, “Sistemas de gestión de la energía ISO 50001”, SENA, 2011.
- [48] American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, “Proposed Standard 189.1P, Standard for the Design of High-Performance Green Buildings”, ASHARE, 2009.
- [49] SILOS CORDOBA, “Paneles de Celulosa”, [en línea]. Disponible:
http://images.poultry.com/files/company/1447/10_REFERENCIA_PANELES_CELULOSA.pdf.
- [50] American Society of Agricultural and Biological Engineers, “Low-Income Country Membership Application”, [en línea]. Disponible:
https://www.asabe.org/media/8818/asabe_low_income_country_application.pdf.
- [51] Organización Mundial De Sanidad Animal, “Guía De Buenas Prácticas Ganaderas”, Roma, 2010.
- [52] Organización Internacional de Normalización, “Gana el desafío de la energía con ISO 50001”, Ginebra, 2011.
- [53] “Estimation of Black Globe Temperature for Calculation of the Wet Bulb Globe Temperature Index”, *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, vol. 2, pp. 1-9, 2011.
- [54] ARCONEL (Agencia de Regulación y Control de Electricidad), “PLIEGO TARIFARIO PARA LAS EMPRESAS ELÉCTRICAS”enero – diciembre 2016
- [55] E. A. M. Bokkers ,H. H. E. van Zanten ,y H. van den Brand, “Field study on effects of a heat exchanger on broiler performance, energy use, and calculated carbon dioxide emission at commercial broiler farms, and the experiences of farmers using a heat exchanger” Poultry Science Association Inc.2010
- [56] Zhang Zhi, Richard S Gates, Zou Zhirong y Hu Xiaohui, “Evaluation of ventilation performance and energy efficiency of greenhouse fans”, *Int J Agric & Biol Eng*, Vol. 8

No.1 pag.103, febrero 2015

- [57] Munters, "CELdek 7090-15 Evaporative Cooling Pad", 2011. [en línea]. Available: https://www.munters.com/globalassets/inriver/resources/products/coolers--humidifiers/1782-celdek-7090_15_gb.pdf.
- [58] ASHRAE, ASHRAE Handbook, M. Owen, Ed., Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2009.
- [59] ANSYS, Inc, ANSYS Fluent Tutorial Guide, Pensilvania, 2013.
- [60] J. W. Worley, M. C. Schaefer, B. D. Fairchild, M. Czarick, M. P. Lacy, S. A. Thompson, J. R. Kastner, C. W. Ritz y L. P. Naeher, "Ammonia and Fine Particulates Inside and Outside Tunnel Ventilated Broiler Houses – A First Look", ASABE, Michigan, 2007.
- [61] Secretarías de la OCDE y de la FAO, Perspectivas agrícolas, OCDE-FAO, 2005-2014.
- [62] V, De Basilio, "Estrés Calórico en Aves" Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía. Instituto de Producción Animal, Maracay 2009.
- [63] F. Moreno, A. Portilla, "Diseño de un sistema de acondicionamiento de aire de un plantel avícola", Escuela Politécnica Nacional 2000.
- [64] R. Kirchner, "Determinación del índice de estrés térmico WBGT", Tesis de Máster en Meteorología, Universidad de Barcelona, 2010
- [65] S. Gil, M. Mayocchi, L.J. Pellizza, "Experimental estimation of the luminosity of the Sun" American Journal of Physics Vol. 34. Agosto del 2006. Pp 728-733.
- [66] K. Schwean-Lardner, H. Classen, "Iluminación para Pollos de Engorde" Aviagen 2010.
- [67] V.E. Dimiceli, S. F. Piltz, S. Amburn, "Estimation of Black Globe Temperature for Calculation of the Wet Bulb Globe Temperature Index" Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2011 Vol II WCECS 2011, October 19-21, 2011, San Francisco, USA
- [68] Quiles y M.L. Hevia, "Termorregulación en las Gallinas" Depto. de Producción Animal, Fac. de Veterinaria, Univ. de Murcia. 2004

