



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE MECÁNICA

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS SISTEMAS DE
VENTILACIÓN Y CLIMATIZACIÓN EN EL ESTABLO LECHERO DE LA
HACIENDA “SAN FRANCISCO”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingenieros Mecánicos

**AUTORES: ESTEBAN ALEJANDRO QUISHPE SUÁREZ
MIGUEL ÁNGEL MANCHENO BARRENO**

TUTOR: WILLIAM GIOVANNY QUITIAQUEZ SARZOSA

Quito – Ecuador

2023

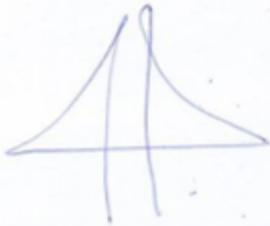
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Esteban Alejandro Quishpe Suárez con documento de identificación N° 1721107454 y Miguel Ángel Mancheno Barreno con documento de identificación N° 1724053291; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 18 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Esteban Alejandro Quishpe Suárez

1721107454



Miguel Ángel Mancheno Barreno

1724053291

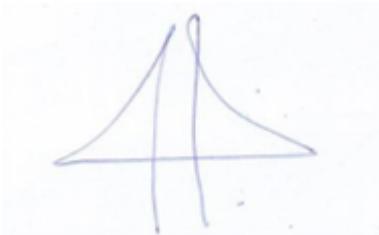
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Esteban Alejandro Quishpe Suárez con documento de identificación N° 1721107454 y Miguel Ángel Mancheno Barreno con documento de identificación N° 1724053291, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Trabajo de Titulación bajo la opción Propuestas Tecnológicas: “Análisis de la eficiencia energética en los sistemas de ventilación y climatización en el establo lechero de la hacienda San Francisco”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

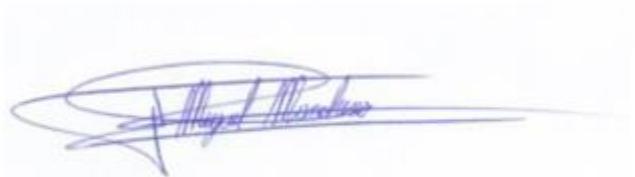
Quito, 18 de septiembre del año 2023

Atentamente,



Esteban Alejandro Quishpe Suárez

1721107454



Miguel Ángel Mancheno Barreno

1724053291

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, William Giovanni Quitiaquez Sarzosa con documento de identificación N° 1721609764, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS SISTEMAS DE VENTILACIÓN Y CLIMATIZACIÓN EN EL ESTABLO LECHERO DE LA HACIENDA "SAN FRANCISCO", realizado por Esteban Alejandro Quishpe Suárez con documento de identificación N° 1721107454 y por Miguel Ángel Mancheno Barreno con documento de identificación N° 1724053291, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Propuesta Tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 18 de septiembre del año 2023

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ing. William Quitiaquez Sarzosa', with a large flourish below it.

Ing. William Giovanni Quitiaquez Sarzosa Ph.D.

1721609764

DEDICATORIA

Esteban Alejandro Quishpe Suárez

Esta tesis es el resultado de su amor, apoyo y constante inspiración. Su inquebrantable aliento ha sido mi motor a lo largo de este arduo camino. A ustedes, mi familia, les dedico este logro con gratitud y profundo cariño.

Miguel Ángel Mancheno Barreno

Dedico esta tesis a mi familia y sobre todo a mi mamá por nunca dejarme de apoyar, a mis amigos y compañeros, a las personas que participaron en mi investigación y a todos aquellos que dedican su vida al conocimiento. Gracias por su apoyo incondicional y por hacer posible este logro.

AGRADECIMIENTO

Esteban Alejandro Quishpe Suárez

A mis padres, hermana, abuelita y a la Universidad Politécnica Salesiana, agradezco su amor, apoyo y contribución invaluable en mi camino académico. Su constante aliento y confianza fueron fundamentales para este importante logro. Con profundo agradecimiento, reconozco su apoyo incondicional en mi tesis.

Miguel Ángel Mancheno Barreno

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi asesor de tesis, el Ing. William Giovanni Quitiaquez Sarzosa, por su guía experta y paciencia. Agradezco también a los miembros de mi comité de tesis, a mi familia por su apoyo incondicional, a mis amigos y compañeros por su aliento constante, y a todas las fuentes y referencias bibliográficas que respaldaron mi investigación. Sin ustedes, este logro no habría sido posible. ¡Gracias de corazón!

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	I
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	II
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
1.1 Estado del arte	3
1.2 Energía y fuentes de energía en sistemas HVAC	11
1.2.1 Energía térmica	11
1.2.2 Energía eléctrica	11
1.2.3 Energía mecánica	11
1.2.4 Energía geotérmica	12
1.2.5 Energía eólica	12
1.2.6 Importancia de la eficacia energética en la conservación de recursos	12
1.3 Eficacia energética	12
1.3.1 Concepto de eficacia energética y su relevancia en sistemas de ventilación y climatización	12
1.3.2 Impacto de la amplitud de ocupación en la eficacia energética de los mecanismos de ventilación y climatización	13
1.3.3 Beneficios de la eficacia energética en los establos lecheros	13
1.4 Mecanismos de ventilación	13
1.4.1 Tipos de sistemas de ventilación utilizados en establos lecheros	14
1.5 Climatización	15
1.5.1 Parámetros y variables a considerar para un adecuado control climático	16
1.6 Consumo energético que afectan el en establos lecheros	17
1.6.1 Componentes que condicionan en el consumo de energético en establos lecheros	17
1.6.2 Estimación del consumo de energético en mecanismos de HVAC	17

1.6.3	Identificación de los fundamentales usuarios de energía en el establo lechero ...	18
1.7	Necesidades básicas de energía en establos lecheros	18
1.7.1	Requisitos energéticos para el mantenimiento del ambiente adecuado en establos lecheros	18
1.7.2	Consideraciones específicas de energía para la cría y producción de ganado lechero	19
1.8	Simulación computacional.....	19
1.8.1	Utilidad del modelado computacional en el estudio de HVAC.....	19
1.8.2	Descripción de software especializado para la simulación de mecanismos de circulación de aire y traspaso de calor	20
1.9	Simulación CFD	20
1.9.1	Principios y fundamentos CFD.....	20
1.9.2	Aplicaciones CFD en el análisis de sistemas de ventilación y climatización.....	20
1.9.3	Limitaciones de la simulación CFD en el contexto de la eficiencia energética....	21
1.10	Transferencia de calor.....	21
1.10.1	Mecanismos de transferencia de temperatura relevantes en mecanismos de ventilación y climatización.....	21
1.10.2	Conceptos básicos de convección, conducción y radiación térmica	22
CAPÍTULO II.....		24
2.1	Localización geográfica.....	24
2.1.1	Tamaño del establo	25
2.1.2	Diseño arquitectónico	26
2.1.3	Sistema y prestación	27
2.2	Cantidad de energía	27
2.2.1	Balance de energía.....	28
2.3	Cálculos de gestión energética.....	30
2.3.1	Flujo de calor proveniente de los animales (ϕ_a).....	30
2.3.2	Flujo de temperatura por difusión a través del recubrimiento del edificio (ϕ_{tr})	32
2.3.3	Flujo de temperatura proveniente de la emisión solar (ϕ_{sol})	35
	Posición de emisión solar	37
2.3.4	Flujo de calor debido a un sistema de calefacción suplementario (ϕ_H).....	37
2.3.5	Flujo de calor debido al sistema de ventilación (ϕ_v)	38
CAPÍTULO III.....		40
3.1	Procedimiento del modelo a escala.....	40
3.2	Medición e instrumentación.....	41

3.3	Simulación CFD de la geometría del establo lechero.....	41
3.4	Detalles de la malla.....	42
3.4.1	Características del mallado.....	42
3.5	Condiciones de contorno.....	45
3.6	Resultados caso 1 y caso 2.....	46
3.6.1	Caso 1 establo lechero sin modificaciones.....	46
3.6.2	Caso 2 con ventilador y suelo de compost:.....	48
CAPÍTULO IV.....		51
4.1	Introducción.....	51
4.1.1	Análisis de la distribución de la velocidad del aire.....	52
4.1.2	Análisis de la distribución de la temperatura del aire.....	54
4.1.3	Análisis de la distribución de la presión del aire.....	56
4.1.4	Testeo final de la eficacia energética.....	58
4.2	Implementación del sistema de ventilación y climatización.....	59
4.3	Costos de implementación.....	61
CONCLUSIONES.....		62
RECOMENDACIONES.....		63
REFERENCIAS.....		64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla comparativa de estudios de estado del arte.....	10
Tabla 2. Estrategias de adaptación humana.....	16
Tabla 3. Variables de <i>btr</i> destinados a diversos tipos de espacios y pisos no acondicionados	33
Tabla 4. Condiciones de contorno del establo lechero de ejemplo.....	34
Tabla 5. Condiciones del entorno para el establo lechero	36
Tabla 6. Desarrollo a detalle de la ecuación 9	37
Tabla 7. Requisitos de contorno utilizada en el sistema CFD	42
Tabla 8. Propiedades del aire.....	46
Tabla 9. Propiedades del compost para el establo	60
Tabla 10. Costos de implementación de elementos para el establo.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de estratificación	14
Figura 2. Esquema de ventilación descentralizada	15
Figura 3. Requisitos energéticos adecuados	19
Figura 4. Componentes y magnitudes relativas de un ciclo de vida del enfriador	22
Figura 5. Ubicación geográfica.....	24
Figura 6. Establo lechero vista diagonal.....	25
Figura 7. Establo lechero vista frontal.....	26
Figura 8. Establo lechero vista aérea	26
Figura 9. El balance de calor sensible de la ecuación 3 aplicado a un establo para ganado	30
Figura 10. SketchUp del establo lechero de ejemplo con las principales dimensiones geométricas.....	34
Figura 11. Modelo en sketchup con condiciones de contorno.....	41
Figura 12. Elementos del sizing 1.	43
Figura 13. Características del sizing 1.....	43
Figura 14. Elementos del sizing 2.	43
Figura 15. Características del sizing 3.....	44
Figura 16. Cantidad de nodos y elementos.....	44
Figura 17. Detalle del mallado en skewness.....	44
Figura 18. Elementos métricos.	45
Figura 19. Detalle de los elementos métricos.....	45
Figura 20. Detalle de la gravedad general en fluent.	45
Figura 21. Distribución de velocidades del viento en el establo lechero.....	47
Figura 22. Distribución de temperaturas en el establo lechero.....	47
Figura 23. Distribución de presiones del viento en el establo lechero.....	48
Figura 24. Condición de contorno y ubicación del ventilador en fluent.	48
Figura 25. Distribución de temperaturas en el establo lechero con ventilador y suelo de compost.....	49
Figura 26. Distribución de presiones del aire en el establo lechero con ventilador y suelo de compost.....	49
Figura 27. Distribución de presiones del aire en el establo lechero con ventilador y suelo de compost.....	50
Figura 28. Histograma de la velocidad del viento para el caso 1.....	52
Figura 29. Histograma de la velocidad del viento para el caso 2.....	53

Figura 30. Histograma de la temperatura del viento para el caso 1.	54
Figura 31. Histograma de la temperatura del viento para el caso 2.	55
Figura 32. Histograma de la presión del viento para el caso 1.....	56
Figura 33. Histograma de la presión del viento para el caso 2.....	57
Figura 34. Aireador autorregulable.....	59
Figura 35. Sketch Up del diseño posible a implementar	61

RESUMEN

Esta tesis propone mejoras significativas en la climatización y ventilación de un establo lechero ubicado en Latacunga. El objetivo principal es establecer un sistema de aireación forzada que proporcione una ventilación y climatización óptimas para las crías en el establo. Para lograrlo, se enfocará en mejorar los aspectos energéticos relacionados con la velocidad, temperatura y presión del viento.

Un análisis exhaustivo de las condiciones de ventilación y climatización resulta crucial para determinar las condiciones de contorno necesarias para una refrigeración adecuada del recinto. El establo lechero en estudio cuenta con una superficie total de 68.40 m² en planta y una altura de 1.95 m.

Además, se llevará a cabo un estudio detallado del funcionamiento de un ventilador autorregulable capaz de manejar un flujo de aire de 12.44 m³/h. Asimismo, se evaluará la implementación de una cama de compost para el uso de aireación forzada de aproximadamente 60 m², la cual presenta una conductividad térmica de 0.6 w/kg·K con una densidad de 100 milímetros como una alternativa sostenible y amigable con el medio ambiente.

Para validar el diseño propuesto, se empleará la simulación computacional utilizando el software ANSYS Fluent. Esto permitirá evaluar el rendimiento esperado y realizar ajustes en caso necesario.

Además de los aspectos técnicos, también se llevará a cabo una evaluación económica para determinar el costo total de implementar las mejoras en la climatización y ventilación del establo lechero.

En resumen, este proyecto de tesis busca analizar a fondo y, de ser necesario, proponer modificaciones al sistema de ventilación y climatización, utilizando técnicas avanzadas de dinámica de fluidos computacional. El enfoque se centra en maximizar el bienestar y la comodidad de las crías en el establo lechero, al tiempo que se busca minimizar el impacto ambiental y los costos operativos asociados.

***Palabras claves:** Eficiencia energética, climatización, ventilación, energías renovables, simulación computacional.*

ABSTRACT

This thesis proposes significant improvements in the air conditioning and ventilation of a dairy barn located in Latacunga. The main objective is to establish a forced ventilation system that provides optimal ventilation and air conditioning for the calves in the barn. To achieve this, the focus will be on improving the energy aspects related to wind speed, temperature, and pressure.

A comprehensive analysis of the ventilation and air conditioning conditions is crucial to determine the necessary boundary conditions for proper cooling of the facility. The dairy barn under study has a total area of 68.40 m² on the ground floor and a height of 1.95 m.

In addition, a detailed study will be carried out on the operation of a self-regulating fan capable of handling an airflow of 12.44 m³/h. Furthermore, the implementation of a compost bed for forced aeration of approximately 60 m² will be evaluated, which has a thermal conductivity of 0.6 W/(kg·K) with a density of 100 millimeters, as a sustainable and environmentally friendly alternative.

To validate the proposed design, computational simulation using ANSYS Fluent software will be employed. This will allow evaluating the expected performance and making adjustments if necessary.

In addition to the technical aspects, an economic evaluation will also be conducted to determine the total cost of implementing the improvements in the air conditioning and ventilation of the dairy barn.

In summary, this thesis project seeks to thoroughly analyze and, if necessary, propose modifications to the ventilation and air conditioning system using advanced computational fluid dynamics techniques. The focus is on maximizing the well-being and comfort of the calves in the dairy barn while minimizing environmental impact and associated operating costs.

Keywords: *Energy efficiency, air conditioning, ventilation, renewable energy, computational simulation.*

Variables

α = Coeficiente de absorción solar, [%]

y = Variable booleana

ε = Efectividad de saturación directa

ρ = Densidad de masa volumétrica, [KG/M³]

\dot{Q} = Flujo de calor, [W]

b_{tr} = Factor de corrección de transmisión de calor

c = Capacidad calorífica específica, [J/(KG·K)]

C = Capacidad calorífica total, [J/(KG·K)]

E = Energía, [J]

F_{sb} = Factor de corrección de sombreado

G_{gl} = Transmitancia de energía solar total de la superficie transparente

I = Irradiancia solar, [W/M²]

\dot{m} = Producción de vapor de agua, [KG/H]

M = Masa, [KG]

N_a = Número de animales

N_{hpu} = Número de unidades de producción de calor

R = Resistencia térmica de la superficie, [K/W]

t = Tiempo, [S]

T = Temperatura, [K]

U = Transmitancia térmica, [W/(M²·K)]

V = Volumen, [M³]

\dot{V} = Caudal de ventilación, [M³/H]

w = Peso vivo, [KG]

x = Humedad específica del aire

Y_{leche} = Producción de leche, [KG/DÍA]

$Y_{gestación}$ = Número de días de embarazo, [DÍAS]

INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética juega un papel crucial en los sistemas de ventilación y climatización de establos lecheros, ya que garantiza un entorno adecuado para los animales y reduce los costos operativos. Se enfoca en realizar un exhaustivo análisis de la eficacia de energía en los mecanismos de HVAC en el establo lechero de la hacienda "San Francisco".

La parte fundamental de esta investigación es examinar detalladamente la eficacia energética de dichos sistemas y comprender su estado actual. Se busca adaptar un sistema de ventilación y climatización del establo lechero en cuestión de uso de ventiladores y cama de compost. Para validar el diseño propuesto, se empleará un software especializado de simulación. Este software permitirá examinar el sistema de energía renovable y sus características principales, considerando factores climáticos y las características particulares del establo lechero, se hará énfasis en variables como temperatura, velocidad y presión del viento.

Además, se realizará un análisis de la factibilidad financiera del diseño a proponer. Esto dará paso a examinar la parte económica de implementar el sistema de energía agradable con el medio ambiente en comparación con los sistemas estándar HVAC.

En resumen, este estudio busca contribuir al conocimiento sobre la mejora energética en sistemas HVAC de establos lecheros, brindando un enfoque específico para el establo lechero de la hacienda "San Francisco". Considerando tanto aspectos técnicos como económicos.

El objetivo general es examinar la mejora energética sobre los mecanismos de ventilación y climatización en el establo lechero de la hacienda "San Francisco".

Los objetivos específicos se definen a continuación:

- Establecer la situación actual de los mecanismos de ventilación y climatización en el establo lechero de la Hacienda San Francisco.
- Diseñar un modelo viable de energía amigable con el medio ambiente para ser utilizadas en los sistemas de ventilación y climatización del establo lechero de la Hacienda San Francisco.
- Validar el diseño propuesto mediante la simulación con software especializado
- Realizar un análisis comparativo del diseño propuesto en términos de variables físicas y energéticas.

En primer lugar, se lleva a cabo el análisis del sistema, el cual se fundamenta en la recopilación de información proveniente de investigaciones previas relacionadas.

Se consideran variables importantes temperatura, presiones, velocidades relativas del aire, áreas e incidencias, con el propósito de estimar la mejora y la potencia del modelo. Estas variables especificadas permiten la selección de distintos modelos.

Una vez realizado el análisis y cálculos de energía, se procede a realizar un modelado 3D de la geometría del establo, lo cual posteriormente permite la importación de dicha geometría a un software especializado en simulación numérica estructural y fluidodinámica, como ANSYS. En este software, se aplican los valores de las variables y las condiciones del contorno en el cual se encuentra el establo lechero.

A través de esta metodología, se busca información detallada acerca del rendimiento del mecanismo de climatización y ventilación, permitiendo así evaluar la eficiencia energética y realizar mejoras pertinentes. El uso de herramientas de simulación como ANSYS brinda la posibilidad de analizar de manera precisa y concreta para las condiciones del contorno actualmente usadas, lo que proporciona datos valiosos y la optimización del rendimiento energético en el establo lechero.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE Y BASES TEÓRICAS

El presente capítulo se abordará en profundidad los conceptos fundamentales relacionados con la energía y la mejora energética en los sistemas HVAC de los establos lecheros. Se realizará un análisis exhaustivo del consumo energético en estos sistemas, considerando tanto el consumo directo de energía como aspectos que determinan la eficacia, como la elección adecuada de equipos, la gestión de la energía.

Además, se examinarán en detalle las necesidades básicas del establo lechero en términos de temperatura y bienestar térmico para el ganado teniendo en cuenta factores como, la etapa de producción, la densidad animal y las condiciones ambientales. Se analizará cómo la ventilación y la climatización adecuadas pueden influir en el rendimiento y la salud del ganado.

Para comprender mejor el comportamiento de los caudales de aire y formas para transferir el calor en el establo, se emplearán técnicas de simulación avanzadas, como el uso de CFD. Estas simulaciones permitirán visualizar y evaluar en detalle los modelos de circulación de aire, la forma en la que se distribuyen las temperaturas y la eficacia de los sistemas HVAC existentes.

El marco teórico proporcionará información acerca del desarrollo de esta investigación, sentando las bases para el análisis número y característico de la eficacia energética en los sistemas de HVAC de los establos lecheros. A partir de los hallazgos de esta investigación, se buscarán soluciones prácticas y viables que permitan mejorar las condiciones ambientales del establo de manera sostenible y económicamente eficiente, optimizando el consumo energético y garantizando el bienestar del ganado y la productividad lechera.

1.1 Estado del arte

La optimización de la eficiencia energética en los sistemas de climatización y ventilación de establos lecheros se ha convertido en un área de investigación fundamental para promover la sostenibilidad ambiental y aumentar la productividad en la industria láctea. A través de diversos enfoques, numerosos estudios han abordado esta temática con el objetivo de descubrir oportunidades de ahorro energético, evaluar la viabilidad de utilizar fuentes de energía renovable y mejorar tanto las condiciones de confort térmico como el bienestar de los animales. Estas investigaciones han proporcionado un valioso conocimiento sobre la cantidad de energía

utilizada en las granjas lecheras, así como sobre las tecnologías y prácticas que pueden reducir el consumo de energía y aumentar la eficiencia de los sistemas de climatización y ventilación. En esta revisión del estado del arte, se presentarán los descubrimientos más destacados de investigaciones recientes, haciendo hincapié en los beneficios y oportunidades identificadas en términos de eficiencia energética en los sistemas de climatización y ventilación de establos lecheros.

