



UNIVERSIDAD LAICA “ELOY ALFARO” DE MANABÍ

Título:

Diseño y Simulación de un Sistema de Calefacción para
Invernaderos en la Carrera de Electromecánica en la Uleam
Extensión El Carmen

Autores:

Andy Gabriel Montalvan Angulo
Gonzalo Alfredo Zambrano Cedeño

Tutor(a)

Ing. Jonathan Jiménez, Mag.

Unidad Académica:

Unidad Académica de Formación Técnica y Tecnológica, Educación
Virtual y Otras Modalidades.

Carrera:

Tecnología Superior en Electromecánica.

El Carmen, septiembre de 2025

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-05-IT-001-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE LAS CARRERAS TÉCNICAS Y TECNOLÓGICAS	VERSIÓN: 3 Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Extensión El Carmen de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Titulación bajo la autoría del estudiante Montalván Angulo Andy Gabriel, legalmente matriculado en la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica, período académico 2025-1, cumpliendo el total de 144 horas, cuyo tema del proyecto es "Diseño y simulación de un sistema de calefacción para invernaderos".

El presente trabajo de titulación ha sido desarrollado en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Lugar, El Carmen de 8 de agosto de 2025.

Lo certifico,


 Ing. Jonathan Jiménez MSc
 Docente Tutor(a)

Nota 1: Este documento debe ser realizado únicamente por el/la docente tutor/a y será receptado sin enmendaduras y con firma electrónica y/o manuscrita.

Nota 2: Este es un formato que se llenará por cada estudiante (de forma individual) y será otorgado toda vez que la asignatura de titulación esté aprobada por el estudiante.

	NOMBRE DEL DOCUMENTO: CERTIFICADO DE TUTOR(A).	CÓDIGO: PAT-05-IT-001-F-004
	PROCEDIMIENTO: TITULACIÓN DE ESTUDIANTES DE LAS CARRERAS TÉCNICAS Y TECNOLÓGICAS	VERSIÓN: 3
		Página 1 de 1

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Extensión El Carmen de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Titulación bajo la autoría del estudiante Gonzalo Alfredo Zambrano Cedeño, legalmente matriculado en la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica, período académico 2025-1, cumpliendo el total de 144 horas, cuyo tema del proyecto es "Diseño y simulación de un sistema de calefacción para invernaderos".

El presente trabajo de titulación ha sido desarrollado en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Lugar, El Carmen de 8 de agosto de 2025.

Lo certifico,


Ing. Jonathan Jiménez MSc
Docente Tutor(a)

Nota 1: Este documento debe ser realizado únicamente por el/la docente tutor/a y será receptado sin enmendaduras y con firma electrónica y/o manuscrita.

Nota 2: Este es un formato que se llenará por cada estudiante (de forma individual) y será otorgado toda vez que la asignatura de titulación esté aprobada por el estudiante.

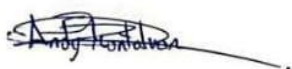
DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Quien(es) suscribe(n) la presente:

Andy Gabriel Montalvan Angulo, Gonzalo Alfredo Zambrano Cedeño

Estudiante(s) de la Carrera de **Tecnología Superior en Electromecánica**, declaro(amos) bajo juramento que el presente proyecto integrador cuyo título: "Diseño y Simulación de un Sistema de Calefacción para Invernaderos en la Carrera de Electromecánica en la Uleam Extensión El Carmen ", previa a la obtención del Título de Tecnólogo Superior en Electromecánica, es de autoría propia y ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros y consultando las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

El Carmen, septiembre de 2025



Andy Gabriel Montalvan Angulo



Gonzalo Alfredo Zambrano Cedeño



APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

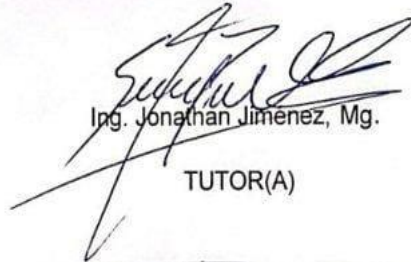
Los miembros del Tribunal Examinador aprueban el Trabajo de Titulación con modalidad Proyecto Integrador, titulado: "Diseño y Simulación de un Sistema de Calefacción para Invernaderos en la Carrera de Electromecánica en la Uleam Extensión El Carmen " de su(s) autor(es): Andy Gabriel Montalvan Angulo, Gonzalo Alfredo Zambrano Cedeño de la Carrera "**Tecnología Superior en Electromecánica**", y como Tutor(a) del Trabajo el/la Ing. Jonathan Jiménez, Mg.

El Carmen, Septiembre de 2025



Ing. Bladimir Mora, Mg.

PRESIDENTE TRIBUNAL



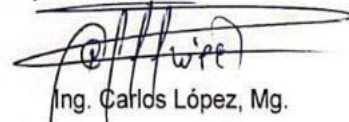
Ing. Jonathan Jiménez, Mg.

TUTOR(A)



Ing. Rocío Mendoza, Mg.

PRIMER MIEMBRO TRIBUNAL



Ing. Carlos López, Mg.

SEGUNDO MIEMBRO TRIBUNAL

AGRADECIMIENTO

Deseamos expresar nuestra más sincera gratitud a quienes, con su apoyo y contribución, hicieron posible la culminación de este proyecto.

En primer lugar, agradecemos a nuestra alma máter, la ULEAM Extensión El Carmen, por ser el espacio donde pudimos no solo adquirir el conocimiento, sino también las herramientas y la guía necesarias para crecer académica y personalmente.

Agradecemos también a nuestros compañeros de estudio y a los amigos que, con sus opiniones, discusiones y apoyo moral, hicieron que este camino fuera más llevadero. Cada intercambio de ideas y cada palabra de aliento nos fortalecieron para seguir adelante.

Finalmente, a todas las personas que, de manera directa o indirecta, nos brindaron su colaboración y buena voluntad durante este proceso, les extendemos nuestro más sincero aprecio. Este logro no es solo nuestro, sino el resultado del apoyo de una comunidad que cree en el valor del conocimiento y el esfuerzo compartido.

Andy Gabriel Montalvan Angulo, Gonzalo Alfredo Zambrano Cedeño

DEDICATORIA

Dedicamos con inmenso cariño y profundo respeto este trabajo a nuestras familias, quienes han sido nuestro mayor motor y refugio incondicional. A nuestros padres, por ser el faro que ilumina nuestro camino, por su incansable esfuerzo, sus incontables sacrificios y por creer siempre en nuestro potencial. Su apoyo inquebrantable y su amor incondicional han sido el cimiento sobre el que hemos construido nuestros sueños.

De igual manera, dedicamos este logro a todos nuestros maestros y profesores. Agradecemos su sabiduría, paciencia y dedicación, virtudes que nos han guiado no solo a través de este proyecto, sino a lo largo de toda nuestra formación. Sus enseñanzas y la pasión con la que comparten su conocimiento han sido la chispa que encendió nuestra curiosidad y la base sobre la que se sustenta nuestra superación personal.

Finalmente, dedicamos este trabajo a cada persona que nos ha extendido una mano, a los amigos que nos han brindado su aliento y a todos aquellos que, de una forma u otra, han sido parte de este camino. Este logro es un reflejo del apoyo y el cariño que hemos recibido.

Andy Gabriel Montalvan Angulo, Gonzalo Alfredo Zambrano Cedeño

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad diseñar y simular un sistema de calefacción para invernaderos que permita visualizar la distribución térmica interior bajo condiciones climáticas frías, como las que se presentan en algunas regiones del Ecuador. El propósito central de este trabajo fue elaborar el modelo geométrico de un invernadero y, a partir de él, realizar simulaciones computacionales para estudiar el movimiento del aire caliente en su interior. El análisis se enfocó en comprender cómo la posición de la entrada de aire influye en la distribución del calor. Para ello, se desarrolló un modelo CAD del invernadero con dimensiones reales (4 m × 6 m × 3 m) y posteriormente se aplicaron técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD). Se evaluaron dos configuraciones: la primera con la entrada de aire caliente ubicada en la parte superior posterior y la segunda con dicha entrada situada en la parte inferior posterior. Los resultados muestran que la entrada inferior promueve una mayor turbulencia, mejor mezcla de aire y una distribución térmica más homogénea en la zona de cultivo. Se concluye que la simulación computacional es una herramienta útil para evaluar configuraciones térmicas sin requerir construcción física del sistema.

PALABRAS CLAVE

Invernadero, calefacción, simulación térmica, dinámica de fluidos, distribución de temperatura.

ABSTRACT

This study aims to design and simulate a heating system for greenhouses that allows visualization of indoor thermal distribution under cold weather conditions, such as those found in some regions of Ecuador. The main objective was to geometrically model a greenhouse and computationally simulate the behavior of hot air flow, in order to analyze how the location of the air inlet affects heat distribution. The methodology was based on CAD modeling of the structure with real dimensions (4 m × 6 m × 3 m) and subsequent simulation using computational fluid dynamics (CFD). Two scenarios were evaluated: one with the hot air inlet at the upper rear and another at the lower rear part. The results show that the lower inlet promotes greater turbulence, better air mixing, and a more uniform thermal distribution in the crop area. It is concluded that computational simulation is a useful tool for evaluating thermal configurations without requiring the physical construction of the system.

KEYWORDS

Greenhouse, heating, thermal simulation, fluid dynamics, temperature distribution.