- [69] B. D. Luck, J. D. Davis y J. L. Purswell, "Effect of Measurement Density on Characterizing Air Velocity Distribution in Commercial Broiler HouseAssessing Cross-Sectional", Míchigan, 2014.
- [70] PERICool, "PANEL EVAPORATIVO" <http://pericoli.com/inglese/html/pericoolr.html>,
- [71] Hubbard, "Broiler Management Manual Fast Growth" 2016
- [72] Aviagen Inc., "Performace Ovjectives Broiler 308", 2014
- [73] C, Meruane y R. Garreaud, "Determinación de Humedad en la Atmósfera" Marzo 2017 [en línea] http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/modHR_antecedentes.pdf
- [74] M. Ortega y A. Peña, "Cartas Psicrométricas", Escuela Politécnica Nacional, Sep. 1996
- [75] S. M. Salazar Torres, "Auditoría ambiental inicial y plan de manejo ambiental para una granja avícola ubicada en el cantón Salcedo de la provincia de Cotopaxi", Escuela Politécnica Nacional, (Tesis de Ingeniero).Quito, 2010.
- [76] S. Ramirez, Revista Lideres, marzo 2017 [en línea] <http://www.revistalideres.ec/lideres/competitividad-reto-sector-avicola-alimentos.html>
- [77] V. H. Hidalgo Díaz, "Numerical study on unsteady cavitating flow and erosion based on homogeneous mixture assumption", Tsinghua University, (Disertación de Grado de Doctor). Junio, 2016.

ANEXO I
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Simulación en MATLAB

El trabajo de simulación utilizando elementos finitos en una dimensión ha sido realizado en MATLAB para evaluar el modelo que permite calcular la temperatura en el interior del galpón. El elemento finito corresponde a un volumen delimitado por la sección transversal del galpón y una profundidad que se varía en función de la velocidad del aire. Esta consideración se realiza para que la masa de aire que pasa de un elemento al siguiente sea constante. El algoritmo de simulación requiere un conjunto de parámetros que corresponde a las temperaturas observadas en los diferentes elementos constitutivos del sistema.

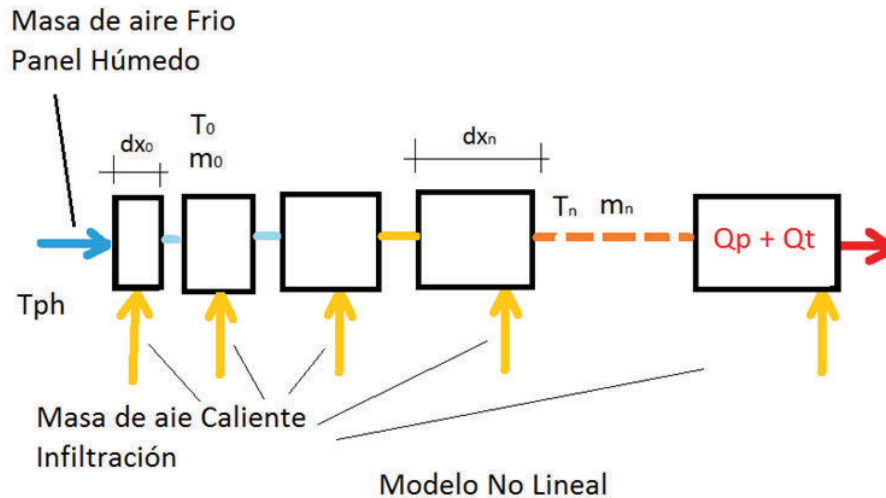


Figura A.1 Modelo no lineal desarrollado. (Fuente Autor)

Parámetros de simulación:

```
Text = 35; %Grados Centígrados - temperatura exterior
Tph = 29; %Grados Centígrados - temperatura del aire en la pared H
Tint = 31.2; %Grados Centígrados - temperatura inicial
Ttecho = 50; %Grados Centígrados - temperatura medida en la cubierta
Tpared = 32; %Grados Centígrados - temperatura medida en las paredes
daire = 1.22; %[Kg m^-3] -densidad del aire
Cpaire = 1.005; %[KJ Kg^-1 k^-1] - calor específico del aire
Lg = 100; %[m] - Longitud del galpón
Dg = 12; %[m] - Ancho del galpón
Hg = 2.5; %[m] - Altura promedio del galpón
Lph = 18; %[m] - Longitud de la pared húmeda
Hph = 1.5; %[m] - Altura de los paneles de la pared húmeda
ne = 11; %número de extractores
Aex = 1.27 * 1.27; %[m^2] - área de un extractor de 50 pulgadas
Vex = 4.92; %[m s^-1] - velocidad promedio de un extractor
Vg = Vex*Aex*ne/(Dg*Hg); %[m s^-1] - velocidad del aire en x = 0
k = 0.00000631; %GAP - ranura equivalente
VgLg = Vg*exp(-k*Lg^2); %Velocidad en pared Húmeda
dpollos = 13; %Densidad de pollos por metro cuadrado
edad = 48; %edad de los pollos en días
```