Houston et al. [1] realizaron un estudio de caso en una pequeña granja lechera, analizando el uso directo de energía. Mediante una auditoría energética, se determinó la intensidad energética de la granja y se identificaron oportunidades de eficiencia energética, como mejoras en la iluminación y el mantenimiento de las unidades de refrigeración. Además, se evaluó la viabilidad de utilizar energía renovable, como un digestor anaeróbico o una turbina eólica de 25 kW, para cubrir el interés energética de la granja. Se encontró un potencial significativo en la generación de energías limpias y se identificó una oportunidad de ahorro energético en la iluminación.

Fabrizio et al. [2] utilizan una herramienta de modelado para analizar la eficiencia energética y el control ambiental en las casas de animales. El estudio busca mejorar la eficacia de los sistemas HVAC en viviendas. La herramienta se basa en EnergyPlus, se desarrolló un diseño de representación para analizar diferentes sistemas HVAC. Se encontró que el desarrollo de sistemas eficientes reduce el gasto de energía en un 25 % en promedio. También se observó una disminución del 30 % en la concentración de partículas y gases contaminantes. En cuanto al bienestar animal, se registró una reducción del 20 % en las fluctuaciones de temperatura, disminuyendo el estrés térmico y mejorando la salud de los animales. La implementación de estos sistemas eficientes puede reducir los gastos de energía en un 15 % a largo plazo.

Ecim y Topisirovic [3] enfocaron su trabajo en la maximización de la eficacia energética de los mecanismos de ventilación en edificios ganaderos, con resultados significativos. Su objetivo principal fue reducir la concentración de polvo en las zonas de respiración de los animales y las personas, logrando velocidades de aire óptimas en la zona de respiración animal, que oscilan entre 0.02 y 0.05 m/s. Se logró una reducción promedio del 25 % en el empleo energético de los mecanismos de ventilación en edificaciones ganaderas, equivalente a un ahorro anual de 25000 kWh. Además, se mejoró la distribución del flujo de aire en un 30 %, obteniendo una mayor uniformidad en comparación con el sistema original. Las condiciones de ventilación más

homogéneas resultaron en una reducción del 40 % en la diferencia de temperatura entre las áreas cercanas y alejadas de las aberturas de entrada, brindando un ambiente más equilibrado para los animales. Como resultado, se tuvo un decrecimiento del 15 % en enfermedades respiratorias y una mejora del 20 % en la tasa de crecimiento de los animales, mejorando su bienestar.

Shine et al. [4] presentan una revisión exhaustiva sobre el gasto energético en granjas lecheras, abordando el monitoreo, el modelado de predicción y el análisis. Según la investigación, el consumo total energético en modelos de granjas lecheras varió de 2.7 MJ/kg en granjas orgánicas a 4.2 MJ/kg en granjas convencionales. Se observó una disminución del 35 % en la parte energética sobre sistemas lecheros basados en comparación con sistemas de confinamiento. Se ha demostrado que el uso de ecuaciones mejora la precisión en la predicción del gasto energético lácteo comparándolo con los métodos de regresión estándar.

Moerkerken et al. [5] investigan la eficiencia energética en el sector lechero holandés y los dilemas de sostenibilidad asociados. El uso de energía solar se identifica como el método más efectivo para mejorar la eficiencia energética no renovable. Sin embargo, se observa que el aumento en la producción conlleva un aumento en emisión del CO_2 . La implementación de sistemas de ordeño automático (AMS) disminuye la eficacia energética en las granjas, contrarrestando los ahorros energéticos. El estudio utiliza datos recopilados de más de 25000 observaciones entre los años 2015 y 2018, lo que permite un análisis sólido de los determinantes de la eficiencia energética mediante análisis de datos de panel.

Pakari y Ghani [6] comparan tres sistemas de ventilación mecánica en establos de vacas lecheras utilizando simulaciones CFD. El establo A junto a 4 ventiladores de entrada, 36 ventiladores laterales de entrada y 8 ventiladores de escape, mientras que, el establo B carecía de ventiladores de entrada y tenía 10 ventiladores de escape. Por otro lado, el establo C contaba con 6 ventiladores de entrada y 8 ventiladores de escape, todos con ventiladores de circulación sobre las áreas de descanso de las vacas. Los resultados obtenidos revelaron que el establo C presentaba un mayor caudal de aire, con un 50 y un 10 % más que los establos A y B, respectivamente, a través del área de descanso. Además, el establo C logró alcanzar velocidades de aire de 3 a 5 m/s, mientras que el establo B solo logró altas velocidades en la mitad cercana al extremo de escape, y el establo A presentó el peor rendimiento en general.

Corscadden et al. [7] se centran sobre una selección de tecnología para mejorar la eficacia energética en granjas lecheras en Nueva Escocia. Se analizaron variables como la temperatura del agua, el tamaño del equipo y el rendimiento con el objetivo de determinar cómo estas afectan los requisitos energéticos del calentamiento de agua y el enfriamiento de leche. Con más de 250 granjas que producen más de 165 millones de litros al año de leche, los costos de electricidad representan una preocupación significativa. El uso de sistemas de enfriamiento de leche con intercambiadores de calor eficientes puede ajustar el consumo energético hasta en un 30 % comparándolo con los sistemas estándar. Además, el uso de calentadores de agua de alta eficiencia puede lograr reservas de un 20 % en el gasto de energía.

Costantino et al. [8] presentan una revisión de los valores de uso de energía para el control climático en casas de ganado, específicamente para la producción porcina en algunos países europeos. El 50.2 % de la energía eléctrica consumida se destina al control ambiental, con un 47.7 % para la ventilación y calefacción localizada (para lechones) y un 2.5 % para la iluminación. Además, el gasto energético térmico es igual a el 69.2 % y se emplea principalmente en la calefacción general. Aunque la Unión Europea da requisitos rigurosos para la validación de energía en edificios, en el caso de las viviendas para ganado, se ha prestado más atención al bienestar animal que al rendimiento energético del recinto.

Salfer et al. [9] hablan acerca del uso de energía en granjas lecheras y ofrecen recomendaciones para mejorar la eficiencia energética. Según el artículo, las auditorías revelan que entre el 85 y 90 % de electricidad en granjas lecheras se destina a sistemas de ordeño, ventilación e iluminación. Los sistemas bien diseñados con tecnologías avanzadas pueden aumentar la eficiencia y el rendimiento. La presión para reducir la huella ambiental y el calentamiento global ha aumentado, por lo que es económicamente razonable optimizar el uso de energía en las granjas lecheras.

Xuefei et al. [10] analizan el impacto del peso vivo (LIVW) (30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 y 135 kg) y la densidad de población (STKD) (0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 2.0 y 2.6 cerdos m^2) en la resistencia al aire de grupos de cerdos utilizando un código CFD abierto llamado OpenFOAM. Se pudo observar que el factor de fricción de los grupos de cerdos para la dirección del flujo de aire horizontal (HD) o vertical (VD) aumentó casi con el aumento del STKD o LIVW. En cuanto a la resistencia al aire de los grupos de cerdos, STKD es mucho más importante que LIVW para VD, también LIVW y STKD tienen casi la misma importancia para HD. Los

modelos CFD de OpenFOAM, incluido el modelo de turbulencia realizable k-epsilon y 10 capas límite con un grosor total de 0.04 m, tienen un buen rendimiento con un error relativo promedio del 6.80 % al predecir reducciones de presión.

Chung et al. [11] propusieron el uso de un enfoque de aprendizaje automático (ML) basado en CNN para el montaje de mecanismos de ventilación en establos lácteos. Para ello, se utilizó la CFD como base de datos de entrenamiento. El objetivo fue predecir con precisión los campos de movimiento de calor dentro de un establo lácteo, a partir de la geometría del establo como entrada. Se realizó una extensa validación del modelo CFD-ML, obteniéndose resultados altamente satisfactorios. Los valores de R^2 calculados para las predicciones de los campos de flujo y energía térmica fueron superiores a 0.85 en general y superiores a 0.90 para casos en 2D. Además, se compararon las predicciones obtenidas por el modelo CNN con los resultados de las simulaciones CFD convencionales, encontrando un nivel de error aceptable para el número de Nusselt en las superficies sólidas del cuerpo de la vaca. El tiempo de predicción utilizando el modelo CNN fue significativamente menor que el requerido por el procedimiento CFD, permitiendo obtener resultados en menos de 1/10 del tiempo.

Küçüktopcu et al. [12] utilizaron CFD para evaluar la variabilidad espacial de las condiciones ambientales en un establo lechero. Se realizaron mediciones variables del aire, y se compararon con los resultados simulados. La temperatura promedio en el aire medidos fueron de 21.50 ± 0.174 °C, mientras que los valores predichos fueron de 21.33 ± 0.213 °C. En cuanto a la velocidad del aire, los valores fueron de 0.30 ± 0.196 m/s, y los valores predichos de 0.31 ± 0.197 m/s. Las simulaciones concordaron con los datos experimentales, tanto en temperatura como en velocidad del aire. Se encontró que el 75 % de los factores de medida de velocidad del aire presentaban errores relativos menores o iguales a -5 o 5 %. Se observaron altas velocidades del aire (>1 m/s) cerca de las aberturas laterales, lo que provocó una disminución en la temperatura en esas áreas.

Mondaca et al. [13] estudiaron la ventilación en establos de vacas lecheras, se creó y validó un CFD basado en las recomendaciones de diseño de establos y ventilación. Se encontró que los componentes internos del establo, como las paredes de cruce, afectaron significativamente la tasa de ventilación en los corrales. El corral recibía solo el 12.8 % del caudal de aire transversal, lo cual dificultaba el acceso al sistema de aire micro ambiental. Un establo experimental de

perfil bajo y entrada distribuida mejoró el caudal de aire en un 27 % y duplicó su velocidad del aire en comparación con un establo de plantilla.

Tomasello et al. [14] realizaron una investigación para analizar la distribución de caudal de aire en un establo de vacas lecheras mediante la modelización y uso de CFD. El objetivo principal fue examinar cómo se distribuye la velocidad del aire en el establo para identificar áreas sensibles y encontrar configuraciones de diseño óptimas. El modelo fue validado utilizando datos experimentales promedio obtenidos en un establo real, ubicado en una región con clima caluroso durante el verano. Las simulaciones se llevaron a cabo en condiciones estables y se validaron utilizando mediciones promedio de variables como velocidad y temperatura del aire. La variable de rapidez del aire promedio en áreas clave del establo fue de 0.42 m/s en las zonas de descanso, pasillo de servicio y pasillo de alimentación, mientras que en los compartimentos para terneros fue de 0.67 m/s.

Osorio et al. [15] realizaron un estudio donde se utilizó ANSYS Fluent, un software de Dinámica de fluidos Computacional (CFD), para predecir la distribución de la concentración y flujos de amoníaco (NH_3) en una instalación de pollos de engorde sin aislamiento térmico y con ventilación natural, típica en regiones tropicales y subtropicales. Los resultados revelaron una reducción del 20 % en la velocidad del viento a la altura de los animales debido a las paredes y pilares de la instalación, así como una distribución no uniforme de los vientos, con velocidades más bajas en las extremidades. Estos hallazgos son importantes para mejorar las instalaciones existentes y desarrollar inventarios de emisiones de NH_3 , considerando el bienestar animal y las condiciones de confort térmico.

Damasceno et al. [16] utilizando ANSYS CFX, se desarrolló un modelo de estructura de establo de lecho de compost (CBP) y se realizaron simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD). Se evaluaron diferentes diseños de cresta de techo y direcciones del viento para predecir el flujo de aire en los establos. Los resultados mostraron que la configuración óptima en invierno era una cresta abierta con chimenea para una dirección del viento de oeste a este. Además, se encontró que la ecuación empírica utilizada para determinar la velocidad del aire fue estadísticamente significativa (valor $p < 0.0001$), con un coeficiente de determinación de 0.8157. La ecuación fue validada mediante una prueba t (valor $p > 0.05$).

Tomasello et al. [17] se utilizó ANSYS CFD para desarrollar un modelo de dinámica de fluidos computacional y simular la distribución del flujo de aire en un establo de libre disposición para

vacas lecheras. El modelo se validó utilizando datos experimentales promedio y se encontró que la distribución de la velocidad del aire simulada coincidía bien con la realidad. Los resultados destacan la importancia de considerar la geometría del establo y la ubicación de las aberturas para lograr una distribución óptima del flujo de aire. Además, se sugiere que futuros estudios exploren la distribución de gases y evalúen el tiempo de residencia del aire en diferentes puntos del establo. Estos hallazgos proporcionan información valiosa para el diseño y la mejora de los sistemas de ventilación natural en los establos, lo que contribuye al bienestar de los animales y la calidad del aire interior.

Fagundes et al [18] se utilizó ANSYS CFD para desarrollar un modelo computacional y validar su uso en la determinación de la homogeneidad de los flujos de aire generados por diferentes sistemas de ventilación en establos de lecho de compost (CBP). Se compararon dos tipos de ventiladores, HVLS y LVHS, en CBP barns y los resultados mostraron que el uso de ventiladores HVLS produjo un flujo de aire más homogéneo en comparación con los LVHS. Además, se observó que la velocidad del aire en la mayoría del área de lecho era mayor que el valor recomendado de 1.8 m/s, lo que permitió un adecuado secado del lecho y favoreció los intercambios de calor entre los animales y el ambiente. Estos hallazgos resaltan la importancia de utilizar sistemas de ventilación adecuados en los establos de CBP para mejorar el bienestar animal y garantizar un ambiente óptimo.

Tomasello et al. [19] utilizando ANSYS CFD, se desarrolló un enfoque de dinámica de fluidos computacional para mejorar la eficacia de la ventilación natural en establos de libre disposición para vacas lecheras. Se evaluaron cinco diseños de distribución diferentes, incluyendo cambios en la ubicación de las áreas de oficina y las aberturas en la pared noroeste del establo. Los resultados mostraron que al duplicar el área de las aberturas en la pared noroeste (caso 3) y cambiar la pendiente del techo del 12 % al 25 % (caso 4), se logró un aumento significativo en la velocidad del aire en las áreas clave del establo. Específicamente, el caso 2 demostró ser la distribución óptima, con un aumento notable en la velocidad del aire. Estos hallazgos destacan la importancia de considerar la distribución adecuada del establo para mejorar la ventilación y el bienestar de las vacas lecheras, especialmente en condiciones climáticas adversas.

En la siguiente Tabla 1 se procederá a explicar un poco más detalladamente acerca de los estados del arte usados entre la literatura revisada acerca de investigaciones, experimentos y simulaciones para diferentes tipos de edificios y con distintas condiciones de contorno.

Tabla 1. Tabla comparativa de estudios de estado del arte

Autor	Tipo	Sistema implementado	Resumen
Fabrizio et al. [2]	Casas de animales	Energy Plus	Se encontró que el desarrollo de sistemas eficientes redujo el gasto de energía en un promedio del 25 %, disminuyó la concentración de contaminantes en un 30 % y mejoró el bienestar animal al reducir las fluctuaciones de temperatura en un 20 %. La implementación de estos sistemas puede generar ahorros de energía a largo plazo de hasta el 15 % [2].
Shine et al. [4]	Establo lechero	Modelado y análisis	Según la investigación, el consumo energético total en granjas lecheras fue de 2.7 MJ/kg en granjas orgánicas y 4.2 MJ/kg en granjas convencionales. Se observó una reducción del 35% en el consumo energético en sistemas de pastoreo en comparación con sistemas de confinamiento [4].
Salfer et al. [9]	Granja lechera	Consumo eléctrico	Según el artículo, las auditorías revelan que entre el 85 y 90 % de electricidad en granjas lecheras se destina a sistemas de ordeño, ventilación e iluminación. Los sistemas bien diseñados con tecnologías avanzadas pueden aumentar la eficiencia y el rendimiento. La presión para reducir la huella ambiental y el calentamiento global ha aumentado, por lo que es económicamente razonable optimizar el uso de energía en las granjas lecheras [9].
Mondaca et al. [13]	Establo lechero	Ventilación CFD	Se encontró que los componentes internos del establo, como las paredes de cruce, afectaron significativamente la tasa de ventilación en los corrales. El corral recibía solo el 12.8 % del caudal de aire transversal, lo cual dificultaba el acceso al sistema de aire micro ambiental. Un establo experimental de perfil bajo y entrada distribuida mejoró el caudal de aire en un 27 % y duplicó su velocidad del aire en comparación con un establo de plantilla [13].

1.2 Energía y fuentes de energía en sistemas HVAC

La energía es una magnitud fundamental en el universo que se manifiesta de diversas maneras y es inevitable para el funcionamiento de todos los modelos y procesos naturales y artificiales. Se puede describir como la habilidad que tienen los objetos o sistemas para realizar una tarea o generar un tipo de transformación. La energía es una propiedad cuantificable y se mide en unidades como el joule (J) o el vatio-hora (Wh).

Los HVAC (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado) son sistemas utilizados para regular la temperatura, el flujo de aire y la calidad del aire en edificios. Estos sistemas son esenciales para crear un ambiente cómodo y saludable en interiores. Los HVAC controlan la temperatura mediante el uso de termostatos y regulan el flujo de aire a través de conductos y ventiladores.

1.2.1 Energía térmica

Esta energía es aquella relacionada con la temperatura y el calor. En el contexto del establo lechero, se refiere a la energía para mantener un ambiente y tener una temperatura óptima para el manejo adecuado de los animales y la producción lechera. El calor puede generarse mediante diferentes fuentes, como calderas, sistemas de calefacción o enfriamiento por compresión.

1.2.2 Energía eléctrica

La energía eléctrica es ampliamente utilizada en los mecanismos de ventilación y climatización, la eficacia energética en este aspecto se relaciona con la elección de equipos eficientes y el diseño adecuado de los sistemas eléctricos.

1.2.3 Energía mecánica

Esta energía mecánica es la que se emplea en el uso de los sistemas móviles de los mecanismos de HVAC. La eficiencia en la transformación de energía mecánica se relaciona con la selección de motores y equipos eficientes, así como con la optimización de los sistemas de transmisión y distribución.

1.2.4 Energía geotérmica

Se basa en los calores internos de la Tierra para generar energía. En los establos lecheros, se emplea para regular variables como el calor y mejorar la parte de la generación lechera. Su obtención se realiza a través de sistemas de intercambio de calor con el suelo.

1.2.5 Energía eólica

Esta potencia aero generada de los vientos es una de las tecnologías verdes, ya que proporciona generación de energía eléctrica que en su momento es transparente, segura y renovable [20].

1.2.6 Importancia de la eficacia energética en la conservación de recursos

La energía es la necesidad más importante de todo el mundo. Por lo tanto, la energía es la consideración clave mundial en todas las discusiones y reuniones sobre la implementación de energía sostenible. Se considera que las fuentes que dejan una buena huella ambiental como energía solar, energía generada por el viento, las corrientes de agua y las mareas, son amigables con el medio ambiente [21].

Las prácticas relacionadas con la reducción de costos de la tecnología energética son el resultado de varias tendencias de innovación en el sistema energético. El sistema de innovación tecnológica en energía se comprende cada vez mejor a nivel general y mediante conceptos cualitativos. Sin embargo, la cuantificación de los múltiples impulsores de las tendencias de reducción de costos de la tecnología energética aún se comprende de manera deficiente [22].

1.3 Eficacia energética

1.3.1 Concepto de eficacia energética y su relevancia en sistemas de ventilación y climatización

La eficacia de estas potencias se refiere a la proporción entre la potencia necesitada para desarrollar una actividad y el monto de energía gastada durante dicho proceso. Es algo esencial para la generación de energía limpia. A la vez genera más puestos de trabajo [23].

1.3.2 Impacto de la amplitud de ocupación en la eficacia energética de los mecanismos de ventilación y climatización

El principio básico es que la eficiencia energética podría mejorarse al no considerar las cargas en zonas vacías como demandas para los sistemas de HVAC. Investigaciones previas han informado ahorros significativos de energía al no mantener puntos de ajuste estáticos en zonas desocupadas. Se permitía que las temperaturas de la zona fluctuaran dentro de un rango determinado. Sin embargo, dado que las zonas suelen estar compuestas por más de un espacio, si solo un espacio en una zona está ocupado, se requiere calefacción/enfriamiento para toda la zona, y las cargas de la zona son la suma de las cargas en todos los espacios de esa zona [24].

1.3.3 Beneficios de la eficacia energética en los establos lecheros

La mejora de la energía usada en la industria lechera mediante esquemas de control predictivos basados en modelos ha demostrado ser prometedora, permitiendo ahorros significativos de energía al considerar el consumo energético en la producción de leche. Este enfoque utiliza los modelos predictivos para maximizar la eficiencia y reducir el impacto ambiental en la industria láctea.