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	III
AGRADECIMIENTO	IV
DEDICATORIA.....	VI
RESUMEN.....	VII
PALABRAS CLAVE	VII
ABSTRACT	VIII
KEYWORDS	VIII
ÍNDICE	IX
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	X
ÍNDICE DE TABLAS	XI
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PROBLEMA.....	3
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. METODOLOGÍA	4
1.4.1. Procedimiento	4
1.4.2. Técnicas.....	5
1.4.3. Métodos.....	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1. DEFINICIONES	8
2.2. ANTECEDENTES.....	10
2.3. TRABAJOS RELACIONADOS.....	12
CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA PROPUESTA.....	15
3.1. DESARROLLO	15
3.1.1. Descripción de la propuesta	15
3.1.2. Etapas.....	17

3.1.3. Presupuesto	19
3.2. RESULTADOS	19
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	27
4.1. CONCLUSIONES	27
4.2. RECOMENDACIONES	28
BIBLIOGRAFÍA	29
ANEXOS.....	31

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Diseño 3D simplificado de un invernadero.....	20
Ilustración 2. Asignación de materiales en el software.....	21
Ilustración 3. Configuración de las condiciones de frontera del caso 1.	22
Ilustración 4. Configuración de las condiciones de frontera del caso 2.	22
Ilustración 5. Distribución de la temperatura sobre las líneas de flujo principales para el caso 1.....	23
Ilustración 6. Distribución de la temperatura sobre las líneas de flujo principales para el caso 2.....	23
Ilustración 7. Gráficos de corte con la distribución por secciones de los contornos de temperatura, vectores de velocidad y líneas de corriente para el caso 1.	24
Ilustración 8. Gráficos de corte con la distribución por secciones de los contornos de temperatura, vectores de velocidad y líneas de corriente para el caso 2.	24
Ilustración 9. Resultados numéricos de las metas (Goals) planteadas para el caso 1.	25
Ilustración 10. Resultados numéricos de las metas (Goals) planteadas para el caso 2.	26

Ilustración 11. Distribución de la temperatura sobre los sólidos al interior del invernadero para el caso 1.	26
Ilustración 12. Distribución de la temperatura sobre los sólidos al interior del invernadero para el caso 2.	26
Ilustración 13. Valores históricos de temperatura en función del número de iteración para el caso 1.	31
Ilustración 14. Valores históricos de temperatura en función del número de iteración para el caso 2.	31

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones iniciales asignadas al modelo.	21
Tabla 2. Condiciones de contorno utilizadas en la simulación.	22

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El diseño y la simulación de sistemas térmicos para invernaderos son herramientas clave para mejorar la producción agrícola en zonas con climas desfavorables. Un sistema de calefacción eficiente debe combinar de manera adecuada la fuente de energía, los elementos de transferencia de calor y, cuando sea necesario, mecanismos de control que mantengan condiciones estables para el desarrollo de los cultivos. Gracias a las tecnologías de simulación, es posible analizar el comportamiento térmico del invernadero considerando factores como el aislamiento, la forma en que se distribuye el calor y el posible consumo de energía, antes de pasar a la etapa de construcción, por lo que este tipo de análisis permite reducir gastos y ajustar con precisión las variables más relevantes para lograr un funcionamiento eficiente (González, Rodríguez, Escobedo, & Martín, 2017).

Los sistemas de calefacción en invernaderos desempeñan un papel crucial para mantener un ambiente térmico adecuado, sobre todo en zonas donde las condiciones climáticas son variables, como la sierra ecuatoriana. Su objetivo principal es distribuir el calor de manera uniforme evitando que las plantas sufran cambios bruscos de temperatura y, al mismo tiempo, reduciendo el consumo de energía. Existen diversas opciones tecnológicas, como la calefacción por agua caliente, el uso de resistencias eléctricas para inserción de aire caliente (como el que se usa en este trabajo) o la implementación de sistemas geotérmicos. La elección entre ellas depende de factores como las dimensiones del invernadero, el tipo de cultivo que se produzca y la disponibilidad de fuentes energéticas en la región. Asimismo, la incorporación de sensores y controladores automáticos permite regular la temperatura con mayor precisión, lo que se traduce en un mejor aprovechamiento de la energía y una menor necesidad de supervisión manual (MET MANN, 2021).

Un trabajo desarrollado en la Universidad de Mar del Plata evaluó la factibilidad técnica y económica de instalar sistemas de calefacción para invernaderos utilizando energías renovables. El proyecto consistió en el diseño de un sistema alimentado por paneles solares fotovoltaicos conectados a la red, complementado con calefactores eléctricos de infrarrojo para mantener la

temperatura estable en un vivero comercial. A través de simulaciones en PVSyst (Software de diseño y simulación de sistemas fotovoltaicos) y un análisis detallado del balance energético, se determinó la capacidad óptima del sistema, asegurando un uso eficiente de la energía y una adecuada distribución del calor (Roberts, Caldera, & Sosa, 2022).

En regiones con climas variables, la instalación de sistemas de calefacción eficientes en invernaderos resulta clave para evitar que las bajas temperaturas afecten la producción agrícola. Un diseño térmico bien planificado no solo protege a los cultivos frente a condiciones adversas, sino que también permite aprovechar mejor la energía disponible, reduciendo los gastos de operación y disminuyendo el impacto ambiental. Cuando se incorporan tecnologías de control automático y se utilizan fuentes renovables, como la energía solar, estos sistemas responden a las exigencias actuales de sostenibilidad y eficiencia. Adaptar las soluciones técnicas a las características y recursos de cada zona contribuye a fortalecer la agricultura protegida, un sector fundamental para garantizar la seguridad alimentaria y potenciar el desarrollo económico local.

Este proyecto está estrechamente ligado a la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica, ya que combina de forma práctica conocimientos clave de termodinámica y mecánica de fluidos, pilares fundamentales en la formación profesional. Su desarrollo, basado en el diseño y la simulación de un sistema de calefacción para invernaderos, permite reforzar las competencias técnicas necesarias para proponer soluciones electromecánicas aplicadas a necesidades reales. Asimismo, el uso de herramientas de simulación y análisis energético refleja el enfoque práctico de la carrera, contribuyendo a preparar a los estudiantes para afrontar retos en los sectores industrial y agroindustrial, con una visión orientada a la innovación y la sostenibilidad.

1.1. PROBLEMA

En Ecuador, los invernaderos enfrentan dificultades para mantener temperaturas óptimas durante períodos fríos, afectando directamente la productividad agrícola. Los sistemas de calefacción convencionales presentan problemas de eficiencia energética y distribución desigual del calor, generando altos costos operativos y microclimas desfavorables para los cultivos. Actualmente, existe una carencia de estudios que analicen mediante simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) el comportamiento térmico de estos sistemas en las condiciones específicas de la zona, lo que limita la capacidad para diseñar soluciones técnicas óptimas antes de su implementación física.

1.2. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto refuerza la formación académica de la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica al aplicar herramientas avanzadas de simulación CFD, directamente relacionadas con áreas clave como la termodinámica y la mecánica de fluidos. La metodología utilizada permitirá validar de manera teórica el diseño de sistemas térmicos antes de su construcción, desarrollando competencias en modelado computacional y análisis de fluidos, fundamentales para resolver problemas propios del campo electromecánico. Asimismo, se establecerá un referente para futuros trabajos académicos que integren simulaciones numéricas en el desarrollo de proyectos con aplicación agroindustrial.

Desde la perspectiva tecnológica, el uso de la simulación CFD ofrece ventajas significativas para optimizar sistemas de calefacción en invernaderos, ya que posibilita predecir el comportamiento térmico con bajo costo y sin riesgos operativos. Al enfocarse exclusivamente en el análisis fluidodinámico y térmico, este proyecto permitirá identificar configuraciones más eficientes que garanticen una temperatura uniforme y reduzcan el consumo energético. Los resultados obtenidos servirán como respaldo técnico para futuras implementaciones físicas, contribuyendo a la modernización de la agricultura protegida mediante soluciones fundamentadas en evidencia científica.

El trabajo se enmarca dentro de la línea de investigación institucional “Ingeniería, Industria, Construcción, Urbanismo y Arquitectura para un Desarrollo

Sustentable y Sostenible”, ya que plantea una propuesta técnica orientada a la eficiencia energética y al uso racional de los recursos térmicos en el ámbito agrícola. A través del diseño y la simulación de un sistema de calefacción para invernaderos, se promueve la adopción de tecnologías limpias y estrategias de mejora ambiental que favorecen la productividad agrícola de forma sostenible, al tiempo que se fortalecen las capacidades de diseño y simulación en ingeniería, aportando soluciones viables frente a los retos energéticos y climáticos del sector rural.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Diseñar y simular un sistema de calefacción para invernaderos

1.3.2. Objetivos específicos

- Modelar geoméricamente el invernadero y los componentes del sistema de calefacción utilizando software CAD.
- Realizar simulaciones mediante software de mecánica de fluidos computacional de forma que se visualice la distribución de temperatura y los patrones de flujo en el sistema.
- Determinar mediante la simulación computacional el efecto de la ubicación de la entrada de aire caliente sobre la distribución térmica en el interior del invernadero.

1.4. METODOLOGÍA

1.4.1. Procedimiento

Etapas 1: Modelado geométrico del invernadero y del sistema de calefacción

- Definición de las dimensiones generales del invernadero: 4 metros de ancho, 6 metros de largo y 3 metros de alto.
- Diseño del modelo tridimensional del invernadero utilizando software CAD, incorporando paredes, techo, puerta de acceso y tres aberturas circulares de 30 cm de diámetro (dos posteriores —superior e inferior— y una frontal superior).
- Inserción de elementos internos representativos como recipientes para tierra y suelo con grava.

