



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA

TEMA:

MODELAMIENTO DEL FLUJO DE AIRE FORZADO EN UN
INVERNADERO

AUTOR: MANUEL JAVIER CABASCANGO ALVAREZ

DIRECTOR: MGS. COSME DAMIAN MEJÍA ECHEVERRÍA

IBARRA – ECUADOR

2019



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	100369810-5		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Cabascango Álvarez Manuel Javier		
DIRECCIÓN:	Río Tahuando y Río Yazuní		
EMAIL:	mjcabascango@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	2 603628	TELÉFONO MÓVIL:	0979470477

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Modelamiento del flujo de aire forzado en un invernadero
AUTOR:	Cabascango Álvarez Manuel Javier
FECHA:	10/06/2019
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	PREGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
ASESOR /DIRECTOR:	MGS. Cosme Mejía

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 10 días del mes de Junio de 2019

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Manuel Javier Cabascango Álvarez". The signature is somewhat stylized and scribbled over.

Manuel Javier Cabascango Álvarez



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERIA EN CIENCIAS APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

En calidad de director del trabajo de grado “**MODELAMIENTO DEL FLUJO DE AIRE FORZADO EN UN INVERNADERO**”, presentado por el egresado **MANUEL JAVIER CABASCANGO ÁLVAREZ**, para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, certifico que el mencionado proyecto fue realizado bajo mi dirección.

Ibarra Junio de 2019



MGS. Cosme Mejía
Director

Agradecimiento

A Dios porque sin él no hubiera podido ver mi sueño realizar.

A mis padres Rosa Álvarez y Manuel Cabascango por ser un pilar fundamental en el transcurso de mi carrera universitaria, gracias por brindarme el apoyo para seguir y nunca rendirme, por todos los consejos y el permanecer junto a mí cada día.

A la Universidad Técnica del Norte por permitirme ser parte de la institución y poder formarme como un nuevo profesional, a los docentes universitarios por brindarnos sus conocimientos adquiridos en toda su vida, gracias por los consejos para ser un buen profesional.

A mis compañeros que juntos compartimos experiencias, conocimientos, nos ayudamos mutuamente para poder conseguir nuestro mayor sueño el graduarnos como ingenieros.

Javier Cabascango

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres por su incondicional apoyo, por cada esfuerzo que dieron por ver cumplir mi sueño el de poder ser Ingeniero, le dedico también a mi hermosa hija Vayolet es el motor de mi vida y por ella así como a mis padres les debo todo en esta vida porque me dieron el aliento a seguir y no decaer.

Javier Cabascango

RESUMEN

Los invernaderos en la actualidad se los construye de manera más técnica para poder proteger mejor la planta de enfermedades que existen en el ambiente, de esta forma se pueden controlar las variables que intervienen en el crecimiento del cultivo como son: temperatura, humedad relativa, radiación solar entre otras; controlando dichas variables se puede lograr un mejor producto al momento de cosecharlo.

Existen modelos matemáticos que permiten determinar cómo se comportan las variables en cierto lugar por ejemplo en hogares, hospitales, plantas industriales, etc.; actualmente se están utilizando o se han desarrollado modelos para poder aplicarlos en el desarrollo de cultivos en invernaderos.

Hay un invernadero en la granja de Yuyucocha que fue utilizado para cultivar y cosechar papa superchola, después de desarrollar el proyecto el lugar fue abandonado, se quiere volver a utilizar el lugar para volver a cultivar pero observando cómo es la distribución del aire en el interior con los ventiladores que se encuentran en el mismo mediante un modelo matemático.

Se desarrolló un modelo que me permite determinar cómo se distribuye el flujo de aire en el interior del recinto, la base de datos se la creo realizando mediciones en el mes de Junio, al terminar la base de datos se procede a realizar pruebas correcciones en el modelo se llegó a resultados satisfactorios.

ABSTRACT

The greenhouses are now built in a more technical way to better protect the plant from diseases that exist in the environment, this way you can control the variables that intervene in the growth of the crop such as: temperature, relative humidity, radiation solar among others; by controlling these variables, a better product can be achieved when harvesting.

There are mathematical models that allow to determine how variables behave in a certain place, for example in homes, hospitals, industrial plants, etc.; currently, models are being used or developed to be applied in the development of crops in greenhouses.

There is a greenhouse in the farm of Yuyucocha that was used to grow and harvest superchola potatoes, after developing the project the place was abandoned, it is wanted to reuse the place to re-cultivate but observing how is the distribution of the air in the interior with the fans that are in it using a mathematical model.

A model was developed that allows me to determine how the air flow is distributed inside the enclosure, the database was created by making measurements in the month of June, at the end of the database we proceed to perform corrections tests in the model was achieved satisfactory results.

Índice de Contenido

Índice de Contenido	IX
Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas	XII
INTRODUCCIÓN	XIII
Planteamiento del problema.....	XIII
Objetivo General.....	XIII
Objetivos Específicos.....	XIII
Antecedentes	XIV
Justificación	XVIII
Alcance	XVIII
CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO	1
1.1 Modelos basados en Dinámica de Fluidos Computacional	1
1.2 CFD.....	2
1.3 Principios físicos.....	3
1.3.1 Conservación de la energía	3
1.3.2 Conservación de la masa.....	4
1.3.3 Conservación de momento.....	5
1.4 Parámetros de estudio de microclima	6
1.4.1 Condiciones de ventilación	6
1.4.2 Modelos de turbulencia.....	7
1.4.3 Variaciones de la temperatura.....	9
1.4.4 Efecto de la radiación.....	9
1.4.5 Variaciones de la humedad	10
1.4.6 Mallas antiáfidas	10
1.4.7 Cultivo.....	10
CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA	13
2.1 Invernadero	13
2.2 Registro de variables.....	15
2.3 Conformación del volumen de control	18
2.3.1 Tipo de análisis	19
2.3.2 Discretización del dominio	19
2.3.3 Caracterización del fluido	20
2.3.4 Modelo de turbulencia	20
2.4 Materiales y condiciones de frontera	20
2.5 Condiciones de frontera	22
2.6 Validación del modelo	22
CAPÍTULO 3 RESULTADOS	25
3.1 Definición de condiciones ambientales externas	25
3.2 Caso I: temperatura más alta en el día de la hora con más frecuencia de valores máximos.....	25
3.3 Caso II: temperatura más baja en el día de la hora con más frecuencia de valores mínimos.....	26
3.4 Análisis de humedad relativa y temperatura en el invernadero	28
3.4.1 Análisis de varianza	28

3.5	Comportamiento de la temperatura y humedad relativa de los casos de estudio con respecto a los requerimientos del cultivo	30
3.6	Validación casos de estudio	32
3.6.1	Distribución espacial de temperatura, humedad relativa y vectores de viento de los casos validados	38
3.6.2	Caso I	38
3.6.3	Caso II	40
CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		45
4.1	Conclusiones	45
4.2	Recomendaciones	47
4.3	Referencias.....	48
4.4	Anexos	51
4.4.1	Anexo1	51
4.4.2	Anexo 2.....	52

Índice de Figuras

Figura 1. Cambio de un elemento del fluido en el tiempo.....	3
Figura 2. Ubicación geográfica del invernadero de estudio	13
Figura 3. Vista lateral del invernadero.....	14
Figura 4. Dimensiones del invernadero	14
Figura 5. Vista frontal del invernadero	15
Figura 6. Estación Meteorológica Inamhi.....	15
Figura 7. Sensores instalados en pilares del recinto	17
Figura 8. Distribución de los sensores en el invernadero	18
Figura 9. Clasificación de materiales.....	21
Figura 10. Análisis de frecuencia de las horas con las máximas temperaturas en el día.....	25
Figura 11. Datos de temperatura a las 14:00 del mes de Junio.....	26
Figura 12. Análisis de frecuencia de las horas con las mínimas temperaturas en el día	26
Figura 13. Datos de temperatura a las 6:00 del mes de Junio.....	27
Figura 14. Distribución de la temperatura del 7 de Junio en los ejes y su relación con la temperatura óptima para el cultivo	30
Figura 15. Distribución de la temperatura del 21 de Junio en los ejes y su relación con la temperatura óptima para el cultivo	31
Figura 16. Distribución de la humedad relativa del 7 de Junio en los ejes y su relación con la humedad óptima para el cultivo.....	31
Figura 17. Distribución de la humedad relativa del 21 de Junio en los ejes y su relación con la humedad óptima para el cultivo.....	31
Figura 18. Resultados de temperatura y humedad relativa medida y simulada por ejes para el caso I.....	33
Figura 19. Resultados de temperatura y humedad relativa medida y simulada por bloques para el caso I.....	33
Figura 20. Resultados de temperatura y humedad relativa medida y simulada por ejes para el caso II.....	34
Figura 21. Resultados de temperatura y humedad relativa medida y simulada por bloques para el caso II.....	34
Figura 22. Curvas de convergencia de los sensores para el caso I.....	36
Figura 23. Curvas de convergencia de los sensores para el caso II.....	38
Figura 24. Distribución de la temperatura simulada a) en ejes y b) en bloques para el caso I	39
Figura 25. Distribución de los vectores de viento dentro del invernadero para el caso I.....	40
Figura 26. Distribución de la temperatura a) en ejes y b) en bloques para el caso II.....	41
Figura 27. Distribución de la humedad relativa simulada a) en ejes y b) en bloques para el caso II.....	42
Figura 28. Distribución de los vectores de viento dentro del invernadero para el caso II.....	43
Figura 29. Distribución de la humedad relativa simulada a) en ejes y b) en bloques para el caso I.....	51
Figura 30. Imágenes del código en Arduino (a,b,c,d,e y f)	54

Índice de Tablas

Tabla 1	Comparación de elementos en un invernadero convencional y automatizado	XV
Tabla 2	Trabajos de simulación de la ventilación de invernaderos con CFD.....	8
Tabla 3	Características técnicas del sensor DHT22.....	16
Tabla 4	Configuración de tipo de análisis.....	19
Tabla 5	Caracterización de las mallas.....	20
Tabla 6	Propiedades de materiales utilizados en el modelo.....	21
Tabla 7	Características de ventiladores.....	22
Tabla 8	Resumen condiciones climáticas de los casos en estudio.....	27
Tabla 9	Análisis de varianza de la temperatura y humedad entre ejes para el caso I.....	28
Tabla 10	Análisis de varianza de la temperatura y humedad entre bloques para el caso I.....	28
Tabla 11	Análisis de varianza de la temperatura y humedad entre ejes para el caso II.....	29
Tabla 12	Análisis de varianza de la temperatura y humedad entre bloques para el caso II.....	29
Tabla 13	Validación de la temperatura y humedad relativa para el caso I.....	32
Tabla 14	Validación de la temperatura y humedad relativa para el caso II.....	34

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del problema

En el Ecuador por los años de 1983 en varios cultivos como son las flores, tomate, lechuga, han existido una amplia serie de enfermedades abióticas, esto se debe al tipo de invernadero que son utilizados en el país. El análisis de este problema se deriva de la ventilación dentro del invernadero y su relación con la temperatura y humedad relativa. Existen 2 tipos de invernaderos, el de tipo cubierta de estructura metálica, madera o mixto que no es tecnificado (no automatizado) y el invernadero tipo cilíndrico bajo normas internacionales tecnificado (automatizado), que regula electrónicamente la temperatura y la humedad relativa [1].

Nuestro país tiene uno de los invernaderos más modernos de América Latina en la ciudad de Quito para la producción de papa. En lo que se refiere a la producción de flores y bananos entre otros productos, está en vías de tecnificación de los invernaderos, pero aún la mayoría no tiene este tipo de tecnología debido a que no se tiene un análisis de los parámetros que intervienen en el proceso del desarrollo del producto. La implementación de este tipo de tecnología optimizaría recursos y mejoraría la producción [2].

Objetivo General

Modelar el flujo de aire forzado en un invernadero.

Objetivos Específicos

- Determinar las variables climáticas en el interior de un invernadero que afecten directa o indirectamente al crecimiento del cultivo, para su utilización en simulación.
- Establecer la metodología adecuada para la obtención de los datos del flujo de aire en el invernadero.
- Simular el sistema de flujo de aire en función de las variables obtenidas.
- Validar la simulación con el invernadero real.

Antecedentes

En los últimos años se ha desarrollado sistemas de automatización para invernaderos que permiten un mejor control del clima dentro del lugar, el sistema tiene una vital importancia debido a las consecuencias favorables que este método tiene para con el cultivo, ofreciendo mejores condiciones de crecimiento y del desarrollo de las plantas, además controlar la temperatura, humedad, radiación solar y velocidad del viento, también el de proteger al cultivo contra enfermedades y plagas [3].