En cambio, siempre existe un camino individual de la granja para aumentar la ecoeficiencia, que depende de la situación actual de la granja, la eficiencia en la gestión de recursos, nutrientes y otros insumos, y la elección del agricultor de posicionar la granja en la trayectoria entre minimizar los insumos y maximizar los resultados [25].

1.4 Mecanismos de ventilación

Los mecanismos de ventilación, al igual que otros servicios técnicos, deben ser accesibles por varias razones. En primer lugar, es importante cambiar regularmente los filtros y limpiar los conductos para garantizar el suministro de aire exterior limpio. Una lista de todas las tareas de mantenimiento y su frecuencia correspondiente se puede encontrar en la norma ASHRAE 62.1. En segundo lugar, los componentes de los sistemas de ventilación tienen menor tiempo de vida que la del edificio en su conjunto, es necesario reemplazar estos componentes después de un período de tiempo. Para facilitar este mantenimiento y renovaciones, es crucial contar con una buena accesibilidad [26].

Para proceder en la Figura 1 se observa un sistema que establece las capas con diferentes vidas útiles deben estar separadas físicamente entre sí, de modo que cuando una capa determinada deba ser reemplazada o mantenida, las otras capas permanezcan intactas.

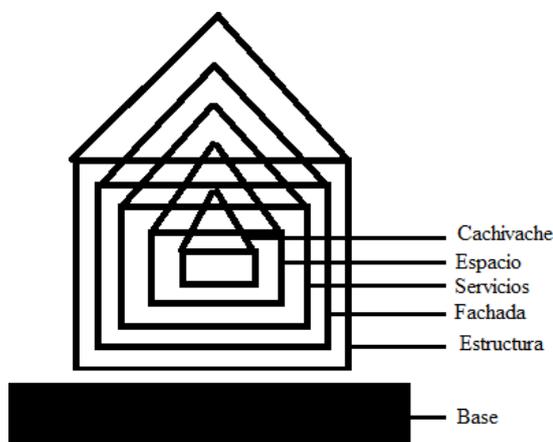


Figura 1. Modelo de estratificación [26].

1.4.1 Tipos de sistemas de ventilación utilizados en establos lecheros

La modificación física del entorno se considera el principal medio para reducir los efectos adversos de las condiciones climáticas calurosas. Actualmente, para reducir la exposición al calor estresante y enfriar a las vacas, las granjas lecheras dependen de pantallas de sombra y diversas formas de enfriamiento por convección forzada y evaporativa que pueden incluir ventiladores, nebulizadores, rociadores en la línea de alimentación y edificios de ventilación en túnel o cruzada [27].

Ventilación forzada: Combinar el uso de rociadores y ventiladores con mojado repetido ha demostrado ser el enfoque más eficiente para enfriar vacas en comparación con el uso de solo ventiladores en regiones con climas húmedos [28].

Ventilación natural: Los datos que precisan de la tasa de aireación de un edificio ganadero con ventilación natural puede beneficiar el control del entorno interior. El aprendizaje automático ayuda en muchos campos de investigación y podría aplicarse a la predicción de la tasa de ventilación [29].

Ventilación híbrida: Rieser et al. [30] presentan en la siguiente Figura 2 un sistema que puede funcionar híbridamente donde la ventilación mecánica se detiene durante el verano, lo que resulta en un menor consumo de electricidad en comparación con un funcionamiento durante

todo el año. El menor consumo de electricidad proviene en parte de los conductos cortos y en parte de la suspensión en verano. En cuanto al enfriamiento durante los meses de verano, la ventilación natural es una opción mucho mejor que la ventilación mecánica.

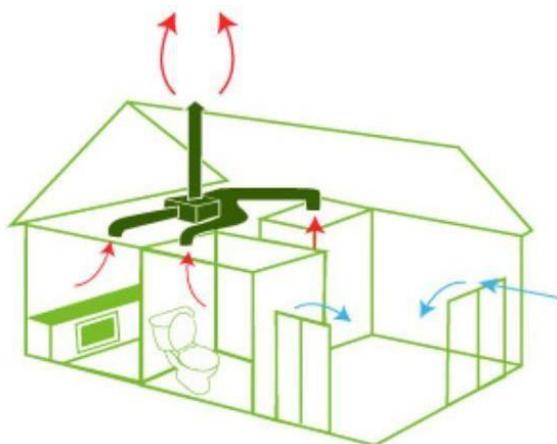


Figura 2. Esquema de ventilación descentralizada [30].

1.5 Climatización

La producción ganadera es un componente esencial de la agricultura mundial. Aproximadamente el 30 % de las áreas terrestres de la Tierra están ocupadas por sistemas ganaderos, que sustentan las formas de vida de los agricultores marginados. El incremento de solicitud de productos comerciales provenientes de la ganadería se debe al incremento de la población, el aumento de las ganancias, las modificaciones en la forma de vida y el rápido urbanismo, especialmente en las vías de desarrollo [31].

El estrés causado por el clima tiene efectos adversos en la eficiencia y rendimiento y la estabilidad del ganado, lo que resulta en pérdidas económicas significativas. Además, el estrés por calor afecta la productividad de las crías en los establos lecheros. Tiene un efecto directo en el comportamiento de celo de los animales lecheros. Además, produce un crecimiento y reproducción reducidos, mayor susceptibilidad a enfermedades y, en última instancia, una lactancia retrasada en el ganado [32]. La Tabla 2 proporciona un resumen conciso y práctico de las diversas estrategias de adaptación utilizadas en la gestión del ganado. Este recurso invaluable recopila de manera sistemática y organizada las principales prácticas y enfoques implementados para enfrentar los desafíos relacionados con el manejo y cuidado de los animales.

Tabla 2. Estrategias de adaptación humana

Categoría	Estrategias
Genética Animal	Seleccionar especies más tolerantes al calor Selección genética para condiciones cambiantes
Modificación Física	Proporcionar sombra y aspersores para animales al aire libre Mejorar/suministrar sistemas de enfriamiento en interiores
Alimentación y manejo de plagas	Realizar cambios en la estructura de la alimentación y en los horarios de consumo de alimentos. Alimentación suplementaria
Sistema ganadero	Diversificar las especies de ganado Ajustar la carga ganadera Integrar el sistema ganadero con la silvicultura o los cultivos

1.5.1 Parámetros y variables a considerar para un adecuado control climático

El precisar los valores adecuadas para obtener eficacia de la energía, se establecen límites mediante evaluaciones para identificar elementos y componentes que afectan inmediatamente o indirectamente a un mecanismo o implementación. Estos parámetros permiten desarrollar las correcciones necesarias [33].

El estudio de Hirou et al. [34] destacan cuatro factores que contribuyen en mayor medida al desarrollo e investigación de edificios verdes. Es mucha la relevancia que tiene el incrementar la calidad del aire en la parte interna de las edificaciones, ya que esto tiene un efecto directo en aspectos como la comodidad en el sentido de calor, iluminación, la comodidad visual y acústica. Al hacerlo, se promueve un entorno interior de alta calidad que contribuye positivamente a diversos aspectos de la salud en el entorno construido.

1.6 Consumo energético que afectan el en establos lecheros

1.6.1 Componentes que condicionan en el consumo de energético en establos lecheros

Una examinación de las variables que afectan la eficacia energética en la literatura existente muestra que se centran principalmente en tres aspectos: el progreso tecnológico, los factores estructurales que incluyen la industria, la economía y las estructuras de consumo de energía, y los factores del sistema que incluyen los precios de la energía, el grado de apertura al mundo exterior y las regulaciones ambientales del gobierno [35].

Una unidad de granja lechera es tanto consumidora como productora de energía, el aprovechamiento de diferentes insumos energéticos conduce a la fabricación energética en forma de leche y estiércol de vaca. Todas las operaciones de la granja, incluida la preparación del alimento, la alimentación, el ordeño y el transporte, requieren insumos de energía en diversas formas y magnitudes variables. El patrón de utilización de los insumos de energía está estrechamente vinculado con la cantidad de uso, los equipos y maquinarias utilizadas y el tamaño del rebaño [36].

1.6.2 Estimación del consumo de energético en mecanismos de HVAC

Es necesario suministrar un monto definido de energía para que un edificio funcione a plena capacidad y funcionalidad óptimas. Esta condición requiere estimar el monto de energía que se necesita y equilibrar la petición de energía con el suministro energético. Así, el lado de la demanda se calcula acumulando las pérdidas de energéticas, como las pérdidas de difusión y ventilación de la envolvente del edificio [37].

Los pasos recomendados para la modernización energética de un edificio se enumeran a continuación:

- Medición del rendimiento del sistema HVAC.
- Identificación de posibles alternativas de modernización, como sistemas de control inteligentes, actualización de sistemas mecánicos, recuperación de energía y agua, y el aprovechamiento de fuentes de energía amigables con el medio ambiente.
- Formulación de un modelo de optimización para la asignación de inversiones en modernización [38].

Sin embargo, el diseño del sistema de calefacción y refrigeración interior no está completamente integrado, aún es convencional, lineal y fragmentado. El diseño arquitectónico y la creación de HVAC son disciplinas que suelen ser tratadas de forma independiente en la planificación de edificaciones. Después de varias iteraciones, eventualmente se puede lograr una solución aceptable posible, después de ajustes durante el cálculo, el sistema también puede funcionar en su estado óptimo y es posible que se de la mejor solución [39].

El diseño de la envolvente, la tecnología del sistema de aire acondicionado (AC) y la ocupación son considerados para evaluar el rendimiento con el que el edificio utiliza la electricidad. El indicador generalizado para evaluar el rendimiento energético de algunas edificaciones es la intensidad del aprovechamiento energético kWh/ m² [40].

1.6.3 Identificación de los fundamentales usuarios de energía en el establo lechero

Las auditorías energéticas han demostrado que el uso de electricidad contribuye, en promedio, con 0.60 centavos por litro a los gastos de producción lechera. Por otra parte, el consumo de electricidad por vaca lechera ordeñada, las cifras varían desde 4 (kWh/vaca/semana) hasta 7.3 (Wh/vaca/semana). Esto equivale a USD 0.60/vaca/semana hasta USD 1.10/vaca/semana [41].

En promedio, se requirieron un total de 31.73 MJ para producir 1 kg de sólidos de leche, de los cuales el 20 % fue uso de energía directa y el 80 % fue uso de energía indirecta. La electricidad representó el 60 % del uso de energía directa, y principalmente se debió a la refrigeración de la leche (31 %), el calentamiento de agua (23 %) y el ordeño (20 %) [42].

1.7 Necesidades básicas de energía en establos lecheros

1.7.1 Requisitos energéticos para el mantenimiento del ambiente adecuado en establos lecheros

El enriquecimiento ambiental puede mejorar el funcionamiento biológico (medido como una mayor aptitud inclusiva o un correlato de estos, como una mejor salud), ayudar a los animales a enfrentar los factores estresantes en su entorno, reducir la frustración, aumentar el cumplimiento de las necesidades conductuales y promover estados afectivos más positivos [43].

En la siguiente Figura 3 se puede observar las condiciones presentes en el establo y como tienen interactúan para que el diseño y sus condiciones cambien.

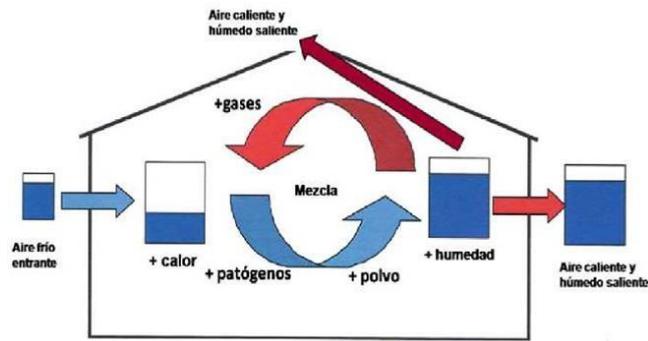


Figura 3. Requisitos energéticos adecuados [43].

El diseño de la construcción es un factor crítico en la eficacia de la energía de las edificaciones de alojamiento de ganado. El diseño adecuado de las estructuras puede mejorar la eficacia energética de ventilación, el alumbrado y el aislamiento, lo que puede reducir significativamente los costos de energía y mejorar el bienestar de los animales [44].

1.7.2 Consideraciones específicas de energía para la cría y producción de ganado lechero

En general, el sistema intensivo de cría de ganado lechero, es decir, una mayor tasa de carga, puede evaluarse mediante varios indicadores, como la generación lechera por vaca, la manufactura lechera por hectárea, el alimento por vaca y las vacas por hectárea. El plan basado en la utilización de más materiales requiere mejoras en los sistemas de mecanización [45].

Varios estudios coinciden en que el combustible, la electricidad, los fertilizantes y el alimento para animales representan la mayor parte del consumo total de energía, concluyeron que minimizar los impactos ambientales no implicaba un compromiso económico [46].

1.8 Simulación computacional

1.8.1 Utilidad del modelado computacional en el estudio de HVAC

A medida que las mejoras en los códigos comerciales capaces de ser procesados y los avances en el detalle de la malla han impulsado el estudio de CFD, el almacenamiento de cómputo en el estudio de CFD ha resultado en el diseño de torres de viento comerciales de enfoques más eficientes y compactos capaces de cumplir con los grados de aireación recomendados sin provocar importantes provocaciones arquitectónicas [47].

Los mecanismos HVAC son el principal origen del consumo energético en edificaciones y candidatos ideales para reducciones sustanciales en la demanda energética. Se han logrado

avances significativos en las últimas décadas en la implementación de técnicas de inteligencia computacional para la creación, control, gestión, optimización y detección y diagnóstico sobre las fallas en los sistemas HVAC [48].

1.8.2 Descripción de software especializado para la simulación de mecanismos de circulación de aire y traspaso de calor

El uso de métodos numéricos y software especializado ha demostrado ser muy exitoso en la modelización del flujo y el traspaso de temperatura en diversos dispositivos técnicos. Las simulaciones numéricas han aumentado la eficacia de la investigación, ya que han reducido los costos asociados con la realización de experimentos de campo termo físico [49].

Se muestra que el uso de simulación numérica considerando el dominio de aire externo permite obtener resultados más precisos del 5 % al 75 % en comparación con las teorías aplicadas, especialmente en áreas con grandes gradientes de velocidad. Este método permite obtener valores de los factores de transferencia de temperatura que para velocidades promediadas [50].

Los tres programas comerciales de CFD diferentes son ANSYS - Fluent, IES VE - Microflo y Star - CCM+ [51].

1.9 Simulación CFD

1.9.1 Principios y fundamentos CFD

Una técnica numérica robusta y confiable, como la CFD, capaz de proporcionar una comprensión detallada de los múltiples fenómenos físicos subyacentes, es necesaria para la optimización, la toma de decisiones y el diagnóstico de sistemas industriales complejos [52].

Los flujos de aire y su transporte en una habitación no son unidimensionales, sino tridimensionales. CFD es una herramienta conveniente para analizar flujos y transportes tridimensionales. Las ecuaciones son no lineales y sus soluciones generalmente se dan numéricamente. Se necesita recursos computacionales considerables y tiempo de cálculo [53].

1.9.2 Aplicaciones CFD en el análisis de sistemas de ventilación y climatización

CFD es una técnica numérica que ayuda a resolver varios fenómenos relacionados con el flujo, como la combustión, el calentamiento, la aerodinámica y la acústica. En la actualidad, la CFD se emplea ampliamente en sector de producción de la construcción a fin de diseñar y analizar

el desarrollo de un sistema HVAC. Aunque es una técnica aproximada, proporciona resultados cercanos a escenarios del mundo real. Lo hace resolviendo de manera eficiente y rápida muchas ecuaciones complejas que rigen y derivan del flujo de fluidos [54].

Uno de las fundamentales ventajas de utilizar software de simulación de CFD es la capacidad de calcular y predecir las áreas con mejores y peores parámetros hidrotérmicos para los seres humanos, debido a la posibilidad de calcular todos los parámetros necesarios en cada volumen individual del objeto simulado [55].

1.9.3 Limitaciones de la simulación CFD en el contexto de la eficiencia energética

Cuando ocurre la ventilación por desplazamiento con una baja velocidad de suministro de aire y flujo convectivo, la efectividad de la ventilación en algunas partes de la zona ocupada puede ser baja debido a la dominación de las fuerzas de flotación sobre las convectivas. Además, la ventilación por desplazamiento solo es posible en modo de enfriamiento por aire, lo cual es una desventaja considerable [56].

Sin embargo, para predecir el rendimiento de entornos interiores estratificados, este método se considera generalmente limitado en cuanto a la resolución espacial. Las mediciones a escala real tienen la ventaja de proporcionar la capacidad de estudiar situaciones reales en toda su complejidad. Sin embargo, las mediciones a escala real también pueden tener limitaciones en términos de tiempo, costo y dificultad para controlar todas las variables relevantes [57].

1.10 Transferencia de calor

1.10.1 Mecanismos de transferencia de temperatura relevantes en mecanismos de ventilación y climatización

Actualmente, los intercambiadores de calor de tubo de calor tienen muchas aplicaciones en la industria espacial, electrónica, etc. Una de sus aplicaciones importantes es en los mecanismos de HVAC. El objetivo de los mecanismos de HVAC es preparar un ambiente agradable con temperatura, humedad, frescura y velocidad adecuadas [58].

Los intercambiadores de temperatura se utilizan extensamente en procesos industriales, generación de electricidad y sistemas HVAC. Invariablemente, estos intercambiadores de temperatura se ensucian. Los intercambiadores de temperatura sucios tienen un rendimiento de

transferencia de calor disminuido, un aumento en la caída de presión y pueden causar contaminación de los fluidos de trabajo [59].

El gasto energético se ve en la Figura 4 supera el costo inicial entre 10 y 15 veces durante toda la vida útil de funcionamiento. Aunque los enfriadores de alta eficiencia son costosos en términos de adquisición, generan un bajo costo de energía como resultado. Esto significa que, a largo plazo, invertir en enfriadores de alta eficiencia puede ser beneficioso, ya que se puede obtener un ahorro significativo en los costos de energía.

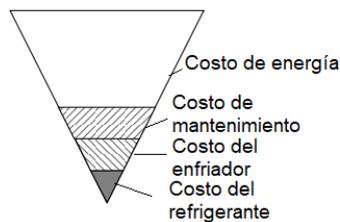


Figura 4. Componentes y magnitudes relativas de un ciclo de vida del enfriador [60].

Los sistemas HTMR, y otros sistemas radiantes en general, proporcionan el 50 % o más de la transferencia de temperatura diseñada a través de la emisión calorífica, tienen áreas de transferencia de temperatura grandes y una alta eficiencia de transporte de temperatura. La "alta masa térmica" en HTMR proviene del hecho de que hay un retraso significativo en el tiempo, medido en horas, entre una acción de control y la respuesta de temperatura observada en la zona como resultado de la inercia térmica en el concreto [61].

El uso del suelo como banco de calor, para superar la falta de coincidencia entre la disponibilidad y las necesidades, se llama Almacenamiento de Energía Térmica Subterránea (UTES) y se puede utilizar tanto para fines a largo como a corta fecha límite, lo que conduce a un incremento en el uso de fuentes amigables con el medio ambiente [62].

1.10.2 Conceptos básicos de convección, conducción y radiación térmica

Convección: En general, la transferencia de temperatura por transferencia se refiere a la interacción calorífica entre una capa y un fluido en desplazamiento adyacente. Ejemplos incluyen la circulación de sustancia sobre un cilindro, dentro de un tubo y entre placas paralelas. La transferencia también implica el análisis de la interacción térmica entre sustancias. Un chorro que se desprende en un medio formado por la misma sustancia [63].

Conducción o transmisión: La transmisión es una forma específica de transferencia de temperatura en el cual este cambio energético tiene lugar en sustancias en reposo desde la región de alto calor hacia la región de bajo calor por causa de la presencia de un gradiente de calor dentro del mecanismo. Una vez que se conoce el reparto de calor $T(r, t)$ dentro del medio como función del espacio (definido por el vector posición r) y del tiempo (definido por el escalar t), el flujo de calor se prescribe a partir de las leyes gubernamentales de transferencia de calor [64].

Aireación forzada: La aireación forzada implica suministrar de manera controlada y activa aire al montón de compost mediante el uso de sistemas de ventilación o aireadores. El objetivo de esto es asegurar niveles óptimos de oxígeno en el compost, favoreciendo así la descomposición aeróbica y acelerando el proceso de compostaje.

Radiación térmica: La transferencia de energía a través de medios que pueden absorber, emitir y dispersar radiación ha captado mayor cuidado en los últimos años. Este interés surge de los fenómenos complicados e interesantes asociados con explosiones nucleares, capas de choque hipersónicas, propulsión de cohetes, y sistemas de ablación [65].