- Asignación de materiales apropiados a cada componente del modelo, considerando sus propiedades térmicas básicas.

Etapas 2: Simulación del comportamiento térmico del sistema

1. Selección del fluido de trabajo (aire) desde la biblioteca del software.
2. Asignación de temperatura inicial uniforme de 10 °C tanto al aire como a los sólidos del modelo.
3. Configuración de condiciones de contorno:
 - Entrada de aire caliente a 30 °C con velocidad de 2 m/s.
 - Salida con presión ambiente en la abertura frontal superior.
4. Definición de parámetros de simulación: régimen estacionario, activación de conducción térmica y gravedad.
5. Generación de visualizaciones como cortes de plano (cut plots), trayectorias de flujo, vectores de velocidad y animaciones.

Etapas 3: Observación del efecto de la ubicación de la entrada de aire caliente

1. Realización de dos estudios de simulación independientes:
 - Caso 1: entrada de aire por la abertura superior posterior.
 - Caso 2: entrada de aire por la abertura inferior posterior.
2. Mantenimiento de condiciones constantes en ambos casos para permitir la comparación visual de los resultados.
3. Registro de resultados visuales para cada caso: distribución de temperatura, flujo de aire, y comportamiento térmico del entorno interior del invernadero.
4. Observación de las diferencias generadas por el cambio de ubicación de la entrada de aire, analizando los efectos sobre el patrón de calentamiento interno.

1.4.2. Técnicas

- **Modelado CAD paramétrico**

El modelado CAD paramétrico permite la creación de geometrías tridimensionales precisas y modificables mediante el uso de parámetros dimensionales, lo que facilita la adaptación y ajuste del modelo según los

requerimientos del proyecto (Alibre, 2024). Esta técnica se aplicó en la Fase 1 del proyecto, durante el desarrollo del modelo geométrico del invernadero y sus componentes. Fue esencial para definir la estructura del recinto, ubicar las aberturas de entrada y salida de aire, e incorporar los elementos internos que influyen en el comportamiento del flujo térmico, como el suelo y los recipientes de cultivo.

- **Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)**

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una técnica que permite simular numéricamente el comportamiento de fluidos y la transferencia de calor en sistemas físicos complejos (Cryospain, 2022). En este proyecto, se empleó en la Fase 2 y 3 para simular el ingreso de aire caliente en el invernadero y visualizar la distribución térmica resultante. Esta técnica permitió observar de forma gráfica y detallada los patrones de flujo y temperatura, sin necesidad de realizar ensayos físicos o construir prototipos.

- **Monitoreo de variables mediante *Goals***

El uso de *Goals* en simulación CFD permite definir variables de interés como temperatura, velocidad o flujo másico, y hacerles seguimiento durante el proceso de cálculo (Hulatt, StudySmarter, 2024). Esta técnica fue utilizada en la Fase 2 para monitorear valores como la temperatura promedio del fluido, la temperatura mínima y máxima, y la velocidad media del aire dentro del invernadero. Su aplicación facilitó el análisis visual de los resultados, especialmente para observar el efecto de la ubicación de la entrada de aire caliente.

1.4.3. Métodos

- **Método de volúmenes finitos**

El MVF es un método numérico robusto ampliamente utilizado en Mecánica de Fluidos Computacional para resolver ecuaciones de flujo y calor en dominios complejos (ESSS, 2016). En este proyecto, el método fue utilizado por el software de simulación CFD durante las fases de análisis térmico. Gracias a este método, fue posible calcular variables como temperatura, velocidad del aire y comportamiento del flujo, celda por celda, generando resultados confiables sobre el comportamiento térmico del sistema simulado.

- **Método de comparación visual por simulación**

El método de comparación visual por simulación consiste en observar gráficamente el comportamiento de una variable al modificar una condición del sistema, permitiendo analizar el efecto de dicha modificación sin necesidad de cálculos cuantitativos complejos (Lee, 2025). En la Fase 3, este método fue empleado para observar los efectos generados por el cambio en la ubicación de la entrada de aire caliente. Se analizaron cortes de temperatura y líneas de flujo en ambas configuraciones, lo que permitió identificar diferencias en la distribución térmica interna del invernadero.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. DEFINICIONES

Diseño y Simulación

El diseño asistido por computadora (CAD) se ha consolidado como una herramienta indispensable en ingeniería, ya que permite desarrollar modelos digitales precisos que representan con fidelidad sistemas físicos (Nine Altitudes, 2019). En el caso de los sistemas de calefacción para invernaderos, el modelado CAD facilita una visualización detallada de la geometría, incluyendo tanto la estructura del invernadero como los elementos que componen el sistema térmico. Esta fase es clave para verificar que cada componente encaje correctamente y cumpla con las especificaciones técnicas antes de pasar a la etapa de simulación.

La simulación computacional, en particular la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), constituye una técnica avanzada para analizar el comportamiento de los fluidos y la transferencia de calor en sistemas complejos. Mediante CFD es posible estudiar la distribución de temperaturas, el patrón de flujos de aire y las pérdidas energéticas sin necesidad de construir prototipos físicos (Silva, 2025). Esta capacidad de análisis previo resulta especialmente valiosa en el diseño de sistemas de calefacción, ya que permite optimizar la eficiencia térmica y reducir costos de implementación.

El proceso de simulación CFD comienza con la discretización del dominio, dividiendo el modelo en una red de pequeñas celdas donde se resuelven las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía. La precisión de los resultados depende directamente de la calidad del mallado, que debe ser más fino en zonas críticas como las fuentes de calor y las paredes del invernadero. Un mallado bien definido permite capturar de forma precisa los gradientes de temperatura y las variaciones en el flujo de aire (Vehi, 2016).

Otro elemento determinante en la simulación CFD es la definición de las condiciones de contorno, que establecen cómo interactúa el sistema con su entorno (Resolved Analytics, 2025). En el caso de un invernadero, esto abarca factores como la temperatura exterior, la radiación solar y las propiedades

térmicas de los materiales empleados. Es fundamental que estos parámetros representen fielmente las condiciones climáticas de la zona de estudio para que los resultados sean aplicables a la realidad.

Finalmente, la validación de resultados es esencial para garantizar la fiabilidad del modelo. Esto puede lograrse comparando los datos obtenidos en la simulación con mediciones experimentales o con referencias de la literatura (NASA, 2021). En situaciones donde no se dispone de datos empíricos, se pueden emplear técnicas como el análisis de sensibilidad o la verificación de independencia de malla, con el fin de confirmar que los resultados no dependen de factores numéricos arbitrarios y reflejan de manera coherente el comportamiento físico esperado.

Sistemas de Calefacción para Invernaderos

En regiones frías o durante las temporadas invernales, los sistemas de calefacción en invernaderos resultan indispensables para mantener un ambiente estable que favorezca el desarrollo de los cultivos. Su función principal es asegurar una distribución homogénea del calor, evitando el estrés térmico en las plantas y, al mismo tiempo, optimizando el consumo energético. Entre las tecnologías más empleadas se encuentran los sistemas de agua caliente, el aire forzado y la calefacción por radiación, cada uno con beneficios y limitaciones que dependen del tipo de cultivo y de las condiciones ambientales (Watson, y otros, 2022).

Los sistemas de agua caliente emplean tuberías distribuidas estratégicamente en el interior del invernadero, a través de las cuales circula el fluido para liberar calor de forma progresiva y uniforme. Esta alternativa ofrece un alto rendimiento energético y un control preciso de la temperatura, aunque implica una inversión inicial elevada en infraestructura (Novagric, 2024). La efectividad de este método depende en gran medida de la disposición de las tuberías y de la velocidad del flujo de agua, parámetros que deben definirse cuidadosamente para evitar zonas frías.

En el caso de los sistemas de aire forzado, el calor se distribuye mediante ventiladores y conductos que impulsan aire caliente al interior del invernadero. Son más económicos y de instalación sencilla, pero si el flujo de aire no se canaliza correctamente, pueden presentarse variaciones notables en la temperatura (Novagric, 2024). Además, un movimiento excesivo de aire podría provocar la pérdida de humedad, lo que puede perjudicar a cultivos sensibles.

La calefacción por radiación, por su parte, utiliza emisores infrarrojos que transmiten calor directamente a las plantas y al suelo, sin calentar de forma prioritaria el aire. Este sistema reduce las pérdidas por convección y es especialmente eficiente, aunque requiere un diseño preciso para evitar sobrecalentamientos localizados. En muchos casos, se emplea como complemento de otros sistemas para conseguir un balance térmico más uniforme (Hulatt, StudySmarter, 2024).

La eficiencia energética es un aspecto clave en el diseño de cualquier sistema de calefacción, dado que un consumo ineficiente puede elevar considerablemente los costos operativos. Medidas como el uso de energías renovables, el aislamiento térmico de la estructura y la implementación de sistemas de control automático contribuyen de forma significativa a mejorar el rendimiento y reducir gastos (Remica, 2016).

En síntesis, el diseño de un sistema de calefacción para invernaderos debe buscar el equilibrio entre uniformidad térmica, eficiencia energética y viabilidad económica. El uso de simulaciones mediante CFD permite evaluar diferentes configuraciones y seleccionar la más adecuada para las condiciones específicas de la ULEAM Extensión El Carmen, asegurando que el sistema propuesto sea factible y adaptado a las necesidades locales.