Existen invernaderos automatizados de nivel tecnológico alto, en este nivel se incluyen instalaciones con dispositivos automatizados con sensores y actuadores para controlar el riego, un ejemplo son los temporizadores o timers, la función de este dispositivo es encender y apagar por ejemplo bombas, otro dispositivo es la foto celda que se puede utilizar para apagar y encender luces, o sensores para operar calentadores y otros dispositivos similares [4].

Algunos invernaderos automatizados tienen tareas programadas controladas por computadora, los sistemas proporcionan cierta independencia en el manejo de los cultivos ya que se tiene el control de aspectos vitales, sin la dependencia de los operadores, que están en función de las variaciones ambientales y su efecto sobre las condiciones internas [5].

Los invernaderos automatizados de nivel tecnológico más altos son aquellos con ambientes controlados, en función de datos internos y externos. La mayor parte de los procesos se controlan por computadoras, las cuales se encargan de operar los equipos de riego, mantener estable la temperatura y realizar o inyectar las soluciones nutritivas, así como abrir y cerrar ventanas automáticamente. Cuentan con una serie de sensores que

detectan las variaciones ambientales y envían señales a las computadoras para operar los dispositivos que se encargan de compensar o corregir las variaciones [4].

Tabla 1

Comparación de elementos en un invernadero convencional y automatizado

ELEMENTOS DENTRO DE UN INVERNADERO	CONVENCIONAL	AUTOMATIZADO
Estructura	Si	Si
Control de temperatura	No	Si
Control de humedad	No	Si
Ventilación automática	No	Si
Ventilación	Si	Si
Iluminación artificial	Si	Si
Control de CO_2	No	Si

Fuente: [4].

En el Ecuador (2015), se desarrolló nuevas tecnologías para el manejo del cultivo de semilla de papa con el fin de que el agricultor obtenga un producto sano, de alto rendimiento y resistencia a las enfermedades y plagas. El invernadero construido para la producción de este producto cuenta con un sistema innovador de control de clima, riego y fertilización, nutrición, al igual que el aseguramiento de la calidad genética y fitosanitaria.

Las áreas con las que cuenta el invernadero automatizado son: laboratorio de biotecnología, área de sistema hidráulico, área de plantas madres, hidroponía y aeroponía, a través de estos sistemas de producción es muy representativa la tecnología innovadora y limpia que permitirá mejorar la calidad del producto y con una mejora significativa en la producción [6].

En Almería – España (2011), la Fundación Cajamar por mejorar el rendimiento y la calidad de las cosechas, han incorporado nuevas estructuras de invernaderos así como nuevos sistemas de control y gestión del clima. Este invernadero cuenta con un sistema altamente automatizado, eficiente en el consumo de energía y agua, el cultivo se vuelve rentable en cualquier época del año y a distintos climas mediante una producción integrada [7].

El invernadero aborda varias etapas de automatización como son: desarrollo de materiales (cubierta, estructura y sustrato del invernadero), sistemas electromecánicos (climatización, movimiento de plantas, fertirrigación y fertilización), sistemas biológicos auxiliares (polinizadores y lucha integrada), manejo de productos (clasificación, procesado y envasado de vegetales), sistema de movimiento de bandejas de cultivo (recogida, destallado, tratamientos, etc), co-productos, residuos y suministro de energía y agua renovables [7].

En México (2016), según la UNAM junto con FIRA y el Colegio de Posgraduados, diseñaron un invernadero automatizado incluyendo tecnología con inteligencia artificial y biotecnología para la producción sustentable de hortalizas. Este tipo de invernadero es innovador por ser capaz de incrementar la producción en cinco veces en relación con los cultivos en campo abierto, además que se puede producir todo el año en cualquier clima.

Este tipo de invernadero cuenta con: sistemas de monitoreo inalámbricos y de control automatizado (controla las variables más importantes), uso de biofungicidas y fertilización biológica (productos a base de bacterias), con esto se pretende desarrollar biobacterias y nuevas formulaciones de biofertilizantes [8].

La supervisión y el control del entorno de los invernaderos desempeñan un papel decisivo en los procesos de producción de los invernaderos. La garantía de condiciones

climáticas óptimas tiene una influencia directa en el rendimiento del crecimiento del cultivo, pero generalmente aumenta el costo del equipo requerido [9].

Tradicionalmente, las instalaciones de invernadero han requerido un gran esfuerzo para conectar y distribuir todos los sensores y sistemas de adquisición de datos. Estas instalaciones necesitan muchos cables de datos y energía para ser distribuidos a lo largo de los invernaderos, lo que hace que el sistema sea complejo y costoso. Por este motivo, y otros como la falta de disponibilidad de actuadores distribuidos, solo los sensores individuales se ubican generalmente en un punto fijo que se selecciona como representativo de la dinámica global del invernadero [9].

Para controlar el clima de un invernadero se deben determinar los valores adecuados de las entradas de control, dada la complejidad inherente, el desarrollo de sistemas de control climático de invernaderos se ha basado a menudo en sistemas heurísticos basados en la experiencia de manejo climático [10].

La importancia del desarrollo de un control de supervisión y adquisición de datos, permite tener controlado de una forma automatizada el clima interior del invernadero, el costo depende de que recursos conllevaría a un ahorro y sobretodo de tiempo, al no tener que dedicar tiempo al control del invernadero manualmente [11].

Las variables climáticas a considerar para el buen control del ambiente de un invernadero son la radiación solar, la velocidad y dirección del viento, la temperatura la humedad relativa. Para obtener una predicción del clima de un invernadero, se han utilizado modelos matemáticos, dichos modelos permiten evaluar estrategias del manejo de un invernadero sin tener que realizar experimentos costosos [12].

Los modelos estáticos utilizan variables medidas en un tiempo dado sin integrarlas como dependientes del tiempo, los modelos dinámicos si dependen del tiempo, la

diferencia de los dos se debe a modelos dinámicos más complejos y son más efectivos en términos de precisión [12].

Justificación

La agricultura se ha visto afectada por factores externos como la lluvia, el viento y el granizo, que no se podían controlar sino únicamente empleando diversas técnicas referidas al riego, la fertilización o el cultivo bajo abrigo. El clima dentro de un invernadero se debe tener en cuenta la gran variabilidad que se registra de los parámetros como la temperatura, la humedad y la velocidad del aire.

Es por ello que al día de hoy día se han desarrollado técnicas modernas para el control de clima interior que permiten depender cada vez menos de los factores climáticos externos.

Alcance

El trabajo se realizará con un estudio previo acerca de los parámetros del clima que interviene dentro del invernadero en la Granja Experimental Yuyucocha, se desarrollará una simulación usando la técnica de Dinámica de Fluidos Computacional, para poder observar cómo se comportan las variables físicas sea a ventilación natural y/o forzada. Para poder modelar y simular se desarrollará a través de un software de simulación, y validada en campo.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Modelos basados en Dinámica de Fluidos Computacional

Inicialmente los modelos basados en CFD se utilizaron en procesos industriales como son: industria automovilística, industria aeroespacial, industria nuclear, industria química., debido a esto investigadores en las áreas de la industria alimenticia, agricultura o ganadería han realizado estudios utilizando modelos basados en CFD para el estudio del microclima en invernaderos entre otros aspectos relacionados con la agricultura [13].

Al comprender la distribución del microclima, los productores pueden optimizar los sistemas de fertilización e irrigación al igual que el consumo excesivo de agua de riego [13].

Mediante CFD la descripción de la distribución del microclima de invernadero puede realizarse modelando las transferencias de calor convectivo, entre otros procesos de intercambio en invernaderos ventilados [12].

Un modelo matemático mediante el uso de la técnica Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) fue validado bajo condiciones de clima mediterráneo, con el sistema de ventilación mecánica, con las ventilas cenitales cerradas, encontrándose correlaciones superiores a 90% [14].

Se utilizaron las características medio ambientales del centro de México, específicamente las de San Luis Potosí, tomadas de la estación meteorológica localizada en el Invernadero de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí [14].

Se desarrolla un modelo numérico basado en CFD para el análisis climático de un invernadero cenital de tres naves sin cultivo y con ventilación forzada en una región de clima cálido ubicado en el municipio del Ejido (Almería, España), el análisis de los resultados indicó que al funcionar el sistema de ventilación forzada la tasa de ventilación es estable, independientemente de las condiciones exteriores. Para velocidades de viento bajas (menores de 3 m/s) la ventilación mecánica adquiere mayor importancia que el flujo de aire exterior debido al efecto eólico o térmico [15].

Se comparan los sistemas de ventilación natural con los sistemas de ventilación forzada diseñados a 15 y 30 renovaciones de aire por hora bajo condiciones de clima mediterráneo en Almería (España). La ventaja inicial de los sistemas de ventilación forzada, fue capaz de desalojar los excesos de temperatura, para darle al cultivo, mejores condiciones micro climáticas, tendientes a la obtención de un mayor peso de fruto (temperaturas más frescas) [16].

1.2 CFD

La CFD es el conjunto de técnicas que permiten resolver las ecuaciones que se derivan de los tres principios como son: conservación de masa, momento y energía, mediante las cuales se obtienen los campos de velocidad, temperatura y presión en el fluido estudiado [17].

La dinámica de fluidos está inmerso en muchos campos industriales como son: la industria aeroespacial, automotriz, procesos químicos, la generación de electricidad, calefacción, ventilación, aire acondicionado, biomédica, petróleo y gas, marinos y muchos otros. Modelos especializados para la combustión, que reaccionan a los flujos y la radiación, entre otros, ayudan a proporcionar el

conocimiento de los equipos y procesos necesarios para aumentar la producción, mejorar la vida de los elementos y disminuir los residuos [18].

1.3 Principios físicos

Las ecuaciones de Navier-Stokes son un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido o cualquier fenómeno en el que se involucren fluidos newtonianos, estas ecuaciones se obtienen aplicando los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen fluido [12].

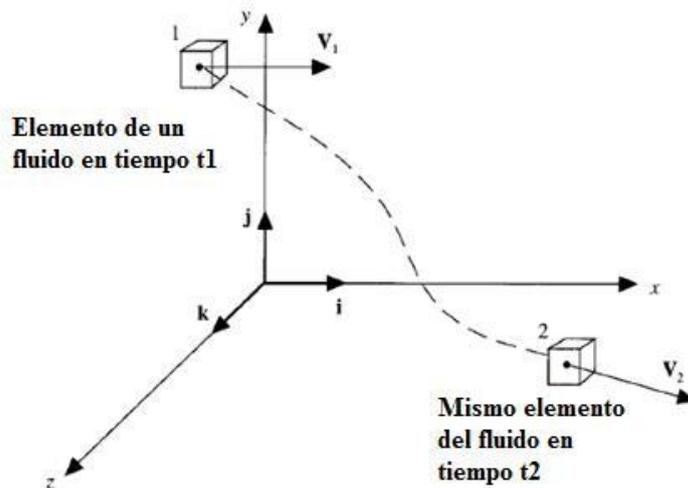


Figura 1. Cambio de un elemento del fluido en el tiempo

Fuente: [12].

El estado físico de cualquier fluido (gas o líquido) está gobernado por los tres principios fundamentales de conservación de la masa, momento y energía.

1.3.1 Conservación de la energía

La ecuación que representa la conservación de la energía es derivada de la primera ley de la termodinámica:

$$\boxed{\text{Razón de cambio de energía con respecto al tiempo}} = \boxed{\text{Cambio neto de calor agregado}} + \boxed{\text{Cambio neto de trabajo}}$$

Los dos términos como son el cambio neto de calor y el cambio neto de trabajo describen la razón de cambio neta de calor agregado al fluido dentro del volumen de control y la razón de cambio neta de trabajo hecho por las fuerzas de la superficie en el fluido [19].

La suma de las energías de las moléculas que se transmite en cualquier movimiento traslacional, rotacional, vibratorio y electrónico de las moléculas y átomos del interior del elemento es la energía interna total. La conservación de energía está integrada por la transferencia de calor por conducción (Ley de Fourier), convección (Ley de Enfriamiento de Newton) y radiación (Stefan-Boltzman) [12].