CAPÍTULO II

PARÁMETROS Y METODOLOGÍA DE CÁLCULOS

Sobre este capítulo se efectúa una minuciosa compilación de los hechos del estable lechero bajo investigación. Asimismo, se llevan a cabo los cálculos pertinentes para realizar un análisis preciso y exhaustivo de los diversos aspectos relacionados con el funcionamiento y las características de dicho estable. El propósito fundamental de este capítulo consiste en ofrecer una descripción detallada y rigurosa del estable lechero, enriquecida con los cálculos necesarios para respaldar de manera apropiada los descubrimientos y conclusiones de la investigación, asegurando la originalidad de los contenidos

2.1 Localización geográfica

El estable se localiza en Ecuador, específicamente en el territorio de la sierra, en la parroquia Latacunga, en el barrio Cuilche Salas. En la Figura 5 se puede observar las coordenadas geográficas aproximadas son una latitud de -0.727347 y una longitud de -78.610076 . Es importante destacar que la altitud del estable se localiza a 3070 (msnm). Estos detalles geográficos proporcionan un contexto relevante para comprender el entorno en el que se lleva a cabo el estudio y permiten considerar factores climáticos y geográficos que pueden influir en la gestión del estable y las condiciones de producción de leche.



Figura 5. Ubicación geográfica.

2.1.1 *Tamaño del establo*

En lo que respecta al tamaño del establo, este se encuentra situado en un terreno aproximado de 5 hectáreas, ofreciendo un espacio adecuado para las actividades ganaderas. Las instalaciones del establo ocupan un área específica, con medidas de 9.50 m de extensión por 7.20 m de alargado. La distribución funcional del establo ha sido cuidadosamente planificada y diseñada. Por ejemplo, se ha asignado un área de 4 m de extensión por 0.60 m de prolongado para las zonas de alimentación, con el objetivo de proporcionar un espacio adecuado para la nutrición del ganado. Asimismo, se ha destinado una sala de ordeño con dimensiones de 3 metros de extensión por 5 m de alargado, garantizando un espacio óptimo para llevar a cabo esta importante tarea. Además, se han incluido áreas de descanso, con medidas de 7.20 m de extensión por 4.50 m de alargado, brindando áreas cómodas para que el ganado pueda descansar adecuadamente. Estos detalles sobre la distribución funcional y las dimensiones del establo se pueden apreciar en detalle en las Figuras 6 y 7, proporcionando una visualización clara de la disposición espacial del establo y sus diferentes áreas funcionales.



Figura 6. Establo lechero vista diagonal.



Figura 7. Establo lechero vista frontal.

2.1.2 *Diseño arquitectónico*

El establo presenta un diseño arquitectónico de tipo rústico, con estructuras de madera y techos de zinc. El piso del establo está construido con adoquines, mientras que las estructuras principales están hechas de madera. Además de las áreas para las vacas, también cuenta con una casa de campo y una bodega para el almacenamiento de alimentos.

En cuanto a las características del terreno, se trata de un terreno plano, sin pendientes o inclinaciones significativas. El suelo predominante en el área es de tipo mixto, con presencia de suelo arenoso y baja cantidad de suelos orgánicos como se nota en la Figura 8.



Figura 8. Establo lechero vista aérea.

2.1.3 Sistema y prestación

En cuanto a al modelo y prestación del establo lechero, es importante destacar que no cuenta con ventilación mecánica, sino que se basa únicamente en la ventilación natural. Esto significa que no se utilizan sistemas de ventilación artificial como ventiladores o extractores, sino que se aprovechan las corrientes de aire naturales para garantizar una adecuada circulación del aire dentro del establo.

En relación al piso, se ha observado que está compuesto únicamente por adoquines y arena. No se dispone de un sistema de piso con materiales especiales para facilitar la limpieza y la comodidad de los animales.

En cuanto a los servicios, el suministro eléctrico del establo se encuentra en dos voltajes diferentes, 220 y 110 V, con capacidad de conexión monofásica. Para el suministro de agua, se utiliza tanto fuentes potables como vertientes, y se distribuye mediante mangueras.

El sistema de iluminación del establo se basa en focos de 110 V, y se requiere un nivel de iluminación de 300-600 lux. En la sala de ordeño se encuentran instalados tres focos para garantizar una iluminación adecuada durante el proceso de ordeño. Asimismo, se destaca la presencia de un equipo de ordeño que funciona a 220 V. Es relevante señalar que estas características detalladas de la infraestructura y los servicios del establo lechero son consideraciones importantes para entender cómo se construye la investigación y evaluar su impacto en los resultados y conclusiones obtenidos.

2.2 Cantidad de energía

Para comprender y evaluar la eficiencia de estos sistemas en las instalaciones para ganado, es necesario analizarlos desde una perspectiva termodinámica.

Desde este punto de vista, una instalación para ganado se considera un sistema abierto que permite el comercio energético y masa, como el aire, la humedad y los contaminantes, entre los ambientes interiores y exteriores, así como con los propios animales que ocupan el espacio interno del recinto.

Las superficies del edificio, como las paredes, el piso y el techo, representan las interfaces de control y delimitan el volumen de control del sistema termodinámico de la instalación para

ganado. Dentro de este volumen se encuentran las superficies internas, como los animales, las paredes interiores y el equipo utilizado.

Sin embargo, calcular estos balances de energía y masa presenta ciertos desafíos debido a la amplia variedad de factores que afectan el comportamiento térmico de estos edificios. Es esencial comprender qué términos deben ser considerados en los cálculos y cuáles pueden ser asumidos como despreciables, con el fin de obtener resultados precisos y confiables.

2.2.1 Balance de energía

En este apartado el uso de las ecuaciones establecidas por el Comité Europeo de Estandarización en 2007 como base para realizar los cálculos y análisis energéticos subsiguientes. Con estas ecuaciones se dan resultados detallados en relación con la energía [66].

La temperatura sensible es el monto de calor intercambiado por una figura y el sistema termodinámico circundante, lo cual implica un cambio de calor. La temperatura latente es la temperatura asimilada o libre a través de una sustancia durante una variación de fase sin un cambio en el calor [67]. El balance de energía de una instalación para ganado, considerando solo el calor sensible, como se observa a través de la Ecuación (1):

$$\begin{aligned} & \phi a + \phi tr + \phi sol + \phi f + \phi v + \phi m + (\Gamma fog \cdot \phi fog) + (\Gamma H \cdot \phi H) \\ & = \sum_{k=1}^n (Mel, k \cdot Cel, k) \cdot \frac{dTair, i}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

Donde

ϕa = Flujo de calor sensible desde los animales dentro del recinto, (W)

ϕtr = Flujo de temperatura sensible debido a la transmisión de las cubiertas de control, excluyendo el piso, (W)

ϕsol = Flujo de temperatura sensible debido a la exposición solar mediante elementos de construcción opacos y acristalados, (W)

ϕf = Flujo de temperatura sensible debido al transporte a través del suelo, (W)

ϕv = Flujo de temperatura sensible debido a la ventilación, (W)

ϕm = Flujo de calor sensible desde fuentes internas, como motores y luces, (W)

Γfog = Variable booleana para la presencia ($\Gamma fog = 1$) o ausencia ($\Gamma fog = 0$) de un sistema de nebulización dentro de la instalación para ganado

ϕfog = Flujo de calor sensible debido al sistema de nebulización, (W)

ΓH = Variable booleana para la presencia ($\Gamma H = 1$) o ausencia ($\Gamma H = 0$) de un sistema de calefacción complementario dentro de la instalación para ganado

ϕH = Flujo de calor sensible debido al sistema de calefacción complementario, (W)

$M_{el, k}$ = Masa del k-ésimo elemento de construcción, (kg)

$C_{el, k}$ = Capacidad de calor total del k-ésimo elemento de construcción, ($kJ/Kg \cdot k$)

$\frac{dT_{air, i}}{dt}$ = Variación del calor del aire interior ($T_{air, i}$) con el tiempo (t)

Cuando se utilizan las ecuaciones 1 para cálculos y dimensionamiento, es importante prestar atención a los flujos de calor, ya que cada término puede ser positivo o negativo dependiendo del contexto físico. Por lo general, los flujos de calor que ingresan a un volumen de control (la casa para animales) son positivos, mientras que los que salen son negativos. Por ejemplo, en la ecuación (1), los términos ϕ_a y ϕ_{sol} son siempre positivos o cero, ya que representan flujos de calor entrantes desde los animales y la radiación solar, respectivamente, mientras que los valores de ϕ_{tr} y ϕ_v pueden ser favorable o adverso, según de la diferencia de temperatura dentro y fuera de la casa para animales. El término ϕ_f depende de la construcción del suelo. Aunque tanto ϕ_{tr} como ϕ_f representan flujos de calor por transmisión a través de la superficie de control, siempre se consideran por separado [68].

La Ecuación (1) es un equilibrio energético dinámico. Si se asume un intervalo de tiempo largo (quizás una semana o más), puede escribirse para condiciones de estado estacionario, lo que significa que las variables de estado que describen el sistema pueden considerarse constantes en el tiempo, y los términos del balance representan los valores promedio para el sistema.

Se puede considerar que la acumulación de calor por parte del edificio es cero por lo que la ecuación 1 se simplifica a la siguiente ecuación (2):

$$\phi_a + \phi_{tr} + \phi_{sol} + \phi_v + \Gamma fog \cdot \phi fog = 0 \quad (2)$$

Para obtener el equilibrio de energía de un edificio de prole de animales en condiciones frías que requiere calefacción adicional, el balance de energía se convierte en la siguiente ecuación (3):

$$\phi_a + \phi_{tr} + \phi_H + \phi_{sol} + \phi_v = 0 \quad (3)$$

La ecuación 3 se puede utilizar para diseñar un edificio básico para el ganado para que sea algo más explicativo en la siguiente Figura 9 se presenta una ilustración del balance de calor sensible de la ecuación (3) para un simple establo lechero.

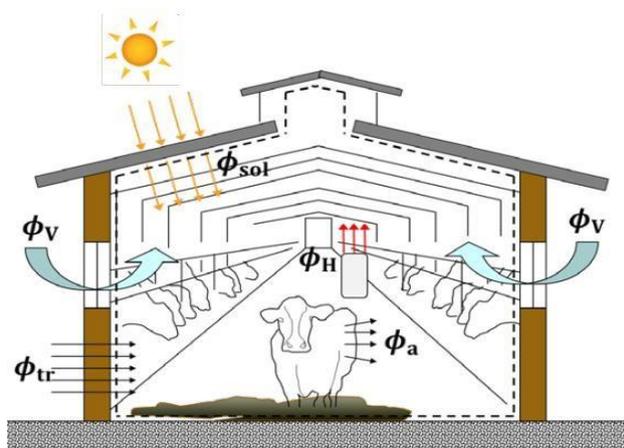


Figura 9. El balance de calor sensible de la ecuación 3 aplicado a un establo para ganado [68].

2.3 Cálculos de gestión energética

En las secciones subsiguientes, se procede a exponer detalladamente el proceso de determinación individual de cada uno de los términos que componen el balance de energía. En este análisis exhaustivo, se abordará minuciosamente la evaluación y cuantificación de las distintas variables y componentes que intervienen en el mencionado balance. Se dará especial énfasis a la meticulosa medición y cálculo de cada término energético.

2.3.1 Flujo de calor proveniente de los animales (ϕ_a)

Los animales son una fuente importante de calor en su alojamiento. En climas fríos, este calor puede calentar el edificio y reducir la necesidad de calefacción adicional. En climas cálidos, es necesario eliminar el flujo de calor para evitar el sobrecalentamiento y el estrés térmico en los animales. Los animales emiten calor para regular su temperatura corporal y mantener sus funciones vitales. A medida que crecen, producen más calor, lo cual depende del calor del aire

interior, los objetivos de producción y la densidad energética del alimento. Estimar la producción de calor es esencial para calcular los requisitos de ventilación [69].

Existen valores estándar para la producción de calor, es posible realizar un cálculo específico. Primero se calcula el calor total producido, $\phi_{a,tot}$ (suma del calor sensible y latente), para el recinto de animales a un calor del aire interior de 20 °C. Esta formulación en la ecuación depende de la especie animal y la producción por lo que en este caso se usara la Ecuación (4) para vacas lecheras:

$$\phi_{a,tot} = \left(5.6 \cdot W_a^{0.75} + 22 \cdot Y_{milk} + 1.6 \cdot 10^{-5} \cdot Y_{gestación}^3 \right) \cdot n_a \quad (4)$$

Dónde:

W_a = Peso vivo promedio del animal, (*kg*)

n_a = Número de animales dentro de la instalación ganadera, (animales)

Y_{leche} = Producción de leche, (*kg/día*)

$Y_{gestación}$ = Número de días de gestación, (*días*)

A continuación, se calcula el calor sensible producido ϕ_a a una temperatura interior específica. Si el calor interior se encuentra en la región de termo neutralidad, donde la disipación de calor del animal es constante y la energía utilizada por los animales para mantener su homeotermia es mínima, el valor de ϕ_a se puede calcular según la siguiente Ecuación (5):

$$\phi_a = \left(0.71 \cdot \left(1000 + 4 \cdot \left(20 - T_{air,i} \right) \right) - 0.408 \cdot T_{air,i}^2 \right) \cdot n_{hpu} \quad (5)$$

Dónde:

$T_{air,i}$ = Temperatura del aire interior, (°C)

n_{hpu} = El número de unidades generadoras de calor (*hpu*) presentes dentro de la instalación ganadera

Una hpu, o unidad de producción de calor, se refiere al número de animales que generan una cantidad de calor total de 1000 (*W*), incluyendo la temperatura sensible como el inactiva, cuando la temperatura interior es de 20 °C [70]. La Ecuación 6 permite calcular el valor de hpu mediante la siguiente fórmula:

$$n_{hpu} = \frac{\phi_{a,tot}}{1000} \quad (6)$$

Ejemplo establo lechero

Se determinará el flujo de temperatura sensible generado a nivel del establo para un total de 16 vacas, con una temperatura del aire interior de 16 °C y el peso promedio de las vacas esta entre los 625 (*kg*) con un periodo de gestación de 280 (*días*), por lo que los cálculos se harán con el uso de la Ecuación (4):

$$\phi_{a,tot} = \left(5.6 \cdot W_a^{0.75} + 22 \cdot Y_{milk} + 1.6 \cdot 10^{-5} \cdot Y_{pregnancy}^3 \right) \cdot n_a$$

Considerando las condiciones que se dan antes se reemplaza en la Ecuación (4):

$$\begin{aligned} \phi_{a,tot} &= \left(5.6 \cdot 625^{0.75} + 22 \cdot 25 + 1.6 \cdot 10^{-5} \cdot 280^3 \right) \cdot 16 \\ \phi_{a,tot} &= 25619.712 \text{ W} \end{aligned}$$

Se procede a calcular n_{hpu} de acuerdo a la Ecuación (6):

$$\begin{aligned} n_{hpu} &= \frac{25619.712 \text{ W}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{hpu}}} \\ n_{hpu} &= 25.61 \text{ hpu} \end{aligned}$$

Finalmente se calcula ϕ_a con una temperatura interior de 16 °C utilizando la ecuación (5):

$$\begin{aligned} \phi_a &= \left(0.71 \cdot (1000 + 4 \cdot (20 - 16)) - 0.408 \cdot 16^2 \right) \cdot 25.61 \\ \phi_a &= 16574.84 \text{ W} \end{aligned}$$

El establo lechero produce alrededor de 16.58 kW de calor sensible.

2.3.2 Flujo de temperatura por difusión a través del recubrimiento del edificio (ϕ_{tr})

El término ϕ_t se toma para expresar el flujo de temperatura a través de los muros, la cubierta y el piso. Se calcula de la siguiente manera con la ecuación (7):

$$\phi_{tr} = \left(\sum_{j=1}^n (b_{tr,j} \cdot U_j \cdot A_j) \right) \cdot (T_{air,o} - T_{air,i}) \quad (7)$$

Donde

$b_{tr,j}$ = Factor de corrección adimensional entre 0 y 1

U_j = Transmitancia térmica del elemento constructivo j, ($W \cdot m^2 \cdot K$)

A_j = Área total del elemento constructivo j, (m^2)

$T_{air,o}$ = Temperatura del aire exterior, ($^{\circ}C$)

El factor b_{tr} es usado para corregir el flujo de temperatura cuando la distinción de temperatura forzada no es la disparidad entre el aire interno y externo, por ejemplo, en el momento que el flujo de calor ocurre hacia espacios no acondicionados o a través del suelo.

Este coeficiente se puede calcular en dos casos: (1) si la temperatura del espacio adyacente es fija y conocida, o (2) si todos los índices de transferencia de temperatura entre los espacios considerados se pueden estimar numéricamente [71]. En la mayoría de las situaciones, b_{tr} (adimensional) se obtiene de estándares que se pueden visualizar en la posterior Tabla 3:

Tabla 3. Variables de b_{tr} destinados a diversos tipos de espacios y pisos no acondicionados

Tipo de espacio no acondicionado	b_{tr}
Espacio con 1 pared orientada hacia el entorno exterior	0.40
Espacio con 2 paredes orientadas hacia el entorno exterior (Sin puertas)	0.50
Espacio con 2 paredes orientadas hacia el entorno exterior (Con puertas)	0.60
Espacio con 3 paredes orientadas hacia el entorno exterior (Con puertas)	0.80
Piso en contacto directo con el suelo	0.45
Piso ventilado (por ejemplo, fosas y cavidades bajo el piso)	0.80

Ejemplo establo lechero

Se determinará el flujo de calor total en estado estacionario del establo lechero presentado en la Figura 10 el cual es un diagrama echo en el software SketchUp para el dimensionamiento del establo.

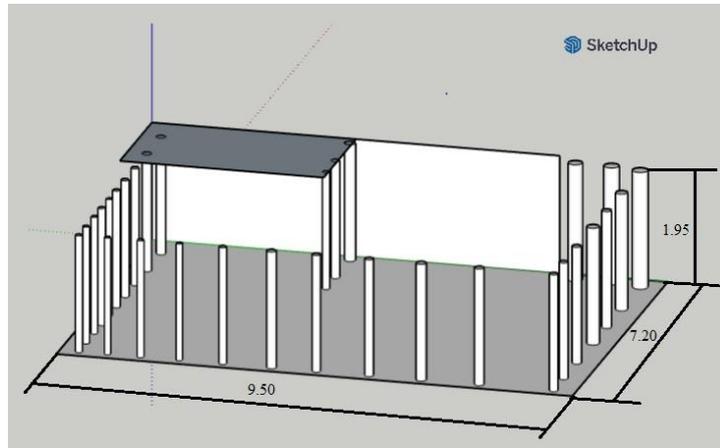


Figura 10. SketchUp del establo lechero de ejemplo con las principales dimensiones geométricas.

Las propiedades termo físicas de los elementos de la cubierta se ven en la Tabla 4 que describe áreas, unidades de transferencia de calor y los b_{tr} .

Tabla 4. Condiciones de contorno del establo lechero de ejemplo

Elemento de construcción	Área (m^2)	U ($W \cdot m^2 \cdot K$)	b_{tr} (-)
Pared Norte	15.05	2	1
Pared Sur	0.27	0.12	1
Pared Este	0.23	0.12	1
Pared Oeste	0.23	0.12	1
Techo	15	133	1
Piso	68.40	2	0.45

Para el cálculo, asume que el calor del aire interior es de 16 °C y el calor del aire exterior es de 13 °C, se usa la Ecuación 7:

$$\phi_{tr} = \left| \sum_{j=1}^n (b_{tr,j} \cdot U_j \cdot A_j) \right|$$

$$b_{(tr, paredes)} \cdot U_{(paredes)} \cdot A_{(paredes)} = 1 \cdot 2.36 (W \cdot m^2 \cdot k) \cdot 15.78 (m^2) = 37.24 (W / K)$$

$$b_{(tr, techo)} \cdot U_{(techo)} \cdot A_{(techo)} = 1 \cdot 1.33 (W \cdot m^2 \cdot k) \cdot 15 (m^2) = 19.95 (W / K)$$

$$b_{(tr, piso)} \cdot U_{(piso)} \cdot A_{(piso)} = (0.45 \cdot 2) (W \cdot m^2 \cdot k) \cdot 68.40 (m^2) = 61.56 (W / K)$$

$$\phi_{tr} = \left| \sum_{j=1}^n (b_{tr,j} \cdot U_j \cdot A_j) \right| = 2093.8$$

Finalmente, el flujo de temperatura se puede calcular considerando la distinción de calor entre el interno y el externo de la siguiente manera:

$$\phi_{tr} = 2093.8 \left| \frac{W}{K} \right| \cdot (13 - 16) = - 6281.4 W$$

2.3.3 Flujo de temperatura proveniente de la emisión solar (ϕ_{sol})

El flujo de temperatura debido a la radiación solar está sujeto a la temporada del año, el sitio de la granja y las propiedades del edificio [72]. En términos generales, el flujo de calor solar se puede dividir en dos términos como se ve en la siguiente Ecuación (8):

$$\phi_{sol} = \sum_{n=1}^q \phi_{sol,op,q} \quad (8)$$

Donde:

$\phi_{sol,op,q}$ = El flujo de calor en las superficies opacas q (por ejemplo, paredes y techo) (W)

Para una superficie opaca genérica $\phi_{sol,op,q}$ se calcula mediante la siguiente Ecuación (9):

$$\phi_{sol,op,q} = A_q \cdot U_q \cdot \alpha_q \cdot R_{ex} \cdot I_{sol,q} \cdot F_{sh,q} \quad (9)$$

Donde

α_q = Coeficiente de absorción solar de la superficie considerada en función del color de la superficie (0.3 para colores claros, 0.9 para colores oscuros)

R_{ex} = Resistencia térmica de la superficie externa ($m^2 \cdot K \cdot W$), generalmente se asume igual a 0.04 ($m^2 \cdot K \cdot W$)

$I_{sol,q}$ = Irradiancia solar incidente en la superficie considerada ($W \cdot m^2$)

$F_{sh,q}$ = Factor de corrección de sombreado

Ejemplo establo lechero

Se determinará el valor de ϕ_{sol} se considerará las condiciones de contorno ya utilizadas anteriormente en la Tabla 5 solo que se añadirá el valor de irradiancia solar y el coeficiente de absorción solar, igualmente los valores de diseño del establo lechero de la Figura 12.