2.2. ANTECEDENTES

Contexto Institucional

La Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM), Extensión El Carmen, es una institución dedicada a la formación técnica y tecnológica en la provincia de

Manabí, Ecuador (ULEAM, 2025). Esta sede se caracteriza por ofrecer carreras orientadas a las necesidades productivas de la región, entre ellas la Tecnología Superior en Electromecánica, que integra conocimientos de las áreas eléctrica y mecánica para preparar profesionales capaces de diseñar, mantener y optimizar sistemas industriales y agroindustriales.

En esta carrera, los estudiantes adquieren competencias en campos como termodinámica, transferencia de calor, mecánica de fluidos y automatización, con un enfoque práctico que combina el uso de simulaciones computacionales y la construcción de prototipos básicos (ULEAM, 2025). No obstante, aunque la institución dispone de laboratorios para prácticas de automatización, aún carece de infraestructura especializada para simulación térmica o para el estudio de sistemas de calefacción en invernaderos. Esta carencia limita la posibilidad de desarrollar proyectos más completos en el ámbito de la climatización agrícola, un sector de creciente relevancia en el país.

Si bien la carrera ha impulsado anteriormente proyectos enfocados en automatización de riego, control de humedad y maquetas de invernaderos, la mayoría se ha orientado a la instrumentación electrónica, dejando en segundo plano el análisis térmico y energético. Esta situación motivó la realización del presente proyecto, cuyo objetivo es incorporar herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) y simulación mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) para proponer soluciones innovadoras en calefacción de invernaderos, aprovechando los fundamentos adquiridos en asignaturas como termodinámica y mecánica de fluidos.

Proyectos Previos y Brechas Identificadas

Antes del desarrollo de este trabajo, los proyectos relacionados con invernaderos en la ULEAM Extensión El Carmen se habían centrado principalmente en prototipos a pequeña escala con sistemas de control electrónico, utilizando sensores de temperatura y humedad conectados a microcontroladores como Arduino o ESP32. Aunque estas iniciativas permitieron monitorear variables ambientales, no incluyeron el diseño térmico ni la simulación de sistemas de

calefacción, por lo que no abordaban directamente el calentamiento eficiente del espacio interior.

En asignaturas como Termodinámica y Mecánica de Fluidos se han realizado simulaciones elementales de transferencia de calor y flujo en ductos, pero sin aplicarlas específicamente a invernaderos. De igual forma, en Instrumentación Industrial se han construido maquetas de invernaderos automatizados, aunque con un enfoque en la electrónica y el control, dejando en segundo plano el estudio de la distribución térmica y la eficiencia energética. Estas experiencias aportaron bases importantes, pero evidenciaron vacíos en la formación aplicada a sistemas de calefacción optimizados para agricultura protegida.

A nivel regional, la mayoría de los invernaderos utilizan métodos empíricos para su construcción y regulación de temperatura. No se encontraron antecedentes de proyectos que aplicaran simulación CFD para analizar o mejorar estos sistemas, lo que subraya el carácter innovador de esta investigación.

Este proyecto constituye el primer esfuerzo documentado dentro de la institución que combina herramientas de diseño CAD y simulación CFD para el estudio de sistemas de calefacción en invernaderos. Ante la ausencia de laboratorios especializados en esta área, la investigación se apoyará en software profesional para suplir la falta de infraestructura física, sentando un precedente para futuros trabajos en climatización agrícola dentro de la carrera.

2.3. TRABAJOS RELACIONADOS

Un estudio relevante realizado en España analizó el impacto de diferentes sistemas de calefacción en invernaderos sobre el desarrollo, producción y calidad de cultivos de tomate. La investigación comparó dos sistemas de calefacción, aire caliente y suelo radiante, junto con ventilación natural en invernaderos multitúnel y tipo Almería durante ciclos de otoño-invierno. Los resultados demostraron que la calefacción solo incrementó significativamente la producción cuando las temperaturas exteriores fueron inferiores a 8°C por

periodos prolongados, sin embargo, los costos de combustible no se justificaron económicamente frente al aumento productivo (Marín, Valera, Molina, & López, 2016).

En México se desarrolló un innovador sistema de climatización para invernaderos utilizando energía solar, como alternativa sostenible a los combustibles fósiles. El estudio, realizado en el Instituto Tecnológico de Pachuca, combinó simulación térmica y diseño de sistemas fotovoltaicos para optimizar el clima interior del invernadero. Mediante un balance térmico, el autor modeló temperaturas y humedad en diferentes estaciones, incorporando materiales de cambio de fase para mejorar la inercia térmica. Los resultados demostraron que la energía solar fotovoltaica era la opción más viable económicamente para alimentar el sistema de climatización, reduciendo costos operativos y emisiones (Juárez, 2019).

En el contexto ecuatoriano, se realizó un estudio documental sobre sistemas de calefacción por suelo radiante para invernaderos, analizando investigaciones desde el año 2000. Los resultados demostraron que este sistema representa una alternativa energéticamente eficiente y ecológicamente sostenible, al reducir significativamente el consumo de combustibles fósiles y evitar la emisión de gases perjudiciales para los cultivos. El sistema mostró capacidad para regular temperaturas tanto en invierno como en verano, mejorando las condiciones de producción y reduciendo el tiempo de retorno de la inversión a mediano plazo. Sin embargo, los investigadores identificaron como principal limitante el elevado costo inicial de implementación, aunque destacaron su rentabilidad a largo plazo. Este trabajo aporta evidencia valiosa sobre las ventajas técnicas y operativas de los sistemas radiantes en condiciones tropicales, proporcionando un referente importante para futuras investigaciones sobre climatización de invernaderos en el país (Bonilla, Acosta, & Moreno, 2020).

De acuerdo con una revisión exhaustiva de la literatura científica y bases de datos universitarias locales, no se han identificado estudios previos que aborden específicamente el diseño, simulación o implementación de sistemas de

calefacción para invernaderos en los cantones de Manabí. Si bien existen investigaciones sobre cultivos protegidos (como tomate o pimiento), estas se han centrado principalmente en aspectos agronómicos de rendimiento, manejo fitosanitario o técnicas de riego, sin profundizar en el análisis térmico de las estructuras o en la optimización energética de sistemas de climatización. Esta brecha en la literatura regional resalta la originalidad y pertinencia del presente estudio, que busca generar conocimiento técnico aplicable a las condiciones climáticas y productivas de la provincia.

CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA PROPUESTA

3.1. DESARROLLO

En esta sección se detalla la implementación práctica de la propuesta desarrollada para dar solución al problema planteado en el Capítulo I, describiendo el proceso de ejecución de los objetivos específicos. A continuación, se presenta el diseño y la metodología aplicada, las etapas clave llevadas a cabo, los materiales utilizados y las decisiones técnicas adoptadas en función de la simulación térmica del sistema de calefacción para invernaderos. Asimismo, se exponen los modelos evaluados y las condiciones de frontera consideradas, con el propósito de representar fielmente el comportamiento del aire caliente dentro del invernadero bajo condiciones climáticas frías. Finalmente, los resultados obtenidos a partir de las simulaciones se presentarán en la siguiente sección.

3.1.1. Descripción de la propuesta

La propuesta se fundamenta en el diseño y simulación computacional de un sistema de calefacción para un invernadero de 4 metros de ancho, 6 metros de largo y 3 metros de alto, con el propósito de visualizar la distribución térmica que se genera en su interior al aplicar aire caliente. El enfoque del trabajo se centró en la creación del modelo geométrico del invernadero utilizando software CAD, seguido de la simulación térmica del comportamiento del flujo de aire caliente mediante herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD), en condiciones ambientales frías. No se abordaron componentes de control automatizado ni análisis energéticos avanzados, ya que el alcance del proyecto se limita a observar los efectos térmicos mediante simulación digital.

Para este fin, se realizaron dos configuraciones distintas de entrada de aire caliente: una ubicada en la parte superior posterior del invernadero y otra en la parte inferior posterior, manteniendo constante la salida de aire en la parte frontal superior. Ambas simulaciones se desarrollaron bajo condiciones iniciales idénticas, lo que permitió observar el efecto de la ubicación de la entrada de aire sobre la distribución del calor en el interior del recinto. A continuación, se

describen las acciones ejecutadas en relación con cada uno de los objetivos específicos.

Descripción del Objetivo Específico 1

Se desarrolló un modelo geométrico simplificado del invernadero respetando sus dimensiones reales (4 m × 6 m × 3 m). El diseño incluyó tres aberturas de 0,30 m de diámetro: dos ubicadas en la parte posterior (una superior y una inferior) y una en la parte frontal, sobre la puerta, próxima al techo. Se integraron además elementos internos representativos como recipientes para cultivos y el suelo. Las paredes y cubierta se asignaron como policarbonato alveolar, los recipientes como madera, y el suelo como grava compactada. Este modelo permitió establecer una base adecuada para realizar simulaciones térmicas realistas, considerando condiciones físicas similares a las de un invernadero funcional.

Descripción del Objetivo Específico 2

En esta etapa se configuraron las simulaciones térmicas utilizando software CFD. Se seleccionó el aire como fluido de trabajo y se estableció una temperatura inicial uniforme de 10 °C tanto para los sólidos como para el fluido. Se mantuvo constante la condición de salida en la abertura frontal superior, con presión ambiente. En el primer estudio, se configuró como entrada de aire el agujero posterior superior, y en el segundo estudio se utilizó la entrada inferior, manteniendo en ambos casos una velocidad de 2 m/s que típicamente se sugiere para invernaderos en diversas publicaciones tal como en páginas como SOLERPLAU y una temperatura de entrada de 30 °C. Durante las simulaciones se generaron visualizaciones de los resultados en forma de planos de corte de temperatura, trayectorias de corriente y vectores de velocidad. Estas representaciones gráficas permitieron observar cómo se comporta el aire caliente dentro del invernadero y cómo se distribuye la temperatura en función de la geometría.

