

**Reducción de las Cargas Térmicas de Climatización Mediante Medidas Pasivas en Techo y  
Envolvente en una Nave Avícola ubicada en un Clima Cálido Tropical**

**Ingrid Dayanna Niño Cárdenas, Leydi Marcela Hernández Mesa**

**Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico**

**Director**

**Julián Ernesto Jaramillo Ibarra**

**Dr. Ingeniería Térmica**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas**

**Escuela de Ingeniería Mecánica**

**Bucaramanga**

**2018**

**Tabla De Contenido**

Introducción.....	12
1. Metodología.....	15
1.1 Simulación De Las Condiciones Actuales De Operación.....	16
1.1.1 Localización.....	16
1.1.2 Tramamiento de la Información Meteorológica.....	16
1.1.3 Temperatura del Cielo.....	18
1.1.4 Temperatura del Suelo.....	19
1.1.5 Información Arquitectónica.....	20
1.1.6 Definición de las Cargas Internas.....	22
1.1.7 Infiltraciones.....	26
1.1.8 Equipos de Ventilación.....	28
1.2 Validación de la Simulación.....	30
1.2.1 Configuración del Galpón para la Primera Semana.....	31
1.2.2 Equipos de Calefacción.....	31
1.2.3 Etapa Experimental.....	33
1.2.3.1 Calibración de las Termocuplas.....	34
2. Modelo Matemático de Referencia.....	36
2.1 Balance de Calor en Superficies.....	36

2.2 Balance de Calor Convectivo del Aire Interior.....	37
2.3 Balance en Superficies Interiores.....	37
2.4 Balance en Superficies Exteriores.....	39
3. Diseños Pasivos.....	39
4. Resultados.....	41
4.1 Influencia de la Temperatura del Suelo en los Resultados.....	41
4.2 Condiciones Actuales de Operación.....	41
4.3 Resultados de la Validación.....	43
4.4 Resultados de los Diseños Pasivos.....	44
4.4.1 Diseño Pasivo III.....	47
5. Conclusiones.....	49
Referencias.....	50

**Lista de Tablas**

	Pag.
Tabla 1 <i>Condiciones climáticas del lugar</i> .....	17
Tabla 2 <i>Dimensiones del galpón</i> .....	21
Tabla 3 <i>Propiedades de materiales en muros interiores</i> .....	21
Tabla 4 <i>Propiedades de materiales en muros exteriores</i> .....	10
Tabla 5 <i>Propiedades de materiales de cielo raso</i> .....	22
Tabla 6 <i>Temperaturas en diferentes puntos del galpón</i> .....	24
Tabla 7 <i>Porcentaje de calor latente y sensible</i> .....	24
Tabla 8 <i>Carga térmica aportada por los pollos</i> .....	25
Tabla 9 <i>Áreas de infiltración en las diferentes zonas del galpón</i> .....	27
Tabla 10 <i>Coefficiente de Stack</i> .....	27
Tabla 11 <i>Clasificación del edificio</i> .....	27
Tabla 12 <i>Coefficiente de viento</i> .....	28
Tabla 13 <i>Condiciones de operación para la primera semana de cría</i> .....	31
Tabla 14 <i>Especificaciones equipo Polystat referencia 1-C6</i> .....	34
Tabla 15 <i>Valores de temperatura media para las dos mediciones realizadas</i> .....	35
Tabla 16 <i>Condiciones actuales de operación del galpón para la última semana de cría</i> .....	42
Tabla 17 <i>Ponderación de las ganancias y pérdidas al interior del galpón para la última semana de cría</i> .....	43
Tabla 18 <i>Análisis del galpón sin equipos de ventilación para la última semana de cría del ave</i> .....	46

**Lista de Figuras**

	Pag.
<i>Figura 1.</i> Metodología de la simulación.....	17
<i>Figura 2.</i> Ubicación del galpón respecto al Norte. ....	18
<i>Figura 3.</i> Temperatura exterior para los días 21, 22 y 24 de enero de año 2017 y temperatura media .....	19
<i>Figura 4.</i> Perfil horario de la temperatura del cielo para la última semana de cría.....	20
<i>Figura 5.</i> Vista isométrica del galpón en SketchUp .....	20
<i>Figura 6.</i> Perfil de iluminación al interior del galpón.....	23
<i>Figura 7.</i> Imagen termográfica del pollo en la primera semana.....	24
<i>Figura 8.</i> Sensación térmica de los pollos.....	26
<i>Figura 11.</i> Distribución de los ventiladores al exterior del galpón.....	28
<i>Figura 9.</i> Horario de operación de los equipos de ventilación.....	29
<i>Figura 10.</i> Ubicación de los extractores en el interior del galpón.....	29
<i>Figura 12.</i> Curva de operación para los equipos de ventilación.....	30
<i>Figura 13.</i> Vista planta del galpón en la primera semana de cría.....	31
<i>Figura 14.</i> Criadoras calefactoras.....	32
<i>Figura 15.</i> Horario de operación de los equipos de calefacción.....	32
<i>Figura 16.</i> Distribución de termocuplas en el interior del galpón.....	33
<i>Figura 17.</i> Instalar del datalogger de temperatura en el interior del galpón.....	34
<i>Figura 18.</i> Curva de calibración de termopar.....	35
<i>Figura 19.</i> Balance de calor en las superficies interiores.....	38

<i>Figura 21.</i> Variación de la Temperatura del aire respecto a la Temperatura del suelo.....	41
<i>Figura 22.</i> Comportamiento de la temperatura interior y exterior del galpón en la última semana de cría.....	42
<i>Figura 23.</i> Tasa interna de ganancia de calor por convección al interior del galpón.....	43
<i>Figura 25.</i> Temperatura al interior del galpón vs temperatura ambiental para la última semana de cría en el diseño III.....	47
<i>Figura 26.</i> Tasa interna de ganancia de calor por convección al interior del galpón.....	48
<i>Figura 27.</i> Tasa de almacenamiento de calor en la zona.....	48

**RESUMEN**

**TITULO:** **REDUCCIÓN DE LAS CARGAS TÉRMICAS DE CLIMATIZACIÓN EN UNA NAVE AVÍCOLA UBICADA EN UN CLIMA CÁLIDO TROPICAL, MEDIANTE EL USO DE MEDIDAS PASIVAS EN TECHO Y ENVOLVENTE\***

**AUTORES:** **INGRID DAYANNA NIÑO CÁRDENAS\*\***  
**LEYDI MARCELA HERNÁNDEZ MESA\*\***

**PALABRAS CLAVE:** **Medidas pasivas, Pollo, Carga Térmica, Confort, Temperatura Interna, EnergyPlus, OpenStudio.**

**DESCRIPCIÓN:**

La temperatura de confort en la crianza de pollos de engorde en climas cálidos húmedos representa un parámetro crítico que incide en el rendimiento y tasa de mortalidad de las aves. Si la temperatura del aire al interior del galpón no está en los rangos recomendados, los métodos de disipación de calor de los pollos para regular su temperatura corporal se hacen insuficientes, causando estrés calórico en las aves y generando así su muerte. El objetivo de esta investigación fue conocer la carga térmica aportada por las diferentes superficies del galpón, que están ayudando a aumentar la temperatura interior y estimar su reducción al implementar medidas pasivas de climatización en un galpón de 2170 m<sup>2</sup> con aproximadamente 26040 aves al interior, mediante su simulación energética en OpenStudio. Los resultados obtenidos en la simulación fueron comparados con la temperatura del aire medida experimentalmente al interior del galpón para la primera semana de crianza y se obtuvo una diferencia porcentual media de 0.68%. Las medidas de eficiencia energética (MEE) implementadas en cubierta, cielo raso y envolvente disminuyeron la ganancia solar por superficies opacas en un valor de 146,17 kW. Se obtuvo una disminución de temperatura de 1.23 °C para la semana más caliente del año.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra Dr. Ingeniería Térmica.

**ABSTRACT**

**TITLE:** **REDUCTION OF COOLING LOAD IN A POULTRY SHED LOCATED IN A WARM TROPICAL CLIMATE, THROUGH THE USE OF PASSIVE METHODS IN CEILING AND ENVELOPE\***

**AUTHORS:** **INGRID DAYANNA NIÑO CÁRDENAS\*\***  
**LEYDI MARCELA HERNÁNDEZ MESA\*\***

**KEYWORDS:** **Bioclimatic, Passive Method, Broiler, Thermal Load, Comfort, Poultry, EnergyPlus, OpenStudio.**

**DESCRIPCIÓN:**

The broiler comfort temperature in hot and humid climatic represents a critical parameter which impacts the performance and the mortality rate in the broilers. If the temperature of the air inside the broiler houses isn't within the recommended ranges, the heat dissipation methods of the broilers to regulate their body temperature become insufficient, causing heat stress in the birds and thus generating their death. The objective of this research was to know the thermal load contributed by the different surfaces of the poultry which are helping to increase the interior temperature and estimate its reduction by implementing passive air conditioning measures in a 2170 m<sup>2</sup> poultry with approximately 26040 birds inland, by means of the energetic simulation in OpenStudio. The outcome of simulation was compared with the inside temperature experimental data for the first week growth. The efficiency energy measures decrease the solar gain through opaque surfaces about 146,17 [kW] for the warmest hour. The best reduction of temperature was 1.23 [°C] for the insulation ceiling and white finished on facade and roof.

---

\* Bachelor Thesis.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra Dr. Ingeniería Térmica.

## Introducción

Los pollos requieren condiciones de temperatura de confort que van desde los 32 °C para el primer día, hasta 21 °C finalizando el periodo de crianza con condiciones de humedad relativa entre 50 y 70% (Aviagen, 2010a). Mantener a las aves en su zona de confort térmico es necesario para que estas se desarrollen de manera saludable y culminen el ciclo de crecimiento.

La mortalidad de las aves aumenta cuando estas son sometidas a condiciones de estrés por calor durante las últimas semanas (Mashaly et al., 2004). Además de ello, los productores se ven afectados por la disminución en los parámetros productivos, que se refleja en que la ganancia en peso y puede presentar una reducción del 35% durante las últimas dos semanas de la crianza, para aves sometidas a temperatura de 32°C, respecto al incremento en peso para el mismo periodo, pero a una temperatura de 21°C (Cooper & Washburn, 1998). La relación entre el alimento consumido respecto al peso ganado por los pollos (tasa de conversión alimenticia), aumenta durante la sexta semana a temperaturas superiores a esta última (Estrada-Pareja, Márquez-Giron, & Restrepo-Betancur, 2007). En climas cálidos con temperatura ambiente que alcanza los 30°C la parvada transfiere calor en exceso mediante jadeo, sin embargo cuando la humedad relativa supera el 70%, este mecanismo se vuelve insuficiente y no les permite regular su temperatura corporal por sí mismas (Aviagen, 2009). Por esta razón, la cría de pollos de engorde a escala industrial requiere de ventilación que ayude a las aves a transferir el calor al aire circundante mediante convección.

La ventilación en los galpones puede ser natural en naves abiertas o forzada en naves con ambiente controlado. La ventilación forzada usa extractores de aire que crean una presión negativa dentro del galpón, introduciendo el aire exterior al interior de la nave, permitiendo la renovación

del aire circundante. Este tipo de ventilación puede ser manejada como ventilación mínima para clima frío o con una temperatura similar a la temperatura de confort del ave, ventilación de transición para una temperatura ambiente con máximo 6°C arriba de la temperatura de confort y ventilación de túnel para climas con diferencia de temperatura mayor a los 6°C entre la temperatura ambiente y la de confort del pollo (Aviagen, 2010b)

La operación de una nave avícola implica gastos energéticos en equipos de iluminación, criadoras para calentar el recinto durante la etapa inicial de la crianza, transporte de alimento y ventilación, llegando a consumos mensuales de 1075 kWh de los cuales aproximadamente un 80% corresponden solo a la operación de los extractores, y contribuyendo a las emisiones de gases de efecto invernadero, que para el año 2012 en Colombia estuvo por el orden de 8,2 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> por consumo energético del sector residencial, industria manufacturera y agropecuario (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2016). Bajo estas condiciones y la necesidad de mantener a las aves en un ambiente confortable, la eficiencia energética de la nave y la reducción de las cargas térmicas de climatización representa un foco de investigación para los productores del sector avícola, el cual superó las 140 mil toneladas de pollo producidas en Colombia para el mes de junio del año 2018 (Fenavi, n.d.). El primer factor por evaluar a la hora de reducir consumos energéticos o querer lograr el confort, antes de involucrar la instalación de equipos de ventilación o aire acondicionado es la arquitectura bioclimática o medidas pasivas de climatización que comprende el estudio del diseño del recinto, el aprovechamiento de las condiciones climáticas del lugar y los elementos de la envolvente para asegurar el confort al interior de una edificación (Pajek & Košir, 2017), el estudio de esta área es reciente pero ampliamente investigado e implementado en el sector residencial presentado reducciones significativas superiores al 40% para medidas como desplazamiento, sombras y ventilación natural (Eliopoulou & Mantziou, 2017); medidas

como intercambiador de calor tierra-aire bajo el suelo de la nave (Laknizi et al., 2016) y principalmente la implementación de paneles evaporativos han sido objeto de investigación (Chávez & Melchor, 2014), al punto en que estos últimos son ampliamente usados y recomendados en los manuales de manejo de ambiente en galpones para zonas climáticas con valores bajos de humedad relativa (Aviagen, 2010a).