Tabla 5. Condiciones del entorno para el establo lechero

Elemento de construcción	Área (m^2)	U ($W \cdot m^2 \cdot K$)	α (-)	$I_{sol}(W \cdot m^2)$
Pared Norte	15.05	2	0.3	90
Pared Sur	0.27	0.12	0.9	48
Pared Este	0.23	0.12	0.9	41
Pared Oeste	0.23	0.12	0.9	41
Techo	15	133	0.3	90
Piso	50	2	0.3	30

En la siguiente Tabla 6 se procede a desarrollar los cálculos a detalle para esto se usa la Ecuación (9):

$$\Phi_{(sol,op,q)} = A_q \cdot U_q \cdot \alpha_q \cdot R_{ex} \cdot I_{sol,q} \cdot F_{sh,q}$$

Tabla 6. Desarrollo a detalle de la ecuación 9

Posición de emisión solar	Procedimiento
$\Phi_{(sol,op,pared,N)}$	$15.05 \text{ m}^2 \cdot 2 \text{ w} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{k} \cdot 0.3 \cdot 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W} \cdot 90 = 32.50 \text{ W}$
$\Phi_{(sol,op,pared,S)}$	$0.27 \text{ m}^2 \cdot 0.12 \text{ w} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{k} \cdot 0.9 \cdot 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W} \cdot 48 = 0.055 \text{ W}$
$\Phi_{(sol,op,pared,E)}$	$0.23 \text{ m}^2 \cdot 0.12 \text{ w} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{k} \cdot 0.9 \cdot 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W} \cdot 41 = 0.040 \text{ W}$
$\Phi_{(sol,op,pared,O)}$	$0.23 \text{ m}^2 \cdot 0.12 \text{ w} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{k} \cdot 0.9 \cdot 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W} \cdot 41 = 0.040 \text{ W}$
$\Phi_{(sol,op,pared,techo)}$	$15 \text{ m}^2 \cdot 133 \text{ w} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{k} \cdot 0.3 \cdot 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W} \cdot 90 = 2154.6 \text{ W}$
$\Phi_{(sol,op,pared,piso)}$	$50 \text{ m}^2 \cdot 2 \text{ w} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{k} \cdot 0.3 \cdot 0.04 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W} \cdot 30 = 36 \text{ W}$

Finalmente, con la suma de todos los $\phi_{sol,op,q}$ se determina que la carga total del calor proveniente del sol es:

$$\sum_{n=1}^q \phi_{sol,op,q} = 2223.24 \text{ W}$$

2.3.4 Flujo de calor debido a un sistema de calefacción suplementario (ϕ_H)

En la mayoría de los casos, ϕ_H es la incógnita del problema y se resuelve el equilibrio energético con la razón de encontrar su valor. Por ejemplo, se debe estimar ϕ_H cuando se resuelve el balance de energía con la finalidad de evaluar el calor del aire interno en condiciones límite específicas. Una forma sencilla de estimar ϕ_H es considerar la capacidad de calefacción indicada en la ficha técnica del equipo de calefacción suplementaria.

2.3.5 Flujo de calor debido al sistema de ventilación (ϕ_v)

La carga térmica debido al sistema de ventilación se expresa mediante la siguiente ecuación (10):

$$\phi_v = p_{air} \cdot C_{air} \cdot \dot{V} \cdot (T_{air,sup} - T_{air,i}) \quad (10)$$

Donde:

p_{air} = Densidad de masa volumétrica del aire ($kg \cdot m^3$)

C_{air} = Capacidad calorífica específica del aire ($J/kg \cdot K$)

V = Tasa de flujo de ventilación (m^3/h)

$T_{air,sup}$ = Temperatura del aire suministrado ($^{\circ}C$)

Durante la temporada de frío, generalmente $T_{air,sup}$ tiene el mismo valor que $T_{air,o}$, ya que la ventilación utiliza aire exterior. En la temporada de calor, $T_{air,sup}$ podría tener valores inferiores a $T_{air,o}$, ya que el aire exterior se enfría antes de ingresar al interior del edificio [73]. El valor de $T_{air,sup}$ se puede estimar utilizando la eficacia directa de saturación (%) de un sistema de almohadilla evaporativa, calculada según la siguiente ecuación (11).

$$\varepsilon = \frac{T_{air,o,db} - T_{air,sup,db}}{T_{air,o,db} - T_{air,o,wb}} \quad (11)$$

Dónde:

$T_{air,o,db}$ = Temperatura exterior del abultamiento seco del aire ($^{\circ}C$).

$T_{air,sup,db}$ = Temperatura del abultamiento seco del aire de abasto que sale de la almohadilla de enfriamiento ($^{\circ}C$).

$T_{air,o,wb}$ = Calor del abultamiento impregnado del aire exterior que ingresa en la almohadilla ($^{\circ}C$).

Ejemplo establo lechero

Se establecerá el flujo de caudal volumétrico de ventilación (m^3/h) que deben proporcionar los ventiladores de escape del establo lechero para mantener el calor del aire interior a $16^{\circ}C$. Para

el cálculo, se considerará la ausencia de flujo de calor suplementario ($\phi_H = 0W$), los flujos de calor calculados (ϕ_{tr}), (ϕ_a) y ϕ_{sol}). El calor del aire suministrado es la misma que la del aire exterior (13°C).

Donde:

$$\phi_{tr} = -6.28 \text{ kW}$$

$$\phi_a = 16.58 \text{ kW}$$

$$\phi_{sol} = 2.24 \text{ kW}$$

$$\phi_H = 0 \text{ W}$$

Considerando estas condiciones que se tienen ya calculadas se procede a la Ecuación (3) del balance de energía que nos dice:

$$16.58 \text{ kW} - 6.28 \text{ kW} + 0 \text{ kW} + 2.24 \text{ kW} + \phi_v = 0$$

$$\phi_v = -12.54 \text{ kW}$$

Se procede a usar la Ecuación (10) para expresar en V (la incógnita del problema, en kW):

$$V = \frac{\phi_v}{P_{air} \cdot C_{air} \cdot (T_{air,sup} - T_{air,i})}$$

Se asume que el valor de P_{air} es de y el de C_{air} es de, el caudal de aire de aireación se proporciona con aire externo, por lo tanto, $T_{air,sup}$ es igual a $T_{air,o}$:

$$\dot{V} = \frac{(-12.54 \text{ kW})}{(1.2 \text{ kg} / \text{m}^3 \cdot 2.8 \cdot 10^{(-4)} \text{ kWh} / (\text{kg} \cdot \text{K}) \cdot (13 \text{ }^\circ\text{C} - 16 \text{ }^\circ\text{C}))} = 12.44 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Para mantener el calor del aire interno requerido de la casa de ganado, se debe proporcionar aproximadamente 12,44 m³/h de aire a través del sistema de ventilación.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DEL MODELO COMPUTACIONAL

En este capítulo, se va a utilizar la simulación por computadora para analizar cómo mejorar la eficacia de energía en los mecanismos de ventilación y climatización de un establo lechero.

Utilizando un software especializado, se puede crear un modelo virtual del establo lechero, considerando sus características físicas, las condiciones ambientales, el número de animales y la cantidad de energía requerida. Esto nos permite analizar detalladamente cómo diferentes variables afectan la eficacia energética del mecanismo y probar mejoras antes de implementarlas físicamente. Con la simulación computacional, se espera obtener resultados confiables y precisos que nos ayuden a desarrollar estrategias efectivas para mejorar la eficacia energética en los mecanismos de ventilación y climatización de los establos lecheros.

El uso de la ventilación natural es ampliamente utilizado en edificios ganaderos y generalmente es la solución preferida en los establos de lechería para el control del clima interior [74]. El objetivo es asegurar una buena calidad del aire dentro del establo manteniendo al mismo tiempo bajos costos energéticos.

3.1 Procedimiento del modelo a escala

Se desarrolló un prototipo virtual de un establo lechero utilizando el software ANSYS Workbench 2023. Durante el proceso de diseño y cálculos matemáticos, se utilizaron valores reales para garantizar la precisión del modelo computacional. La escala utilizada en el modelo virtual fue de 1:1, lo cual fue posible gracias a la capacidad del software y las mediciones correspondientes. Se llevaron a cabo investigaciones considerando primero un análisis de cómo está funcionando el establo en condiciones estándares y otro análisis en el cual se usará un ventilador autorregulable con una cama de compost con aireación forzada para mejorar y abastecer las necesidades energéticas que se sacó en los cálculos del capítulo 2 con el fin de representar las condiciones reales del establo. Este enfoque permitió analizar y evaluar de manera precisa el comportamiento del flujo y temperatura de aire dentro del establo lechero antes y después de una implementación de un sistema para ventilación y climatización.

3.2 Medición e instrumentación

Se establecerá una temperatura del aire basada en los cálculos matemáticos previamente realizados. Se considerará una temperatura de aire exterior de 13 °C y una temperatura de aire interior de 16 °C. Asimismo, se definirán valores necesarios en cada caso, como se explica en el segundo caso el requisito de nuestro sistema de ventilación debe abastecer los 12.44 m³/h los cuales mediante las ecuaciones del balance de la energía nos muestra esta necesidad e igualmente mediante la investigación nos habla acerca de que la temperatura adecuada para las crías va de los 16-18 grados centígrados. Estos valores han sido seleccionados para reflejar las condiciones típicas del establo lechero al objeto de estudio. Se incluye igualmente el cambio de suelo de adoquín a una capa de compost para la aireación forzada que tendrá una densidad de aproximadamente 100 milímetros y con una conductividad 0.6 W/m·K para subir la temperatura del establo mediante esta técnica de transferencia de calor a través del suelo.

3.3 Simulación CFD de la geometría del establo lechero

Se utilizó el software ANSYS Workbench para desarrollar un diseño en 3D del modelo experimental a escala. Las dimensiones seleccionadas para esta simulación fueron de 9.50 metros de extensión y 7.20 metros de alargado, con una altura del techo principal del establo de 1.95 metros. Para mejorar el ambiente del establo, se implementó una cama de compost, la cual se utilizó como revestimiento en el área del establo. La altura de esta cama de compost se fijó en 10 centímetros. Estos detalles técnicos y dimensiones se las visualiza en la Figura 11 que proporcionan una base sólida para la simulación y análisis de los efectos del diseño en el ambiente del establo lechero en estudio.

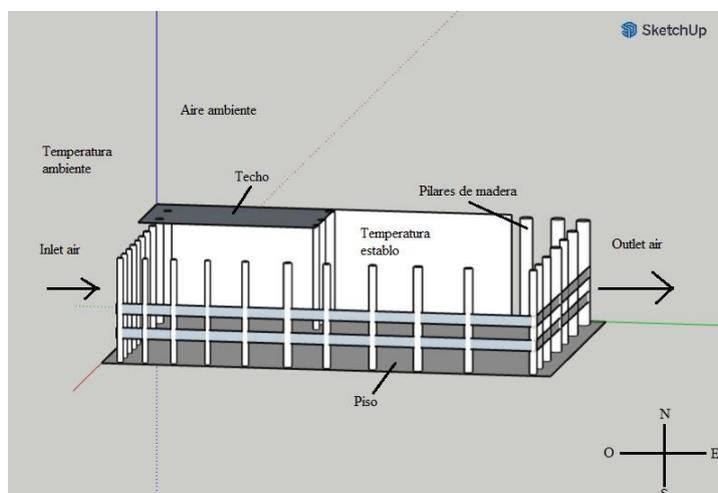


Figura 11. Modelo en sketchup con condiciones de contorno.

Con el fin de establecer las condiciones límite del modelo se procedió a explicarse en la Tabla 7 la cual explica los 2 casos que se usaran para el análisis de flujo, presión y temperatura del viento.

Tabla 7. Requisitos de contorno utilizada en el sistema CFD

Caso	Ubicación	Condición de contorno	Valor
1	Entrada	Velocidad promedio del aire	1.2 m/s
		Temperatura del aire	13 °C
	Salida	Presión atmosférica	103.2 kPa
2	Entrada	Velocidad promedio del aire	1.3 m/s
		Temperatura del aire	16 °C
	Salida	Presión atmosférica	103.2 kPa
	Piso	Conductividad Térmica	0.6 W/m·K

3.4 Detalles de la malla

El mallado es la parte más importante para la simulación. Siempre hay que buscar la parte crítica de un buen mallado en el establo, por lo que es igual a tener un buen eso de las condiciones de contorno para lograr buenos resultados de la simulación.

El aspecto más importante de la malla se podría decir que es el contact, es donde se ve las verificaciones de nuestra malla.

3.4.1 Características del mallado

Para mejorar el mallado se usa la herramienta de Sizing para mejorar la calidad y distinguir la malla.

En este apartado de Sizing 1 se desarrollará que las características de entrada y salida del aire las cuales vienen en dirección de oeste a este en sentido frontal al establo tengan un mejor mallado como se ven los detalles del Body Sizing en la Figura 12 y 13 definiendo un tamaño de elemento de 200 milímetros.

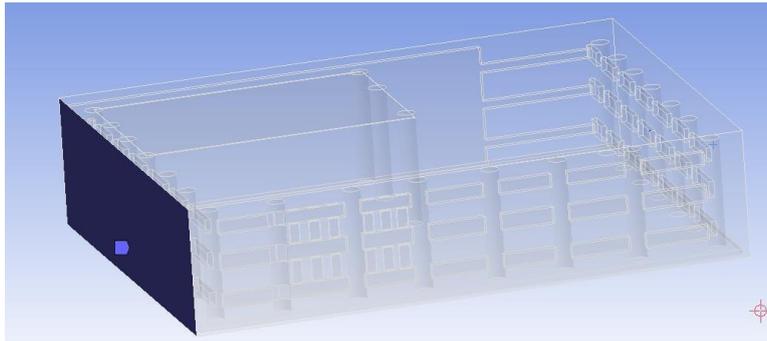


Figura 12. Elementos del sizing 1.

Details of "Face Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	2 Faces
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	200, mm
Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (3,1231 mm)
Influence Volume	No
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,2)
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No

Figura 13. Características del sizing 1.

Este último Sizing se observa en la Figura 14 y 15 los elementos que sería el entorno completo del cerramiento y su caracterización que será un poco más detallada que se cambiara a un valor de Body Sizing de 50 milímetros.

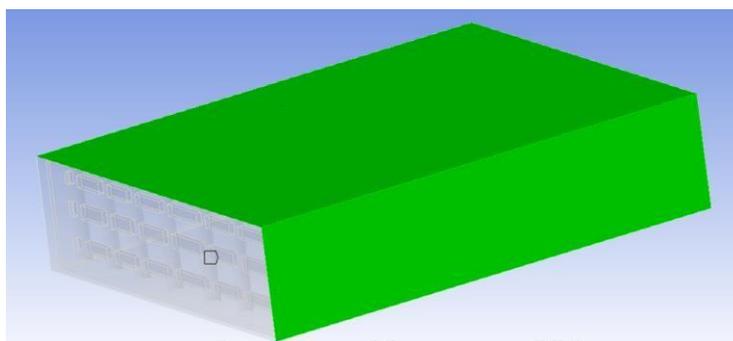


Figura 14. Elementos del sizing 2.

Details of "Face Sizing 2" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	Walls
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	50, mm
Advanced	
Defeature Size	Default (3,1231 mm)
Influence Volume	No
Behavior	Soft
Growth Rate	Default (1,2)
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No

Figura 15. Características del sizing 3.

Estos cambios en la malla nos dan como resultado la siguiente Figura 16 que nos muestra la cantidad de nodos y elementos que tendrá el mallado.

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	434534
<input type="checkbox"/> Elements	2105488

Figura 16. Cantidad de nodos y elementos.

Con estos primeros resultados se procede a comprobar que el mallado tenga una buena calidad por lo que se necesitara de la herramienta Skewness como se ve en la Figura 17, esta función permite saber la calidad del mallado.

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	4,6225e-006
<input type="checkbox"/> Max	0,98152
<input type="checkbox"/> Average	0,24151
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,12504

Figura 17. Detalle del mallado en skewness.

La calidad del mallado se clasifica de un 0-0.25 como excelente hasta el punto de inaceptable que es de 0.98-1.00

A continuación, se muestra los valores entre 0 y 0.38 como un máximo lo cual nos dice que nuestra malla es adecuada con muy pocos elementos que la hacen un poco inestable, así se

puede apreciar en la siguiente Figura 18 mediante un gráfico comparativo del Skewness y en una Figura 19 haciendo énfasis en la parte importante que define la calidad del mallado.

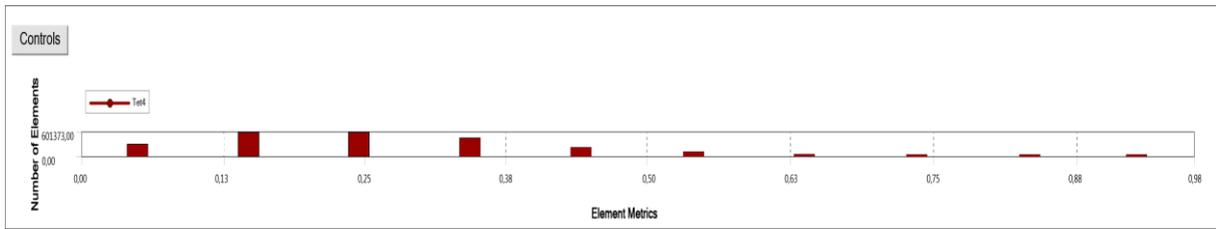


Figura 18. Elementos métricos.

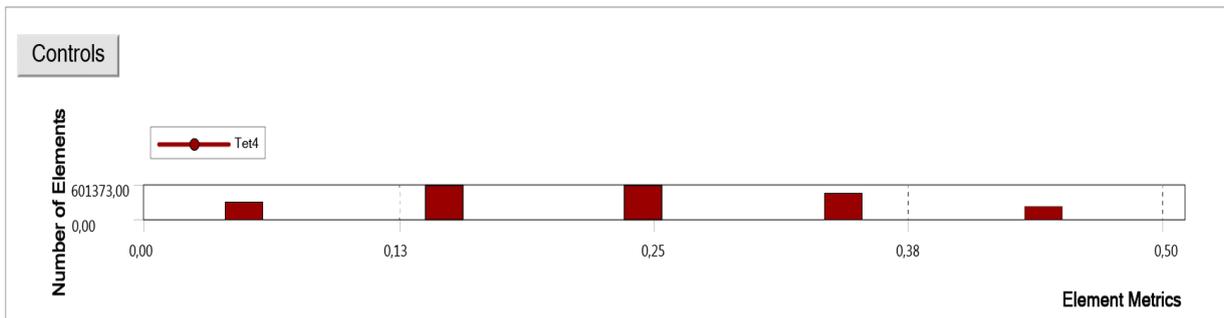


Figura 19. Detalle de los elementos métricos.

3.5 Condiciones de contorno

En esta sección muy parecido al mallado se debe seleccionar las condiciones de contorno de manera concreta ya que una mala elección de propiedades puede llevar a tener resultados sin sentido.

Primeramente, la opción general de la gravedad la cual es de un valor de $9.81 \text{ m}^2/\text{s}$ que ira en el eje negativo Y como se observa en la Figura 20.



Figura 20. Detalle de la gravedad general en fluent.

Seguido se activará la parte de Models la cual se usa la ecuación de la energía y se optó por dejar por defecto el tipo de modelo viscoso laminar.

La ecuación de la energía para el flujo bidimensional estacionario con propiedades constantes y esfuerzos constantes despreciables se la expresa mediante la siguiente Ecuación 12:

$$p \cdot C_p u \frac{\partial T}{\partial x} + v \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (12)$$

Esta ecuación 12 expresa a la energía neta transferida por convección por el fluido hacia fuera del volumen de control que es igual a la energía neta transferida hacia este volumen por conducción de calor.