Calculo del calor generado por los pollos según la edad.

```
Qp = Lg*Dg*dpollos*(6.38-0.782*edad+0.109*edad^2-0.00146*edad^3)/3600;
%[wattios]
```

Calculo de calor debido a la infraestructura para la temperatura externa

```
hParedes =0.4381;    %[J m^-2 s^-1 C^-1]
hVentanas =0.6514;  %[J m^-2 s^-1 C^-1]
hTecho =0.2795;     %[J m^-2 s^-1 C^-1]
hPuertas =0.5356;   %[J m^-2 s^-1 C^-1]
hPiso =0.8377;      %[J m^-2 s^-1 C^-1]
hParticiones =0.7887;  %[J m^-2 s^-1 C^-1]
hParticiones_concreto = 0.4504; %[J m^-2 s^-1 C^-1]
hParedes_Venta = 0.4; %
AParedes = 2*Lg*Hg + 2*Dg*Hg;
ATEcho = Lg*Dg;
```

```
Qt = (hTecho*ATEcho*(Ttecho-Tint)+hParedes*AParedes*(Tpared-
Tint)*hParedes_Venta+ (1-hParedes_Venta)*hVentanas*AParedes*(Tpared-
Tint))/1000; %[vatios]
```

Calculo de la ranura equivalente

```
%gap = 0.165617046; %[m^2] área equivalente por cada metro longitudinal
fgap = 2624.6758;
gap = fgap * k;
```

Evaluación de la temperatura en la salida (extractores)

```
t = 0.1; %[s] Tiempo de intervalo - define el tamaño del elemento finito

x = 100; %[m] - posición del elemento finito inicial
Vx = Vg*exp(-k*x^2); %[m s^-1] - velocidad inicial
volPH = Hg*Dg*Vx; %[m^3] - volumen de aire en el elemento finito
dx = Vx*t; %[m] - intervalo o profundidad del elemento finito
```

Evaluación de la mezcla de aire que ingresa por la pared húmeda y el interior

```
masaPH = volPH * daire;
masaInf = gap * Vx * dx * daire;
T = (masaPH * Tph + masaInf * Text)/(masaPH + masaInf);
Q = (masaPH + masaInf)* Cpaire * (273.15 + T);
Q = Q + (dx * Qt)/Lg + (dx * Qp)/Lg;
T = (Q / (Cpaire * (masaPH + masaInf)))-273.15;
TF(1) = T;
masaEq = masaPH + masaInf;
x = x - dx;
i = 1;
```

Evaluación de la mezcla a lo largo del galpón

```
while x > 0
    i = i+1;
    Vx = Vg*exp(-k*x^2);
    dx = Vx*t;
    masaInf = gap * Vx * dx * daire; %[Kg] - masa de infiltración
    T = (masaEq * T + masaInf * Text)/(masaEq + masaInf);
    Q = (masaEq + masaInf)* Cpaire * (273.15 + T);
```

```

Q = Q + (dx * Qt)/Lg + (dx * Qp)/Lg;
T = (Q / (Cpaire * (masaEq + masaInf)))-273.15;
TF(i) = T;
masaEq = masaEq + masaInf;
x      = x - dx;
end

```

Simulación en ANSYS

Por otra parte se utilizó ANSYS para contrastar los valores de velocidad obtenidos con el modelo no lineal desarrollado en MATLAB y los medidos utilizando un anemómetro de mano. Debido a que el trabajo estudia el efecto de la velocidad por efecto de la infiltración producida por las condiciones de la edificación de los galpones se realizó la simulación dando énfasis a este parámetro.

ANSYS FLUENT, el módulo de análisis utilizado resuelve las ecuaciones de Navier Stokes aplicando un método numérico "Large Eddy Simulation (LES)" que evalúa las expresiones temporales en el espacio físico o el espacio de Fourier. El método reduce la complejidad de las expresiones filtrando el espacio mediante la obtención de un promedio de las variables reduciendo así las variaciones menos significativas. La evaluación se realiza considerando elementos finitos caracterizados por los campos de velocidad y de presión que se relacionan por el tensor de la variación de estas magnitudes con sus vecinos.