Una de las metodologías empleadas en el diseño de viviendas y en general en el área de la ingeniería es el modelado y simulación de las condiciones de temperatura y fluidos mediante softwares especializados, permitiendo la valoración de factores críticos a tener en cuenta en la construcción o evaluación de la viabilidad en propuestas de diseño; las opciones de construcción bioclimática como el ejercicio de simular y evaluar resultados previos se han complementado para optimizar el uso de la energía y lograr condiciones de confort, tal es el caso de estudios de simulación como, el comportamiento térmico de elementos constructivos en Matlab (Illampas, Kyriakidis, & Michael, 2017) y la determinación del consumo energético implementando techo frío y reducción de la carga térmica de enfriamiento con EnergyPlus y OpenStudio donde se encontró reducción de temperatura interna de hasta 1,4°C (Kolokotroni et al., 2018). La simulación energética de naves avícolas es limitada en el sentido en que la evaluación de los efectos que trae implementar medidas pasivas en una edificación se ha profundizado para construcciones habitadas por personas. En galpones se han realizado simulaciones mediante la dinámica de fluidos computacional para conocer el efecto de la ubicación de las ventanas del galpón en el confort térmico de los pollos (Guerra, 2017), además de ello la institución especializada en parámetros técnicos y de producción avícola Aviagen recomienda minimizar los efectos de calor radiante del sol para reducir el estrés por calor, es por ello que se requiere el análisis desde la transferencia de

calor de los elementos constructivos, las condiciones meteorológicas y la carga térmica aportada al recinto por los pollos.

En esta investigación se plantea reducir la carga térmica del galpón aplicando medidas pasivas que modifiquen los elementos de envolvente y techo del diseño actual, simulando el comportamiento energético en el software OpenStudio (Alliance for Sustainable Energy, n.d.), para conocer los efectos sobre las ganancias y pérdidas de carga en la nave previo a una intervención física de la misma, analizada en la etapa en la que la diferencia entre la temperatura de confort del pollo y la temperatura ambiente presenta su valor más grande en un clima cálido, es decir la sexta semana de crianza, donde se hace crítica la disminución de la temperatura interior para lograr condiciones de confort.

## **1. Metodología**

El proyecto se evaluó en dos etapas del ciclo de vida del pollo. La primera etapa contempla la primera semana de vida del animal en la cual los requerimientos de confort están para temperaturas cercanas a los 32°C y humedades comprendidas entre el 50 y 70%. Para este periodo se realizaron medidas experimentales de temperatura interior del galpón, y se validaron con la simulación realizada bajo las mismas condiciones de operación.

La segunda fase está planteada en la última semana de cría, debido a que el requerimiento de temperatura de confort (temperaturas de 21 °C para humedades entre el 50 y 70%) se hace más

exigente a causa de las condiciones ambientales presentes en el lugar (altas humedades y altas temperaturas), afectando los parámetros de rendimiento y la tasa de mortalidad.

### **1.1 Simulación de las Condiciones Actuales de Operación**

Se determinó el comportamiento energético de un galpón para cría de pollos mediante el uso de la herramienta computacional OpenStudio, determinando pérdidas y ganancias de calor generadas por la fachada del edificio, cielo raso, cubierta y fuentes internas como luces, equipos y pollos. Los flujos de calor fueron obtenidos luego realizar la simulación para la última semana del periodo de cría, bajo condiciones de carga interior ofrecida por los pollos en esta misma semana. Para este periodo el galpón opera con densidades de 12 pollos/m<sup>2</sup>.

La simulación se realizó en la última semana de crianza, para determinar las variables que están contribuyendo al aumento de la temperatura del aire en el interior del galpón, y se esté afectando el confort de las aves.

**1.1.1 Localización.** El proyecto se realizó en una granja ubicada en el municipio de Lebrija (Santander, Colombia) orientada a 60° respecto al norte, a una latitud 7° Norte y longitud 73° Oeste, con una altura de 937 msnm.

**1.1.2 Tramamiento de la información meteorológica.** El programa OpenStudio requiere de un archivo climático en formato EPW con información meteorológica. Para su creación, se trabajó con el software Elements, el cual permite crear y editar archivos de clima personalizados. Los registros de información para la creación del fichero climático fueron suministrados por el IDEAM y corresponden a información medida para los años 2016 y 2017, por la estación

Meteorológica número WMO 23195250 del Aeropuerto Palonegro ubicado en Municipio de Lebrija. Los datos medidos se muestran en la tabla 1.

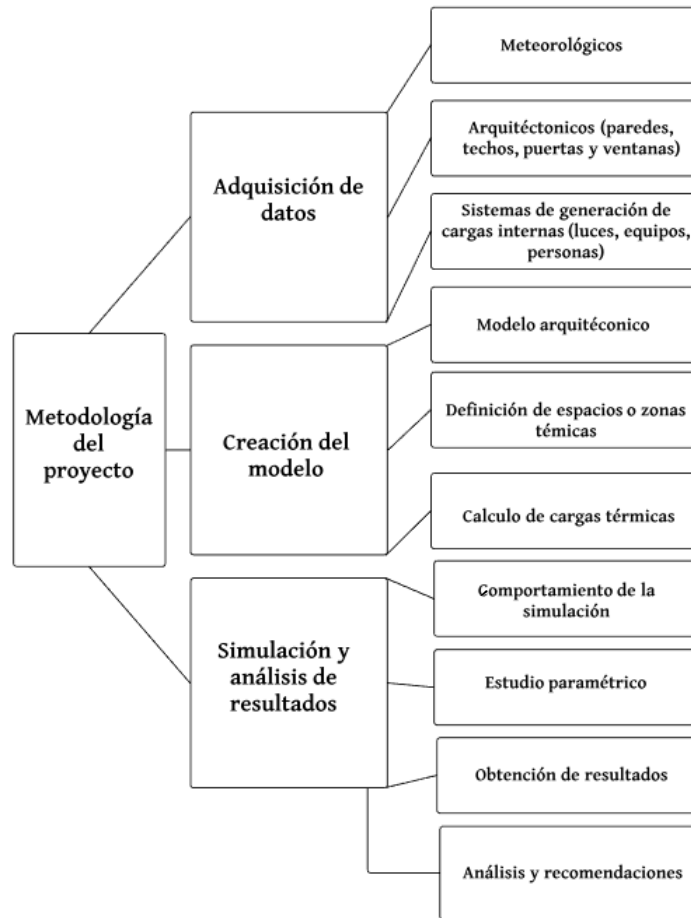


Figura 1. Metodología de la simulación. (Sanchez Castellanos & Meza Moreno, 2014)

Tabla 1  
Condiciones climáticas del lugar

Temperatura (°C)*		Humedad relativa (%HR)*		Radiación solar (kw)	Presión atmosférica (kpa)
Media (±desv.est)	Rango	Media (±desv.est)	Rango	Media	
22.08 (±2.57)	18.00-30.00	89.65 (±12.22)	44-100	600	86.7

Adaptada de archivo climático del IDEAM, estación meteorológica ubicada en el aeropuerto Palonegro.



Figura 2. Ubicación del galpón respecto al Norte (Google, n.d.).

El archivo histórico suministrado por el IDEAM, presentaba información faltante de 33 horas para variables como temperatura de bulbo seco, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento. Por lo cual se calculó la media de los datos correspondientes a dos días antes y dos días después del dato que no tenía registros. El valor obtenido de la media entre datos se tomó como el registro que faltaba. Figura 3.

**1.1.3 Temperatura del cielo.** El cálculo de la temperatura del cielo se realizó utilizando la ecuación (1) referenciada en el Manual de EnergyPlus (Bigladder Software, n.d.)

$$Sky_{temperature} = \frac{(Horizontal_{IR})^{2.5}}{\sigma} - Temperature_{Kelvin} \quad (1)$$

Donde  $Horizontal_{IR}$  es la intensidad de radiación infrarroja en  $W/m^2$ . Sigma es la constante de Stefan-Boltzmann y equivale a  $5.6697 \times 10^{-8} [W/m^2 * K^4]$ . Para el cálculo de la radiación infrarroja se trabajó con la siguiente ecuación.

$$Horizontal_{IR} = Sky_{emissivity} * \sigma * Temperature_{drybulb}^4 \quad (2)$$

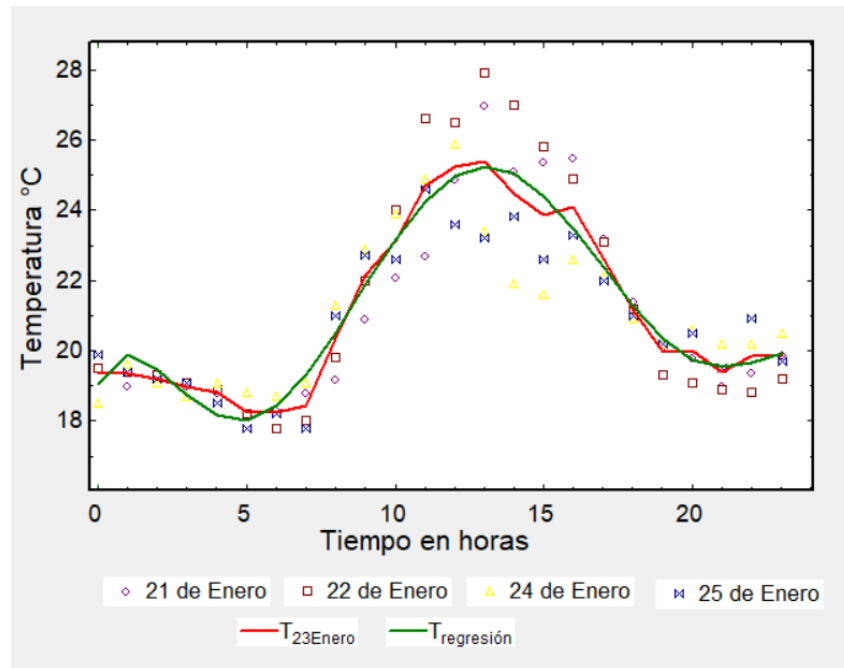


Figura 3. Temperatura exterior para los días 21, 22, 24 y 25 de enero de año 2017 y temperatura media.

$$Sky_{emissivity} = (0,787 + 0,764 * \ln\left(\frac{Temperature_{dewponit}}{273}\right)) + (1 + 0,0224N - 0,0035N^2 + 0,00028N^3) \quad (3)$$

Se tomó el valor de la temperatura del punto de rocío del archivo histórico de la estación meteorológica del Aeropuerto Palonegro, este valor debe estar en (K). N es el porcentaje de nubosidad del cielo. Para cielo despejado se considera (N=0).

La temperatura del cielo se calculó para los días de simulación que corresponde a la primera y última semana del ciclo de cría del pollo, se calculó una media para un día y se generó un perfil de temperatura para 24 horas, diferente para la primera semana y para la última, figura 4.

**1.1.4 Temperatura del suelo.** De acuerdo con la referencia para entradas y salidas de EnergyPlus, se tomó el valor de la temperatura del suelo 2°C debajo de la temperatura del aire promedio en un mes.