1.3.2 Conservación de la masa

Una ley de conservación importante para cualquier flujo es la ley de la conservación de la masa la cual establece que la materia no se crea ni se destruye, esta ley requiere que, para un flujo inestable, la razón del incremento de masa dentro del volumen de control sea igual a la razón neta a la cual la masa entra al volumen de control [19].

$$\boxed{\begin{array}{l} \text{Flujo de masa neta} \\ \text{que sale del} \\ \text{volumen de control} \\ \text{A} \end{array}} = \boxed{\begin{array}{l} \text{Tasa de cambio} \\ \text{de la masa en el} \\ \text{volumen de} \\ \text{control} \\ \text{B} \end{array}}$$

La tasa neta de flujo másico fuera del elemento es igual a la tasa de decrecimiento de la masa dentro del elemento [12].

1.3.3 Conservación de momento

La segunda ley de movimiento de Newton establece que la suma de las fuerzas que actúan sobre un fluido, es igual al producto entre la masa y aceleración del elemento [19].

$$F = ma \quad (1)$$

Fuente: [12]

donde F es fuerza resultante aplicada a un fluido (N); m es la masa del fluido (kg); a es la aceleración del fluido ($m\ s^{-2}$).

Las fuerzas resultantes que actúan en el elemento provienen de dos fuentes a saber: 1) del cuerpo en sí, como gravitacional, eléctrica y magnética y 2) las fuentes que actúan en la superficie y del elemento del fluido como la distribución de los esfuerzos cortante y normal debido a la viscosidad del fluido. Estos esfuerzos están involucrados en la deformación del fluido [12].

Por medio de ecuaciones en derivadas parciales no lineales, permiten una aplicación práctica para un fluido viscoso e incomprensible [20].

Ecuación de continuidad:

Siendo ρ constante

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

Fuente: [12]

Ecuación de momento:

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \rho g_i \quad (3)$$

Fuente: [12]

Ecuación de energía:

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i h) = \frac{\partial p}{\partial x_i} \left(K \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial P}{\partial T} + u_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (4)$$

Fuente: [12]

Donde u_i es la componente de velocidad en la dirección i (m s^{-1}); x_i indica la dirección i ; ρ es la densidad del aire (kg m^{-3}); P es la presión del aire (Pa); g_i es cualquier aceleración del campo en la dirección i (m s^{-2} , en este caso sólo la aceleración gravitacional, g); h es la entalpía (J kg^{-1}); k es el coeficiente de conductividad del aire ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$); T es la temperatura absoluta del aire (K); μ es la viscosidad molecular del aire ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$) y; τ_{ij} es el tensor de Reynolds en la dirección de i a j (N) [12].

1.4 Parámetros de estudio de microclima

Se han desarrollado investigaciones en los últimos años acerca del estudio de las tasas de ventilación considerando la optimización de las ventanas y la geometría del invernadero. Para el estudio de las variables climáticas en un microclima la herramienta más utilizada es la de CFD [21].

1.4.1 Condiciones de ventilación

Una investigación numérica sobre un prototipo de unidad reforzada con aire para cámaras de crecimiento de cultivos obtuvo simulaciones que verifican una relación no lineal entre la tasa de flujo de aire y las aberturas de ventilación, mostrando la zona de mezcla [21].

De acuerdo con las simulaciones CFD, la combinación de la configuración dual de ventilación lateral tiene poco efecto sobre el intercambio total de aire, pero

aumenta el movimiento del aire en los cultivos y homogeneiza las temperaturas. Otra investigación tuvo en cuenta el efecto del ángulo externo de las rejillas del dispositivo de ventilación contra la presión y la velocidad internas para optimizar el rendimiento del dispositivo. El ángulo óptimo era de 35 a 40 ° con una velocidad del viento de 4,5 ms⁻¹ [22].

Los parámetros que afectan las tasas de ventilación en un invernadero son la ventilación impulsada por la flotabilidad, la velocidad, la dirección del viento exterior, la combinación de aberturas laterales y superiores, la cantidad de naves, la longitud del invernadero, la estructura del invernadero, mallas anti insectos, pantallas de sombreado, entre otros equipos de control del clima. La maximización de las tasas de ventilación no siempre es la adecuada y se debe tomar en cuenta las diferencias de temperatura a nivel de 1 metro del nivel del suelo y la heterogeneidad en cada hilera y entre hileras [12].

1.4.2 Modelos de turbulencia

Para la mayoría de las situaciones de ventilación existen fluctuaciones en el fluido por las magnitudes en las componentes de la velocidad (por efecto de la temperatura, del viento o ambos). “Las mediciones y visualizaciones experimentales han demostrado el carácter turbulento del flujo de aire dentro y fuera del invernadero. Por lo tanto, el fenómeno de turbulencia debe ser tomado en cuenta” [12].

El modelo Realizable k-ε satisface ciertas restricciones matemáticas en las tensiones de Reynolds, y es consistente con la física de los flujos turbulentos. Las ecuaciones de RNG k-ε tienen una forma similar a las ecuaciones del modelo k-ε estándar, excepto que la ecuación de velocidad de disipación tiene un término

adicional relacionado con la tasa media de deformación y cantidades de turbulencia que le permite incluir más fenómenos físicos [23].

El modelo estándar de turbulencia k-ε comúnmente es utilizado, y la elección de los modelos de turbulencia debe basarse en los fenómenos involucrados en la simulación [22].

Existen diferentes modelos de turbulencia, aplicando al comportamiento del flujo de aire en un conducto de distribución, se empleó de forma individual, el modelo k-ε, el modelo RNG k-ε y el modelo de las tensiones de Reynolds. Los resultados obtenidos de las simulaciones indican que el modelo k-ε presenta un mejor comportamiento numérico, generando menores residuos en las variables de flujo y un menor costo computacional [24].

Tabla 2

Trabajos de simulación de la ventilación de invernaderos con CFD

Autores	Ap*	D*	MT*	V*	R*	Comentarios
Okushima et al. (1989)	Campo del Flujo	3D	Std. K-ε	Pobre	1	Primer uso del std. K-ε en flujos de ventilación natural
Mistriotis et al. (1997a)	Campo del Flujo	2D	RNG K-ε	Excelente	3	Primero en usar una técnica numérica de gas trazador. Buen análisis de varios modelos de turbulencia
Mistriotis et al. (1997b)	Campo del Flujo	2D	RNG K-ε	Razonable	3	Plantas representadas como un piso de calor. Varios modelos empíricos se usaron para determinar la partición del calor sensible
Bartzanas et al. (2002)	Diseño	3D	Std. K-ε	Razonable	4	Efecto de arrastre del dosel del cultivo fue computarizado usando un medio poroso.
Boulard and Wang (2002)	Campo del Flujo	3D	Std. K-ε	Razonable	5	Se usó modelo de transpiración del cultivo y modelos de efecto de arrastre

Campen and Bot (2003)	Campo del Flujo	3D	Std. K-ε	Razonable	5	Se usó un invernadero vacío para observar los efectos del viento en la tasa ventilación
Fatnassi et al. (2006)	Design	3D	Std. K-ε	Bueno	5	Se usó el modelo de Boulard y Wang (2002) en el diseño de un invernadero

Nota: *Ap: aplicación. D: dimensión. MT: modelo de turbulencia. V: validación. R: Realista (Puntaje del 1-5, con 5 más real) [12].

1.4.3 Variaciones de la temperatura

Un análisis del comportamiento de ventilación de las estructuras de invernadero se lo realizó cuando las diferencias de temperatura del aire constituyen la principal fuerza impulsora del efecto de flotación-flotación. Las bajas velocidades del viento con frecuencia coinciden con las altas temperaturas, cuando se requiere mayor eficiencia de ventilación [25].

La transmisión por convección y radiación son las formas de transferencia de calor dominantes. La diferencia entre el aire interno del invernadero y el externo está fuertemente vinculada con la radiación solar y segundo con la velocidad del viento. Las condiciones de contorno térmicas y las cargas de calor afectan los límites de los valores absolutos de temperatura, pero no afectan la distribución de temperatura [12].

1.4.4 Efecto de la radiación

El efecto de la radiación solar y térmica a menudo se tiene en cuenta al establecer paredes específicas o flujos de calor en los límites físicos del invernadero cuando se aplica CFD. La transferencia de radiación dentro del cultivo en sí sigue siendo un estudio, ya que determina las dos principales funciones fisiológicas de los cultivos: la transpiración y la fotosíntesis [22].

En Francia utilizaron un modelo de radiación solar para conocer la heterogeneidad de la transpiración de lechuga en un túnel de viento y la planta fue considerada como un medio poroso con una fuente de calor latente y sensible [12].

1.4.5 Variaciones de la humedad

En las investigaciones realizadas, los deshumidificadores y el enfriamiento reducen la diferencia general de humedad entre las áreas media e inferior de un invernadero, el uso de un modelo 3D podría identificar la distribución heterogénea de la humedad relativa en un invernadero [22].

En un perfil vertical de la humedad específica del aire en el centro del invernadero no presenta picos a estos niveles como en el caso del perfil de temperatura porque la cubierta plástica del techo y la superficie del suelo no intercambian vapor de agua [26].

1.4.6 Mallas antiáfidas

Hay influencia de las pantallas contra insectos en el clima interno del invernadero al igual que si se aumenta el área de apertura al usar pantallas y aplicaciones para insectos. Un aumento gradual de la temperatura del aire y una disminución de la velocidad del aire dentro del invernadero existe si se reduce la porosidad del filtro de insectos [27].

Las mallas anti insectos se han modelado anteriormente como saltos porosos debido a la caída en la presión del aire que fluye a través de ellas [28].

En análisis con CFD las mallas anti-insectos son comúnmente representadas como medio poroso [12].

1.4.7 Cultivo

Las plantas en el invernadero introducen una resistencia física al flujo de aire, por lo que las áreas representativas se modelaron como regiones de medio poroso. Las plantas generalmente forman zonas burdas, porosas, donde las leyes de Darcy no funcionan [28].

El cultivo simulado como medio poroso frena el desplazamiento interior del aire. La presencia del cultivo reduce la cantidad de flujo de energía del suelo hacia el ambiente debido a la transpiración del cultivo, lo que implica menores gradientes de temperatura ambiental, esto muestra la importancia específica de la ventilación cenital ya que, combinada con la transpiración del cultivo, esta ventilación es capaz de mantener niveles homogéneos de temperatura en la zona de cultivo (1 a 2 m), con velocidades de viento exterior de 3 a 5 m s⁻¹. Con velocidades de viento menores a 3 m s⁻¹ la ventilación cenital produce saltos térmicos del orden de 10 °C en las zonas centrales del invernadero [29].

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1 Invernadero

El invernadero utilizado para la investigación tiene el nombre de Granja Experimental Yuyucocha UTN, se encuentra ubicado en Imbabura en el cantón Ibarra.

El invernadero se ubica en la parroquia de Caranqui, a $0^{\circ}19'43.1''$ Norte y $78^{\circ}07'56.7''$ Oeste, la ubicación geográfica del invernadero se la calcula mediante el programa de Google Maps.

Se realizaron mediciones de variables climáticas dentro del recinto durante el mes de junio. Se realizó un análisis estadístico de los días y horas de temperaturas más altas para definir los casos a estudiar, donde se analizó la variabilidad de la temperatura y la humedad relativa.

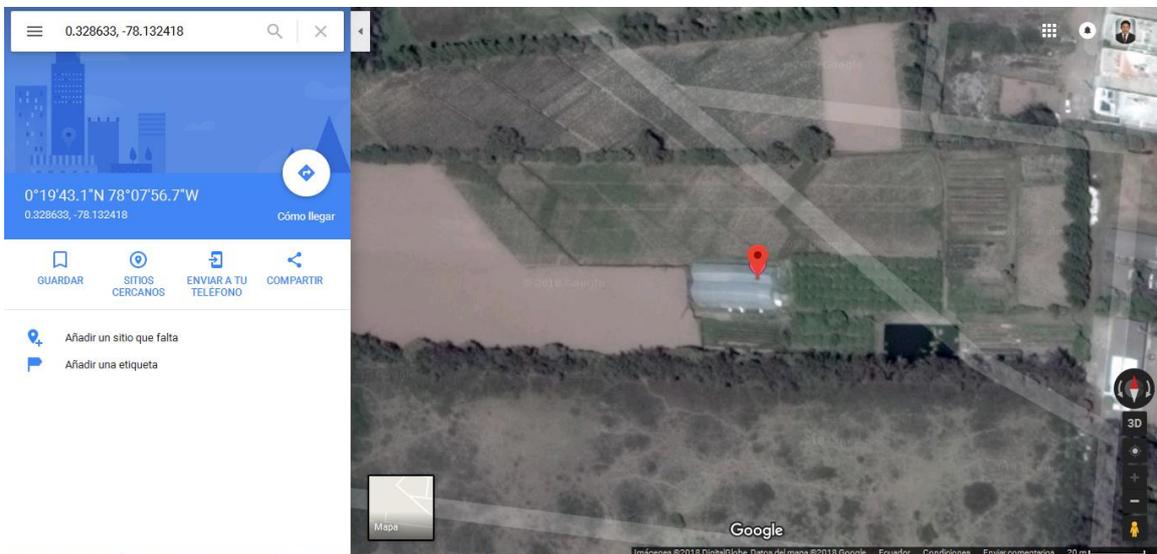


Figura 2. Ubicación geográfica del invernadero de estudio
Fuente: [31]



Figura 3. Vista lateral del invernadero

En la figura 4 se puede observar las dimensiones de una parte del invernadero que se utilizó para el estudio; tiene una altura de 6,24m, el ancho es de 8,16m y 16,30m de largo, la ventana izquierda está cubierta por una malla antiáfida con una altura de 1,30m y 10m de largo, los ventiladores se encuentran ubicados a una altura de 3m, toda la cubierta del invernadero es de polietileno de baja densidad.