En primer término se define la geometría que corresponde a un galpón de 100 metros de largo y 12 metros de ancho. El uso de simetría permite que el volumen de control se reduzca a la mitad en el sentido transversal. Dado que la geometría es muy regular es decir no se ha incorporado detalles como bordes de las ventoleras u otros elementos geométricos ya que su escala es muy reducida respecto a las dimensiones generales. Se ha incorporado en la geometría segmentos que serán definidos como extractores, ventoleras o inlets y la pared húmeda. Estos elementos incorporados en la geometría se muestran en la gráfica, donde los extractores han sido creados en forma individual en razón de que se realizan simulaciones con un número diferente de extractores. Las ventoleras en un número de 10 aparecen como un único elemento ya que actúan de manera coordinada, es decir todas se abren o todas se cierran.

Los cambios entre ventilación mínima y de túnel pasando por la de transición se consiguen cambiando las condiciones iniciales de estos elementos para que se comporten como una pared.

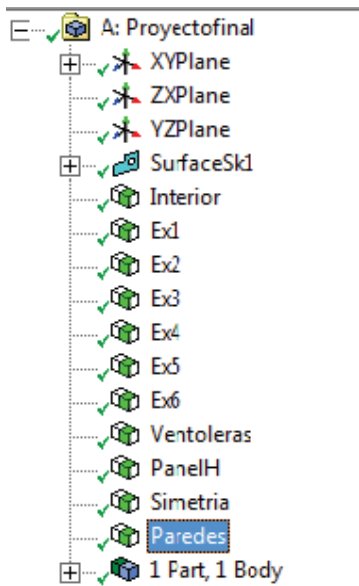


Figura A.2 Elementos geométricos definidos para la simulación. (Fuente Autor)

Para la geometría del galpón se ha obtenido tres tamaños de mallado con elementos mínimos de 0.05 metros, 0.1 metros y 0.2 metros. En cada caso los elementos generados son de geometría muy regulara casi cuadrados.

Las condiciones iniciales han sido definidas para los extractores considerando los parámetros ofrecidos por los fabricantes. Una presión de 45 Pa y un flujo de masa de 7 kilogramos de aire por segundo.

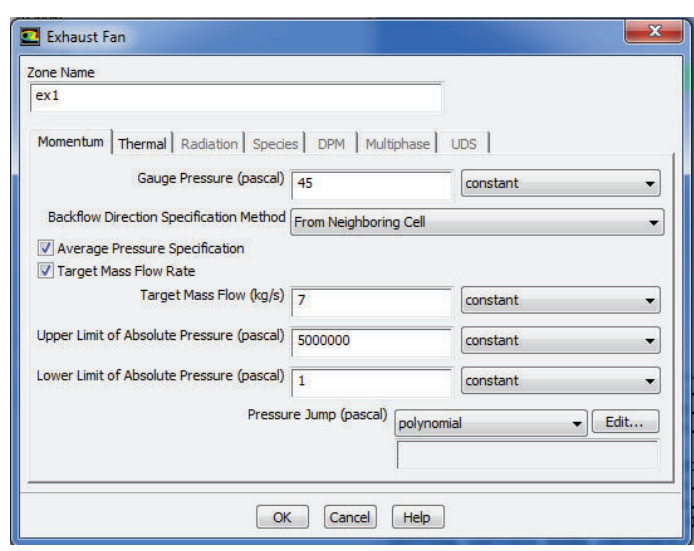


Figura A.3 Parámetros de simulación para los extractores. (Fuente Autor)

Para las ventoleras se ha seleccionado una entrada de ventilación con una presión de 12 Pa que corresponde a valores medidos in situ.