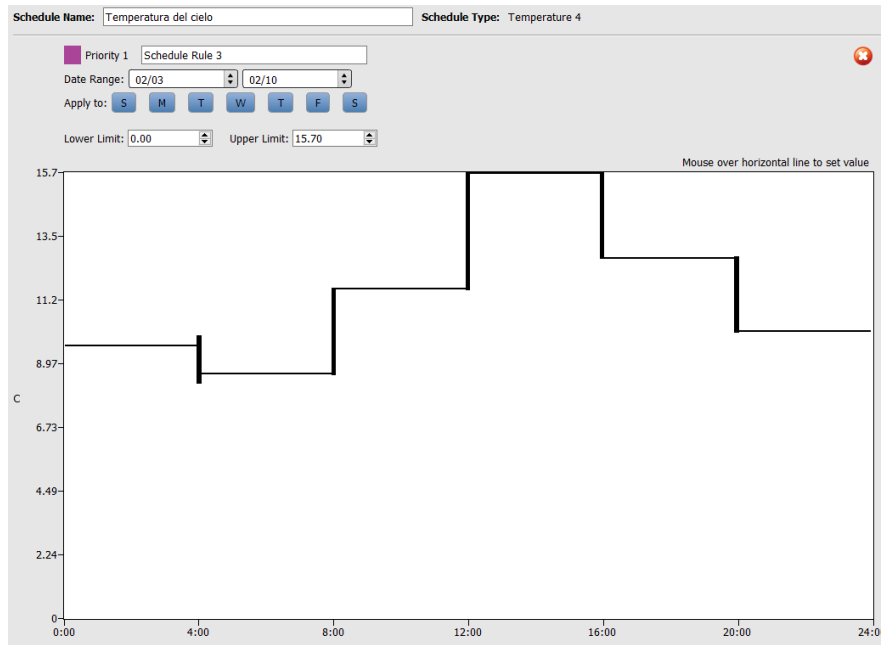


Figura 4. Perfil horario de la temperatura del cielo para la última semana de cría.

**1.1.5 Información arquitectónica.** El galpón consta de cuatro zonas termicas, según su diseño actual , como se puede observar en la figura 5. La primera zona corresponde al área de almacenamiento de alimentos y demás insumos que requiere los pollos para su crecimiento. Las zonas 2 y 3 son cuartos laterales conectados a las zona 4, por estos se da el ingreso de los pollos (inicio del ciclo de cría) y salida (finalización del ciclo de cría). En la zona 4 ocurre todo el proceso de crecimiento, desde el primer día hasta que finaliza el ciclo. En la tabla 2 se muestran las mediciones realizadas in situ.

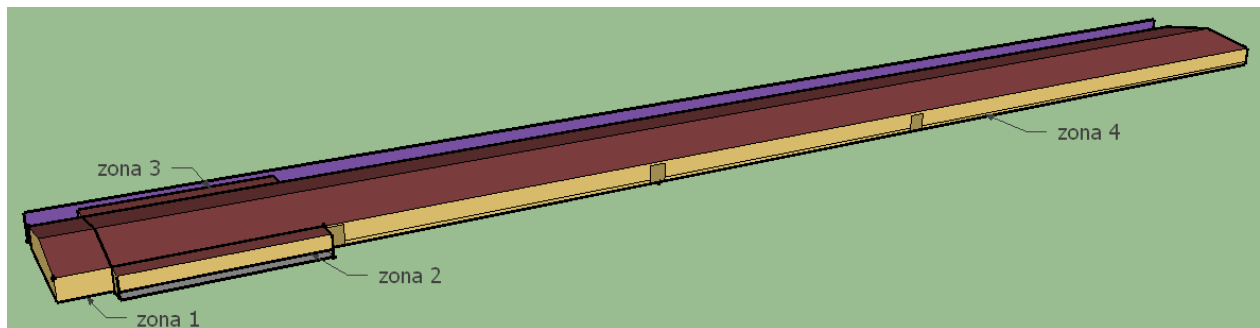


Figura 5. Vista isométrica del galpón en SketchUp.

Tabla 2

*Dimensiones del galpón.*

Zona	Altura piso a cielo raso (m)	Altura piso a techo exterior (m)	Área de piso (m <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )
I	2.37	3.66	70	211.05
II	-	2.37	46	109.02
III	-	2.37	46	109.02
IV	2.37	3.66	2170	5142.90

**1.1.5.1 Materiales de muros interiores y exteriores.** Los muros interiores son los encargados de dividir cada zona térmica del galpón. Para el caso en estudio, se cuenta con muro de ladrillo que divide la zona térmica 1 de la 4 y espacios en la zona 2 y 3 que dividen a la zona 4.

Tabla 3

*Propiedades de materiales en muros interiores*

Propiedades a Temperatura ambiente (24°).				
Material	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Cp (kJ/kg*K)	k (W/mK)	Espesor (m)
Ladrillo común	1281.48	0.79	0.48	0.22
Aplanado de cemento arena	2000	1.05	1.4	0.015

Las propiedades térmicas se toman de (Cengel & Boles, 2011)

Los muros exteriores son la envolvente externa del galpón. Estos son los encargados del aislar térmicamente el interior.

Tabla 4.

*Propiedades materiales exteriores*

Propiedades a Temperatura ambiente (24°). Cengel				
Material	Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	Cp [KJ/kg*K]	k [W/mK]	Espesor [m]
Zinc	7140	0.389	116	0.001
Ladrillo común	1281.48	0.79	0.48	0.22
Aplanado de cemento arena	2000	1.05	1.4	0.015
Hierro	7870	0.447	80.2	0.008
Polipropileno	910	1,925	0.12	0.001
Cascarilla de arroz	92	13,180	0.036	0.02

Las propiedades térmicas se toman de (Cengel & Boles, 2011)

**1.1.5.2 Materiales de cielo raso y cubierta.** La cubierta exterior del galpón está elaborada en zinc y el cielo raso es de polipropileno. La distancia entre el cielo raso y la cubierta exterior es de 1.29 m. En la tabla 5, se muestran los materiales para ambas cubiertas.

Tabla 5

*Propiedades de materiales de cielo raso*

Material	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Cp (KJ/kg*K)	k (W/mK)	Espesor (m)
Polipropileno	910	1,925	0.12	0.0005
Zinc	7140	0.389	116	0.001

Las propiedades térmicas se toman de (Cengel & Boles, 2011)

**1.1.6 Definición de las cargas internas.** Para el balance de calor al interior del galpón, EnergyPlus tiene en cuenta las ganancias internas y el tipo de fuente que las produce. Para ellos se definieron cargas internas y perfiles de uso para iluminación, equipos de calefacción (criadoras) y pollos.

**1.1.6.1 Luces.** Las luces internas proporcionan longitudes de onda corta en el rango visible del espectro electromagnético. Una parte de la energía proporcionada por las bombillas se convierte en luz visible (longitud de onda corta) y otra parte se transforma en energía térmica o calor (longitud de onda larga), esto dependerá del tipo de bombilla. El calor disipado es absorbido por las superficies interiores de la zona haciendo que estas aumenten su temperatura

La iluminación al interior del galpón se realiza con luces incandescentes. Estas operan con un nivel de potencia de 60 w y con una distribución térmica de la siguiente manera: 0.2 se convierte en luz visible, 0.7 en energía radiante y 0.1 en pérdidas. Para el cálculo de la carga aportada por las bombillas, se utilizó la siguiente formula dada por ASHRAE.

$$q_{el} = W * F_{ul} * F_{sa} \quad (4)$$

Donde  $q_{el}$ : ganancia de calor [w],  $W$ : potencia total del bombillo [w],  $F_{ul}$ : factor de uso de iluminación y  $F_{sa}$ : factor especial de iluminación.

El factor de uso se trabajó desde OpenStudio realizando un horario de uso como se muestra en la figura 5, por esta razón en la ecuación 4 se asignó un valor de 1 al factor de uso, para así permitir que el multiplicador de factor de uso sea tomado desde el horario de uso.

El horario de uso o de encendido de las bombillas, varía dependiendo de la semana en la cual se encuentre el pollo. Para la primera semana se manejan 23 horas luz por día requeridas para el buen crecimiento del pollo. Para la última semana no se manejan horas luz, sin embargo, se trabajó un horario de una (1) hora luz por día para incluir las inspecciones hechas por los Avicultores en horas de la noche, figura 6.

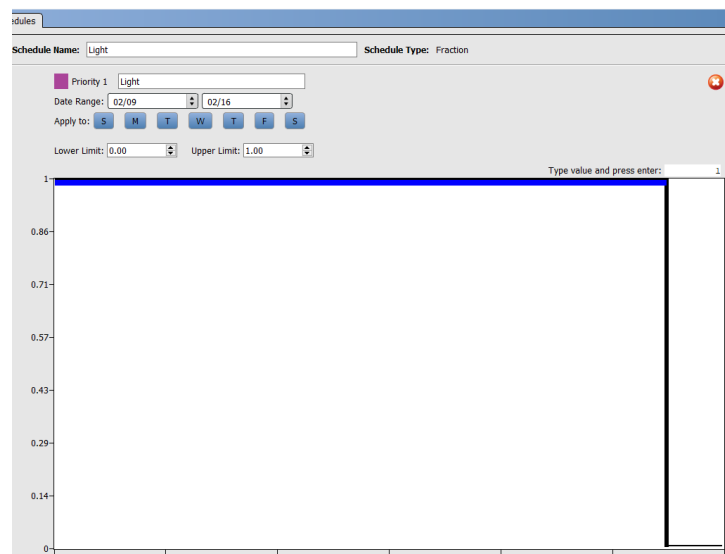


Figura 6. Perfil de iluminación al interior del galpón

**1.1.6.2 Pollos.** Durante los primeros días de crecimiento del pollo, este requiere calor de suministro puesto que es incapaz de regular su temperatura corporal en esta etapa, a medida que crecen disipan el calor sensible y latente para alcanzar su temperatura de confort. En la figura 7 se puede observar la distribución del calor en el pollo respecto al galpón.

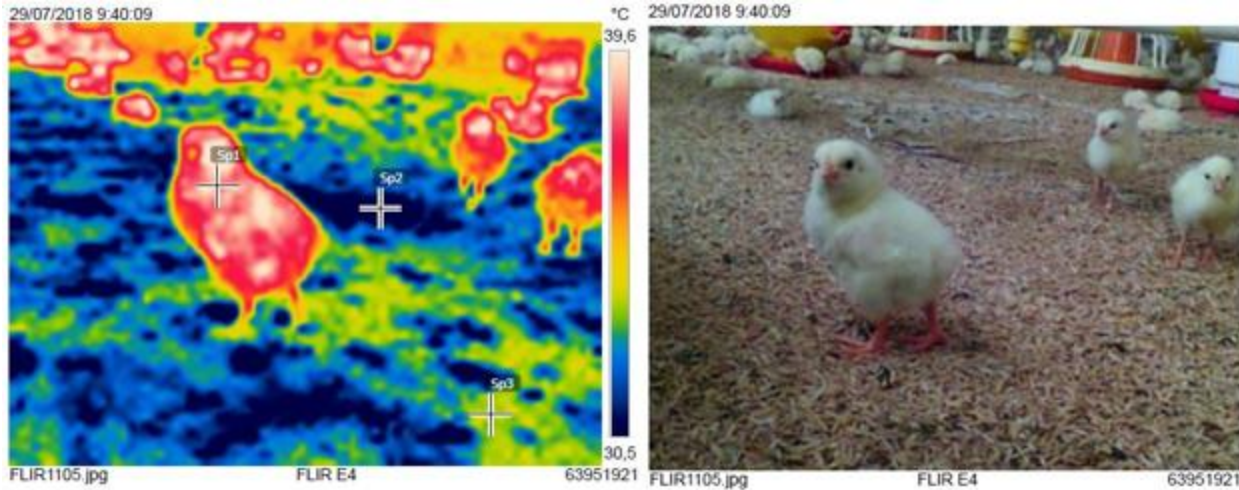


Figura 7. Imagen termográfica del pollo en la primera semana.