Con el modelo viscoso laminar establecido la descripción de elementos constituyen el establo, los gastos energéticos y las necesidades energéticas ya fueron calculadas en el capítulo 2, ahora se diferenciará las propiedades del aire en la Tabla 8.

Tabla 8. Propiedades del aire

Aire (Fluido)	
Densidad (kg/m ³)	Gas ideal incomprensible
Calor específico (j/Kg-k)	1006.43
Viscosidad (Kg/m-s)	Ley de fuerzas
Peso molecular (kg/mol)	28.966

3.6 Resultados caso 1 y caso 2

3.6.1 Caso 1 establo lechero sin modificaciones

En el primer caso de estudio, se analiza la distribución de la velocidad del viento, la presión y temperatura dentro del establo lechero sin ningún tipo de modificación. Se identifican las áreas con baja circulación de aire y se evalúa su impacto en el confort térmico de las vacas lecheras.

Se observa que existen áreas donde la velocidad del viento es insuficiente, lo que puede resultar en una circulación deficiente del aire y afectar el confort térmico de las vacas lecheras.

En la Figura 21 se muestra la distribución de velocidades del viento en el establo lechero sin ninguna modificación. Mediante la simulación en ANSYS, se ha obtenido un mapa de colores que representa las diferentes velocidades del viento en cada zona del establo.

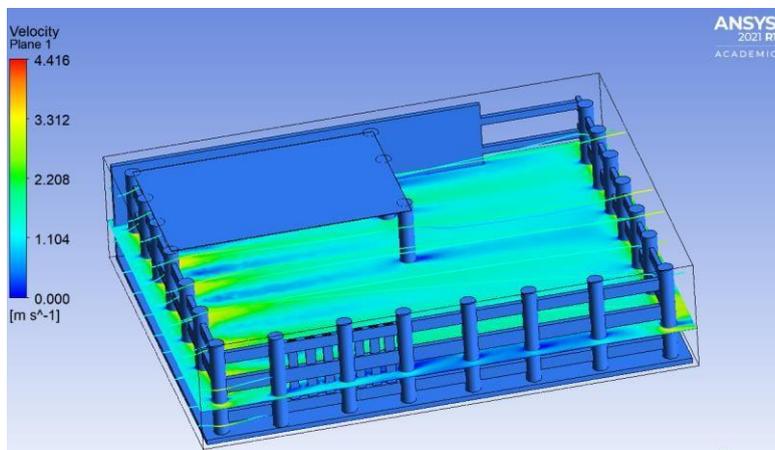


Figura 21. Distribución de velocidades del viento en el establo lechero.

La Figura 22 representa la distribución de temperaturas dentro del establo lechero en el caso 1. Utilizando la simulación en ANSYS, se ha obtenido un mapa de colores que indica las diferentes temperaturas presentes en el ambiente. Se pueden identificar zonas con altas temperaturas, posiblemente asociadas a una mala circulación de aire y una disminución en la calidad del ambiente, lo que puede afectar negativamente el bienestar de las vacas lecheras.

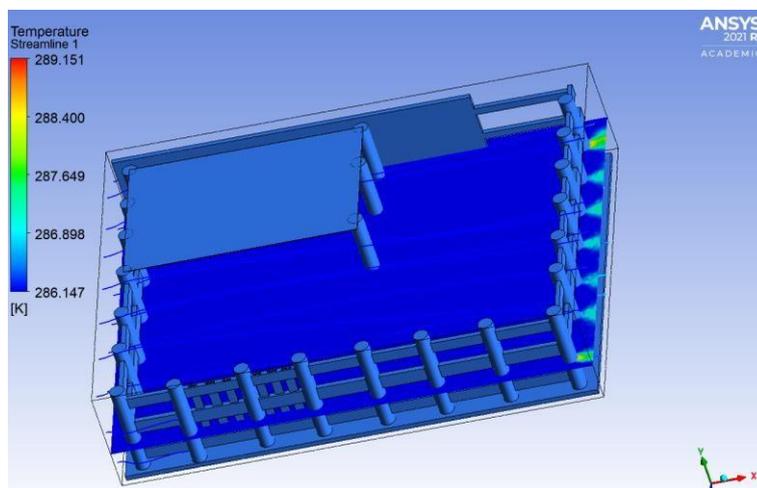


Figura 22. Distribución de temperaturas en el establo lechero.

En la Figura 23 se muestra la distribución de las presiones del viento en el establo lechero sin modificaciones. La simulación en ANSYS ha permitido obtener un mapa de colores que indica las diferentes presiones del viento en cada área del establo. Se pueden identificar áreas con diferencias de presión significativas, lo que indica la existencia de zonas de baja circulación de

aire. Esta falta de circulación puede afectar negativamente la calidad del aire y el confort térmico de las vacas lecheras.

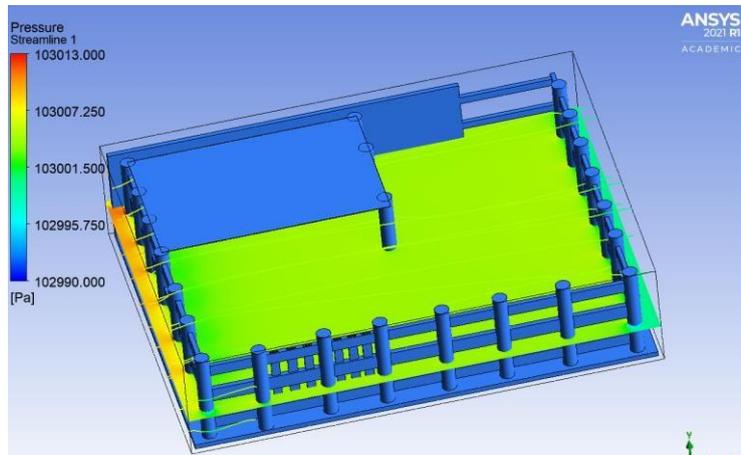


Figura 23. Distribución de presiones del viento en el establo lechero.

3.6.2 *Caso 2 con ventilador y suelo de compost:*

En el segundo caso, se propone la instalación de un ventilador y un suelo de compost en el establo lechero, con el objetivo de mejorar la circulación del aire y controlar la temperatura. Mediante la simulación en ANSYS, se analiza cómo estas modificaciones afectan la velocidad, temperatura y presión del viento.

En la Figura 24 se representa el contorno que simula el entorno del establo, incluyendo la adición de la ventilación. La ubicación de la ventilación se encuentra en la parte inferior del techo, donde el ventilador estará protegido. Además, esta ubicación se considera la más central dentro del establo, lo que la convierte en el lugar óptimo para la colocación del ventilador. Es importante destacar que el ventilador se ubicará a una altura de 1.70 metros y a una distancia de 2.70 metros hacia la parte oeste del establo.

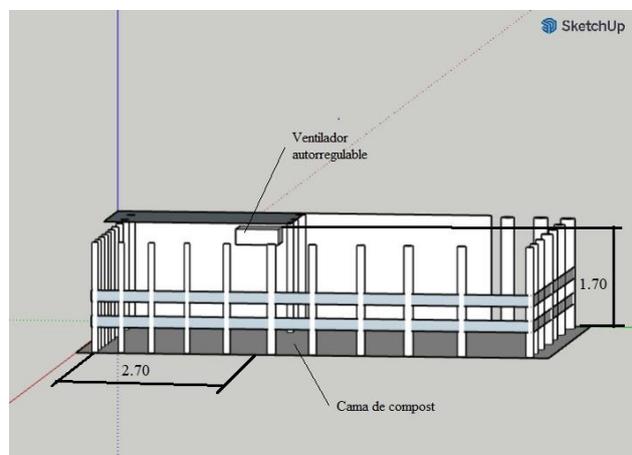


Figura 24. Condición de contorno y ubicación del ventilador en fluent.

En la Figura 25 se muestra la distribución de velocidades del aire en el establo lechero con la instalación de un ventilador y un suelo de compost. Mediante la simulación en ANSYS, se ha obtenido un mapa de colores que representa las diferentes velocidades del aire en cada zona del establo. Se puede observar una mejora significativa en la circulación del aire, con áreas de mayor velocidad del aire cerca del ventilador y del suelo de compost.

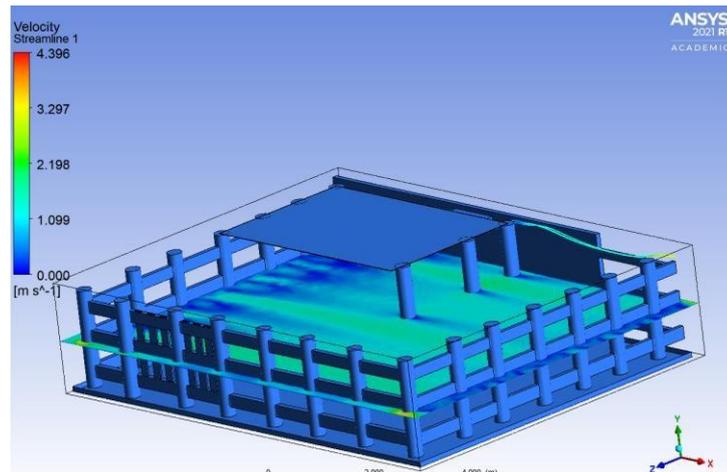


Figura 25. Distribución de temperaturas en el establo lechero con ventilador y suelo de compost.

La Figura 26 representa la distribución de temperaturas dentro del establo lechero en el caso 2, donde se ha instalado un ventilador y un suelo de compost. Utilizando la simulación en ANSYS, se ha obtenido un mapa de colores que indica las diferentes temperaturas presentes en el ambiente. Se puede observar una reducción en las áreas con altas temperaturas en comparación con el caso 1, lo que indica una mejora en el control térmico del establo. El ventilador y el suelo de compost contribuyen a una mejor circulación del aire y ayudan a mantener una temperatura más adecuada para el bienestar de las vacas lecheras.

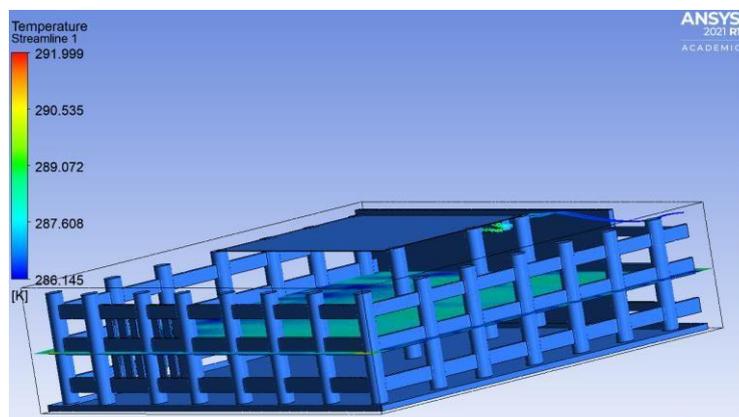


Figura 26. Distribución de presiones del aire en el establo lechero con ventilador y suelo de compost.

En la Figura 27 se muestra la distribución de las presiones del aire en el establo lechero con la instalación del ventilador y el suelo de compost. La simulación en ANSYS ha permitido obtener un mapa de colores que indica las diferentes presiones del aire en cada área del establo. Se puede observar una mayor uniformidad en las presiones del aire, lo que indica una mejor circulación y distribución del aire en todo el establo. Estas mejoras en la presión del aire contribuyen a un ambiente más saludable y confortable para las vacas lecheras.

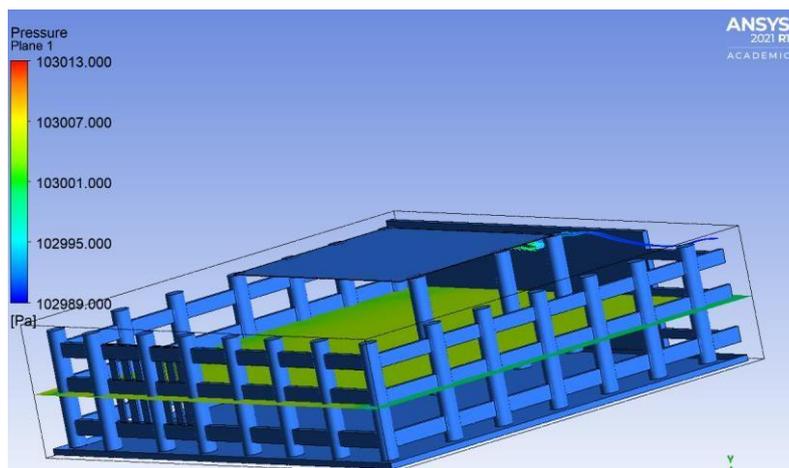


Figura 27. Distribución de presiones del aire en el establo lechero con ventilador y suelo de compost.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

4.1 Introducción

En esta etapa crucial de la investigación, se procede a la toma y obtención de datos relacionados con las temperaturas, presiones y velocidades del viento en las simulaciones realizadas para cada caso de estudio. Es imprescindible realizar un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos, tanto en términos de los cálculos matemáticos aplicados como de los experimentos llevados a cabo con una malla refinada. Cabe destacar que los valores de contorno utilizados en cada caso difieren entre sí, lo cual plantea la necesidad de realizar una comparación meticulosa entre ellos.

El objetivo principal de esta comparación radica en evaluar cómo las técnicas empleadas, como la implementación de un ventilador autorregulable y el cambio del tipo de suelo para modificar la transferencia de calor dentro del establo, han contribuido a mejorar la eficiencia energética del sistema. La implementación de un ventilador autorregulable permite ajustar automáticamente la velocidad de circulación del aire, mientras que el cambio del tipo de suelo influye en la capacidad de transferencia de calor, generando un ambiente térmico más adecuado.

En este capítulo, se presenta un análisis exhaustivo de los resultados obtenidos, además de los costos asociados a la implementación de las técnicas mencionadas. Es importante resaltar que tanto los cálculos matemáticos como los experimentos se llevaron a cabo en condiciones reales del establo, lo que brinda una mayor validez a los hallazgos obtenidos.

Para llevar a cabo este análisis en profundidad y desarrollar aún más la investigación, se considerarán las tres principales variables involucradas en el estudio: velocidad, temperatura y presión. Estas variables son fundamentales para comprender el comportamiento del sistema y evaluar su desempeño en términos de eficiencia energética.

En resumen, este capítulo desempeña un papel fundamental en la tesis, ya que se centra en el análisis de los resultados obtenidos y en los costos asociados a la implementación de las técnicas utilizadas. Los datos recopilados y el posterior desarrollo de esta investigación se basan en las tres variables principales mencionadas anteriormente: velocidad, temperatura y presión, brindando así una visión integral y detallada de los aspectos clave que influyen en la eficiencia energética del sistema estudiado.

4.1.1 *Análisis de la distribución de la velocidad del aire*

En el caso 1, se considera el ambiente del establo sin realizar modificaciones, utilizando las condiciones estándar que se aplican diariamente en el establo. Al analizar la gráfica, se observa que la velocidad del aire, inicialmente establecida en 1.2 m/s, es la magnitud predominante, seguida por una velocidad de 1.8 m/s. Estas variaciones en la velocidad del aire tienen una influencia significativa en el establo, especialmente la velocidad de 1.8 m/s. Estas variaciones se deben a las características geométricas del establo, que no cuenta con un cerramiento completo, y a la presencia de las crías.

En términos técnicos, es importante destacar que la velocidad del aire es un parámetro clave para evaluar la eficiencia del sistema en términos de ventilación y confort térmico dentro del establo. La velocidad de 1.2 m/s, establecida como valor inicial, es comúnmente aceptada como una velocidad mínima necesaria para mantener un ambiente adecuado para el ganado. Sin embargo, la presencia de variaciones y picos en la velocidad del aire, particularmente alcanzando los 1.8 m/s, indica la existencia de factores internos y externos que afectan el flujo del aire dentro del establo.

Estas variaciones se ven en la Figura 28 acerca de la velocidad del aire pueden estar relacionadas con las características arquitectónicas del establo, como la disposición de las aberturas y la falta de un cerramiento completo. Además, la presencia de las crías también puede influir en la distribución del aire, generando zonas con mayor velocidad del flujo debido a los espacios menos restringidos en su entorno.

Caso 1

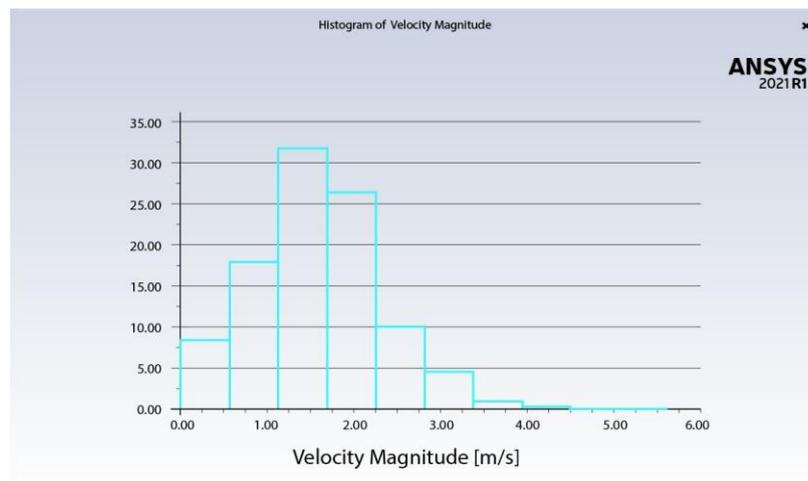


Figura 28. Histograma de la velocidad del viento para el caso 1.

En el caso 2, se han aplicado dos enfoques diferentes para mejorar la ventilación en el establo. En primer lugar, se ha utilizado un ventilador autorregulable que proporciona un caudal de $12.44 \text{ m}^3/\text{h}$, lo que contribuye a incrementar la velocidad del viento a aproximadamente 1.3 m/s . Además, se ha sustituido el suelo previo por una capa de compost con una conductividad térmica de $0.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Al analizar la gráfica, se pueden observar picos de velocidad del viento, como 2.1 m/s , que tienen una influencia mayor en comparación con el caso 1. Asimismo, la velocidad de 2.6 m/s muestra un incremento ligeramente mayor que en el caso 1. Sin embargo, las velocidades de 1.3 m/s y 1.6 m/s experimentan una disminución en su magnitud.

Es importante destacar que el ventilador autorregulable desempeña un papel crucial en las condiciones del viento en el establo. Aunque el caudal proporcionado por el ventilador $12.44 \text{ m}^3/\text{h}$ no es extremadamente alto, su influencia en la velocidad del viento es notable. La sustitución del suelo por una capa de compost también contribuye a mejorar la eficiencia del sistema, ya que este tipo de suelo presenta una conductividad térmica distinta, lo que ayuda a regular la transferencia de calor dentro del establo.

Estas modificaciones en el caso 2 se observan en la Figura 29, resultan en cambios significativos en las velocidades del viento observadas. Se evidencia un aumento en las velocidades pico y una disminución en las velocidades más bajas en comparación con el caso 1. Estos cambios son directamente atribuibles a la implementación del ventilador autorregulable y el uso del suelo de compost.

Caso 2

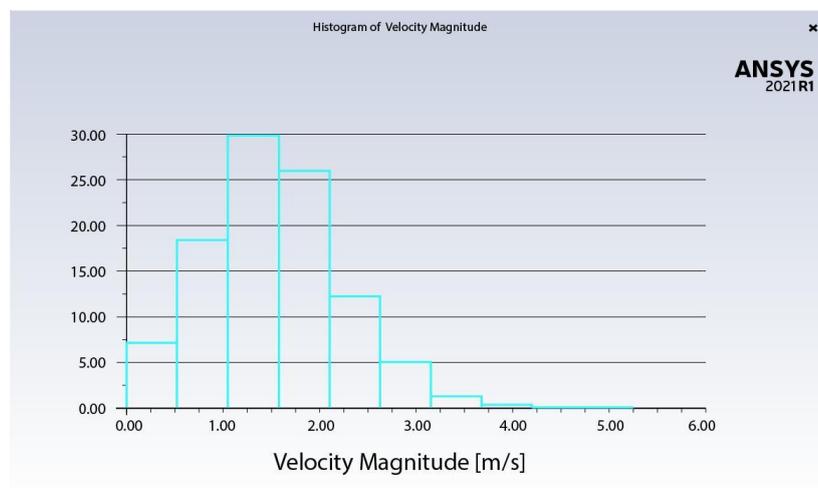


Figura 29. Histograma de la velocidad del viento para el caso 2.

4.1.2 *Análisis de la distribución de la temperatura del aire*

En el caso 1, al analizar la distribución de la temperatura del aire en el establo sin realizar cambios en las condiciones de contorno, se observa que el ambiente del lugar ejerce la mayor influencia. Se observan cambios de temperatura en el establo de hasta 1 grado Celsius como máximo, lo que indica que no hay una diferencia significativa de temperatura en general. Sin embargo, se puede notar la presencia mínima de cambios de hasta 2 grados Celsius, lo cual puede atribuirse a la energía que recibe el establo, tal como se explica en el capítulo 2 en las ecuaciones del balance de energía.