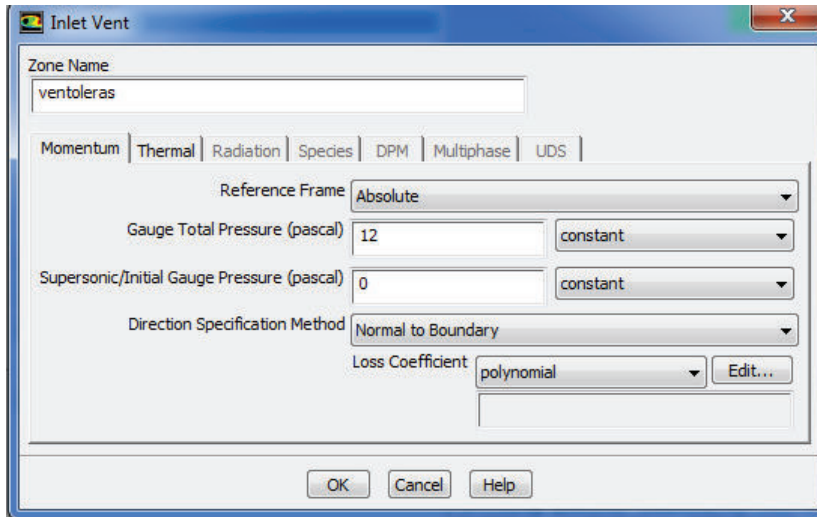


Figura A.4 Parámetros de simulación para las ventoleras. (Fuente Autor)

La pared húmeda se configura como entrada de presión. A diferencia de las ventoleras, la pared húmeda no permite que el aire ingrese de manera libre produciendo una diferencia de presión.

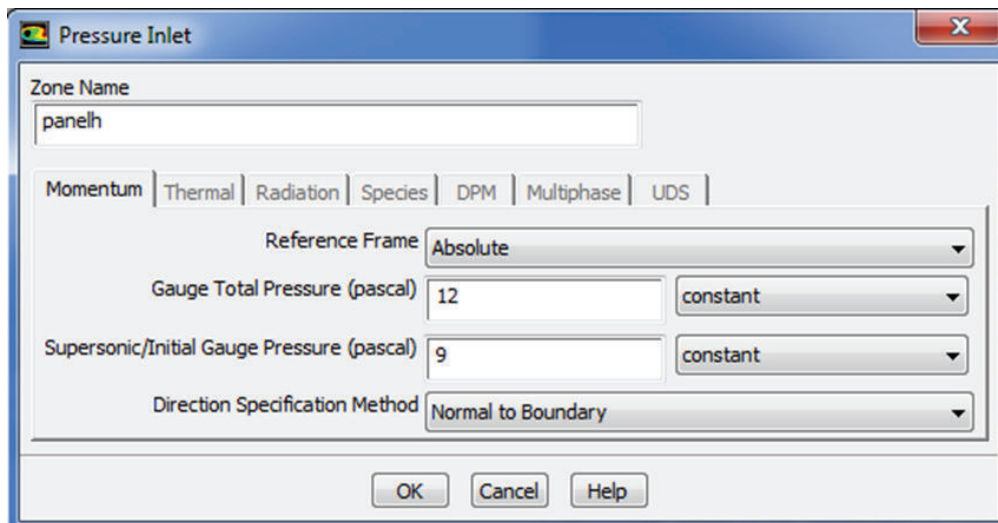


Figura A.5 Parámetros de simulación para la pared húmeda. (Fuente Autor)

Los valores y constantes de referencia son

Reference Values

Compute from

Reference Values

Area (m ²)	1
Density (kg/m ³)	1.225
Depth (m)	1
Enthalpy (j/kg)	0
Length (m)	1
Pressure (pascal)	25
Temperature (k)	300
Velocity (m/s)	0
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4

Figura A.6 Parámetros de simulación de los valores de referencia. (Fuente Autor)

La solución se define bajo los siguientes parámetros o métodos. En los que se relaciona la presión y la velocidad del aire donde la variación se calcula en base a variaciones de mínimos cuadrados.

Solution Methods

Pressure-Velocity Coupling

Scheme

Spatial Discretization

Gradient

Pressure

Momentum

Figura A.7 Método de solución utilizado. (Fuente Autor)

El perfil de velocidad muestra una velocidad aproximadamente constante en el interior del galpón y un remolino en la vecindad de la pared húmeda. Este remolino es causado por el aire que ingresa con mayor velocidad en la primera parte de la pared y debido a una rápida caída de la presión sobre el panel la velocidad decrece en forma exponencial.