Tabla 6

Temperaturas en diferentes puntos del galpón

Puntos de Muestra	Temperatura [°C]
Sp1	38,5
Sp2	29,6
Sp3	33,7

La proporción en la que transfieren el calor sensible y latente está determinada por la temperatura ambiente a la que se encuentre el galpón, el porcentaje de calor latente aumenta con la temperatura ambiente.

Tabla 7

Porcentaje de calor latente y sensible

Temperatura Ambiente	Pérdida de Calor, %	
	Sensible (Radiación y Convección)	Latente (Jadeo)
25°C	77	23
30°C	74	26
35°C	10	90

Nota: tomado de Aviagen, 2010b

El calor convectivo y radiante emitido por el ave corresponde aproximadamente a un 77% y 23% respectivamente, del calor sensible total (Yahav et al., 2004).

$$\text{Calor Sensible} = \text{Calor Convectivo} + \text{Calor Radiante} \quad (5)$$

$$\text{Calor Latente} = \text{Calor por Evaporación} \quad (6)$$

La cantidad de calor transferido al ambiente es aproximadamente 11 Btu/h por kilogramo de peso ganado (Aviagen, 2009), es decir que a medida que avanza el periodo de crianza la temperatura dentro del galpón aumenta y se agudiza por la densidad de aves por metro cuadrado.

$$Q_{kgbtu} = 11$$

$$Q_{kg} = Q_{kgbtu} * \text{convert} \left( \frac{btu}{h} - kg; \frac{W}{kg} \right)$$

$$Q_p = \text{Peso}_{p_{kg}} * Q_{kg} \quad (4)$$

$$\text{Peso}_{p_{kg}} = \text{Peso}_{p_g} * \text{convert}(g; kg)$$

$$\text{Peso}_{p_g} = 1900$$

La temperatura efectiva que puede alcanzar el pollo, según su sensibilidad térmica, está determinada por la semana de edad en la que se encuentre, la velocidad del aire proporcionada por los extractores y temperatura exterior del galpón.

Tabla 8

*Carga térmica aportada por los pollos*

Peso [g]	$Q_{\text{disipado}} [W]$
100	0,3
300	1,0
500	1,6
700	2,3
900	2,9
1100	3,5
1300	4,2
1500	4,8
1700	5,5
1900	6,1

Como se puede observar en la figura 8, la temperatura efectiva de un pollo con siete semanas de edad puede disminuir hasta aproximadamente 5°C en un lugar con una temperatura exterior de 32°C y una velocidad del aire dentro del galpón de 2,5 m/s.

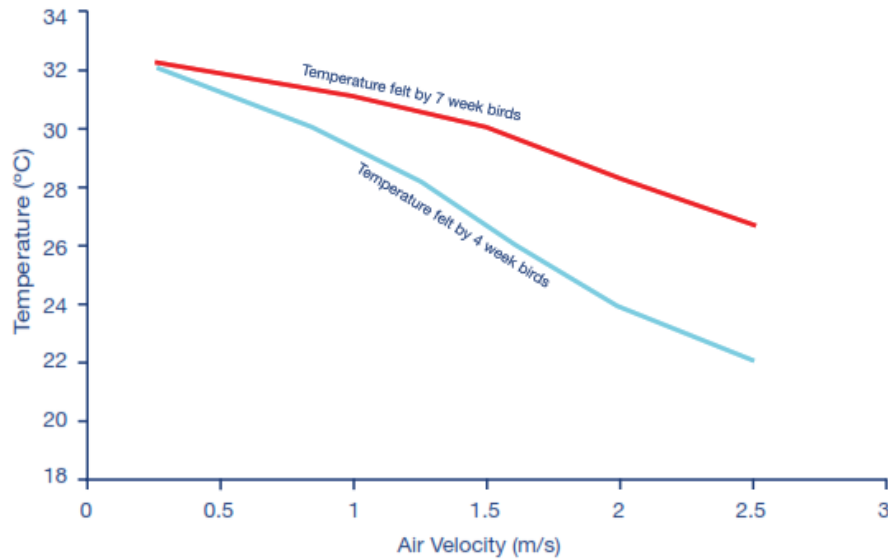


Figura 8. Sensación térmica de los pollos. (Aviagen, 2010a)

**1.1.7 Infiltraciones.** Las infiltraciones corresponden al aire exterior que fluye hacia el interior del galpón por medio de áreas abiertas al ambiente. Variables como la velocidad y dirección, diferencia de temperatura entre el aire exterior y el aire interior de la zona generan variaciones en la densidad y presión del aire desde el exterior al interior, causando un flujo de entrada de aire al galpón.

EnergyPlus trabaja con tres métodos diferentes para el cálculo de las infiltraciones. En este proyecto se trabajó con el método Space Infiltration Effective Leakage Areas (EnergyPlus), el cual está formulado de la siguiente manera:

$$Q = F_{schedule} * \frac{A_L}{1000} \sqrt{C_s * \Delta T + C_w * U^2} \quad (7)$$

Donde Q: flujo de aire infiltrado  $m^3/s$ ,  $A_L$  : área efectiva de infiltración  $m^2$ ,  $C_s$  : coeficiente de stack  $(\frac{L}{s})^2 / (cm^4 * K)$ ,  $\Delta T$ : diferencia de temperatura entra la zona interior y el aire exterior con

el cual se está intercambiando aire,  $C_w$ : coeficiente del aire  $\left(\frac{L}{s}\right)^2 / \left(cm^4 * \left(\frac{m}{s}\right)^2\right)$  y  $U$ : velocidad del aire promedio medida por una estación local  $m/s$

El área efectiva de infiltración fue calculada definiendo las áreas abiertas en las paredes y los techos. Para cada zona térmica se determinó un área de infiltración. Cabe aclarar que la fachada del galpón presenta varias aberturas que no son propias de su diseño, algunas se han presentado por el tiempo de uso.

Tabla 9  
*Áreas de infiltración en las diferentes zonas del galpón*

Zona Térmica	Área de infiltración ( $m^2$ )
1	38.023
2	16.00
3	16.00
4	78.48

El coeficiente de Stack se determinó con la tabla 9

Tabla 10  
*Coeficiente de Stack*

<b>Modelo básico para Coeficiente de Stack <math>C_s</math></b>			
Altura del edificio			
	Uno	Dos	Tres
Coeficiente de Stack	0.000145	0.000290	0.000435

Adaptado de "ASHRAE, 2009"

Para el cálculo del coeficiente del aire se tuvo en cuenta la tabla 11. Se seleccionó un ‘shelter class’ número 2, ya que el galpón se encuentra en una zona rural en el Municipio de Lebrija.

Tabla 11  
*Clasificación del edificio*

<b>Local shelter classes</b>	
Shelter Class	Description
1	No obstructions or local shielding
2	Typical shelter for an isolated rural house
3	Typical shelter caused by other buildings across street from building under study

Adapatado de "ASHRAE, 2009"

Con el número “shelter class” ya conocido, se pasó a la tabla 12 para seleccionar el coeficiente del aire ( $C_w$ ). El valor seleccionado para el coeficiente del aire, bajo las condiciones del lugar fue 0.000246.

Tabla 12  
*Coeficiente de viento*

<b>Basic Model Wind Coefficient <math>C_w</math></b>			
House Height (Stories)			
Shelter Class	One	Two	Three
1	0.000319	0.000420	0.000494
2	0.000246	0.000325	0.000382
3	0.000174	0.000231	0.000271

Adaptado de "ASHRAE, 2009"

En el archivo climático se encuentra la variable velocidad del viento. La diferencia de temperatura es calculada por el programa con los balances de energía al interior y exterior del galpón.

**1.1.8 Equipos de ventilación.** Los equipos de ventilación son los encargados de extraer la carga térmica al interior del galpón y de generar corrientes de aire para garantizar las condiciones de confort en los animales.



Figura 9. Distribución de los ventiladores al exterior del galpón

El galpón tiene once equipos de ventilación. Para su operación, se programa un horario de uso durante el día y la noche. En las condiciones actuales de operación se trabaja con dos equipos encendidos durante la madrugada y parte de la noche, y con once equipos encendidos durante el día. A continuación, se muestra el horario de uso para la última semana de cría.

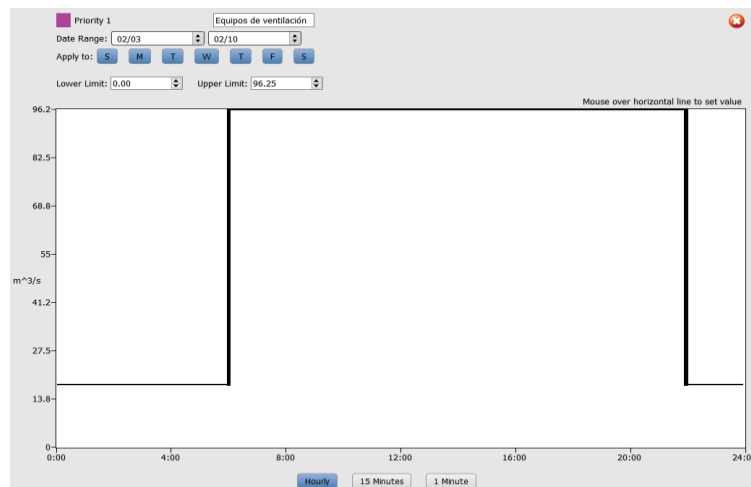


Figura 10. Horario de operación de los equipos de ventilación

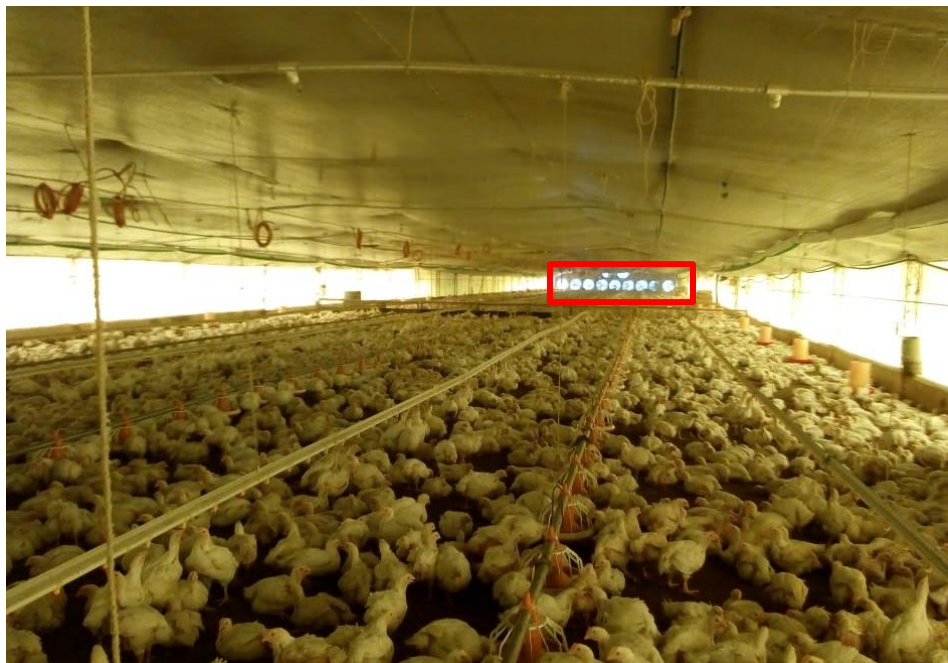


Figura 11. Ubicación de los extractores en el interior del galpón

Se midió la velocidad del aire al interior del galpón con todos los equipos de ventilación encendidos, con el fin del calcular el caudal de aire movido por los extractores, debido a que no se tenía registro de esta información. La velocidad fue medida a una altura de 1.2 m sobre el nivel el piso y a 77 m de distancia de los equipos (mitad del galpón). Para el cálculo del caudal se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$Q_T = V_{media} * A_{transversal} \quad (9)$$

$$Q_T = Q_e * N_e \quad (8)$$

$Q_T$  Corresponde el caudal total movido por todos los ventiladores. El área transversal de galpón es el ancho del galpón por la altura  $14 \times 2.37 \text{ m}^2$ . El caudal da un total de  $8.75 \text{ m}^3/\text{s}$  por extractor. Con el caudal movido por los extractores, se calculó la presión de operación de los mismos con la curva de operación. La potencia del motor corresponde a 1 cv.