Descripción del Objetivo Específico 3

Se realizaron dos simulaciones con condiciones idénticas, variando únicamente la ubicación de la entrada de aire caliente. Esto permitió observar de forma visual

cómo cambia la distribución térmica interna del invernadero en función del punto de ingreso del flujo caliente. En ambos casos se obtuvieron temperaturas internas entre 28 °C y 30 °C, sin superar los rangos térmicos seguros para un entorno agrícola protegido. Se identificaron diferencias en los patrones de flujo: en el caso con entrada superior, el aire tendió a desplazarse directamente hacia la salida, mientras que, en el caso con entrada inferior, el aire ascendió generando mayor mezcla y circulación dentro del volumen del invernadero. Estas observaciones permiten comprender cómo influye la geometría del sistema en la dinámica térmica interna, sin necesidad de recurrir a validaciones experimentales o cálculos de eficiencia

3.1.2. Etapas

A continuación, se describen las etapas desarrolladas para el cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos, siguiendo una secuencia lógica desde el modelado geométrico hasta la validación de los resultados obtenidos por simulación.

Etapas 1: Actividades realizadas para cumplir el Objetivo Específico 1

Modelado geométrico del invernadero y sistema de calefacción

- Definición de las dimensiones reales del invernadero, considerando condiciones típicas para producción agrícola a pequeña escala.
- Diseño del modelo tridimensional del invernadero en software CAD con dimensiones de 4 m de ancho, 6 m de largo y 3 m de alto.
- Incorporación de tres aberturas circulares de 30 cm de diámetro:
 - Una en la parte posterior superior.
 - Una en la parte posterior inferior.
 - Una en la parte frontal superior, sobre la puerta.
- Integración de componentes internos relevantes:
 - Recipientes de cultivo modelados como estructuras de madera.
 - Piso representado con material de grava.

- Asignación de materiales a los componentes:
 - Paredes y techo: policarbonato alveolar (6 mm).
 - Recipientes: madera.
 - Suelo: grava compactada.
- Preparación del modelo para su importación al entorno de simulación CFD, asegurando la compatibilidad geométrica y térmica.

Etapas 2: Actividades realizadas para cumplir el Objetivo Específico 2

Simulación del comportamiento térmico mediante CFD

- Importación del modelo CAD al entorno de simulación CFD.
- Selección del aire como fluido de trabajo desde la biblioteca del software.
- Asignación de temperatura inicial de 10 °C a todos los sólidos y al fluido en el dominio.
- Configuración de condiciones de contorno:
 - Salida de aire por la abertura frontal superior con condición de presión ambiente.
 - Estudio 1: entrada de aire caliente en la abertura posterior superior (30 °C, 2 m/s).
 - Estudio 2: entrada de aire caliente en la abertura posterior inferior (30 °C, 2 m/s).
- Aplicación de mallado y definición de parámetros de simulación en régimen estacionario.
- Ejecución de las simulaciones para ambas configuraciones.
- Obtención de resultados visuales mediante:
 - *Cut Plots* de temperatura.
 - Vectores de velocidad.
 - Líneas de corriente.

- Animaciones de plano de corte móvil.
- Trayectorias del flujo principal dentro del invernadero.

Etapas 3: Actividades realizadas para cumplir el Objetivo Específico 3

Observación del efecto de la ubicación de la entrada de aire caliente

- Realización de dos configuraciones independientes variando únicamente la ubicación de la entrada de aire caliente.
- Registro de salidas visuales en ambas configuraciones para facilitar la comparación cualitativa.
- Observación de los efectos de cada configuración sobre:
 - Distribución de la temperatura en el volumen interno.
 - Formación de zonas de mayor acumulación térmica.
 - Comportamiento del flujo de aire y presencia de vórtices.
- Identificación de diferencias en la circulación interna del aire según la posición de la entrada, destacando cómo esta variable geométrica afecta el patrón térmico general del invernadero.
- Organización de los resultados gráficos para su análisis visual en la siguiente sección del documento.

3.1.3. Presupuesto

El presente proyecto no requirió la adquisición de materiales físicos ni la construcción de prototipos, ya que se desarrolló íntegramente mediante herramientas de diseño y simulación computacional. Por esta razón, no se generaron costos directos asociados a la ejecución de los objetivos específicos.

3.2. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de las actividades realizadas en cumplimiento de cada uno de los objetivos específicos. Los datos se respaldan mediante gráficos, capturas de simulación, visualizaciones

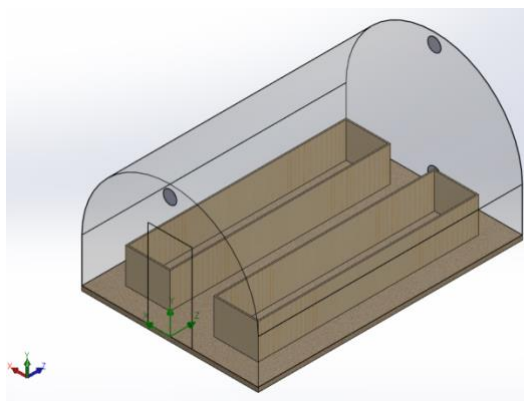
térmicas y análisis visual de los patrones de flujo y temperatura observados durante la simulación computacional del sistema de calefacción propuesto.

Objetivo Específico 1: Modelado geométrico

El desarrollo del modelo tridimensional del invernadero constituyó la base fundamental para los análisis posteriores. Se diseñó un recinto cerrado de 4 metros de ancho, 6 metros de largo y 3 metros de alto, respetando las proporciones típicas de un invernadero de producción agrícola a pequeña escala, basado en las recomendaciones de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) que indica una altura mínima de 3m sin restricciones en las demás dimensiones y con una forma de capilla a dos aguas que, al ser de fácil construcción, es muy común en este tipo de estructuras. La estructura incluyó una puerta frontal de acceso y tres aberturas circulares de 30 cm de diámetro, dado que se considera una tubería de ingreso de aire caliente de 12 pulgadas que es típica para ventilación forzada, dos de ellas ubicadas en la pared posterior (una en la parte superior y otra en la parte inferior) y una tercera sobre la puerta, cerca del borde superior frontal. Estas aberturas simulan los puntos de entrada y salida de aire caliente.

Ilustración 1.

Diseño 3D simplificado de un invernadero.

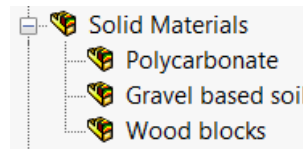


En el diseño se definieron materiales representativos para cada componente: policarbonato alveolar de 6 mm para paredes y cubierta, madera para los receptáculos de cultivo, y grava para el suelo. Estos materiales fueron seleccionados tanto por su presencia habitual en este tipo de instalaciones como

por sus propiedades térmicas, permitiendo una simulación más realista del comportamiento del sistema. El uso del software CAD permitió generar una geometría limpia y adecuada para el mallado y la posterior aplicación de condiciones de contorno en la fase de simulación.

Ilustración 2.

Asignación de materiales en el software.



Este modelo permitió no sólo visualizar espacialmente el sistema de calefacción, sino también establecer un entorno computacional confiable, capaz de reflejar el comportamiento térmico y dinámico del aire caliente en el interior del invernadero.

Objetivo Específico 2: Simulación térmica mediante CFD

Se realizaron dos simulaciones térmicas bajo condiciones iniciales idénticas: temperatura de 10 °C, típico en épocas frías en varias zonas del Ecuador, en todo el dominio (sólidos y aire), aire como fluido de trabajo y condición de salida a presión ambiente en la abertura frontal superior. La única diferencia entre ambos estudios fue la ubicación de la entrada de aire caliente. En el primer estudio, se utilizó la abertura superior posterior como entrada, con aire a 30 °C, que es una temperatura recomendada para calefacción de invernaderos, y velocidad de 2 m/s, que es un valor común para sistemas de ventilación forzada de este tipo ya que no se generan corrientes que puedan favorecer la pérdida de humedad. En el segundo estudio, se aplicaron las mismas condiciones de entrada, pero desde la abertura inferior posterior.

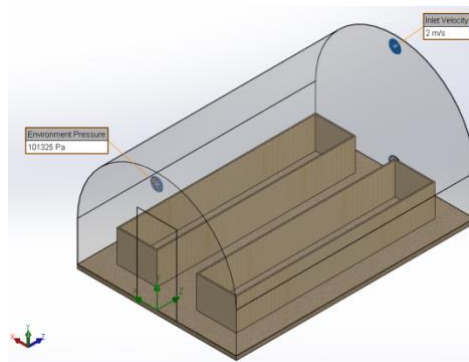
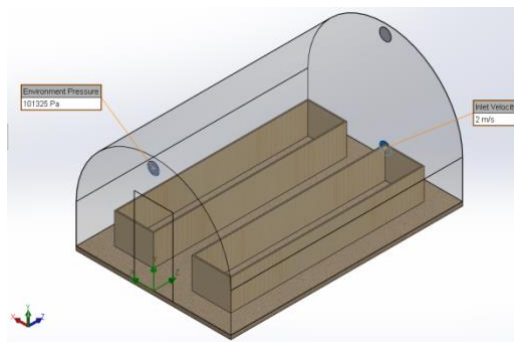
Tabla 1.

Condiciones iniciales asignadas al modelo.