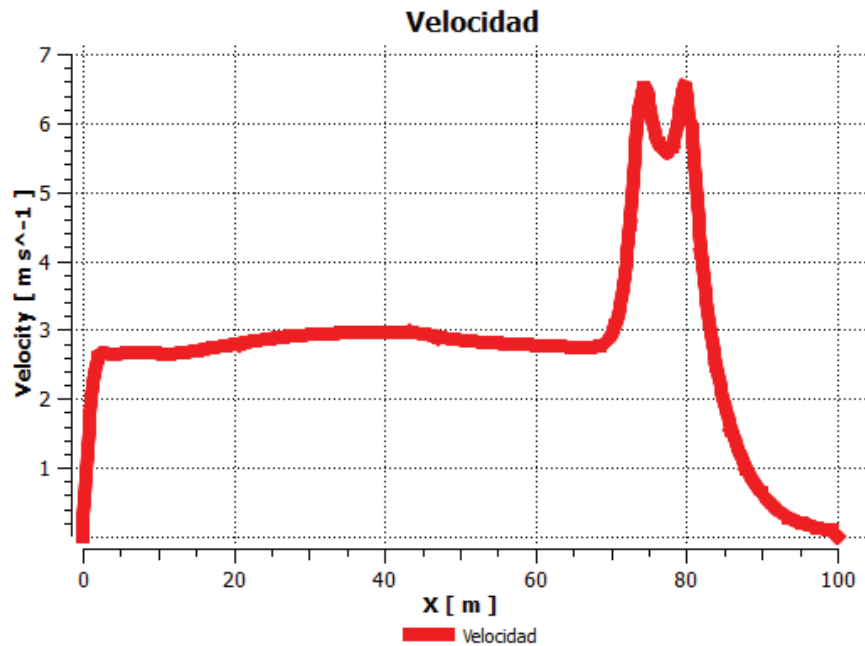


Figura A.7 Perfil de velocidad con 3 extractores y la pared húmeda. (Fuente Autor)

En la simulación se agregan los inlet o ventoleras para producir el efecto de infiltración que de manera natural existe debido a los defectos constructivos y ausencia de sellos en las cortinas y otros puntos de entrada de aire. No es posible contemplar en la simulación 2D todos estos elementos. La figura A.8 muestra una serie de picos que reflejan la turbulencia producida por las entradas de aire a gran velocidad que perturban de manera local el flujo del aire. Se observa también que la velocidad del aire en su conjunto disminuye de manera acentuada como una exponencial decreciente.

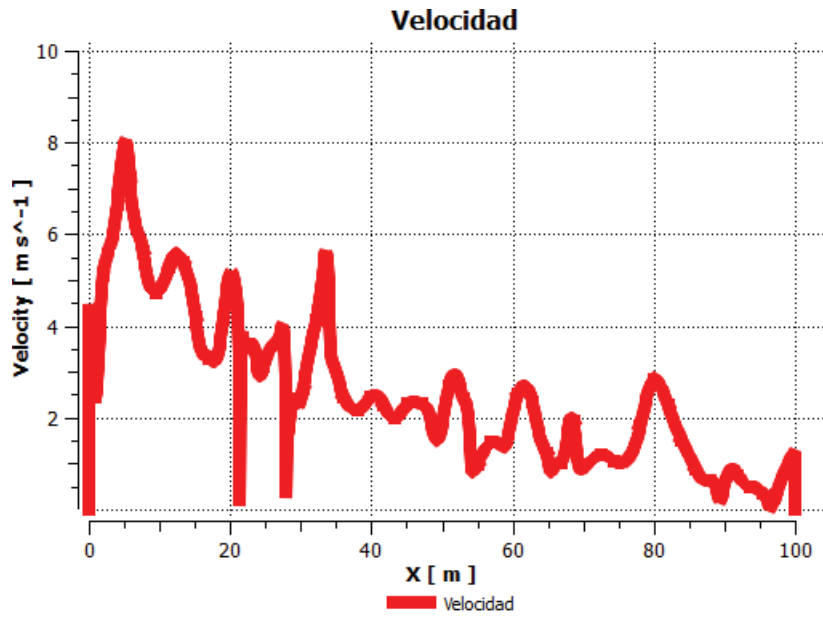


Figura A.8 Perfil de velocidad con 3 extractores, ventoleras y la pared húmeda. (Fuente Autor)

ANEXO II.
DATOS TÉCNICOS DE COMPONENTES DEL SISTEMA

ANEXO III.
DATOS TÉCNICOS DE LOS INSTRUMENTOS UTILIZADOS