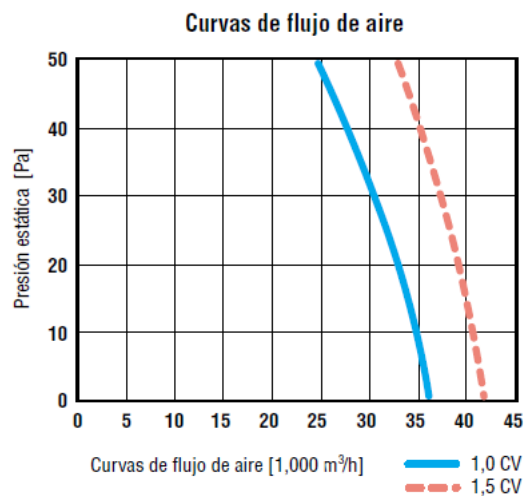


Figura 9. Curva de operación para los equipos de ventilación

## 1.2 Validación de la simulación

La validación se realizó en la primera semana de cría del pollo, bajo condiciones de operación diferentes a la última semana.

**1.2.1 Configuración del galpón para la primera semana.** En esta etapa se reduce el área condicionada al interior del galpón para que sea habitada por los pollos que llegan de la incubadora. Esta nueva área corresponde a  $480 \text{ m}^2$  ubicados en la mitad del galpón. Los materiales de la fachada exterior e interior, cubierta exterior, cielo raso y piso, se mantienen constantes de la primera semana a la última semana del ciclo de cría.



*Figura 10.* Vista planta del galpón en la primera semana de cría

Además del área condicionada, también se presentan cambios en las áreas de infiltración, carga y densidad de los pollos. Aparecen nuevas ganancias internas por equipos debido a que se requieren lámparas calefactoras para calentar la zona. A continuación, se muestran las nuevas entradas que tendría el software.

Tabla 13.

*Condiciones de operación para la primera semana de cría*

Calor disipado por los pollos (w)	Densidad de población (pollos/ $\text{m}^2$ )	Área de infiltración ( $\text{m}^2$ )	Número de extractores	Setpoint extractores ( $^{\circ}\text{C}$ )	Horario de luces (horas)
0.3	50	3	2	27-30	23

**1.2.2 Equipos de calefacción.** Los equipos de calefacción proporcionan un ambiente de confort en los primeros 14 días de cría del pollito. Su uso es necesario debido a que en este tiempo el ave no es capaz de regular su temperatura corporal, (Aviagen, 2009). Para alcanzar los niveles de confort, se utilizan lámparas calefactoras que irradian las superficies interiores del galpón aumentando la temperatura del aire por intercambio convectivo.

La carga de calefacción se introdujo como una ganancia interna con una densidad de  $17.62 \text{ w/m}^2$  multiplicada por 22 que es el número total de criadoras en la zona. La distribución térmica de la criadora se asignó de la siguiente manera: 0.85 para fracción radiante y 0.15 en fracción perdida. La fracción latente se dejó como 0 ya que el equipo no aporta este tipo de carga. Estos porcentajes fueron calibrados por medio de un análisis de sensibilidad en la simulación, debido a que en las especificaciones técnicas de los equipos no se encontraba esta información.



Figura 11. Criadoras calefactoras

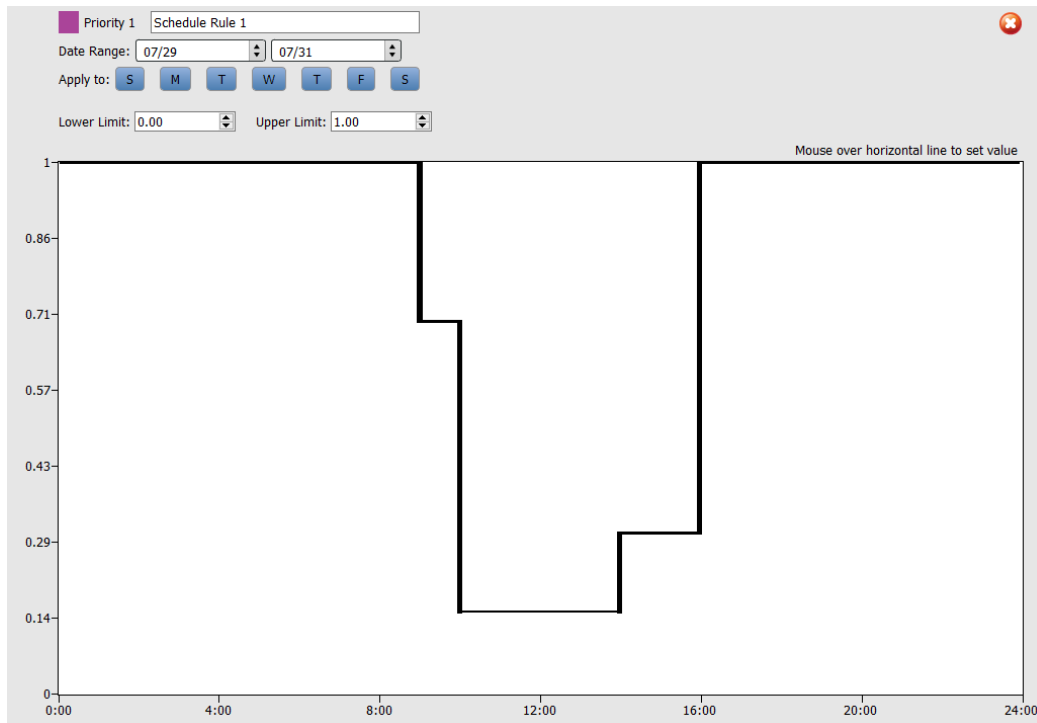


Figura 12. Horario de operación de los equipos de calefacción

**1.2.3 Etapa experimental.** Se realizaron mediciones de temperatura al interior del galpón con una frecuencia de registro de un dato por hora. Para para la primera semana de cría se trabajó con una desidad de población de 50 pollos/ $m^2$ .

El registro de las las temperatuas se realizó con un datalogger de temperatura de referencia DT4947SD GENERAL Figura 17, con termocuplas tipo k. Se inslaron tres termocuplas a lo largo y ancho del galpón. La longitud de cada termocupla era de 5 m, por lo que esta sería la distancia máxima a la cual se sensó desde el punto fijo en el cual se encontraba instalado el datalogger



*Figura 13.* Distribución de termocuplas en el interior del galpón

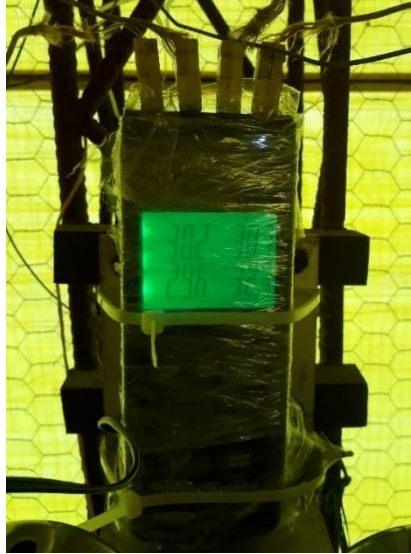


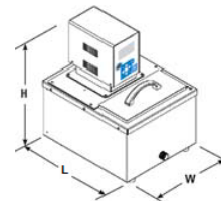
Figura 14. Instalar del datalogger de temperatura en el interior del galpón

**1.2.3.1 Calibración de las termocuplas.** Para la calibración, se trabajó con el equipo Polystat 1-C6 de la línea Cole-Parmer. Este cuenta con las siguientes especificaciones:

Tabla 14

*Especificaciones equipo Polystat referencia 1-C6*

Rango de Temperatura de trabajo [°C]	Volumen del baño [L]	Capacidad de enfriamiento [W] a 20 °C	Refrigerante	Dimensiones H x W x L [mm]	Peso neto [kg]
-20 a 100	5.4 a 6.5	250 w	R134a	622.3 x 203.2 x 416.6	26.3



Nota: tomado de ‘Manual de Polystat’

El fluido que se utilizó en el baño fue agua destilada, la cual no contiene impurezas e iones que afecten la durabilidad del equipo. Se seleccionaron seis valores de temperatura para la calibración, estos se encuentran en el rango de 18 a 36 °C. Su selección se hizo teniendo en cuenta las

temperaturas máximas y mínimas medidas por cada termopar al interior del galpón. Se realizaron dos mediciones para cada temperatura de referencia, los valores medios se muestran en la tabla 15.

Tabla 15

*Valores de temperatura media para las dos mediciones realizadas*

Temperatura del baño (°C) (±Desv. est)		18,0 (±0.05)	22,2 (±0.03)	26,0 (±0.01)	34,0 (±0.01)	36,2 (±0.01)
Temperatura de la termocupla (°C) (± Desv. est)	Termocupla 1	17,7 (±0.07)	22,1 (±0.07)	25,9 (±0.07)	32,8 (±1.77)	36 (±0.14)
	Termocupla 2	17,8 (±0.07)	22,0 (±0.00)	25,9 (±0.07)	33,8 (±0.14)	35,9 (±0.14)
	Termocupla 3	17,8 (±0.07)	22,0 (±0.07)	25,8 (±0.00)	33,9 (±0.07)	36,0 (±0.00)

Los valores medidos por las termocuplas se graficaron respecto al setpoint dado al equipo y se determinó la ecuación de ajuste para cada termocupla.

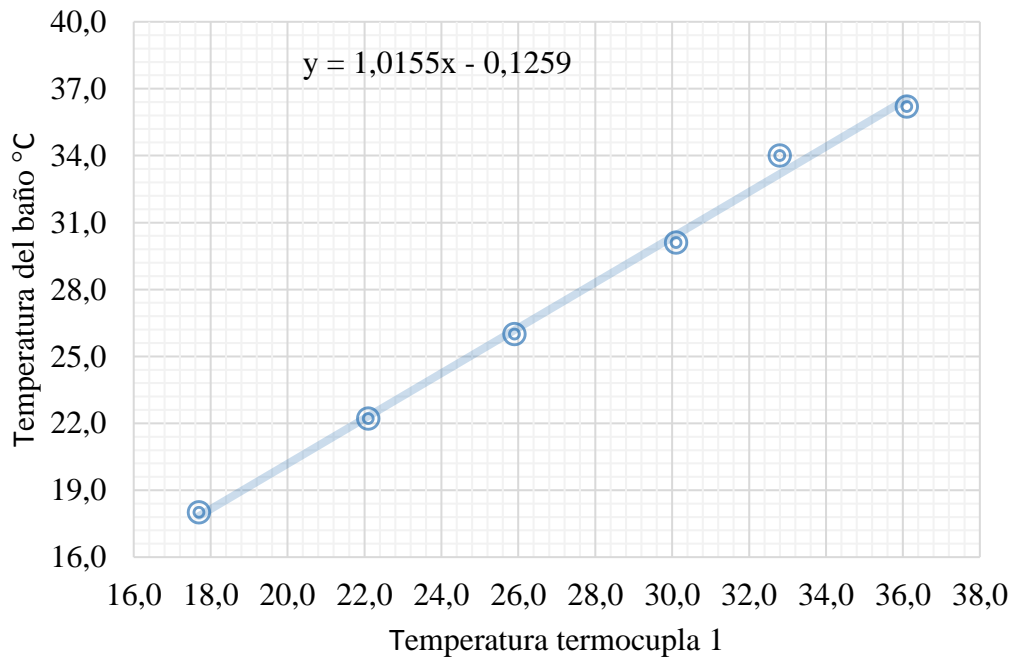


Figura 15. Curva de calibración de termopar

## 2 Modelo Matemático de Referencia

### 2.1 Balance de calor en superficies

EnergyPlus tiene diferentes modelos matemáticos para el cálculo de conducción en paredes. Para modelos en los cuales las superficies tengan conductividad variable o materiales de cambio de fase, EnergyPlus recomienda el uso del Modelo de Diferencia Finita de Conducción. Si se quiere evaluar el movimiento y almacenamiento de calor y humedad en superficies desde y hacia el ambiente interno y externo, el programa recomienda el uso del Modelo Combinado de Transferencia de Calor y Humedad (HAMT). Existe otro modelo matemático llamado Modelo de la Función de Transferencia de Conducción, el cual es aplicado a superficies en las cuales no se tienen materiales con las propiedades antes mencionadas. Por el contrario, es un método más simplificado que los anteriores.