Variable	Dominio	Valor	Observación
Temperatura inicial	Aire y todos los sólidos (paredes, suelo, recipientes)	10 °C	Simula condiciones frías al inicio de la simulación
Presión inicial	Todo el dominio	101325 Pa (presión atmosférica)	Condición estándar para el aire al iniciar el análisis

Tabla 2.*Condiciones de contorno utilizadas en la simulación.*

Ubicación	Tipo de condición	Parámetro	Valor asignado	Observación
Entrada posterior superior (caso 1)	Velocity Inlet	Temperatura del aire	30 °C	Aire caliente ingresando desde la parte superior
		Velocidad del aire	2 m/s	Dirección perpendicular a la abertura
Entrada posterior inferior (caso 2)	Velocity Inlet	Temperatura del aire	30 °C	Aire caliente ingresando desde la parte inferior
		Velocidad del aire	2 m/s	Mismas condiciones que en el caso 1
Salida frontal superior	Pressure Outlet	Presión	101325 Pa	Simula salida libre a presión ambiente Se consideran materiales con propiedades térmicas reales
Paredes, techo y suelo	Wall (no-slip)	Condición térmica	Conducción activada	

Ilustración 3.*Configuración de las condiciones de frontera del caso 1.***Ilustración 4.***Configuración de las condiciones de frontera del caso 2.*

Ambas simulaciones permitieron visualizar cómo el flujo de aire caliente se desplazaba a través del interior del invernadero, afectando la distribución térmica según la ubicación de la entrada. En el caso 1, el aire ingresó desde la parte

superior y avanzó de forma más directa hacia la salida, generando un patrón de flujo lineal. En el caso 2, el aire entró desde abajo, ascendiendo progresivamente, lo cual generó una mayor interacción con el aire frío y una mezcla más activa.

Ilustración 5.

Distribución de la temperatura sobre las líneas de flujo principales para el caso 1.

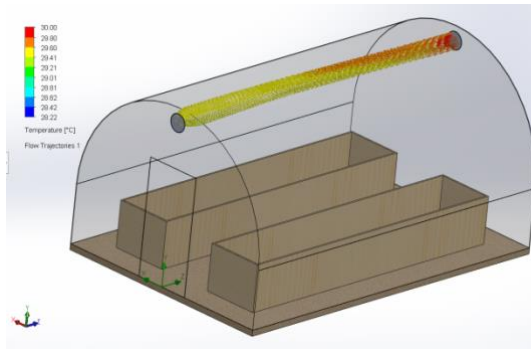
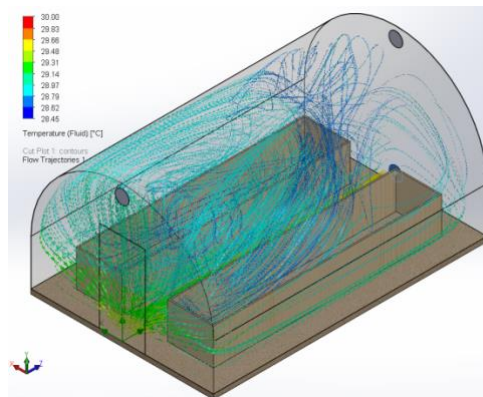


Ilustración 6.

Distribución de la temperatura sobre las líneas de flujo principales para el caso 2.



Se generaron *cut plots* con vectores de velocidad, líneas de corriente y contornos térmicos, lo que permitió observar zonas de acumulación de calor, desplazamiento del flujo y presencia de vórtices suaves. En ambos casos, las temperaturas internas alcanzaron valores entre 28 °C y 30 °C, lo cual sugiere que el aire caliente se distribuyó dentro de un rango adecuado.

Ilustración 7.

Gráficos de corte con la distribución por secciones de los contornos de temperatura, vectores de velocidad y líneas de corriente para el caso 1.

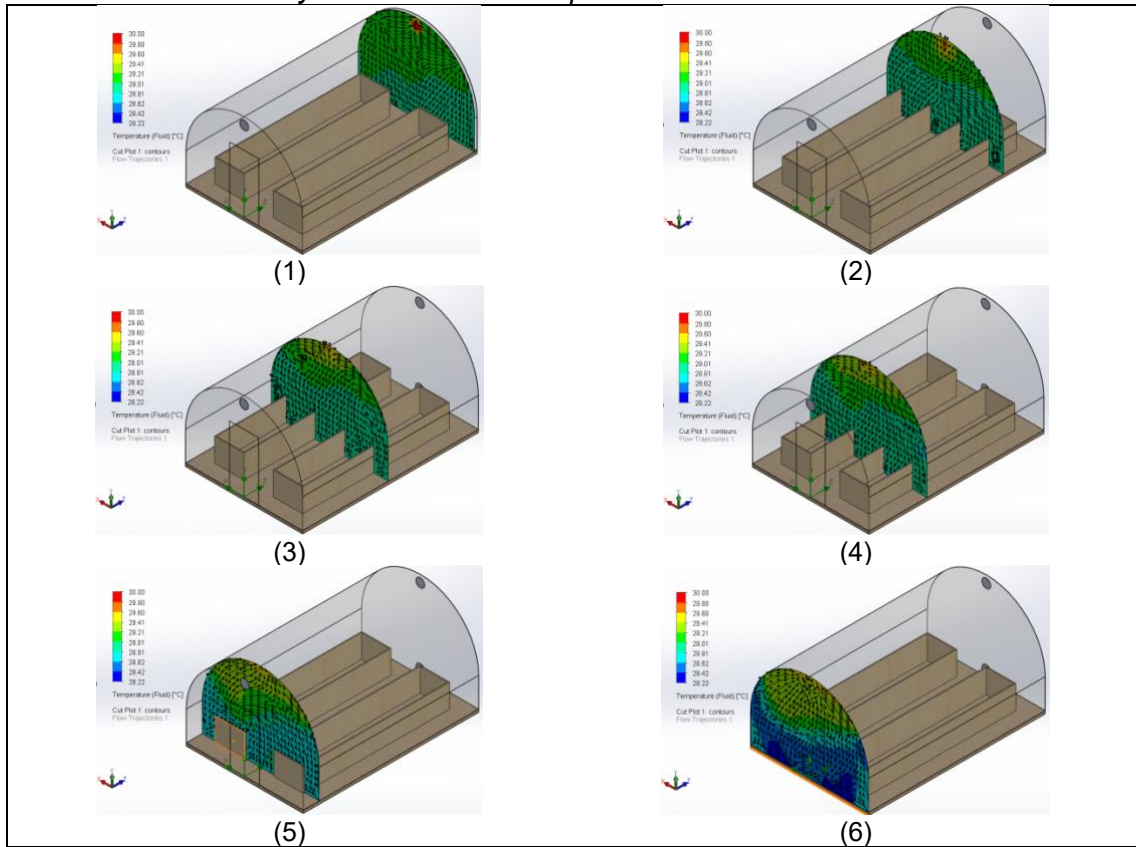
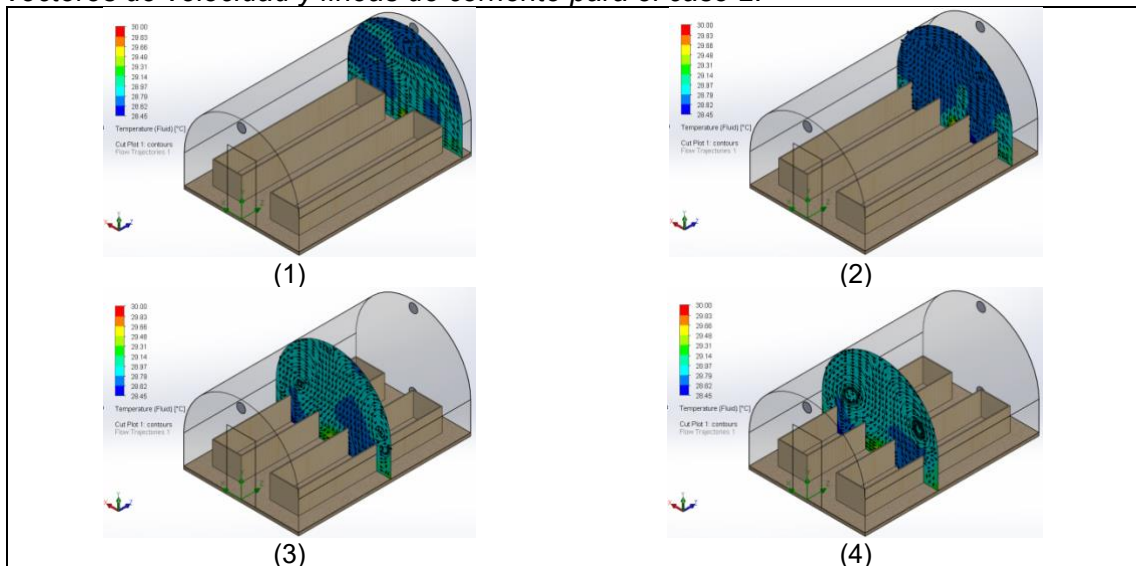
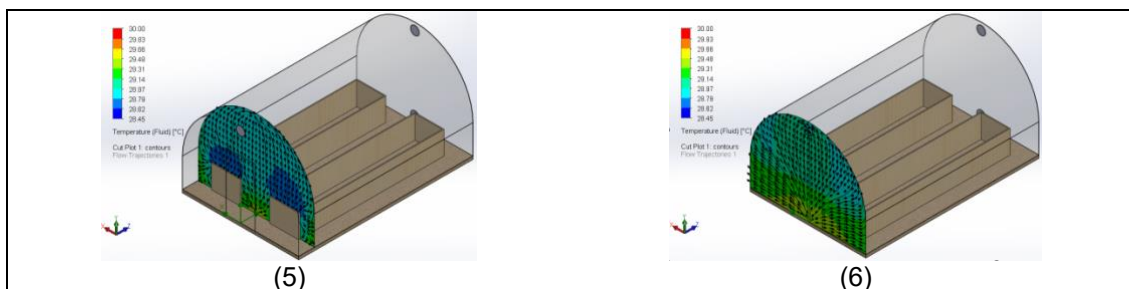


Ilustración 8.