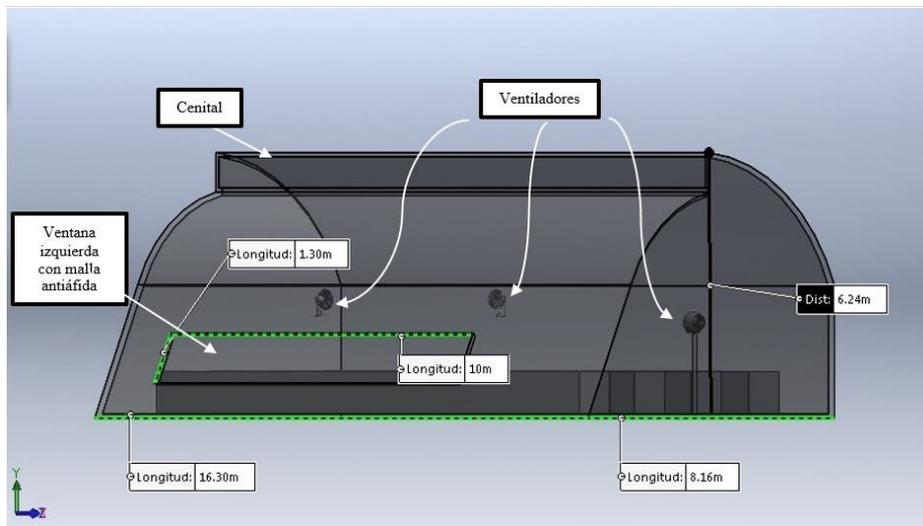


Figura 4. Dimensiones del invernadero



Figura 5. Vista frontal del invernadero

Al momento del estudio en el interior del invernadero se encuentran cajas para cultivo hidropónico de semilla de papa, cada una con una dimensión de 14m de largo, 1m de alto y 1m de ancho.

2.2 Registro de variables

Para la medición de las variables climáticas externas se obtuvo mediante una estación meteorológica ya instalada en la Granja experimental Yuyucocha perteneciente al INAMHI se puede observar en la figura 6, tomando las variables como son: temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento.



Figura 6. Estación Meteorológica Inamhi

Dentro del recinto se instalaron 6 sensores DHT22 para la medición de la temperatura y humedad relativa, cada sensor se instaló en un pilar separados cada 3 metros a una altura de 2 metros sobre el suelo figura 7, cada sensor fue cableado hasta una placa Arduino, mediante una laptop conectado a la placa Arduino se registraron las mediciones en el interior del recinto.

Tabla 3
Características técnicas del sensor DHT22

PARÁMETRO	DHT22
Alimentación	3.3V – 6V DC
Corriente	1mA
Señal de Salida	Digital
Rango de medida de Temperatura	De -40 a 80 °C
Precisión Temperatura	± 0.5 °C
Resolución Temperatura	0.1 °C
Rango de medida de Humedad	De 0% a 100 % RH
Precisión Humedad	± 2% RH
Resolución Humedad	0.1% RH
Tiempo de Respuesta	2s

Fuente: [30].



Figura 7. Sensores instalados en pilares del recinto

Para el análisis del comportamiento de la temperatura y la humedad relativa, se agrupo la información de los sensores por ejes y bloques como se ve en la figura 8 en el horario de 6:00 de la mañana hasta las 17:00 de Lunes a Sábado en el mes de Junio, para el análisis espacial de la temperatura y la humedad relativa se consideraron los casos:

- I. La temperatura más alta en función de la fecha y hora con más frecuencia de valores máximos en el intervalo del día.
- II. La temperatura más baja en función de la fecha y con más frecuencia de valores mínimos en el intervalo del día.

Para los 3 casos se analizó estadísticamente la temperatura y la humedad relativa entre ejes por medio de un análisis de varianza, con el método de Tukey y con un grado de confianza de $\alpha= 0,05$.

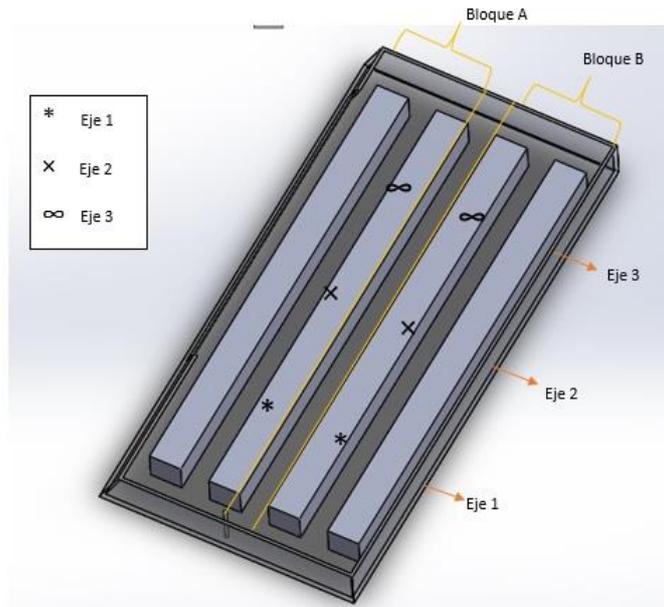


Figura 8. Distribución de los sensores en el invernadero

Para los dos casos se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con el método de Tukey y con un grado de confianza de $\alpha=0,05$ para determinar si existe estadísticamente diferencias en la temperatura y humedad entre ejes y entre bloques.

2.3 Conformación del volumen de control

Aplicando dinámica de fluidos computacional en 3D se realizó un modelo en estado estacionario utilizando el programa comercial Solidworks Flow Simulation 2016.

Un invernadero es un espacio que las condiciones ambientales dependen del clima exterior, el clima está en constante cambio por lo que es difícil a que llegue a un estado estacionario. Para realizar un modelado preciso en estado transitorio, se deben tener valores de las variables climáticas y de las condiciones de frontera que definen el dominio, cultivo e invernadero de forma continua para poder registrar los cambios [12].

Se decidió trabajar en estado estacionario por sus condiciones que si se conocen en un tiempo determinado.

2.3.1 Tipo de análisis

Se escogió el análisis interno excluyendo cavidades sin condiciones de flujo para utilizarlo en la simulación, en la tabla 4 se indica que parámetros se debe escoger para el análisis interno a simular.

Tabla 4
Configuración de tipo de análisis

Análisis Interno	
Características Físicas	Valor
Conducción de calor en sólidos	Si
Radiación	Si
- Modelo de radiación	Transferencia discreta
- Temperatura de entorno	Valor temperatura externa
Radiación solar	Si
- Definido por	Dirección e intensidad
- Eje Y	-1
- Intensidad	Valor de radiación

2.3.2 Discretización del dominio

Se evaluaron siete mallas para poder ver, comparar los resultados y poder escoger una que esté más acorde a valores reales, en la tabla 5 se presenta la cantidad de celdas, celdas de sólidos y celdas del fluido, además de la refinación de cada malla.

Tabla 5
Caracterización de las mallas

Malla	Celdas	Celdas del Sólido	Celdas del Fluido	Refinación
Malla 1	640 427	534 081	106 346	3
Malla 2	897 589	622 618	274 971	3, CH 10
Malla 3	1 560 778	1 324 309	236 469	4
Malla 4	2 299 083	1 119 952	1 179 131	4, CH 10
Malla 5	4 354 161	3 758 971	595 190	5
Malla 6	1 389 894	801 141	588 753	5, CH 10

2.3.3 Caracterización del fluido

Se define las características del fluido a simular, el aire se consideró como un flujo isotrópico, incomprensible y newtoniano.

Fueron definidos los modelos físicos de acuerdo a la capacidad computacional que se tiene para el modelado.

2.3.4 Modelo de turbulencia

De acuerdo a investigaciones realizadas por otros autores el modelo de turbulencia a implementar fue el κ - ϵ -estándar debido a su mejor comportamiento numérico, mejor manejo de variables y menor costo computacional.

2.4 Materiales y condiciones de frontera

Los materiales utilizados se los puede ver en la figura 9, los ítems fluido y sólido son incorporados por el programa, así también las propiedades térmicas de cada fluido, en la tabla 6 el material del sólido que se incorporó como es el polietileno.

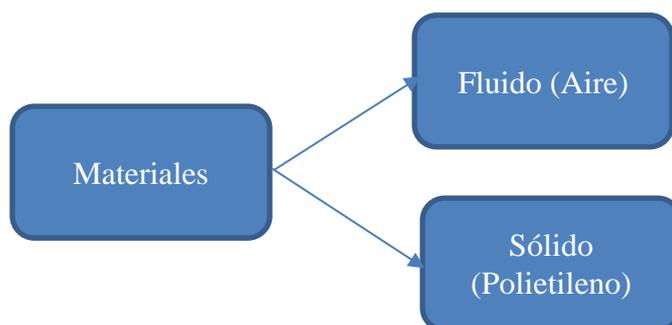


Figura 9. Clasificación de materiales

Tabla 6

Propiedades de materiales utilizados en el modelo

PROPIEDAD	AIRE (T=21.85°C)	POLIETILENO
Densidad (kg/m^3)	1,225	920
Calor específico ($J/Kg^{\circ}K$)	1006,43	1900
Conductividad térmica ($W/m^2^{\circ}K$)	0,0242	0,3
Coefficiente de expansión térmica ($1/^{\circ}K$)	0,003389	

Fuente: [12].

Se añadieron ventiladores en la parte interna del invernadero, 1 ventilador mecánico y 2 ventiladores convencionales, en la tabla 7 se presenta cada uno con sus respectivas características, el ventilador mecánico se encuentra situado en la entrada del invernadero mientras que los dos ventiladores convencionales se encuentran situados uno en la parte izquierda del invernadero y otro en la parte derecha del invernadero.

Tabla 7
Características de ventiladores

Ventilador	Ventilador Mecánico	Ventilador convencional 1 y 2
Tipo de ventilador	Axial	Axial
Referencia de densidad	1,2kg/m ³	1,2kg/m ³
Caudal másico / volumétrico	Caudal volumétrico	Caudal volumétrico
Velocidad rotor	180.64 rad/s	170.48 rad/s
Diámetro externo	0.401 m	0.4572 m
Diámetro del cubo	0.15 m	0.1 m
Dirección de rotación	Sentido de las agujas del reloj	Sentido de las agujas del reloj

2.5 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera del dominio cambian de acuerdo al caso a evaluar, en estas condiciones se incorporan las características específicas de las paredes del modelo, se debe tener en cuenta que el viento predominante tiene una dirección y magnitud por lo que debe estar acorde de acuerdo al caso evaluado.

2.6 Validación del modelo

Para la validación del modelo se hizo una comparación de datos de temperatura y humedad relativa de los 6 sensores para los 2 casos estudiados, para no depender de un solo dato en un momento dado se hizo un promedio de los 10 valores anteriores y 10 valores posteriores al del valor respectivo.

Existe una ecuación para poder determinar el rendimiento de un modelo como es la raíz del error medio cuadrático relativo (RERMC) mediante la siguiente fórmula:

$$RERMC = \frac{100}{\bar{y}_{dato}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{mod,i} - y_{real,i})^2} \quad (5)$$

- Donde \bar{y}_{dato} es el promedio de los datos medidos.
- n es la cantidad de mediciones.
- $y_{mod,i}$ es el valor del dato simulado.
- $y_{real,i}$ es el valor del dato medido.

Un porcentaje de error valido para un valor no debe sobrepasar un 10% de error para poder ser considerado un valor aceptable [12].

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1 Definición de condiciones ambientales externas

Para definir los casos que se utilizarán para el estudio y modelado del comportamiento de la temperatura y la humedad relativa se realizó un análisis estadístico, y se realizó un análisis de varianza entre ejes.