La función de Transferencia de Conducción es calculada por el método de espacio de estados, donde las variables de estado son las temperaturas nodales, las temperaturas ambientales (interior y exterior) las cuales son entradas y los flujos resultantes en ambas superficies son las salidas.

El sistema de espacio de estado básico se define mediante las siguientes ecuaciones de matriz lineal:

$$\frac{d[x]}{dt} = [A][X] + [B][u] \quad (11)$$

$$[y] = [C][x] + [D][u] \quad (12)$$

Donde  $x$  es el vector de las variables de estado,  $u$  es un vector de entrada,  $y$  es un vector de salida y  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , y  $D$  son coeficientes de la matriz.

## 2.2 Balance de calor convectivo del aire interior

El balance de calor convectivo del aire al interior de la zona está establecido por la suma algebraica de las ganancias y pérdidas al interior del galpón, teniendo en cuenta superficies, ganancias internas (pollos), infiltraciones y equipos de HVAC.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{SL}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_i - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zones}} \dot{m}_i c_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} c_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (13)$$

Donde  $\sum_{i=1}^{N_{SL}} \dot{Q}_i$  = suma de las cargas internas convectivas,  $\sum_{i=1}^{N_{surfaces}} h_i A_i (T_i - T_z)$  = calor convectivo transferido desde las superficies,  $\dot{m}_{inf} c_p (T_{\infty} - T_z)$  = calor transferido desde las infiltraciones de aire exterior,  $\dot{Q}_{sys}$  = calor extraído por lo equipos de ventilación,  $C_z \frac{dT_z}{dt}$  = calor resultante transferido al aire de la zona,  $C_z = \rho_{air} C_p C_T$ ,  $\rho_{air}$  = densidad del aire,  $C_p$  = calor específico del aire de la zona y  $C_T$  = capacidad de calor sensible del aire.

## 2.3 Balance en superficies interiores

El balance de calor en las superficies interiores del galpón se modeló teniendo en cuenta: conducción a través de la envolvente del edificio (galpón), convección del aire, absorción y

reflección de radiación de onda corta (ganancias solares, luces), radiación de onda larga (equipos internos y superficies).

La ecuación de balance en la superficie interior se muestra a continuación :

$$q''_{lwx} + q''_{sw} + q''_{lws} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (14)$$

Donde  $q''_{lwx}$  = flujo de radiación de onda larga intercambiada entre las superficies de la zona,  $q''_{sw}$  = flujo de radiación de onda corta intercambiada entre las superficies y luces,  $q''_{lws}$  = flujo de radiación de onda larga desde los equipos de la zona,  $q''_{sol}$  = flujo de radiación solar absorbida por las superficies y  $q''_{conv}$  = Flujo convectivo al aire de la zona.

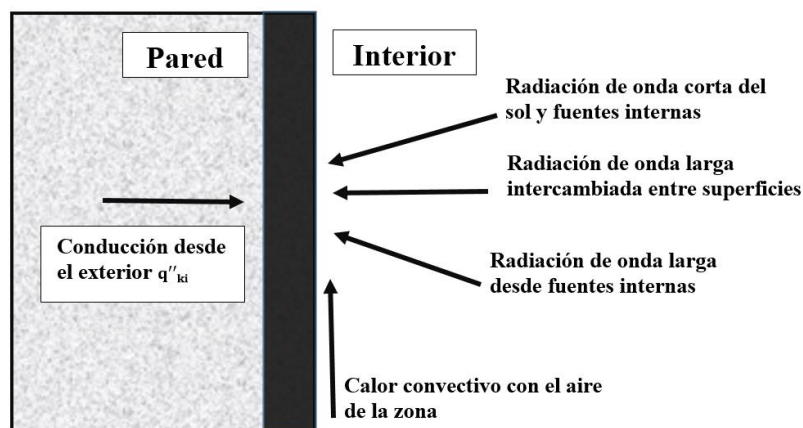


Figura 16. Balance de calor en las superficies interiores. Tomado de "EnergyPlus"

Para el cálculo del flujo de calor convectivo del aire de la zona, se calcula el coeficiente de convección interior utilizando un algoritmo adaptativo, el cual determina el valor del Richardson ( $R_i$ ) para determinar si es flujo forzado, mixto o natural. Valores grandes de  $R_i$  indican que la flotabilidad predomina, mientras que valores pequeños indicarán que es flujo forzado.

## 2.4 Balance en Superficies Exteriores

El balance de calor en las superficies exteriores se modeló bajo las condiciones ambientales exteriores, teniendo en cuenta la radiación, velocidad del viento, superficies exteriores y demás.

La ecuación de balance en la superficie exterior se muestra a continuación:

$$q''_{\alpha sol} + q''_{lwr} + q''_{conv} + q''_{ko} = 0 \quad (15)$$

Donde  $q''_{\alpha sol}$  = flujo de radiación directa y difusa absorbida por las superficies,  $q''_{lwr}$  = flujo de radiación de onda larga intercambiada con los alrededores,  $q''_{conv}$  = flujo convectivo intercambiado con el aire exterior y  $q''_{ko}$  = flujo de calor por conducción de las paredes.

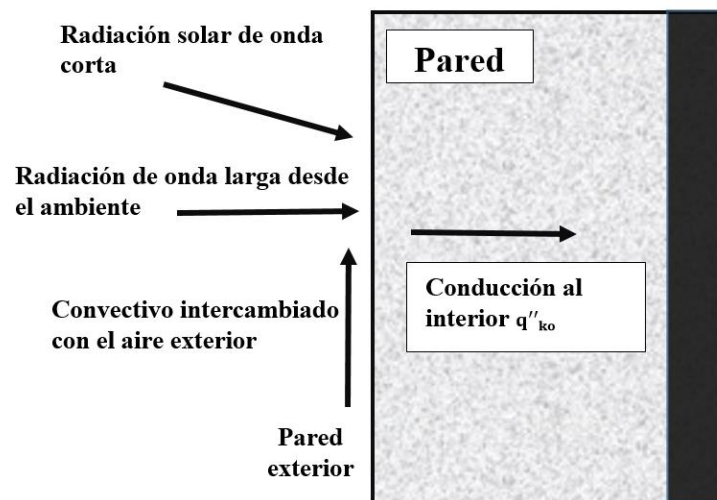


Figura 17. Balance en superficies exteriores. Tomado de Fuente. EnergyPlus

## 3 Diseños Pasivos

En las condiciones actuales de operación, la cubierta está elaborada en zinc el cual tiene alta conductividad térmica, y su absorptividad solar es de 0.7, es decir, absorbe el 70% de la radiación

solar que incide sobre él. Por lo tanto, algunos de los diseños pasivos que se plantearon están desarrollados bajo la hipótesis de reducir las ganancias solares por cubierta y superficies, esta última también plateada con el objetivo de aumentar la reflectividad de cada superficie.

Se plantearon cinco prototipos de diseños pasivos. Diseño I: Cubierta con capa de pintura blanca, diseño II: cubierta con capa de pintura blanca y fachada exterior con cortinas blancas, diseño III: diseño II más aislante (thermolon) en el cielo raso, diseño IV: cubierta exterior curva con capa de pintura blanca y diseño V: rotación del galpón  $90^\circ$  respecto al norte.

El diseño V, se evaluó teniendo en cuenta la latitud y dirección respecto al norte en la cual se encuentra ubicado el galpón. La fachada suroeste recibe alta incidencia solar para los meses desde septiembre hasta marzo, debido a que en este tiempo el sol se encuentra orientado hacia el sur. Por lo tanto se evaluó el efecto que tendría orientar la fachada lateral del galpón  $90^\circ$  respecto al norte.

Para evaluar cuál diseño es el más viable desde el punto de vista de reducción de temperatura al interior, se simuló el galpón bajo condiciones geométricas y de ganancias internas de la última semana de cría (crítica), en la época del año en la cual se presentan las temperaturas ambientales más elevadas, las cuales se registraron del 3 al 10 de febrero del año 2017. El modelo se corrió sin tener en cuenta la ventilación generada por los extractores, con el fin de determinar el efecto de la fachada y cubierta en la conducción de calor hacia el interior del galpón.

## 4 Resultados

### 4.1 Influencia de la Temperatura del Suelo en los Resultados

Se evaluó el efecto que tiene la variación de la temperatura del suelo sobre el cálculo de la temperatura del aire al interior y se considera despreciable esta variación, presentando una desviación estándar de  $\pm 0.20$ , como se muestra en la figura 20.

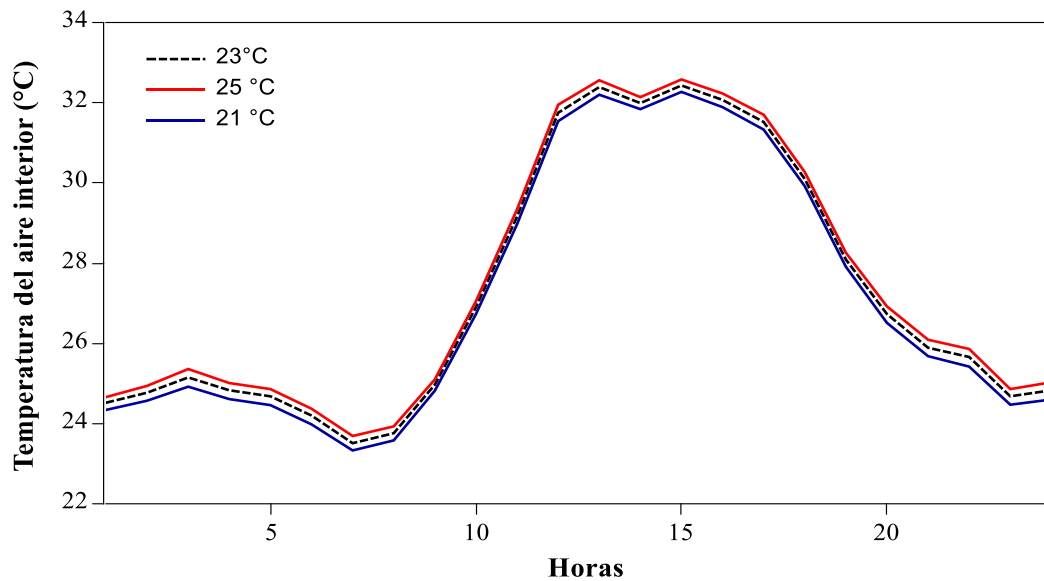


Figura 18. Variación de la Temperatura del aire respecto a la Temperatura del suelo.

### 4.2 Condiciones Actuales de Operación

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la simulación de las condiciones actuales de operación para la última semana de cría teniendo en cuenta los equipos de ventilación.

Tabla 16

*Condiciones actuales de operación del galpón para la última semana de cría*

Temperatura media (°C) (± Desv. est)	Temperatura máxima (°C)	Humedad relativa media (%HR) (± Desv. est)	Ventilación (ach)	Infiltraciones (ach)
24.9 (2.6)	31.30	74.4 (13.2)	76	4.9 (7.7)

Se determinó el comportamiento de la temperatura radiante de las superficies y la temperatura del aire al interior del galpón, para condiciones de carga interna correspondientes a la última semana del ciclo de cría. Figura 22.