Gráficos de corte con la distribución por secciones de los contornos de temperatura, vectores de velocidad y líneas de corriente para el caso 2.





Objetivo Específico 3: Observación del efecto de la ubicación de la entrada de aire caliente

Para este objetivo se compararon las visualizaciones gráficas de ambas simulaciones con el propósito de observar los efectos generados por la ubicación de la entrada de aire caliente. No se realizaron cálculos comparativos ni se aplicaron criterios de validación; el análisis se basó únicamente en las imágenes generadas por la herramienta de simulación.

En el caso 1 (entrada superior), el aire circuló rápidamente hacia la salida sin generar turbulencias significativas en el área central del invernadero. En cambio, en el caso 2 (entrada inferior), se evidenció un flujo más dinámico, con desplazamiento ascendente y mayor interacción con el entorno, lo que permitió visualizar una distribución más amplia del calor.

Ilustración 9.

Resultados numéricos de las metas (Goals) planteadas para el caso 1.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Average Total Pressure 1	[Pa]	101295.27	101295.27	101295.26	101295.30	100	Yes	0.04	0.08
GG Minimum Temperature (Fluid) 2	[°C]	28.22	27.59	26.75	28.22	11	Yes	1.48	0.17
GG Average Temperature (Fluid) 3	[°C]	28.97	28.88	28.77	28.97	85	Yes	0.20	0.17
GG Maximum Temperature (Fluid) 4	[°C]	30.00	30.00	30.00	30.00	100	Yes	0	5.70e-04
GG Minimum Total Temperature 5	[°C]	28.22	27.59	26.75	28.22	11	Yes	1.48	0.17
GG Average Total Temperature 6	[°C]	28.97	28.88	28.77	28.97	85	Yes	0.20	0.17
GG Maximum Total Temperature 7	[°C]	30.00	30.00	30.00	30.00	100	Yes	0	5.68e-04
GG Average Density (Fluid) 11	[kg/m ³]	1.17	1.17	1.17	1.17	90	Yes	7.83e-04	7.06e-04
GG Volume Flow Rate 12	[m ³ /s]	0.0003	0.0004	0.0003	0.0004	100	Yes	8.0185e-05	0.0026
GG Average Velocity 13	[m/s]	0.091	0.089	0.085	0.091	44	Yes	0.005	0.002
SG Average Temperature (Fluid) 1	[°C]	29.43	29.36	29.24	29.43	100	Yes	0.18	0.19
SG Volume Flow Rate 2	[m ³ /s]	-0.1340	-0.1339	-0.1340	-0.1339	100	Yes	8.0185e-05	0.0001
SG Average Temperature (Fluid) 3	[°C]	30.00	30.00	30.00	30.00	100	Yes	0	3.03e-06
SG Volume Flow Rate 4	[m ³ /s]	0.1343	0.1343	0.1343	0.1343	100	Yes	0	0.0001

Ilustración 10.

Resultados numéricos de las metas (Goals) planteadas para el caso 2.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Average Total Pressure 1	[Pa]	101295.82	101295.81	101295.79	101295.82	100	Yes	0.03	0.08
GG Minimum Temperature (Fluid) 2	[°C]	28.45	28.26	28.05	28.45	45	Yes	0.39	0.18
GG Average Temperature (Fluid) 3	[°C]	28.84	28.69	28.53	28.84	54	Yes	0.31	0.17
GG Maximum Temperature (Fluid) 4	[°C]	30.00	30.00	30.00	30.00	100	Yes	0	3.03e-06
GG Minimum Total Temperature 5	[°C]	28.45	28.26	28.05	28.45	45	Yes	0.39	0.18
GG Average Total Temperature 6	[°C]	28.84	28.69	28.53	28.84	54	Yes	0.31	0.17
GG Maximum Total Temperature 7	[°C]	30.00	30.00	30.00	30.00	100	Yes	0	3.03e-06
GG Average Density (Fluid) 11	[kg/m^3]	1.17	1.17	1.17	1.17	58	Yes	1.21e-03	7.01e-04
GG Volume Flow Rate 12	[m^3/s]	0.0006	0.0006	0.0006	0.0007	100	Yes	0.0001	0.0026
GG Average Velocity 13	[m/s]	0.128	0.126	0.125	0.128	60	Yes	0.004	0.002
SG Average Temperature (Fluid) 1	[°C]	28.96	28.83	28.70	28.96	73	Yes	0.25	0.19
SG Volume Flow Rate 2	[m^3/s]	-0.1350	-0.1350	-0.1350	-0.1349	100	Yes	0.0001	0.0001
SG Average Temperature (Fluid) 3	[°C]	28.76	28.58	28.45	28.76	100	Yes	0.31	0.35
SG Volume Flow Rate 4	[m^3/s]	0	0	0	0	100	Yes	0	1.0000e-08

Las imágenes muestran que en ambas configuraciones se logra calentar el espacio, aunque con diferencias en los patrones de movimiento del aire. Estas observaciones permiten comprender cómo influye la ubicación del punto de entrada sobre el comportamiento térmico del sistema, sin necesidad de hacer análisis cuantitativos o cálculos de eficiencia.

Ilustración 11.

Distribución de la temperatura sobre los sólidos al interior del invernadero para el caso 1.

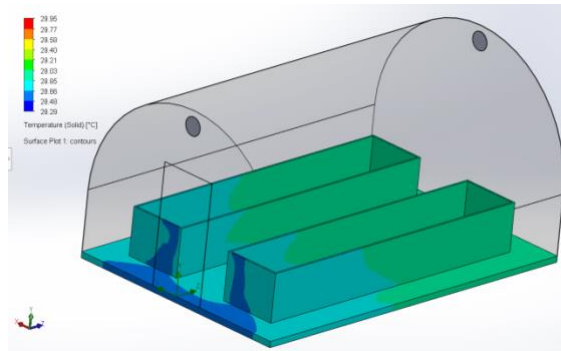
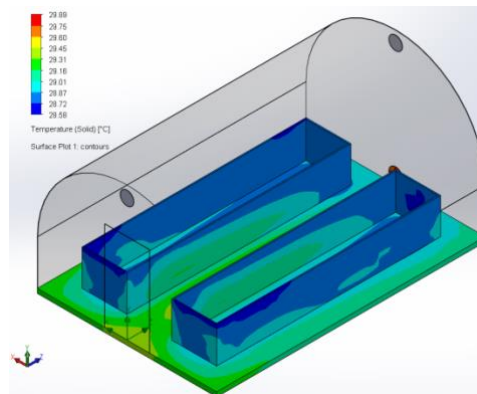


Ilustración 12.

Distribución de la temperatura sobre los sólidos al interior del invernadero para el caso 2.



CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

Conclusión del Objetivo Específico 1:

Se cumplió satisfactoriamente con el modelado geométrico del invernadero y los componentes del sistema de calefacción. Se desarrolló un modelo tridimensional con dimensiones reales (4 m × 6 m × 3 m), incorporando elementos relevantes como paredes, techo, suelo, recipientes para cultivos y aberturas para entrada y salida de aire. Los materiales asignados (policarbonato, madera y grava) permitieron representar adecuadamente el comportamiento térmico del sistema en condiciones simuladas, sirviendo como base estructural para las fases posteriores del proyecto.

Conclusión del Objetivo Específico 2:

Se logró cumplir con la simulación computacional del comportamiento térmico en el interior del invernadero utilizando un flujo de aire caliente. Las visualizaciones obtenidas mediante *cut plots*, vectores de velocidad y líneas de corriente permitieron observar la distribución de temperatura generada por el ingreso de aire caliente a 30 °C, en condiciones ambientales iniciales de 10 °C. En ambas configuraciones, el sistema permitió alcanzar un entorno térmico interno entre 28 °C y 30 °C, representando de forma visual y cualitativa el funcionamiento de un sistema de calefacción aplicado a un espacio cerrado.

Conclusión del Objetivo Específico 3:

Se cumplió con la observación del efecto de la ubicación de la entrada de aire caliente sobre la distribución térmica del invernadero. A través de las simulaciones realizadas se identificaron diferencias en los patrones de circulación del aire y en la forma en que se distribuye el calor en el espacio interior. La simulación permitió visualizar cómo el ingreso por la parte inferior genera un flujo ascendente con mayor interacción dentro del recinto, mientras que el ingreso superior favorece un desplazamiento más directo hacia la salida. Estas observaciones aportan criterios visuales útiles para el análisis de configuraciones futuras en sistemas similares.

4.2. RECOMENDACIONES

- Se sugiere considerar el diseño de sistemas de calefacción que incluyan entradas de aire caliente en la parte inferior del invernadero, ya que, según la simulación realizada, esta configuración permite una mejor difusión del calor en la zona de cultivo.
- Se recomienda evaluar, mediante simulaciones previas, la ubicación óptima de entradas y salidas de aire caliente. La disposición con entradas inferiores y salidas superiores mostró, visualmente, un patrón de circulación más favorable en el interior del recinto.
- Se aconseja fomentar el uso de herramientas de simulación térmica como parte del proceso de enseñanza en áreas como transferencia de calor y dinámica de fluidos, ya que permiten representar de forma visual conceptos abstractos y su aplicación en contextos reales.
- Se sugiere ampliar este tipo de análisis mediante simulaciones adicionales que contemplen variaciones en caudal de entrada, temperatura de inyección, formas geométricas del recinto o disposición interna, con el fin de explorar más escenarios posibles dentro del entorno virtual sin necesidad de construcción física.