3.2 Caso I: temperatura más alta en el día de la hora con más frecuencia de valores máximos

Para el caso I los datos del día con mayor temperatura fueron escogidos el día 07 de Junio, realizando un análisis de frecuencias se logró identificar que las horas de mayor frecuencia de temperaturas máximas son a las 14:00 pm con 8 datos como se observa en la figura 10.

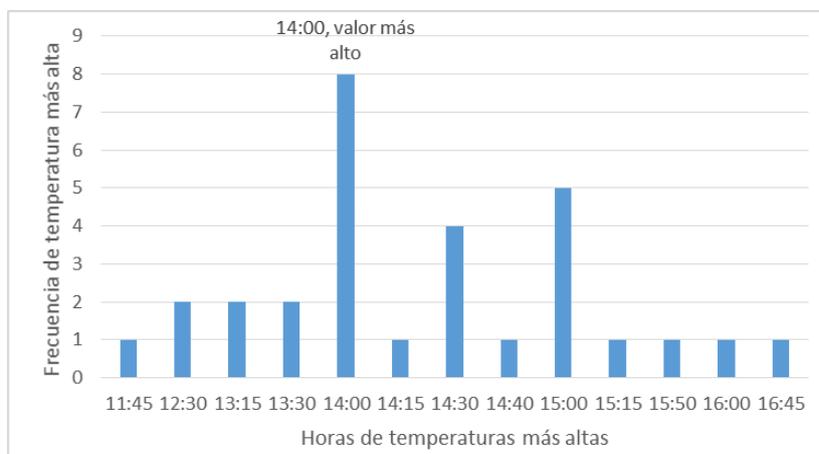


Figura 10. Análisis de frecuencia de las horas con las máximas temperaturas en el día

Los valores de temperatura de todo el mes de Junio a las 14:00 se lo puede observar en la figura 11, como resultado del intervalo de las temperaturas se obtuvo que en el día 07 de Junio es la temperatura más alta a las 14:00 con un valor de 26,2°C.

El 09 y el 12 de Junio se aproximan a valores de temperaturas elevadas como del día 07, teniendo como datos 26,1 °C y 26 grados °C respectivamente.

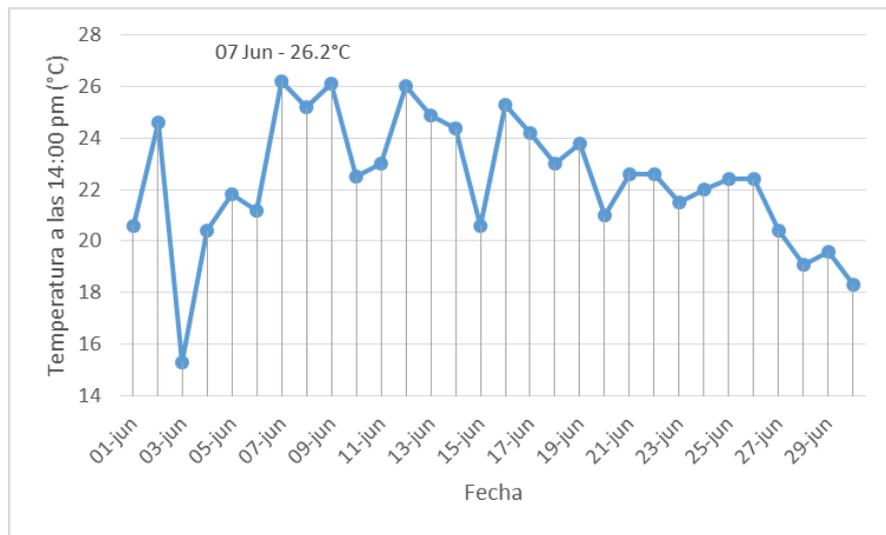


Figura 11. Datos de temperatura a las 14:00 del mes de Junio

3.3 Caso II: temperatura más baja en el día de la hora con más frecuencia de valores mínimos

Para el caso II los datos del día con menor temperatura fueron escogidos el día 21 de Junio, realizando un análisis de frecuencias se logró identificar que las horas de mayor frecuencia de temperaturas mínimas son a las 6:00 am con 20 datos como se observa en la figura 12.

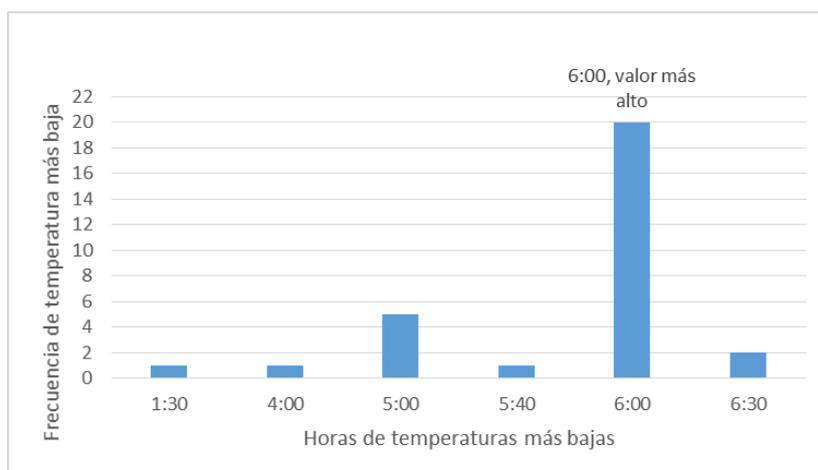


Figura 12. Análisis de frecuencia de las horas con las mínimas temperaturas en el día

Los valores de temperatura de todo el mes de Junio a las 6:00 se lo puede observar en la figura 13, como resultado del intervalo de las temperaturas se obtuvo que en el día 21 de Junio es la temperatura más baja a las 6:00 con un valor de 7°C. El 7 de Junio se aproxima a un valor de temperatura bajo como del día 21, teniendo como dato 8 °C.

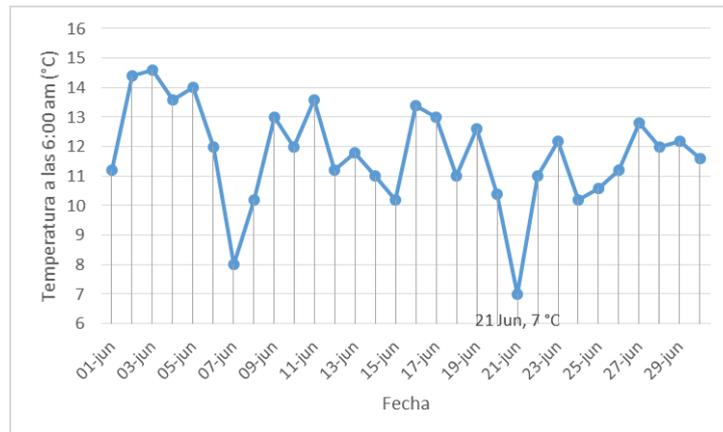


Figura 13. Datos de temperatura a las 6:00 del mes de Junio

Las variables climáticas registradas por la estación meteorológica para los 2 casos en estudio se puede observar en la tabla 8.

Tabla 8
Resumen condiciones climáticas de los casos en estudio

Caso	Fecha	Hora	Temperatura (° C)	Humedad		Viento	
				Relativa (%)	Radiación (W/m2)	Velocidad (m/s)	Dirección predominante
I	07 Junio	14:00	26.2	50	538	3	NO
II	21 Junio	06:00	7	92	26	0	C

3.4 Análisis de humedad relativa y temperatura en el invernadero

Se realizó un análisis de varianza con el método de Tukey para determinar si existen variaciones de temperatura y humedad relativa en el invernadero.

3.4.1 Análisis de varianza

En las tablas 9 y 10 se muestran los resultados para el caso I que con el análisis de varianza para la humedad relativa entre ejes y bloques, existe una diferencia significativa por razón a ser mayores del grado de confianza del 5%, en lo que respecta la temperatura entre ejes existe una diferencia, en cambio la temperatura entre bloques no existe una diferencia significativa por ser menor al 5% del grado de confianza.

Los resultados son comparados con un grado de confianza de 0,05 (5%) para demostrar si existe o no diferencias significativas, esto quiere decir que si es menor al grado de confianza no existe diferencia.

Tabla 9

Análisis de varianza de la temperatura y humedad entre ejes para el caso I

			Tabla de ANOVA				
			Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
TEMPERATURA (°C) * Ejes	Entre grupos (Combinado)		.423	2	.212	.214	.819
	Dentro de grupos		2.965	3	.988		
	Total		3.388	5			
HUMEDAD R. (%) * Ejes	Entre grupos (Combinado)		7.030	2	3.515	.896	.495
	Dentro de grupos		11.770	3	3.923		
	Total		18.800	5			

Tabla 10

Análisis de varianza de la temperatura y humedad entre bloques para el caso I

			Tabla de ANOVA				
			Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
TEMPERATURA (°C) * Bloques	Entre grupos (Combinado)		2.802	1	2.802	19.102	.012
	Dentro de grupos		.587	4	.147		
	Total		3.388	5			
HUMEDAD R. (%) * Bloques	Entre grupos (Combinado)		11.760	1	11.760	6.682	.061
	Dentro de grupos		7.040	4	1.760		
	Total		18.800	5			

existe una diferencia estadísticamente significativa por tener un valor mayor al 5% del grado de confianza.

Los resultados obtenidos con el análisis de varianza para el caso II demuestran que entre ejes existe un gradiente térmico estadístico representativo mayor al 5%, entre bloques existió una diferencia de gradiente, para la humedad relativa en los dos casos existió un gradiente estadísticamente representativo mayor a 5% tanto en ejes como en bloques.

Tabla 11

Análisis de varianza de la temperatura y humedad entre ejes para el caso II

TABLA DE ANOVA						
		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
TEMPERATURA (°C) * Ejes	Entre grupos	.030	2	.015	1.000	.465
	Dentro de grupos	.045	3	.015		
	Total	.075	5			
HUMEDAD R. (%) * Ejes	Entre grupos	3.720	2	1.860	1.433	.366
	Dentro de grupos	3.895	3	1.298		
	Total	7.615	5			

Tabla 12

Análisis de varianza de la temperatura y humedad entre bloques para el caso II

TABLA DE ANOVA						
		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
TEMPERATURA (°C) * Bloques	Entre grupos	.002	1	.002	.091	.778
	Dentro de grupos	.073	4	.018		
	Total	.075	5			
HUMEDAD R. (%) * Bloques	Entre grupos	.202	1	.202	.109	.758
	Dentro de grupos	7.413	4	1.853		
	Total	7.615	5			

3.5 Comportamiento de la temperatura y humedad relativa de los casos de estudio con respecto a los requerimientos del cultivo

Según [31], el clima óptimo para el cultivo de la semilla de papa variedad superchola, la temperatura ideal en el día debe ser de hasta 20°C y en la noche entre 10°C a 15°C, para la humedad relativa debe ser entre 60 % y 75%.

Luego se necesita una temperatura más alta para un buen crecimiento del follaje, la temperatura no debe sobrepasar los 30°C manteniéndose una temperatura óptima para el buen desarrollo del cultivo.

En la figura 14 y 15 se representan la distribución de las temperaturas de los días 7 y 21 de Junio con respecto a los ejes, se puede observar que las horas con mayor temperatura va desde las 09:00 am hasta las 17:00 pm, la temperatura óptima para la semilla de papa se encuentra por debajo de las temperaturas medidas, esto representa que tiene un exceso de temperatura en el interior del invernadero por falta de ventilación de los aires acondicionados.

En las primeras horas del día como son desde las 06:00 la temperatura se encuentra ideal para el cultivo de papa.