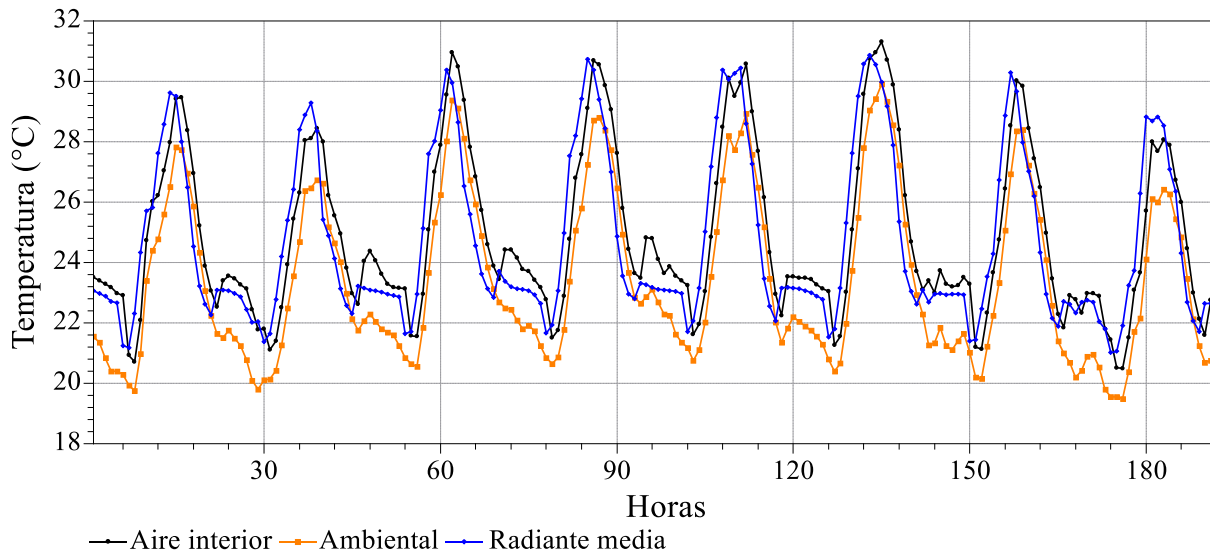


Figura 19. Comportamiento de la temperatura interior y exterior del galpón en la última semana de cría.

En la figura 23 se presenta la tasa interna de ganancia de calor por convección al interior del galpón, la cual comprende las pérdidas o ganancias al interior del galpón por ventilación e infiltraciones, pollos y el calor transferido al aire de la zona desde todas las superficies interiores.

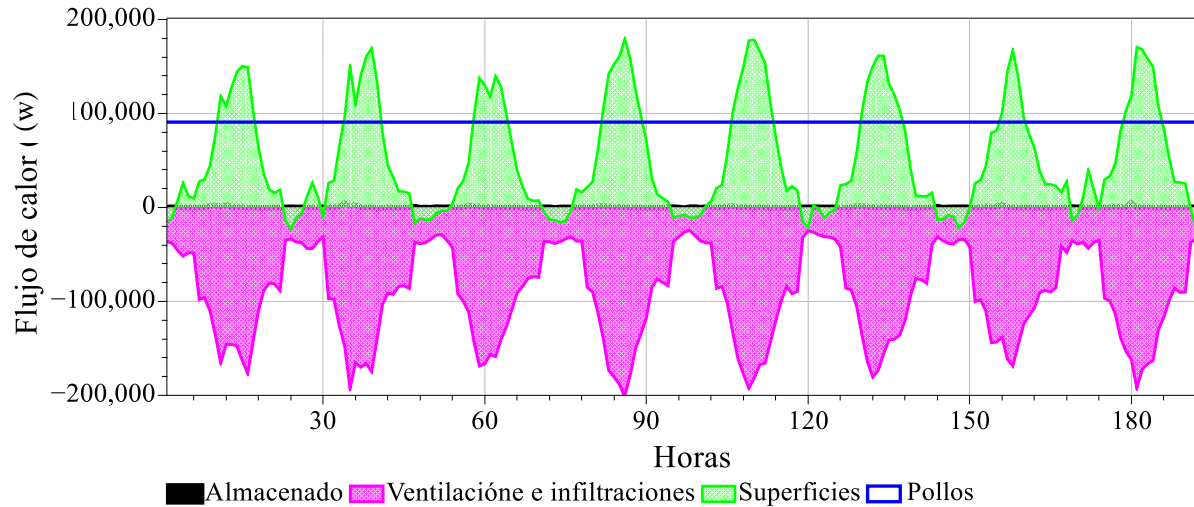


Figura 20. Tasa interna de ganancia de calor por convección al interior del galpón  
 Nota: El calor almacenado corresponde a la tasa de almacenamiento de calor del aire de la zona

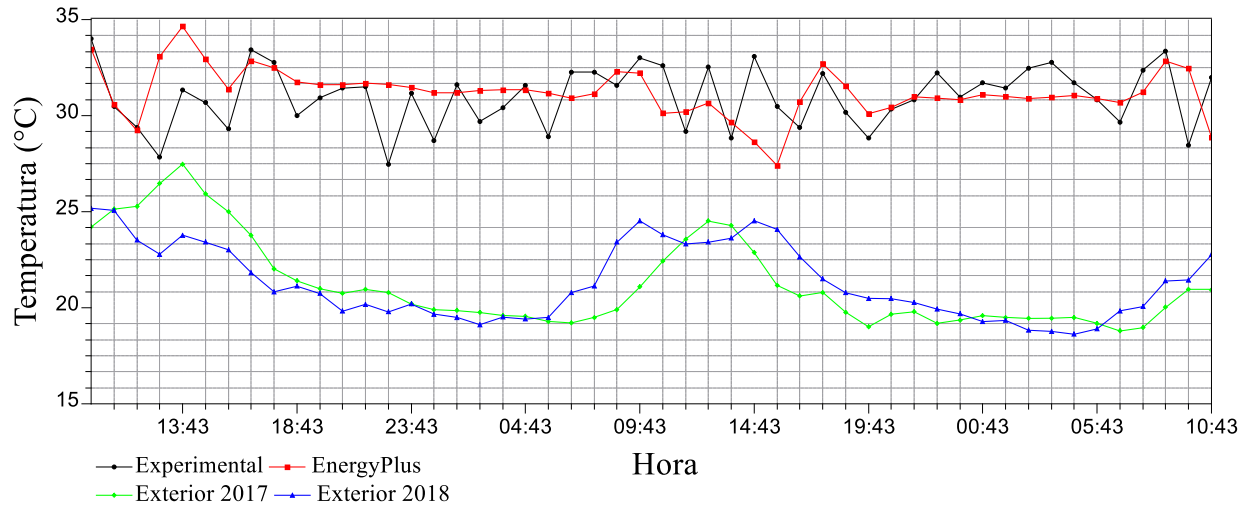
Tabla 17

*Ponderación de las ganancias y pérdidas al interior del galpón para la última semana de cría*

Ítem	Ganancia % ( $\pm$ Desv. est)	Perdida % ( $\pm$ Desv. est)
Pollos	63.28 ( $\pm 2.33$ )	-
Superficies	36.71 ( $\pm 2.32$ )	-
Ventilación	-	66.33 ( $\pm 1.54$ )
Infiltraciones	-	33.66 ( $\pm 1.54$ )

### 4.3 Resultados de la Validación

Se encontró una diferencia porcentual media de 0.64% con una desviación estándar diferencial de  $\pm 6.14$  entre los datos medidos experimentalmente y los simulados. Las diferencias más altas de temperatura se presentaron a las 2:00 pm para el día 29 y 30 de julio. Se observa en la figura 24 que las diferencias más altas entre las temperaturas simuladas y medidas se presentan en horas en las que la diferencia entre la temperatura exterior de un año a otro es alta.



Las mediciones experimentales se realizaron para los días 29, 30 y 31 de julio del año 2018 y la simulación se realizó con datos meteorológicos correspondientes al año 2017, debido a que la plataforma del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudio Ambientales) no ha reportado todas las variables meteorológicas para la fecha en la cual se realizó la toma de datos experimentales.

#### 4.4 Resultados de los Diseños Pasivos

Se evaluaron las diferentes medidas pasivas aplicadas en la envolvente y cubierta del edificio, sin considerar los equipos de ventilación al interior del galpón. Esto debido a que se quiere observar el efecto directo que tienen las ganancias solares a través de las superficies del edificio para los diferentes diseños pasivos implementados.

Para las medidas pasivas implementadas en los diseños sin equipos de ventilación, se obtiene una disminución de temperatura del aire de 1.05 °C al interior del galpón para el diseño pasivo III (Fachada y cubierta exterior blanca, aislante cielo raso), respecto de las condiciones actuales de

operación. Esta diferencia de temperatura corresponde a la máxima alcanzada luego de un análisis paramétrico de los diferentes diseños.

Como se muestra en la tabla 16, la mayor ganancia de calor se obtiene por la cubierta para el diseño actual de operación. Sin embargo, implementando los diferentes diseños pasivos, esta superficie se convierte en un puente térmico que ayuda a la disipación de calor desde el interior hacia el exterior del galpón, contribuyendo a la disminución de la temperatura interior.

Los flujos de calor obtenidos en las superficies al variar la orientación del galpón presentan valores muy cercanos al diseño actual, es decir no representa un parámetro significativo a modificar en el diseño actual del galpón para disminuir la ganancia solar al interior del galpón.

Tabla 18

*Análisis del galpón sin equipos de ventilación para la última semana de cría del ave*

Diseño	Temperatura (°C)					Flujo de calor por conducción (w)			
	Media en el día*	Media en la noche	Máxima	Media radiante en el día	Media radiante noche	Cielo raso	Cubierta	Fachada Noreste	Fachada suroeste
Actual	27.33	24.67	32.19	28.98	23.32	9256.82	13308.11	-599.10	-107.53
I	26.75	24.36	31.23	25.31	22.05	-3928.64	-4029.48	16.14	470.22
II	26.70	24.36	31.16	25.01	22.05	-3784.42	-3899.06	-255.64	-64.36
III	26.71	24.40	31.14	24.99	22.24	-3270.96	-3414.49	-245.21	-84.47
IV	26.75	24.39	31.21	25.27	22.17	-3711.08	-3795.55	0.25	465.91
V	27.32	24.67	32.18	28.92	23.28	9251.32	13279.90	-208.79	-725.71

\*la temperatura media hace referencia a la temperatura del aire al interior de galpón en la zona donde se encuentran los pollos.

Diseño I. Cubierta exterior con capa de pintura blanca

Diseño II. Fachada y cubierta exterior blanca

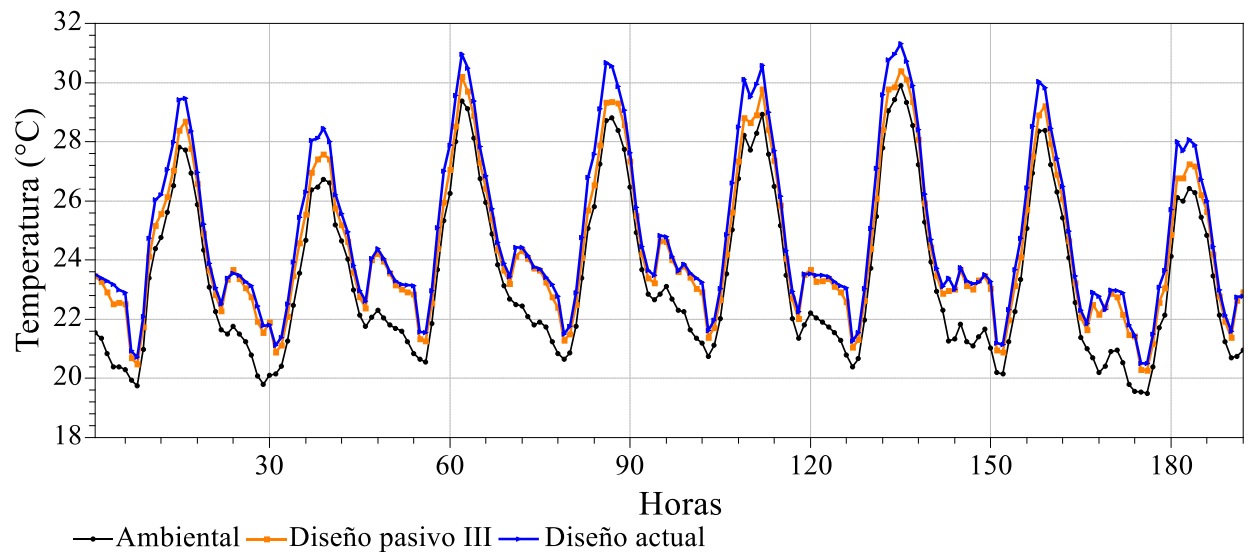
Diseño III. Fachada y cubierta exterior blanca, aislante cielo raso

Diseño IV. Cubierta exterior curva con capa de pintura blanca

Diseño V. Rotación del galpón 90° respecto al Norte

**4.4.1 Diseño pasivo III.** En el diseño pasivo número III se dejó la fachada y la cubierta exterior igual que en el diseño II, sin embargo, se agregó aislante tipo Thermolon en la cubierta interior.