BIBLIOGRAFÍA

- Alibre. (19 de Enero de 2024). *Alibre*. Obtenido de Design Intent - Guía de modelado paramétrico 3D: <https://www.alibre.com/es/blog/design-intent-a-guide-to-3d-parametric-modeling/>
- Bonilla, S., Acosta, J., & Moreno, J. (2020). Sistema de calefacción por suelo radiante en procesos agrícolas en invernaderos. *Polo del Conocimiento*, 413-431.
- Cryospain. (19 de Julio de 2022). *Cryospain*. Obtenido de Dinámica de fluidos computacional: cómo está revolucionando los proyectos de ingeniería : <https://cryospain.com/es/dinamica-fluidos-computacional-esta-revolucionando-proyectos-ingenieria>
- ESSS. (12 de Diciembre de 2016). *ESSS*. Obtenido de El método de volúmenes finitos: <https://www.esss.com/es/blog/el-metodo-de-volumenes-finitos/>
- González, M., Rodriguez, N., Escobedo, J., & Martin, I. (2017). Diseño y simulación de un invernadero asistido con energía renovable para Durango. *Revista Aplicaciones de la Ingeniería*, 1-15.
- Hulatt, L. (5 de Septiembre de 2024). *StudySmarter*. Obtenido de Análisis de convergencia: <https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-quimica/analisis-de-convergencia/>
- Hulatt, L. (13 de Agosto de 2024). *StudySmarter*. Obtenido de Calefacción De Invernaderos: <https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-agricola/calefaccion-de-invernaderos/>
- Juárez, A. (2019). *Diseño De Un Sistema De Climatización Para Invernaderos Utilizando Energía Solar*. Hidalgo: Instituto Tecnológico de Pachuca.
- Lee, S. (11 de Junio de 2025). *Validación y verificación en modelado de simulación*. Obtenido de https://www-numberanalytics-com.translate.google/blog/validation-verification-simulation-modeling?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- Marín, P., Valera, D., Molina, F., & López, A. (2016). Influencia de diferentes sistemas de calefacción sobre el desarrollo, producción y calidad de un cultivo de tomate en invernadero. *ITEA* , 375-391.
- MET MANN. (22 de Julio de 2021). *MET MANN*. Obtenido de Sistemas de calefacción para invernaderos: <https://www.metmann.com/sistemas-de-calefaccion-para-invernaderos/>

- NASA. (10 de Febrero de 2021). *NASA*. Obtenido de Descripción general de la verificación y validación de CFD: https://www-grc-nasa-gov.translate.goog/www/wind/valid/tutorial/overview.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- Nine Altitudes. (20 de Agosto de 2019). *Nine Altitudes*. Obtenido de ¿Qué es CAD, para qué sirve y qué ventajas tiene?: <https://9altitudes.com/es/aprende-y-conecta/articulos/que-es-cad-para-que-sirve-y-que-ventajas-tiene>
- Novagric. (Junio de 2024). *Novagric*. Obtenido de Calefacción en invernaderos: <https://novagric.com/climatizacion-de-invernaderos/calefaccion-en-invernaderos/>
- Remica. (7 de Novimebre de 2016). *Remica*. Obtenido de Siete claves para el ahorro y la eficiencia energética en sistemas de calefacción de invernaderos: <https://remica.es/eficiencia-energetica-sistemas-de-calefaccion-invernaderos/>
- Resolved Analytics. (Junio de 2025). *Resolved Analytics*. Obtenido de Introducción a las condiciones de contorno: https://www-resolvedanalytics-com.translate.goog/cfd/what-is-a-boundary-condition?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- Roberts, J., Caldera, M., & Sosa, A. (2022). *Diseño De Un Sistema De Calefacción Alimentado Por Paneles Solares*. Mar del Plata: Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Silva, V. (Junio de 2025). *FanTR*. Obtenido de ¿Qué es CFD (Computational Fluid Dynamics)? : <https://fantr.com/es/blog/qu-e-es-cfd-computational-fluid-dynamics-143>
- ULEAM. (Junio de 2025). *ULEAM*. Obtenido de <https://carreras.uleam.edu.ec/facultad-ciencias-de-la-vida-y-tecnologicas/>
- ULEAM. (Junio de 2025). *ULEAM Extensión El Carmen*. Obtenido de Electromecánica: <https://carreras.uleam.edu.ec/extension-el-carmen/carrera-electromecanica/>
- Vehi, J. M. (2016). *Mallado de Geometrías Complejas Mediante CFD*. Barcelona: UPC.
- Watson, J., Gómez, C., Buffington, D., Bucklin, R., Henley, R., & McConnell, D. (2022). Calefacción de invernaderos. *EDIS IFAS*, 1-5.

ANEXOS

Ilustración 13.

Valores históricos de temperatura en función del número de iteraciones para el caso 1.

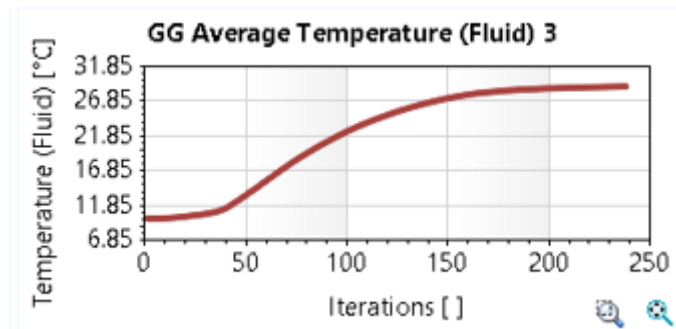
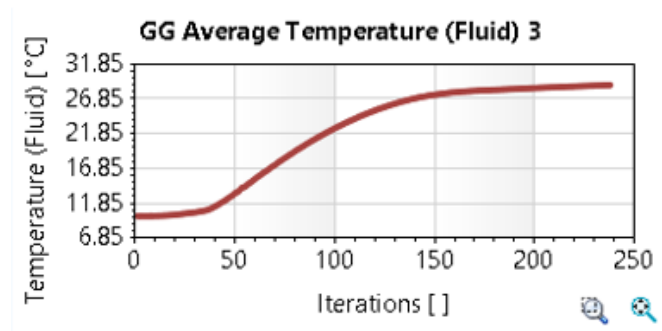


Ilustración 14.

Valores históricos de temperatura en función del número de iteraciones para el caso 2.



UNIVERSIDAD_LAICA_1_Corrección - 5

6%
Textos sospechosos

- 6% Similitudes
 - < 1% similitudes entre comillas
 - < 1% entre las fuentes mencionadas
- 3% Idiomas no reconocidos (Ignorado)
- 28% Textos potencialmente generados por IA (Ignorado)

Nombre del documento: UNIVERSIDAD_LAICA_1_Corrección - 5.docx
ID del documento: c423c5b7638c26be75512a32577c25b897bd532a
Tamaño del documento original: 2,58 MB

Depositante: JONATHAN PAÚL JIMENEZ GONZALES
Fecha de depósito: 15/8/2025
Tipo de carga: Interface
Fecha de fin de análisis: 15/8/2025

Número de palabras: 8077
Número de caracteres: 56.641

Distribución de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	MONTEJO JOSE - VERGARA ERICK.pdf MONTEJO JOSE - VERGARA ERICK #10497 Viene de de mi grupo 9 Fuentes similares	3%		Palabras idénticas: 3% (289 palabras)
2	MENDOZA ZAMBRANO.pdf MENDOZA ZAMBRANO #423710 Viene de de mi grupo 9 Fuentes similares	3%		Palabras idénticas: 3% (239 palabras)
3	TRABAJO DE IMPLEMENTACION- DEMO 2 R (1).docx TRABAJO DE IMPL. #16072 Viene de de mi grupo 2 Fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (57 palabras)
4	repositorio.utp.edu.co Estudio de cargabilidad de turbo generador a gas, en ár... https://repositorio.utp.edu.co/home	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (48 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	hdl.handle.net Estudio computacional de la dinámica del flujo turbulento en un... http://hdl.handle.net/1992/61102	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (39 palabras)
2	EMEB-2024-2-13.docx EMEB-2024-2-13 #abae2c Viene de de mi grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (23 palabras)
3	remica.es Eficiencia energética en sistemas de calefacción de invernaderos https://remica.es/eficiencia-energetica-sistemas-de-calefaccion-invernaderos/	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (27 palabras)
4	es.scribd.com PROYECTO Circuito Turístico PDF Turismo Ocio https://es.scribd.com/document/419634586/PROYECTO-Circuito-Turistico	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (20 palabras)
5	duinto.com Método de Elementos Finitos en ANSYS Fluent: Flujo y Calor https://duinto.com/metodo-de-elementos-finitos-en-ansys-fluent-flujo-y-calor/	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (21 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

- <https://www.alibre.com/es/blog/design-Intent-a-guide-to-3d-parametric-modeling/>
- <https://www.esss.com/es/blog/el-metodo-de-volumenes-finitos/>
- <https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-quimica/analisis-de-convergencia/>
- <https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-agricola/calefaccion-de-invernaderos/>
- https://www.numberanalytics.com.translate.google/blog/validation-verification-simulation-modeling?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc

Jonathan Jiménez
Ing. Jonathan Jiménez