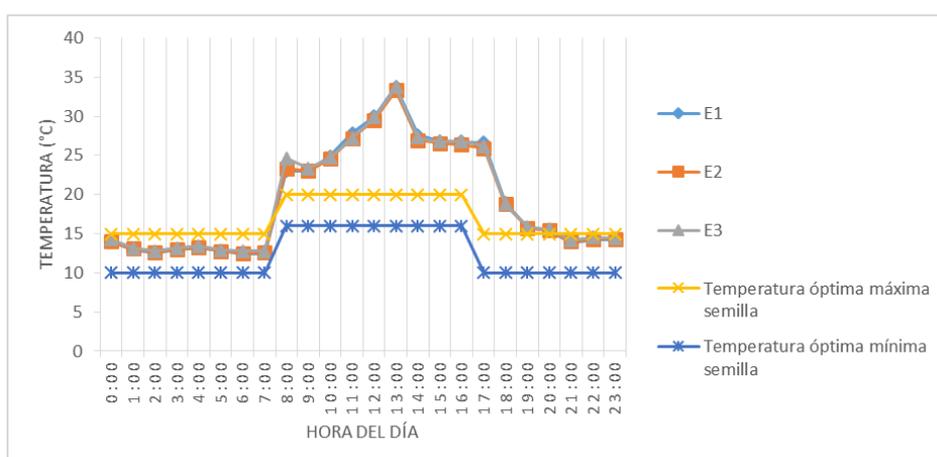


Figura 14. Distribución de la temperatura del 7 de Junio en los ejes y su relación con la temperatura óptima para el cultivo

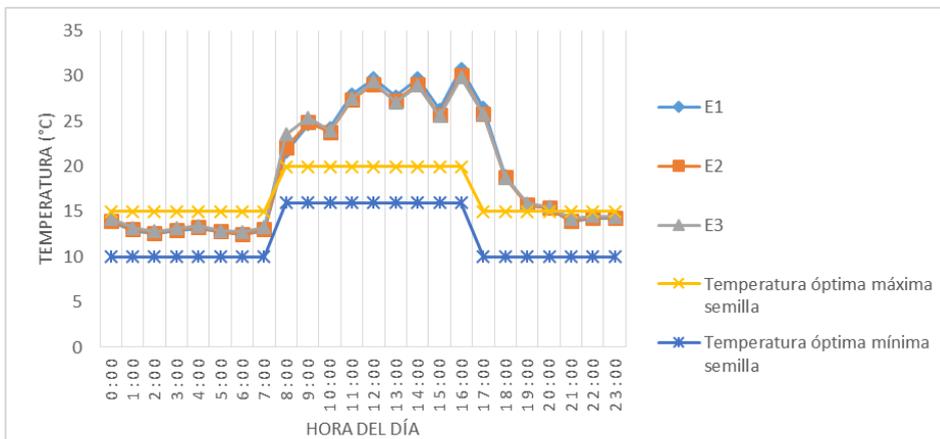


Figura 15. Distribución de la temperatura del 21 de Junio en los ejes y su relación con la temperatura óptima para el cultivo

En la figura 16 y 17 se representan la distribución de las humedades relativas de los días 7 y 21 de Junio con respecto a los ejes, se puede observar que las horas con mayor humedad relativa es en el ámbito nocturno en intervalos que no son muy recomendados para la semilla, la humedad óptima para la semilla de papa se encuentra óptimo por horas como es de 8:00 a 10:00 y de 15:00 a 17:00.

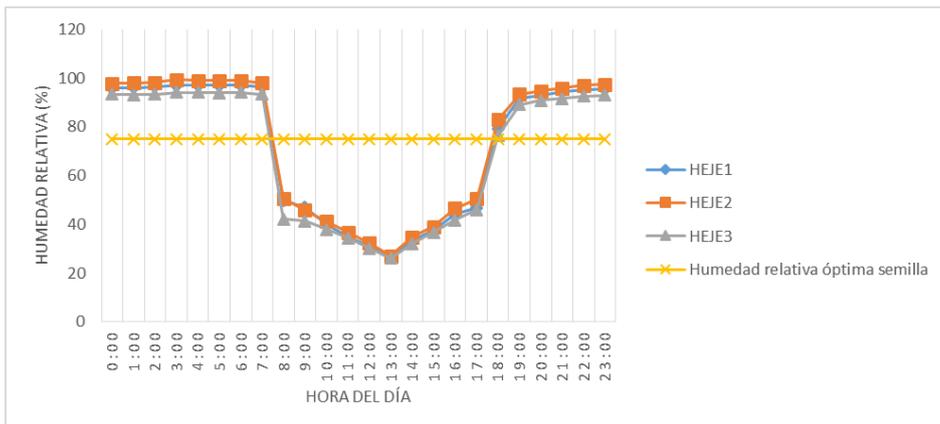


Figura 16. Distribución de la humedad relativa del 7 de Junio en los ejes y su relación con la humedad óptima para el cultivo

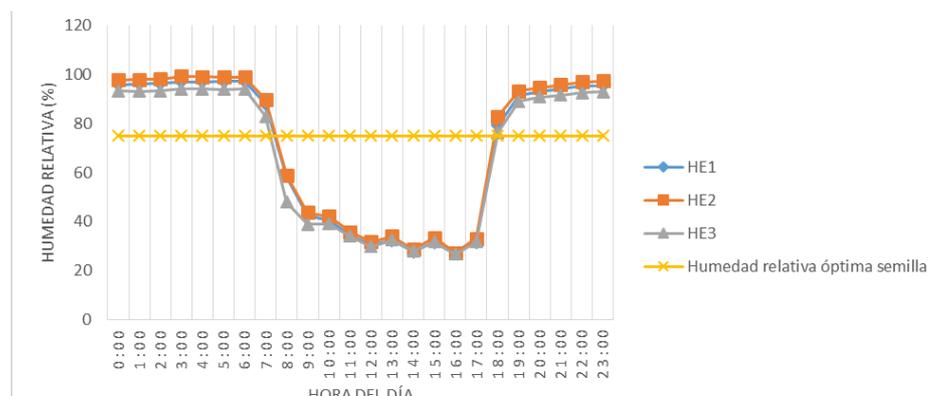


Figura 17. Distribución de la humedad relativa del 21 de Junio en los ejes y su relación con la humedad óptima para el cultivo

Con los resultados de la distribución de la humedad relativa y la temperatura en los días analizados se puede observar que el clima necesario para el cultivo está fuera del rango necesario y puede afectar el rendimiento del cultivo, esto se debe a que no se implementaron los aires acondicionados.

Según [12], los aspectos antes mencionados justifican la necesidad de utilizar o generar herramientas que permitan proteger correctamente el ambiente en función del clima, definiendo si es viable la utilización de sistemas mecánicos o solo sistemas naturales.

3.6 Validación casos de estudio

Los resultados de la validación de la humedad relativa y la temperatura para el caso I se observan en la tabla 13, la agrupación de ejes como en bloques para la temperatura obtuvo un valor RERMC menor al 10% válido para que un modelamiento de clima interior sea aceptable, mientras en la agrupación de ejes y en bloques para la humedad relativa obtuvo un RERMC mayor al 10%.

La temperatura obtuvo un porcentaje de RERMC entre 0% a 2% indicando que es aceptable, la humedad relativa obtuvo un porcentaje de RERMC entre 34% y 48%.

Tabla 13

Validación de la temperatura y humedad relativa para el caso I

Agrupación	RERMC – Temperatura (%)	RERMC – Humedad relativa (%)
Eje 1	0.29%	45.23%
Eje 2	2.08%	34.82%
Eje 3	1.63%	44.37%
Bloque A	0.15%	34.72%
Bloque B	2.47%	48.64%

En la figura 18 y 19 se encuentran los resultados de las comparaciones entre los valores de temperatura y humedad relativa separados por ejes y bloques obtenidos mediante simulación y medidos en campo.

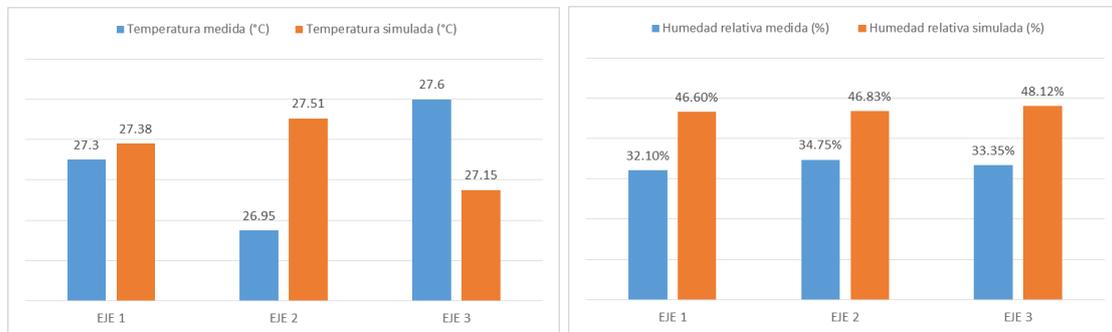


Figura 18. Resultados de temperatura y humedad relativa medida y simulada por ejes para el caso I

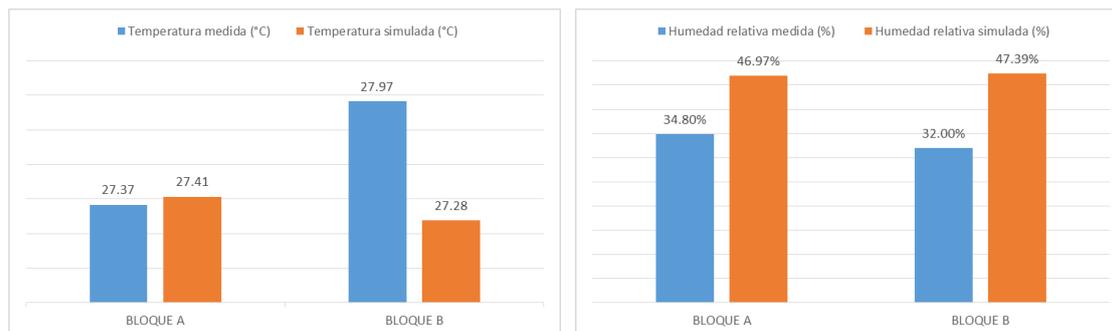


Figura 19. Resultados de temperatura y humedad relativa medida y simulada por bloques para el caso I

Los resultados de la validación de la humedad relativa y la temperatura para el caso II se observan en la tabla 14, en este caso en las agrupaciones tanto en ejes como en bloques se obtuvo un valor RERMC menor al 10% por lo que se encuentra en el porcentaje aceptable válido para un modelamiento de clima interior, la temperatura se encuentra en un porcentaje de 4% y 5% válido tanto en ejes como en bloques, la humedad relativa se encuentra en un porcentaje entre 1% y 3% válido tanto en ejes como en bloques.

Tabla 14

Validación de la temperatura y humedad relativa para el caso II

Agrupación	RERMC – Temperatura (%)	RERMC – Humedad relativa (%)
Eje 1	5.79%	1.29%
Eje 2	5.67%	2.45%
Eje 3	4.02%	3.17%
Bloque A	4.85%	2.40%
Bloque B	5.32%	2.09%

En la figura 20 y 21 se encuentran los resultados de las comparaciones entre los valores de temperatura y humedad relativa separados por ejes y bloques obtenidos mediante simulación y medidos en campo.

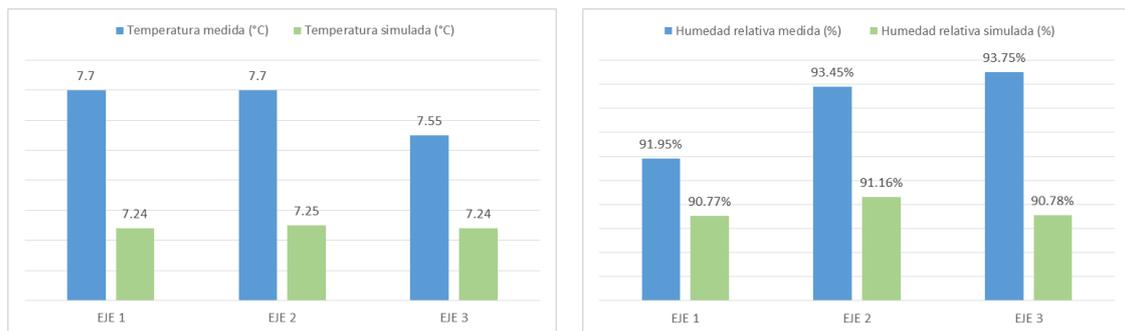


Figura 20. Resultados de temperatura y humedad relativa medida y simulada por ejes para el caso II