La figura 25 muestra el comportamiento de la temperatura interior para el diseño pasivo III junto con el diseño actual, con el cual el galpón está operando. La diferencia máxima entre el diseño actual y el diseño pasivo III fue de 1.23 °C para el 10 de febrero a la 1:00 pm. Para el día más caliente del año se obtuvo una disminución de temperatura de 0.90 °C.



*Figura 21.* Temperatura al interior del galpón vs temperatura ambiental para la última semana de cría en el diseño III

Para esta configuración, se calcularon los nuevos flujos convectivos generados en superficies, pollos infiltración y ventilación al interior del galpón.

En este diseño se observa claramente como la relación entre las cargas térmicas transferidas al aire interior varía de manera sustancial. El calor disipado por las aves es una magnitud que se mantiene, en cualquier caso, ya que depende del peso del pollo, a diferencia de las ganancias que

se obtienen por las superficies, la magnitud de los flujos de calor por superficies en el diseño III disminuye considerablemente al diseño actual.

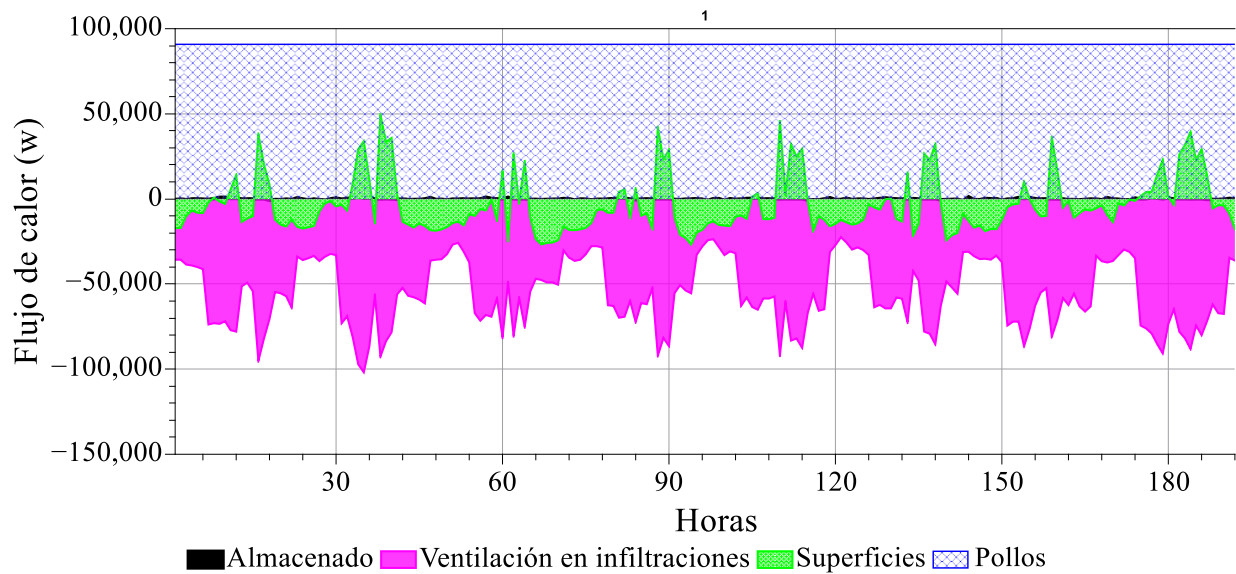


Figura 22. Tasa interna de ganancia de calor por convección al interior del galpón

La tasa de almacenamiento de calor al interior del galpón disminuyó debido a que las ganancias por superficies se redujeron. Por lo tanto el calor transferido al aire es menor, reduciendo la temperatura del aire interior.

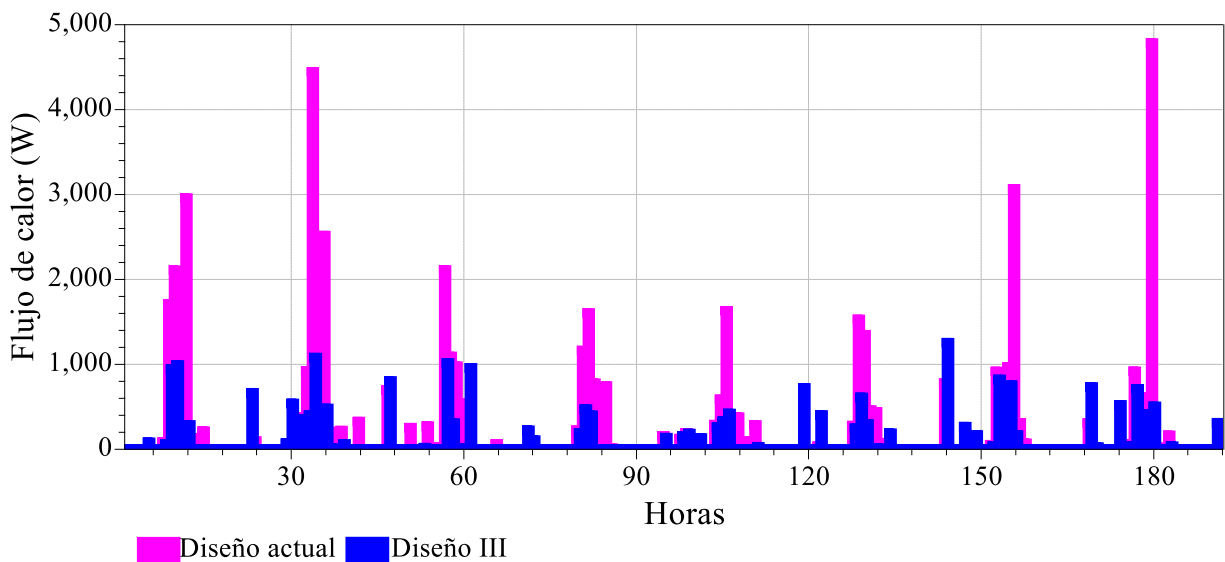


Figura 23. Tasa de almacenamiento de calor en la zona

## 5 Conclusiones

- ✓ Se determinó el comportamiento energético del galpón en las condiciones actuales, es decir los flujos de calor por superficies y la distribución de temperatura del aire interior.
- ✓ La mayor ganancia de calor se obtiene por la cubierta y la cara noroeste ayuda a disipar el calor.
- ✓ Se validó la simulación mediante datos experimentales y demostró la factibilidad de modelar las condiciones energéticas en un galpón.
- ✓ Se redujo la carga térmica aportada por la cubierta y envoltorio del galpón implementando medidas pasivas de climatización, en un 50% respecto al galpón base.
- ✓ Se logró disminuir la temperatura del aire interior hasta 1,3°C en la semana más caliente del año para la última semana de cría del periodo de crianza.
- ✓ La etapa crítica corresponde a la toma de temperaturas experimentales al interior del galpón debido a las condiciones operativas del mismo.

Tanto la reducción de las ganancias térmicas por superficies como la disminución de la temperatura del aire al interior del galpón implican necesariamente una baja en el porcentaje de mortalidad que se tiene actualmente.

Se requiere de más estudios que permitan cuantificar la disminución de la tasa de mortalidad debida a una reducción de 1,3°C en la temperatura del aire interior.

Las medidas pasivas implementadas en la simulación de cada uno de los diseños propuestos logran reducir las ganancias de calor al interior del galpón respecto al diseño actual con el que opera la crianza de los pollos y se puede observar que la cubierta del galpón representa una superficie de gran incidencia en la carga transferida al interior, respecto de las demás superficies.

### Referencias

- Alliance for Sustainable Energy, L. (n.d.). OpenStudio | OpenStudio. Retrieved October 24, 2018, from <https://www.openstudio.net/>
- ASHRAE. (2009). F18 Si: Nonresidential Cooling and Heating.
- Aviagen. (2009). Manejo del Ambiente En el Galpón de Pollo de Engorde.
- Aviagen. (2010a). *Environmental Management in the Broiler House* (Vol. 5).
- Aviagen. (2010b). ROSS Manual de manejo del Pollo de carne.
- Bigladder Software. (n.d.). Climate Calculations: Engineering Reference — EnergyPlus 8.9. Retrieved October 31, 2018, from <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-9/engineering-reference/climate-calculations.html#climate-calculations>
- Cengel, Y. (n.d.). Termodinámica.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2011). *Termodinámica* (seventh).
- Chávez, J. R. G., & Melchor, F. F. (2014). Application of combined passive cooling and passive heating techniques to achieve thermal comfort in a hot dry climate. *Energy Procedia*, 57, 1669–1676. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.157>
- Cooper, M. A., & Washburn, K. W. (1998). The Relationships of Body Temperature to Weight Gain, Feed Consumption, and Feed Utilization in Broilers under Heat Stress. *Poultry Science*, 77(2), 237–242. <https://doi.org/10.1093/ps/77.2.237>
- Eliopoulou, E., & Mantziou, E. (2017). Architectural Energy Retrofit (AER): An alternative building's deep energy retrofit strategy. *Energy and Buildings*, 150, 239–252. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.001>

Emn, E. (n.d.). EM50n Ventilador extractor.

Estrada-Pareja, M., Márquez-Giron, S., & Restrepo-Betancur, L. (2007). Efecto de la temperatura y la humedad relativa en los parámetros productivos y la transferencia de calor en pollos de engorde. *Rev. Col. Cienc. Pec.*, 20(3), 288–303. <https://doi.org/10.1007/s10940-010-9115-5>

Fenavi. (n.d.). Información estadística pública - FENAVI - Federación Nacional de Avicultores de Colombia. Retrieved October 23, 2018, from <http://fenavi.org/estadisticas/informacion-estadistica-publica/>

Google. (n.d.). Granja Granada - Google Maps.

Guerra, E. (2017). *Evaluación de alternativas en las instalaciones avícolas de pollos de carne para la mejora de las condiciones de confort de los animales. Assessment*. Universitat Politècnica de València.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, C. (2016). *Inventario Nacional y Departamental de Gases de Efecto Invernadero - Colombia*.

Illampas, R., Kyriakidis, A., & Michael, A. (2017). Computational Evaluation of the Thermal, Environmental and Structural Performance of an Innovative Masonry System. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 812–820. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.166>

Kolokotroni, M., Shittu, E., Santos, T., Ramowski, L., Mollard, A., Rowe, K., ... Novieto, D. (2018). Cool roofs: High tech low cost solution for energy efficiency and thermal comfort in low rise low income houses in high solar radiation countries. *Energy and Buildings*, 176, 58–70. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.005>

Laknizi, A., Elmaakoul, A., Ben Abdellah, A., Bouya, M., Dhimdi, S., & Said, S. (2016). Evaluation of earth-air heat exchanger for cooling and heating a poultry house: Case study in Morocco. *Proceedings of 2015 IEEE International Renewable and Sustainable Energy*

- Conference, IRSEC 2015*, (December 2015). <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2015.7455040>
- Mashaly, M. M., Hendricks, G. L., Kalama, M. A., Gehad, A. E., Abbas, A. O., & Patterson, P. H. (2004). Effect of heat stress on production parameters and immune responses of commercial laying hens. *Poultry Science*, 83(6), 889–894. <https://doi.org/10.1093/ps/83.6.889>
- Pajek, L., & Košir, M. (2017). Can building energy performance be predicted by a bioclimatic potential analysis? Case study of the Alpine-Adriatic region. *Energy and Buildings*, 139, 160–173. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.035>
- Sanchez Castellanos, P., & Meza Moreno, Y. (2014). *Análisis energético y simulación virtual del edificio denominado centro de caracterización de materiales de construcción Álvaro Beltrán Pinzón ubicado en la sede principal de la universidad industrial de Santander mediante el software EQUEST*.
- Yahav, S., Straschnow, A., Luger, D., Shinder, D., Tanny, J., & Cohen, S. (2004). Ventilation, sensible heat loss, broiler energy, and water balance under harsh environmental conditions. *Poultry Science*, 83(2), 253–258. <https://doi.org/10.1093/ps/83.2.253>