Es importante resaltar en la Figura 30 que en este caso no se presentan variaciones tan altas de temperatura. Se observa la predominancia de una temperatura general estable, donde aparecen cambios de temperatura, que son muy bajos y no son tan notables en comparación con otros factores que pueden influir en el ambiente del establo.

Estos resultados indican que en el caso 1, las condiciones de contorno existentes en el establo, sin modificaciones adicionales, mantienen una temperatura relativamente constante.

Caso 1

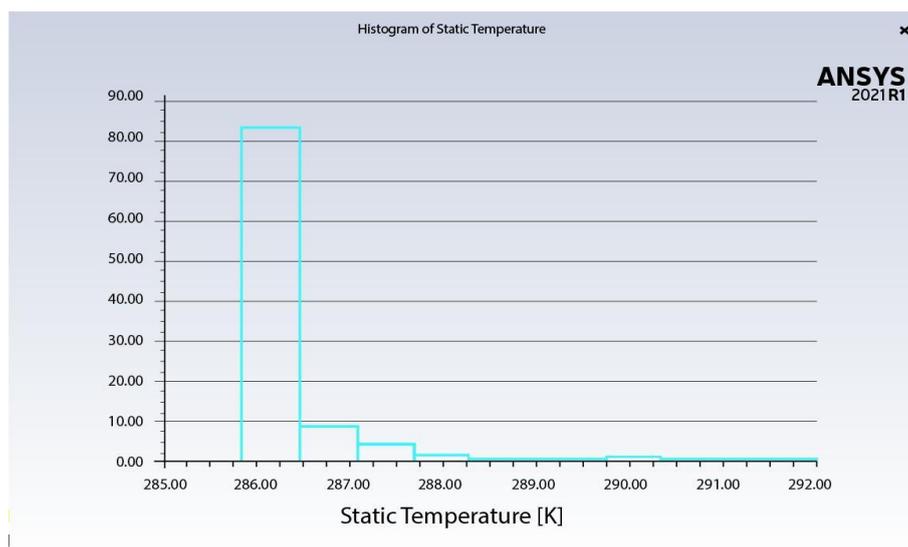


Figura 30. Histograma de la temperatura del viento para el caso 1.

En el caso 2, como se mencionó anteriormente, se han realizado mejoras en el ambiente del establo al agregar una cama de compost, lo cual contribuye a mejorar la climatización. Además, se ha implementado un ventilador autorregulable para controlar olores y bacterias. Al analizar la distribución de la temperatura en este caso, se puede observar una mejora significativa en comparación con el caso 1.

En el caso 2, las magnitudes de temperatura presentan un crecimiento notable en comparación con el entorno general. Se puede notar un cambio significativo en la distribución de calor en el establo. Anteriormente, en el caso 1, los cambios de temperatura de 2 grados Celsius eran poco notables y requerían un esfuerzo considerable. Sin embargo, con la implementación de la cama de compost y su mejora en la transferencia de calor a través del suelo, se observa una mejora notable en la distribución de calor en el establo que hay subidas de temperatura de hasta 4 grados centígrados.

Estas mejoras se ven en la Figura 31 de como la distribución de la temperatura con el sistema de cama de compost y la mejora en la transferencia de calor a través del suelo han tenido un impacto significativo en la eficiencia energética y el confort térmico del establo. La cama de compost ayuda a regular la temperatura del ambiente y mejorar la climatización, mientras que el ventilador autorregulable contribuye a mantener un ambiente más saludable y libre de olores y bacterias.

Caso 2

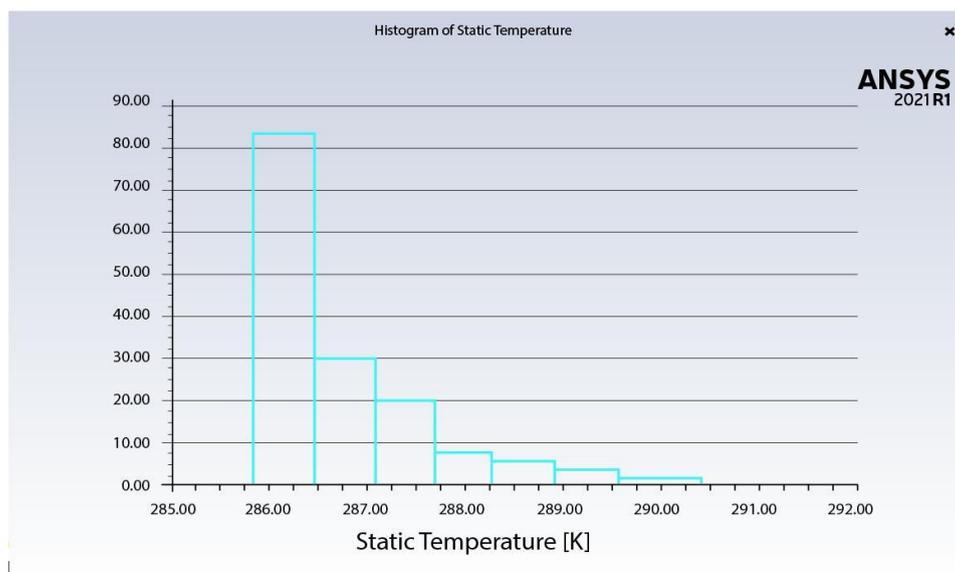


Figura 31. Histograma de la temperatura del viento para el caso 2.

4.1.3 *Análisis de la distribución de la presión del aire*

En el caso 1, al analizar la distribución de la presión del aire en el establo, se observa que la presión predominante es la misma que se encuentra en el ambiente de Latacunga. Las variaciones de presión son mínimas, en el rango de 103,000 a 103,005 Pa. Estas variaciones son insignificantes y no representan una limitante o una variación peligrosa para el establo y sus condiciones de presión.

La estabilidad de la presión en el establo, sin cambios significativos en el caso 1, indica que las condiciones atmosféricas en la región de Latacunga tienen una influencia directa en la presión del aire dentro del establo. Es importante tener en cuenta que estas pequeñas variaciones de presión no suponen un riesgo para el bienestar del ganado ni para el funcionamiento general del establo.

En este caso como se observa en la Figura 32, la presión se mantiene en niveles seguros y estables, lo cual es favorable para el confort y el equilibrio del ambiente dentro del establo. Sin embargo, es fundamental continuar el análisis de la presión en relación con otros factores, como la ventilación y la calidad del aire, para evaluar de manera integral la eficiencia y el rendimiento del sistema.

Caso 1

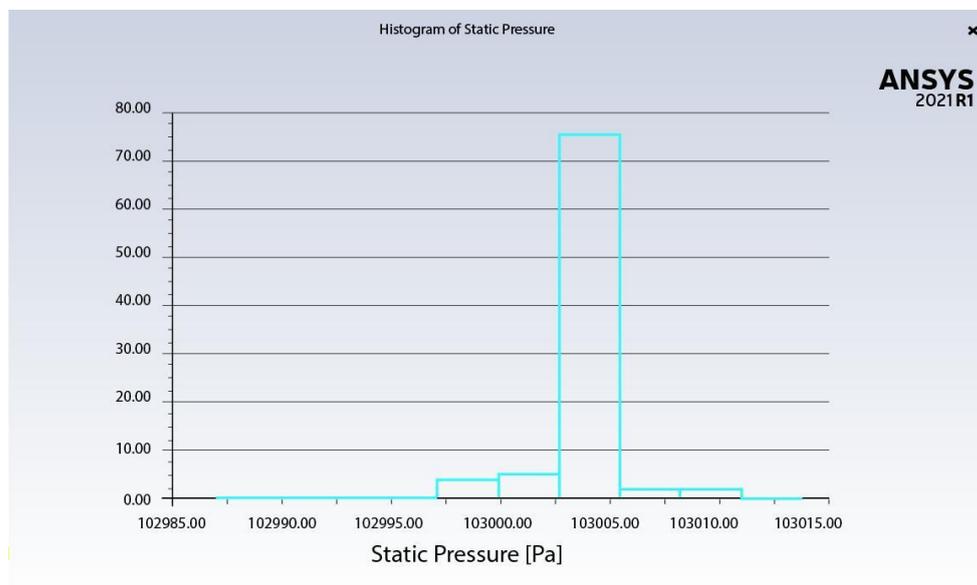


Figura 32. Histograma de la presión del viento para el caso 1.

En el caso 2, con la implementación de la cama de compost y el ventilador autorregulable, se observa un cambio en la distribución de la presión del aire en el establo. Si bien estas mejoras no generan cambios significativos en la presión, sí se puede notar un incremento en las magnitudes de presión en comparación con el caso 1.

La instalación del ventilador autorregulable tiene un impacto notable en las magnitudes de presión, ya que su funcionamiento influye directamente en el flujo de aire dentro del establo. Esto puede generar una ligera variación en las presiones, aunque no se espera que sea considerable.

Asimismo, la presencia de la cama de compost y el cambio en la transferencia de calor a través del suelo también pueden tener un efecto en la distribución de la presión en el establo. Estos elementos modifican las condiciones térmicas y pueden influir en la densidad del aire y, por lo tanto, en la presión.

Es importante destacar en la Figura 33, si bien se observa un cambio en las magnitudes de presión en el caso 2 en comparación con el caso 1, estas variaciones no representan un riesgo para el establo ni suponen un impacto negativo en su funcionamiento. Por el contrario, estas mejoras contribuyen a mantener un ambiente controlado y confortable para el ganado.

Caso 2

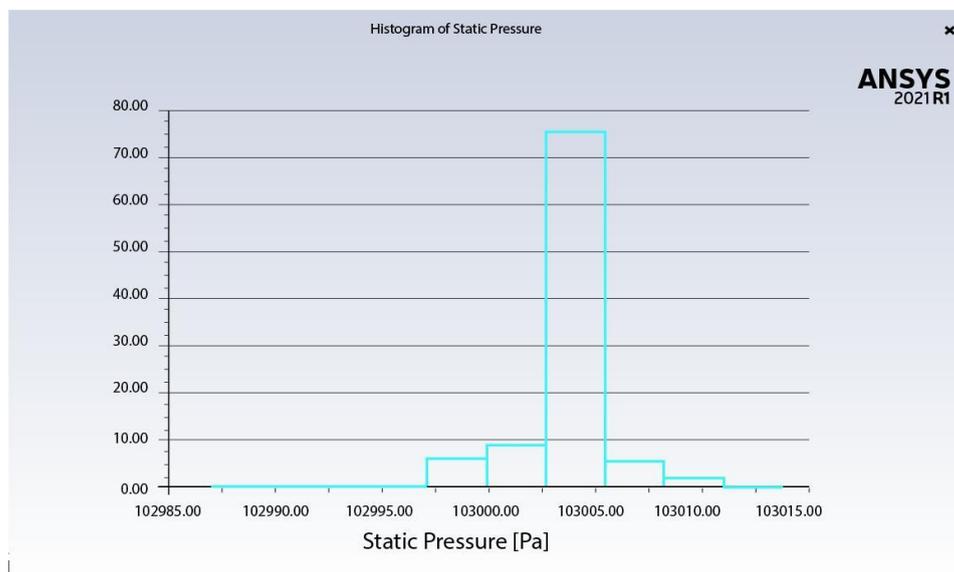


Figura 33. Histograma de la presión del viento para el caso 2.

4.1.4 Testeo final de la eficacia energética

Se realizó el análisis utilizando el principio de conservación de energía, se obtuvo un valor final al aplicar la Ecuación 3. Este valor, de 12.44 m³/h, indica la cantidad necesaria para que nuestro establo, además de contar con una ventilación natural, cumpla con los requisitos de funcionamiento óptimo. Con este equipo, se podrá regular tanto la contaminación del aire como el aireamiento forzado para la cama de compost. Aunque la ventilación actual del establo es adecuada debido a que 12.44 m³/h no es una cantidad excesiva, mediante estos cálculos de energía que se lograra aumentar la eficiencia del establo a un nivel superior.

Durante el testeo final de la parte energética, se han observado notables variabilidades en los valores de flujo de aire, con errores promedio que aumentan significativamente debido a diferencias de hasta 2.6 m/s en diferentes áreas del establo. Además, se han identificado variaciones muy bajas, en el rango de 1.2 y 1.3 m/s, que se mantienen constantes en la ventilación del establo.

Estas fluctuaciones inusuales en el flujo de aire se atribuyen principalmente a la presencia de un techo que no cubre completamente el establo. En la zona donde finaliza el techo, se produce un choque intenso entre diferentes temperaturas y elementos, lo cual afecta el flujo de aire y genera una alta variación en las velocidades del viento en esa área específica.

El análisis de las temperaturas revela cambios significativos al utilizar una nueva transferencia de calor a través de la técnica de la aireación forzada, lo cual nos permite incrementar notablemente las temperaturas que previamente se mantenían constantes en todos los sentidos. Gracias a esta mejora, se ha logrado un cambio de 3 a 4 grados centígrados sin incurrir en un consumo excesivo de energía mediante el uso de acondicionadores externos.

La implementación de esta nueva transferencia de calor a través del suelo ha demostrado ser una estrategia eficiente y sostenible para regular las temperaturas en el establo. Al aprovechar las características térmicas del suelo y su capacidad para retener y liberar calor de manera gradual, se ha logrado un aumento notable en las temperaturas internas sin depender únicamente de sistemas de climatización convencionales, aunque el uso de la cama de compost es pequeño se adapta a las condiciones que estamos optando.

Este enfoque innovador minimiza el gasto energético y reduce la dependencia de equipos externos que consumen energía. Al optimizar la transferencia de calor a través del suelo, se ha

logrado un mayor control sobre el ambiente térmico del establo, lo que resulta en condiciones más confortables y adecuadas para el ganado.

Es importante destacar que este cambio en la transferencia de calor no solo ha influido en el aumento de las temperaturas, sino que también ha proporcionado una mayor estabilidad térmica en el establo. La capacidad del suelo para actuar como un regulador natural del calor ha contribuido a minimizar las fluctuaciones bruscas y mantener un ambiente más constante y equilibrado.

4.2 Implementación del sistema de ventilación y climatización

Se empleará un aireador autorregulable de la marca EC-N con un código de 5209161900 - EC 22 N BLANCO RAL 9016 fabricado en poliestireno que se puede visualizar en la Figura 34, el cual posibilita la renovación del aire en el establo mediante las áreas principales.



Figura 34. Aireador autorregulable.

Este tipo de aireadores tiene un rango de caudales de entre 15 y 45 m³/h, lo que supera ligeramente nuestras necesidades específicas. Sin embargo, a pesar de que no es lo exacto considerando factores como el precio y la facilidad de instalación, este aireador cumple con los requisitos para nuestro establo. Con su utilización, se logrará obtener un balance de energía completo gracias a este mecanismo de ventilación, ayudara a airear lo que es la cama de compost para evitar el crecimiento de bacterias fuera de lo normal, mantener una temperatura más constante y mantener un ambiente más estable y con condiciones óptimas para todo el establo lechero.

Se utilizará una cama de compost con una superficie de 60 metros cuadrados, una altura de 100 milímetros y un requisito total de 300 kilogramos de compost.

En la siguiente Tabla 9 se explica a detalle los elementos que tendrá el compost.

Tabla 9. Propiedades del compost para el establo

Parámetro	Valor
Relación c/n inicial	30-35:1
Relación c/p inicial	75-150:1
Tamaño de la partícula	12.5 – 50 mm
Contenido de la humedad	50-60 %
Aireación	0.6 – 1.8 $m^3/dia/kg$
Temperatura	55 °C
Agitación	Cortos periodos

La cama de compost se extenderá uniformemente sobre el área especificada, creando una capa de 100 milímetros de espesor. Esta capa proporcionará una superficie porosa y estructurada que favorecerá la circulación del aire y la transferencia de calor en el establo.

Es importante destacar que la calidad del compost utilizado será determinante para su capacidad conductiva. Un compost de alta calidad, preferiblemente derivado de una combinación de estiércol y materiales vegetales en descomposición.

Además de la conductividad térmica, el compost también aportará otros beneficios al establo, como la mejora de la retención de agua en el suelo, el aporte de nutrientes esenciales para las plantas y la promoción de una estructura de suelo saludable.

A continuación, en la Figura 35 se muestra un diseño en SketchUp que representa la disposición y ubicación de los elementos en el establo lechero, brindando una representación visual de cómo podrían implementarse en la práctica.

El diseño incluye la distribución de los diferentes componentes, como la cama de compost, el ventilador autorregulable y otros elementos relevantes para la climatización y eficiencia energética del establo. Se pueden apreciar las dimensiones y ubicaciones relativas de estos elementos, lo que permite visualizar cómo interactúan entre sí y cómo se integran en el entorno del establo.

Esta representación gráfica proporciona una guía visual valiosa para comprender la disposición propuesta y puede servir como punto de referencia durante la implementación real del diseño en el establo. Además, permite una mejor comunicación y discusión entre los diferentes profesionales y partes interesadas involucradas en el proyecto.

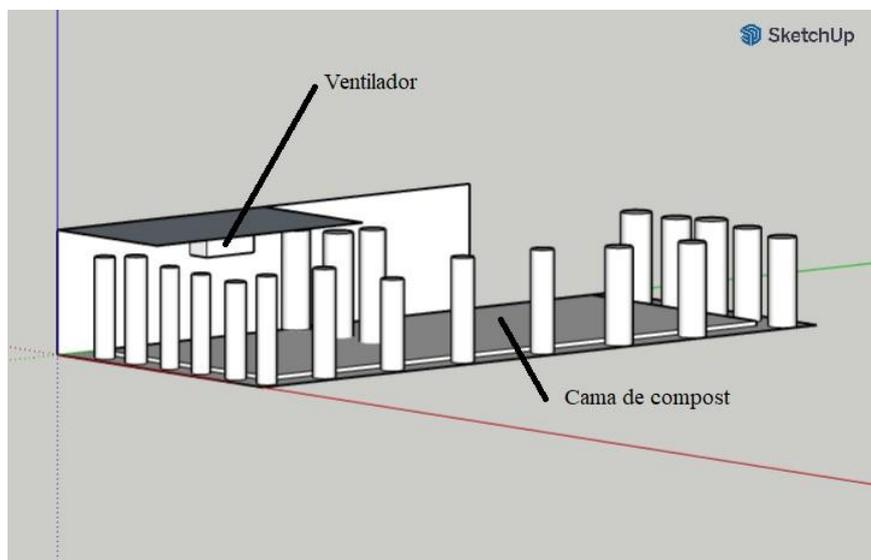


Figura 35. Sketch Up del diseño posible a implementar

4.3 Costos de implementación

Se presenta a continuación un resumen del presupuesto destinado a mejorar el sistema de ventilación y climatización del establo lechero. En la Tabla 9 se detallan los costos asociados al uso de un ventilador autorregulable y la implementación de un suelo de compost, ambos elementos clave para lograr un mayor equilibrio en la temperatura dentro del establo. Es importante destacar que se priorizó la opción más económica, considerando además el compromiso con el uso de energías limpias y amigables con el medio ambiente.

Tabla 10. Costos de implementación de elementos para el establo

Nombre	Especificación	Cantidad	Precio unitario (USD)	Precio total (USD)
Ventilador autorregulable	Potencia de 15 m3/h	1	45	45
Compost	3000 kg	1	70	70
			Total	115

CONCLUSIONES

1. Mediante la aplicación de ecuaciones de balance de energía y el análisis de las condiciones de contorno del establo, se obtuvo una comprensión detallada de los sistemas de ventilación y climatización existentes. Se identificaron áreas que requerían mejoras significativas para optimizar el confort térmico y la calidad del aire en el establo. Estos hallazgos proporcionaron una base sólida para el desarrollo de soluciones más eficientes y sostenibles.
2. Se diseñó un sistema innovador que integra un sistema de ventilación autorregulable y un sistema de transferencia de calor basado en una cama de compost con aireamiento forzado. Esta solución aprovecha fuentes de energía renovable para mejorar la ventilación y la climatización de manera eficiente. Se tuvieron en cuenta aspectos como la disponibilidad de materia orgánica y nutrientes para garantizar un rendimiento óptimo del compost y maximizar la capacidad conductiva del suelo.
3. Se llevó a cabo una rigurosa validación del diseño propuesto utilizando software especializado, específicamente ANSYS. A través de simulaciones detalladas, se evaluaron múltiples variables, como la distribución de temperaturas, las fluctuaciones de presión y las velocidades del aire. Los resultados obtenidos respaldaron la efectividad y viabilidad del diseño propuesto, demostrando mejoras significativas en el rendimiento del sistema en comparación con los sistemas convencionales. Esta validación experimental brinda confianza en la implementación práctica del diseño propuesto.
4. Se analizó cada caso del establo lechero para sacar cambios en temperatura de hasta 4 grados centígrados, velocidades del viento que crecieron de hasta 2.6 y los más bajos de 1.2 m/s , se implementó un sistema de ventilación autorregulable que se obtuvo mediante el uso de ecuaciones de la energía con un valor de 12.44 m^3/h , cambios en la presión mínimos que subieron por la presencia de sistemas nuevos que no afectaron notoriamente al sistema. Se tuvieron en cuenta los gastos relacionados con la adquisición de los equipos necesarios. Estos costos fueron comparados con los beneficios esperados en términos de eficiencia energética y mejoras en el confort térmico. Se concluyó que, los beneficios energéticos y la reducción en los gastos operativos a largo plazo hacen que la implementación de estos sistemas sea eficiente.