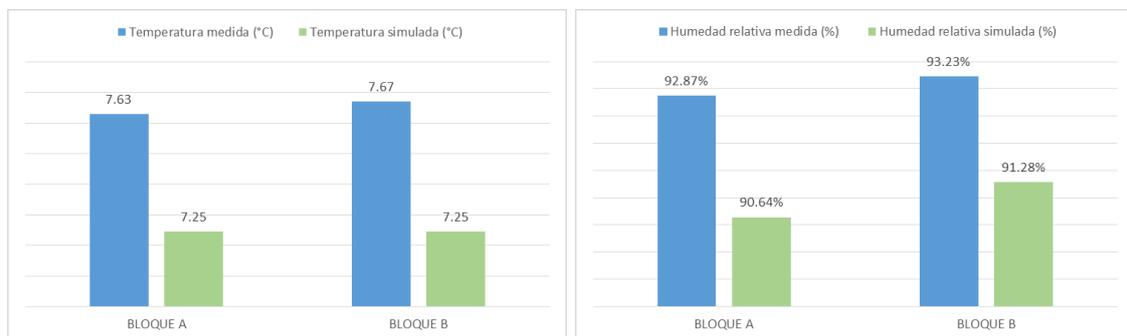
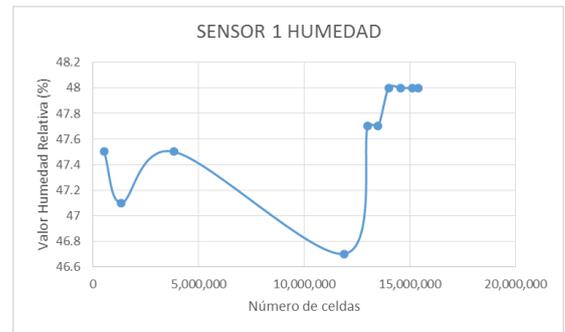
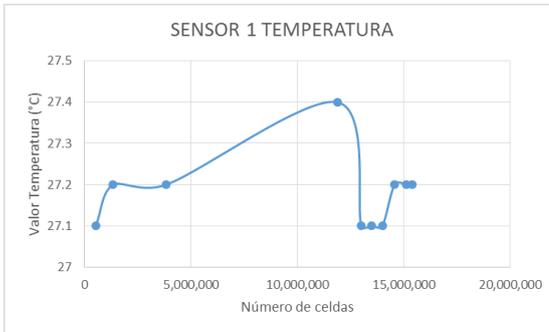


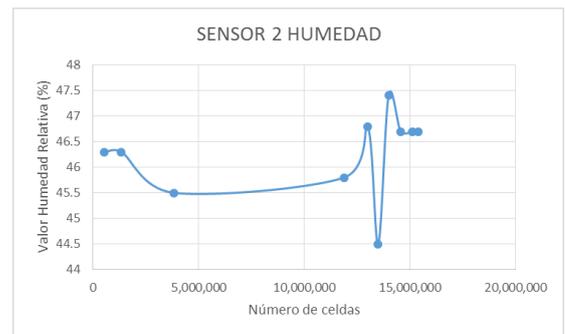
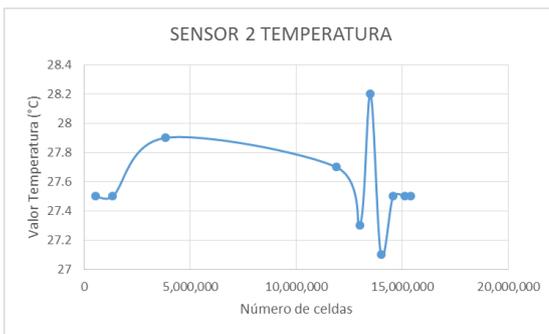
Figura 21. Resultados de temperatura y humedad relativa medida y simulada por bloques para el caso II

3.6.1 Curva de convergencia

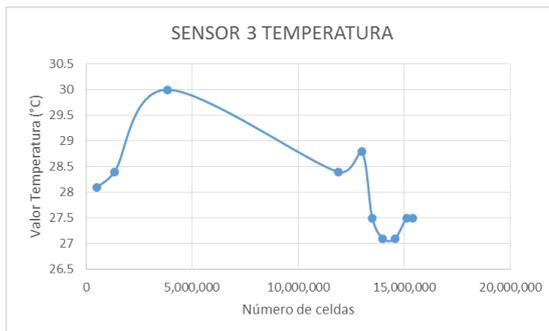
Con distintas simulaciones realizadas en Solidworks se realizó una curva de convergencia para poder determinar cuando el valor es estable para la temperatura y humedad para el caso 1 (figura 22) y para el caso 2 (figura 23).



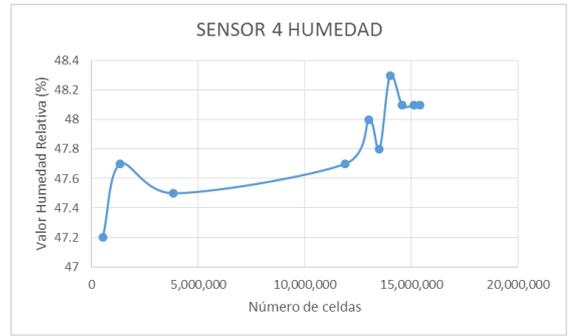
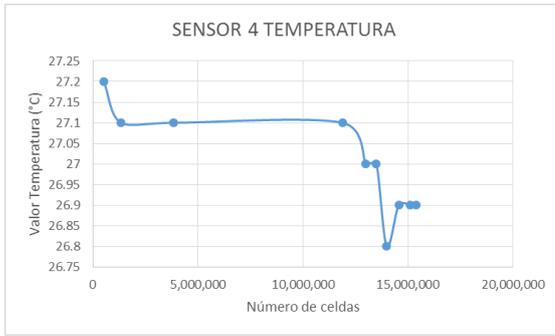
a) Sensor 1



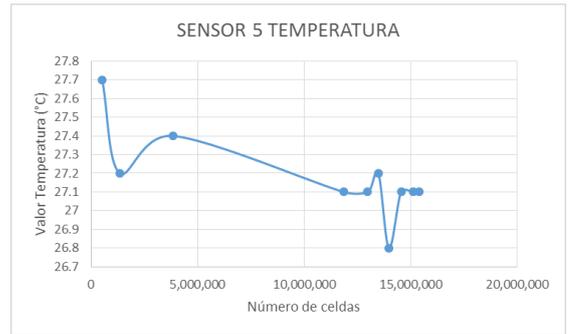
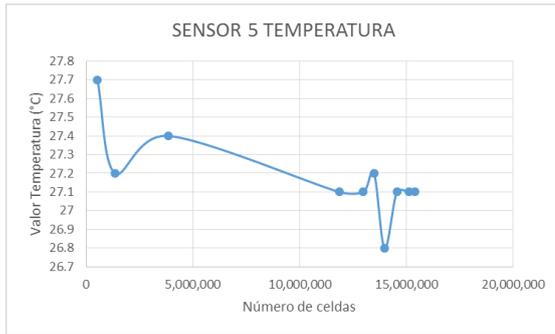
b) Sensor 2



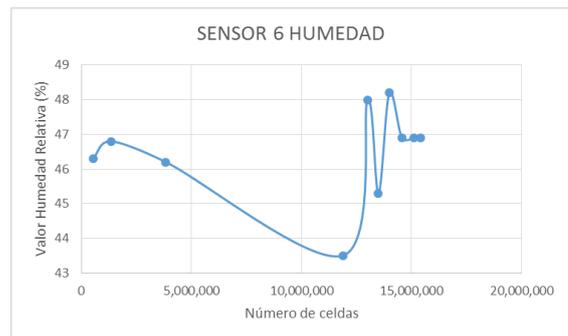
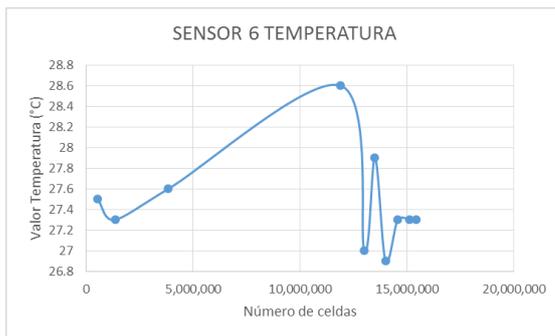
c) Sensor 3



d) Sensor 4

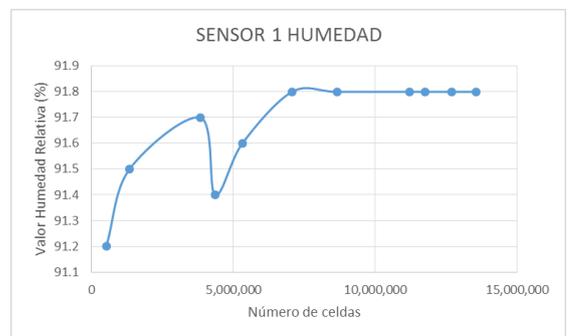
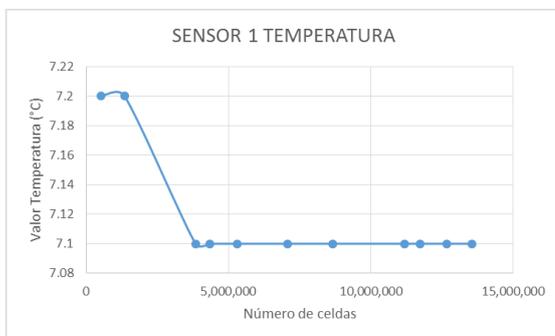


e) Sensor 5

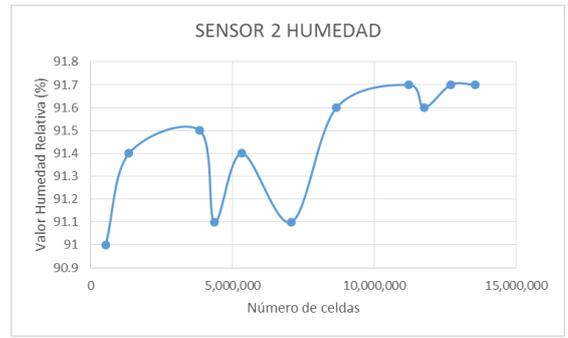
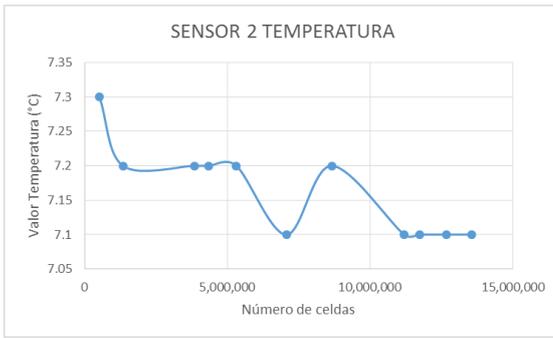


f) Sensor 6

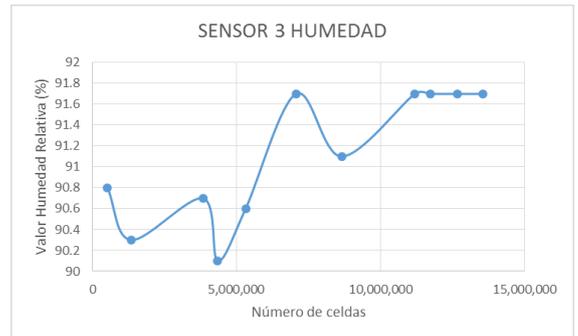
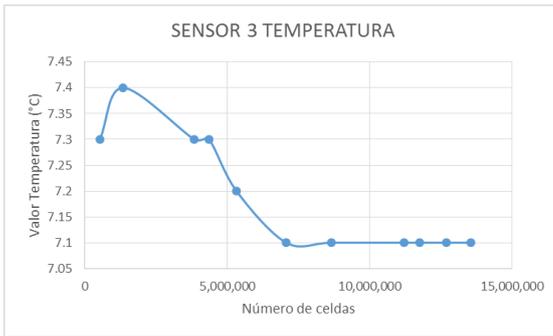
Figura 22. Curvas de convergencia de los sensores para el caso I



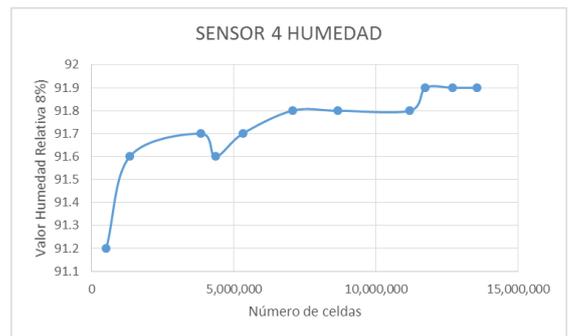
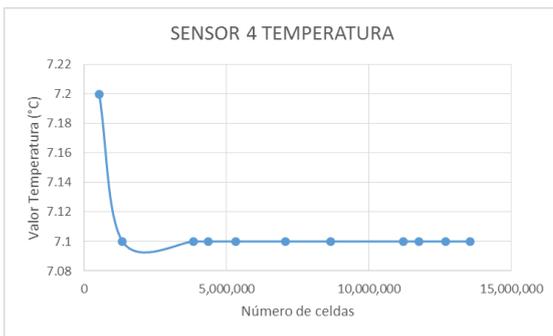
a) Sensor 1