RECOMENDACIONES

Implementación de sistemas de control automatizado: Se recomienda implementar sistemas de control automatizado para monitorear y regular la ventilación y climatización en tiempo real. Estos sistemas permitirán ajustar automáticamente la velocidad del ventilador, la apertura de las entradas de aire y otros parámetros según las condiciones ambientales. Esto optimizará el consumo energético y mantendrá un ambiente confortable para los animales en el establo. Además, estos sistemas facilitarán la recolección de datos sobre el rendimiento y el funcionamiento de los sistemas, lo que puede ser útil para futuras mejoras y optimizaciones.

Utilización de materiales aislantes: Es recomendable utilizar materiales aislantes de alta calidad en las estructuras del establo. Estos materiales ayudarán a reducir las pérdidas de calor o frío, manteniendo una temperatura más estable dentro del establo. Al minimizar la carga térmica, se reducirá la necesidad de sistemas de calefacción o refrigeración adicionales en el futuro. Esta medida no solo contribuirá a mejorar la eficiencia energética, sino que también proporcionará un ambiente más confortable para los animales, lo que puede tener un impacto positivo en su salud y bienestar.

Mantenimiento regular: Es fundamental establecer un programa de mantenimiento regular para garantizar el correcto funcionamiento de los sistemas de ventilación y climatización a largo plazo. Esto implica realizar la limpieza y revisión periódica de los ventiladores, conductos de aire y otros equipos relacionados. Además, se deben llevar a cabo reparaciones o reemplazos de componentes defectuosos de manera oportuna. Un mantenimiento adecuado asegurará un rendimiento óptimo de los sistemas a lo largo del tiempo y prolongará su vida útil. Además, el monitoreo regular puede ayudar a identificar posibles problemas o deterioros en los equipos antes de que se conviertan en fallas mayores.

Capacitación del personal: Es importante proporcionar capacitación adecuada al personal encargado de operar y mantener los sistemas de ventilación y climatización. Esto incluye la comprensión de los principios de funcionamiento de los sistemas, el manejo de los controles y la identificación temprana de posibles problemas o situaciones anormales. La capacitación adecuada garantizará que el personal pueda utilizar los sistemas de manera eficiente y tomar medidas rápidas y adecuadas en caso de cualquier anomalía.

REFERENCIAS

- [1] C. Houston, S. Gyamfi, and J. Whale, “Evaluation of energy efficiency and renewable energy generation opportunities for small scale dairy farms: A case study in Prince Edward Island, Canada,” *Renew Energy*, vol. 67, pp. 20–29, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.11.040.
- [2] E. Fabrizio, A. Ghiggini, and M. Bariani, “Energy performance and indoor environmental control of animal houses: A modelling tool,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2015, pp. 439–444. doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.833.
- [3] O. Ecim-Djuric and G. Topisirovic, “Energy efficiency optimization of combined ventilation systems in livestock buildings,” *Energy Build*, vol. 42, no. 8, pp. 1165–1171, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.10.035.
- [4] P. Shine, J. Upton, P. Sefeedpari, and M. D. Murphy, “Energy consumption on dairy farms: A review of monitoring, prediction modelling, and analyses,” *Energies*, vol. 13, no. 5. MDPI AG, Mar. 01, 2020. doi: 10.3390/en13051288.
- [5] A. Moerkerken, S. Duijndam, J. Blasch, P. van Beukering, and A. Smit, “Determinants of energy efficiency in the Dutch dairy sector: dilemmas for sustainability,” *J Clean Prod*, vol. 293, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126095.
- [6] A. Pakari and S. Ghani, “Comparison of different mechanical ventilation systems for dairy cow barns: CFD simulations and field measurements,” *Comput Electron Agric*, vol. 186, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.compag.2021.106207.
- [7] K. W. Corscadden, J. N. Biggs, and M. Pradhanang, “Energy efficient technology selection for dairy farms: Milking cooling and electric water heating,” *Appl Eng Agric*, vol. 30, no. 3, pp. 375–382, 2014, doi: 10.13031/aea.30.10403.
- [8] A. Costantino, E. Fabrizio, A. Biglia, P. Cornale, and L. Battaglini, “Energy Use for Climate Control of Animal Houses: The State of the Art in Europe,” in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, Nov. 2016, pp. 184–191. doi: 10.1016/j.egypro.2016.11.024.
- [9] J. Salfer, E. Cortus, and K. Janni, “Making and Evaluating Energy Use Changes in the Dairy Barn,” 2015.
- [10] X. Wu, Z. Shi, and H. Li, “Study on the air resistance of pigs in groups based on open-source CFD code: Influence of stocking density and live weight,” *Biosyst Eng*, vol. 220, pp. 1–18, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2022.05.014.
- [11] H. Chung, X. Zhang, S. Jung, Z. Zhang, and C. Y. Choi, “Application of machine-learned metadata-driven model for dairy barn ventilation simulation,” *Comput Electron Agric*, vol. 202, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.compag.2022.107350.
- [12] E. KÜÇÜKTOPCU, S. UZAL SEYFİ, M. MUSTAQİMAH, and B. CEMEK, “Computational Fluid Dynamics Modeling of Environmental Conditions in A Naturally Ventilated Free-Stall Dairy Barn,” *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpaşa University*, Nov. 2022, doi: 10.55507/gopzfd.1181753.
- [13] M. R. Mondaca, C. Y. Choi, and N. B. Cook, “Understanding microenvironments within tunnel-ventilated dairy cow freestall facilities: Examination using computational fluid dynamics and experimental validation,” *Biosyst Eng*, vol. 183, pp. 70–84, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2019.04.014.

- [14] N. Tomasello, F. Valenti, G. Cascone, and S. M. C. Porto, "Development of a CFD model to simulate natural ventilation in a semi-open free-stall barn for dairy cows," *Buildings*, vol. 9, no. 8, Aug. 2019, doi: 10.3390/buildings9080183.
- [15] J. A. Osorio Saraz, I. de F. Ferreira Tinôco, K. S. Olivera Rocha, L. Barreto Mendes, and T. Norton, "A CFD based approach for determination of ammonia concentration profile and flux from poultry houses with natural ventilation," *Rev Fac Nac Agron Medellin*, vol. 69, no. 1, pp. 7825–7834, 2016, doi: 10.15446/rfna.v69n1.54750.
- [16] F. A. Damasceno *et al.*, "3d cfd analysis of natural ventilation in reduced scale model of compost bedded pack barn for dairy cows," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 22, pp. 1–17, Nov. 2020, doi: 10.3390/app10228112.
- [17] N. Tomasello, F. Valenti, G. Cascone, and S. M. C. Porto, "Development of a CFD model to simulate natural ventilation in a semi-open free-stall barn for dairy cows," *Buildings*, vol. 9, no. 8, Aug. 2019, doi: 10.3390/buildings9080183.
- [18] B. Fagundes *et al.*, "Comparison of airflow homogeneity in compost dairy barns with different ventilation systems using the CFD model," *Agronomy Research*, vol. 18, no. Special Issue 1, pp. 788–796, 2020, doi: 10.15159/AR.20.106.
- [19] N. Tomasello, F. Valenti, G. Cascone, and S. M. C. Porto, "Improving natural ventilation in renovated free-stall barns for dairy cows: Optimized building solutions by using a validated computational fluid dynamics model," *Journal of Agricultural Engineering*, vol. 52, no. 1, 2021, doi: 10.4081/jae.2021.1135.
- [20] F. H. Khan, T. Pal, B. Kundu, and R. Roy, "Wind Energy: A Practical Power Analysis Approach," in *2021 Innovations in Energy Management and Renewable Resources, IEMRE 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Feb. 2021. doi: 10.1109/IEMRE52042.2021.9386754.
- [21] M. El-Shafie, S. Kambara, and Y. Hayakawa, "Hydrogen Production Technologies Overview," *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 07, no. 01, pp. 107–154, 2019, doi: 10.4236/jpee.2019.71007.
- [22] A. Elia, M. Kamidelivand, F. Rogan, and B. Ó Gallachóir, "Impacts of innovation on renewable energy technology cost reductions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 138. Elsevier Ltd, Mar. 01, 2021. doi: 10.1016/j.rser.2020.110488.
- [23] H. Fuquen Gonzalez, "EFICIENCIA ENERGÉTICA," 2014. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/333089139>
- [24] Z. Yang, A. Ghahramani, and B. Becerik-Gerber, "Building Occupancy Diversity and HVAC System Energy Efficiency," 2019. [Online]. Available: <https://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>
- [25] F. Grassauer *et al.*, "Assessing and improving eco-efficiency of multifunctional dairy farming: The need to address farms' diversity," *J Clean Prod*, vol. 338, p. 130627, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130627>.
- [26] O. Seuntjens, B. Belmans, M. Buyle, and A. Audenaert, "A critical review on the adaptability of ventilation systems: Current problems, solutions and opportunities," *Building and Environment*, vol. 212. Elsevier Ltd, Mar. 15, 2022. doi: 10.1016/j.buildenv.2022.108816.

- [27] S. Fournel, V. Ouellet, and É. Charbonneau, “Practices for alleviating heat stress of dairy cows in humid continental climates: A literature review,” *Animals*, vol. 7, no. 5. MDPI AG, May 01, 2017. doi: 10.3390/ani7050037.
- [28] C. A. Becker and A. E. Stone, “Graduate Student Literature Review: Heat abatement strategies used to reduce negative effects of heat stress in dairy cows,” *Journal of Dairy Science*, vol. 103, no. 10. Elsevier Inc., pp. 9667–9675, Oct. 01, 2020. doi: 10.3168/jds.2020-18536.
- [29] Á. G. V. Requena, E. A. S. Dávila, G. F. L. Peña, and V. I. T. Alarcón, “Influence of the cooling system on dairy cattle productivity in the Huaura Valley, Peru,” *Revista de Investigaciones Veterinarias del Peru*, vol. 28, no. 1, pp. 195–200, Jan. 2017, doi: 10.15381/rivep.v28i1.12928.
- [30] A. Rieser *et al.*, “Integration of energy-efficient ventilation systems in historic buildings—review and proposal of a systematic intervention approach,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 4, pp. 1–21, Feb. 2021, doi: 10.3390/su13042325.
- [31] S. Mondal and I. J. Reddy, “Impact of climate change on livestock production,” in *Biotechnology for Sustainable Agriculture: Emerging Approaches and Strategies*, Elsevier, 2017, pp. 234–256. doi: 10.1016/B978-0-12-812160-3.00008-8.
- [32] P. Kumar Mittal, B. Gupta, D. Raj Bilochi, C. Pavan Kumar Mittal, and G. Gottam, “The effect of climate change on productivity and reproductive and health performance of livestock: A review,” ~ 4 ~ *Journal of Entomology and Zoology Studies*, vol. 7, no. 2, 2019.
- [33] E. Y. Un *et al.*, “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA "IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS DE EFICIENCIA.”
- [34] H. Karimi, M. A. Adibhesami, H. Bazazzadeh, and S. Movafagh, “Green Buildings: Human-Centered and Energy Efficiency Optimization Strategies,” *Energies*, vol. 16, no. 9. MDPI, May 01, 2023. doi: 10.3390/en16093681.
- [35] X. Zheng and A. Heshmati, “An analysis of energy use efficiency in China by applying stochastic frontier panel data models,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 8, Apr. 2020, doi: 10.3390/en13081892.
- [36] P. Sefeepari, “Assessment and Optimization of Energy Consumption in Dairy Farm: Energy Efficiency,” *Iranica Journal of Energy & Environment*, 2012, doi: 10.5829/idosi.ijee.2012.03.03.0924.
- [37] E. I. Samuel, E. Joseph-Akwara, and A. Richard, “Assessment of energy utilization and leakages in buildings with building information model energy,” *Frontiers of Architectural Research*, vol. 6, no. 1, pp. 29–41, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.foar.2017.01.002.
- [38] N. Asim *et al.*, “Sustainability of Heating, Ventilation and Air-Conditioning (HVAC) Systems in Buildings—An Overview,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 2. MDPI, Jan. 01, 2022. doi: 10.3390/ijerph19021016.

- [39] Y. Yang and Z. Li, “Integrated Design and Assessment for Indoor Heating, Ventilation and Air-Conditioning in Hot Summer and Cold Winter Area: A Case Study in China,” *Buildings*, vol. 12, no. 11, Nov. 2022, doi: 10.3390/buildings12111844.
- [40] M. Balbis-Morejón, J. J. Cabello-Eras, J. M. Rey-Hernández, and F. J. Rey-Martínez, “Energy evaluation and energy savings analysis with the 2 selection of ac systems in an educational building,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 14, Jul. 2021, doi: 10.3390/su13147527.
- [41] J. Upton and M. Murphy, “Dairy Farm Energy Consumption.”
- [42] J. Upton, J. Humphreys, P. W. G. Groot Koerkamp, P. French, P. Dillon, and I. J. M. De Boer, “Energy demand on dairy farms in Ireland,” *J Dairy Sci*, vol. 96, no. 10, pp. 6489–6498, Oct. 2013, doi: 10.3168/jds.2013-6874.
- [43] R. Mandel, H. R. Whay, E. Klement, and C. J. Nicol, “Invited review: Environmental enrichment of dairy cows and calves in indoor housing,” *J Dairy Sci*, vol. 99, no. 3, pp. 1695–1715, Mar. 2016, doi: 10.3168/jds.2015-9875.
- [44] N. M. Holden, M. L. (Mary L. Wolfe, J. A. Ogejo, E. J. Cummins, and American Society of Agricultural and Biological Engineers, *Introduction to biosystems engineering*.
- [45] P. Sefeedpari, Z. Shokoohi, and S. H. Pishgar-Komleh, “Dynamic energy efficiency assessment of dairy farming system in Iran: Application of window data envelopment analysis,” *J Clean Prod*, vol. 275, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124178.
- [46] E. Llanos, L. Astigarraga, and V. Picasso, “Energy and economic efficiency in grazing dairy systems under alternative intensification strategies,” *European Journal of Agronomy*, vol. 92, pp. 133–140, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.eja.2017.10.010.
- [47] J. K. Calautit, D. O’Connor, P. Sofotasiou, and B. R. Hughes, “CFD simulation and optimisation of a low energy ventilation and cooling system,” *Computation*, vol. 3, no. 2, pp. 128–149, 2015, doi: 10.3390/computation3020128.
- [48] M. W. Ahmad, M. Mourshed, B. Yuce, and Y. Rezgui, “Computational intelligence techniques for HVAC systems: A review,” *Building Simulation*, vol. 9, no. 4. Tsinghua University Press, pp. 359–398, Aug. 01, 2016. doi: 10.1007/s12273-016-0285-4.
- [49] A. Mironov, S. Isaev, A. Skrypnik, and I. Popov, “Numerical and physical simulation of heat transfer enhancement using oval dimple vortex generators —Review and recommendations,” *Energies*, vol. 13, no. 20. MDPI AG, Oct. 01, 2020. doi: 10.3390/en13205243.
- [50] A. N. Beskopylny, I. Panfilov, and B. Meskhi, “Modeling of Flow Heat Transfer Processes and Aerodynamics in the Cabins of Vehicles,” *Fluids*, vol. 7, no. 7, Jul. 2022, doi: 10.3390/fluids7070226.
- [51] N. Li, J. C. Supervisor, J. Claesson, D. Burman, and L. Ting, “COMPARISON BETWEEN THREE DIFFERENT CFD SOFTWARE AND NUMERICAL SIMULATION OF AN AMBULANCE HALL.”
- [52] L. Hosain, “Fluid flow and heat transfer simulations for complex industrial applications From Reynolds averaged Navier-Stokes towards smoothed particle hydrodynamics,”

- [53] S. Kato, “Review of airflow and transport analysis in building using CFD and network model,” *JAPAN ARCHITECTURAL REVIEW*, vol. 1, no. 3, pp. 299–309, Jul. 2018, doi: 10.1002/2475-8876.12051.
- [54] M. Zaidi, B. Ashraf, U. Allauddin, M. Mahrukh, B. Ashraf, and U. Saleem, “Computational Fluid Dynamics Analysis for Ventilation and Air-Conditioning of an Office Room CFD of thermal Plasma Spray field View project Numerical Investigation of Turbulent Flow Over Single and Tandem Square Cylinders View project Computational Fluid Dynamics Analysis for Ventilation and Air-Conditioning of an Office Room.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/356635043>
- [55] M. Rimár, A. Kulikov, M. Fedak, and M. Abraham, “CFD analysis of the ventilation heating system,” *Mechanics and Industry*, vol. 20, no. 7, 2019, doi: 10.1051/meca/2020020.
- [56] Stiapis Christos, “CFD study of the different inlet configurations and airflows in a room with IJV,” *Department of Building Engineering, Energy Systems and Sustainability Science*, vol. 1, pp. 3–4, 2022.
- [57] S. Gilani, H. Montazeri, and B. Blocken, “CFD simulation of stratified indoor environment in displacement ventilation: Validation and sensitivity analysis,” *Build Environ*, vol. 95, pp. 299–313, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.09.010.
- [58] M. Soltanieh and M. H. Saidi, “Application of heat pipe heat exchangers in heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/228909074>
- [59] J. A. Siegel and W. W. Nazaroff, “Predicting Particle Deposition on HVAC Heat Exchangers.”
- [60] “Air-Conditioning and Mechanical Ventilation (ACMV) Systems.”
- [61] C. Duarte, “UC Berkeley HVAC Systems Title Design and control of high thermal mass radiant systems.” [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/82t6n3xr>
- [62] K. Strpić *et al.*, “Application of ground heat exchangers in cow barns to enhance milk cooling and water heating and storage,” *Energy Build*, vol. 224, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110213.
- [63] L. M. (Latif M. Jiji, *Heat convection*. Springer, 2006.
- [64] D. W. Hahn and M. N. Özişik, “Frontmatter,” in *Heat Conduction*, John Wiley & Sons, Inc., 2012, pp. i–xxx. doi: 10.1002/9781118411285.fmatter.
- [65] R. Siegel and J. R. Howell, “Radiation Transfer With Absorbing, Emitting, and Scattering Media.”
- [66] European Committee for Standardization, *Heating systems in buildings-Method for calculation of the design heat load*. 2009.
- [67] P. Panagakos and P. Axaopoulos, “Comparing fogging strategies for pig rearing using simulations to determine apparent heat-stress indices,” *Biosyst Eng*, vol. 99, no. 1, pp. 112–118, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2007.10.007.
- [68] A. A. M. A. Al-Zaidi, “Ventilation system design for poultry buildings,” *Net Journal of Agricultural Science*, vol. 10, no. 1, pp. 37–42, 2022, doi: 10.30918/NJAS.101.22.008.

- [69] G. Kokogiannakis, P. Strachan, K. Georgios, C. Joe, and S. Paul, “Impact of using different models in practice A case study with the simplified methods of ISO 13790 Standard and detailed modeling programs Sustainable structural design of buildings View project IMPACT OF USING DIFFERENT MODELS IN PRACTICE-A CASE STUDY WITH THE SIMPLIFIED METHODS OF ISO 13790 STANDARD AND DETAILED MODELLING PROGRAMS,” 2007. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/237408351>
- [70] A. J. A. Aarnink, “Heat and moisture production in growing-finishing pigs and broilers.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/332935867>
- [71] *Thermal performance of buildings-Transmission and ventilation heat transfer coefficients-Calculation method BSI Standards Publication*. 2017.
- [72] D. van Dijk, “EN ISO 52016-1: The new international standard to calculate building energy needs for heating and cooling, internal temperatures and heating and cooling load,” in *Building Simulation Conference Proceedings*, International Building Performance Simulation Association, 2019, pp. 4061–4068. doi: 10.26868/25222708.2019.211405.
- [73] M. Jaap and J. J. N. M.) Hogeling, “SUPPORT THE DISSEMINATION AND ROLL-OUT OF THE SET OF ENERGY PERFORMANCE OF BUILDING STANDARDS DEVELOPED UNDER EC MANDATE M/480 Prepared by Dick van Dijk with contributions by the Project Team,” 2021.
- [74] M. R. Mondaca and N. B. Cook, “Modeled construction and operating costs of different ventilation systems for lactating dairy cows,” *J Dairy Sci*, vol. 102, no. 1, pp. 896–908, Jan. 2019, doi: 10.3168/jds.2018-14697.