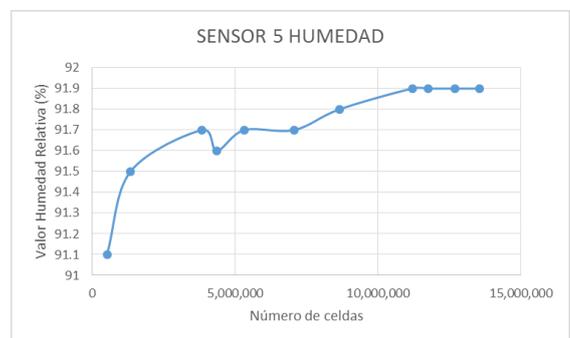
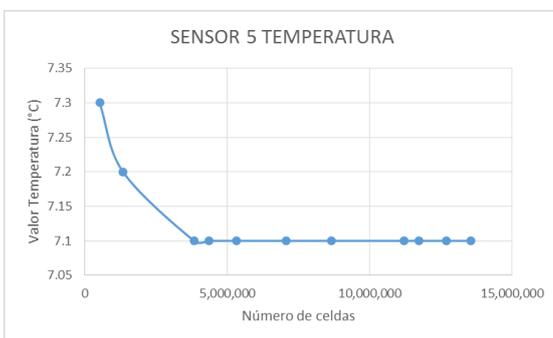
b) Sensor 2



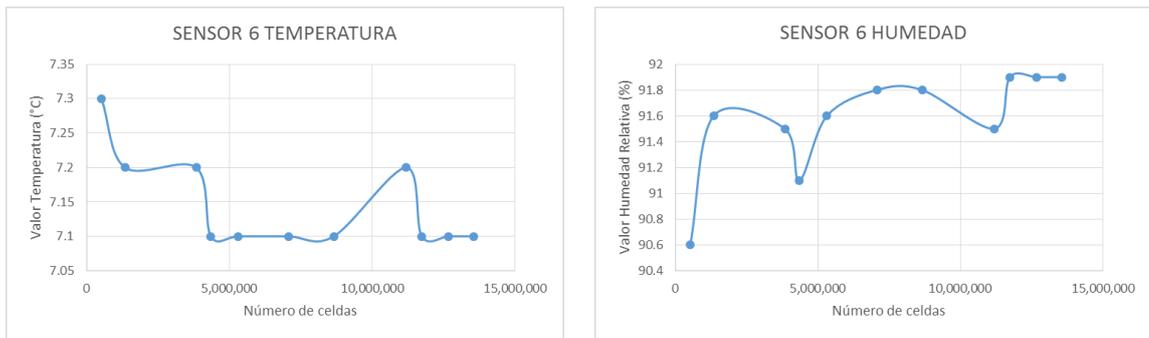
c) Sensor 3



d) Sensor 4



e) Sensor 5



f) Sensor 6

Figura 23. Curvas de convergencia de los sensores para el caso II

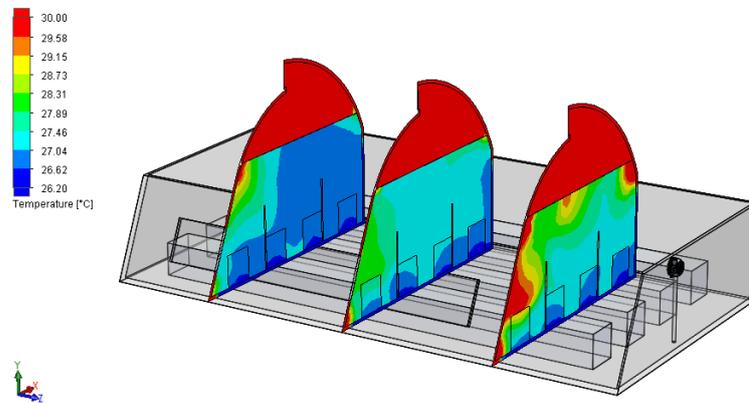
Para obtener las curvas del caso I se necesitó simular con más de 16.000.000 millones de números de celdas para poder llegar a una estabilización, al contrario del caso II que se necesitó menos de 15.000.000 estabilizándose.

Los valores obtenidos de las simulaciones de los sensores en el caso I se asemejaron a los medidos con una diferencia de 1° C o menos en cambio los valores simulados del caso II todos se diferencian con un 1° C.

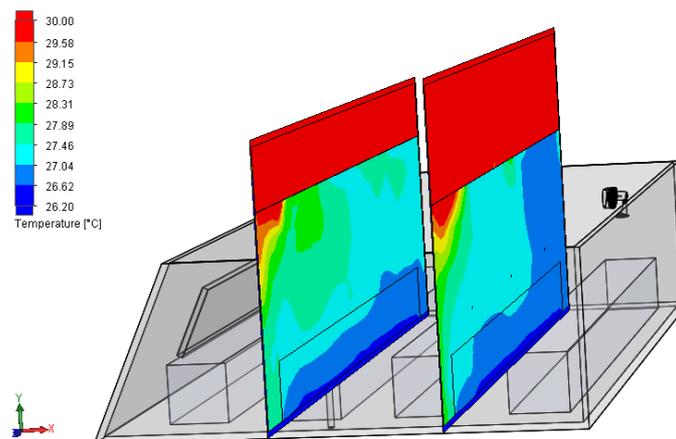
3.6.2 Distribución espacial de temperatura, humedad relativa y vectores de viento de los casos validados

3.6.3 Caso I

Los resultados para el caso I son representados en la figura 24a, de acuerdo a la simulación se obtuvo mayor temperatura en el eje 1, la temperatura tanto en ejes como en bloques (24b) no es muy uniforme.



a) En ejes



b) En bloques

Figura 24. Distribución de la temperatura simulada a) en ejes y b) en bloques para el caso I

El flujo de aire dentro del invernadero para el caso I se observa en la figura 25, la variable velocidad de viento exterior es de noroeste con 3m/s, los ventiladores interiores se encuentran encendidos de tal manera que me permita enfriar el ambiente interior del invernadero, como se puede observar en la parte central – inferior, la temperatura del clima se encuentra uniforme, esto quiere decir que los ventiladores están cumpliendo su función pero faltan los aires acondicionados para poder enfriar más el recinto, la temperatura simulada se asemeja bastante a la medida, en la parte superior derecha y en la parte central se puede observar que con el modelo de turbulencia existe una acumulación de torbellinos.

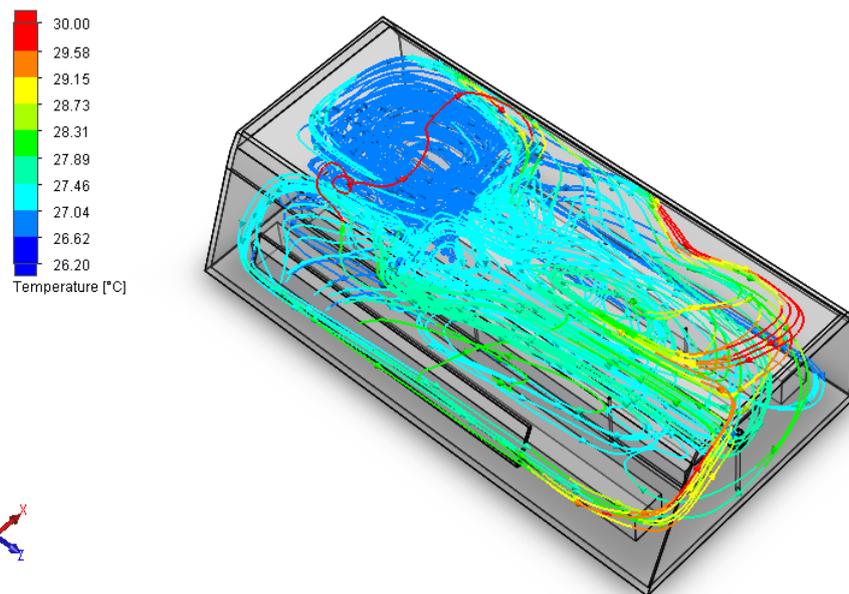
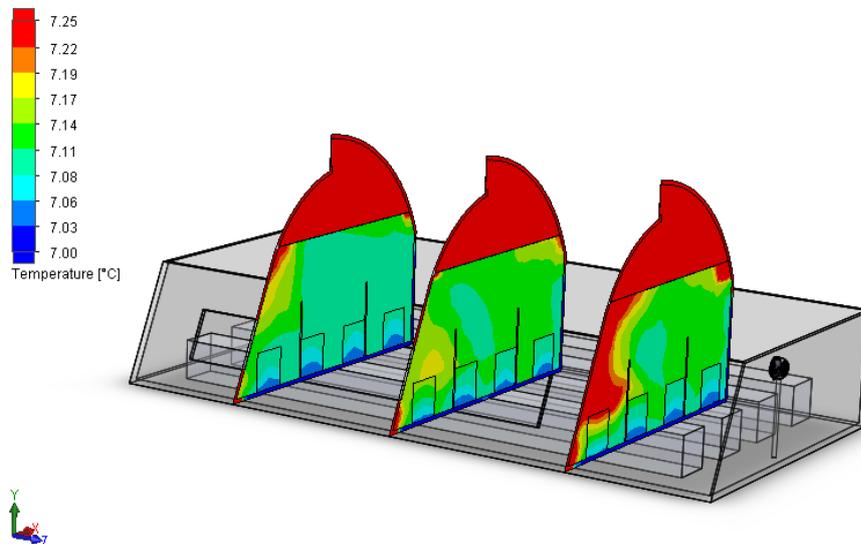


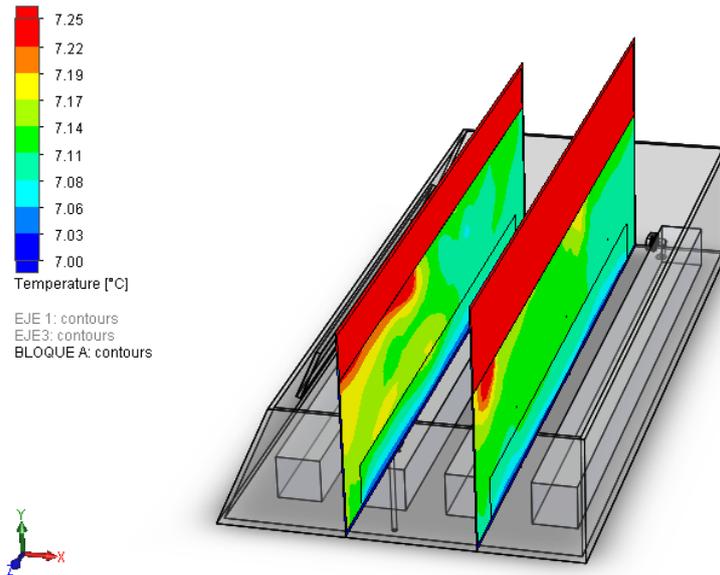
Figura 25. Distribución de los vectores de viento dentro del invernadero para el caso I

3.6.4 Caso II

Los resultados para el caso II son representados en la figura 26a, de acuerdo a la simulación se obtuvo mayor temperatura en el eje 1, la temperatura tanto en ejes como en bloques (26b) no es muy uniforme.



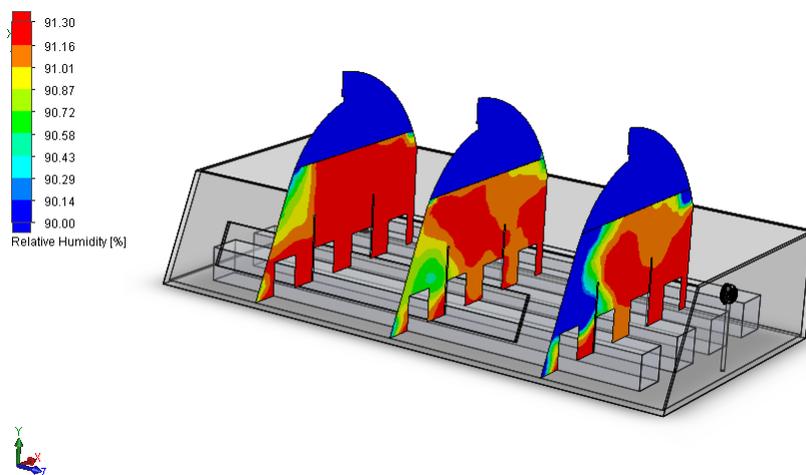
a) En ejes



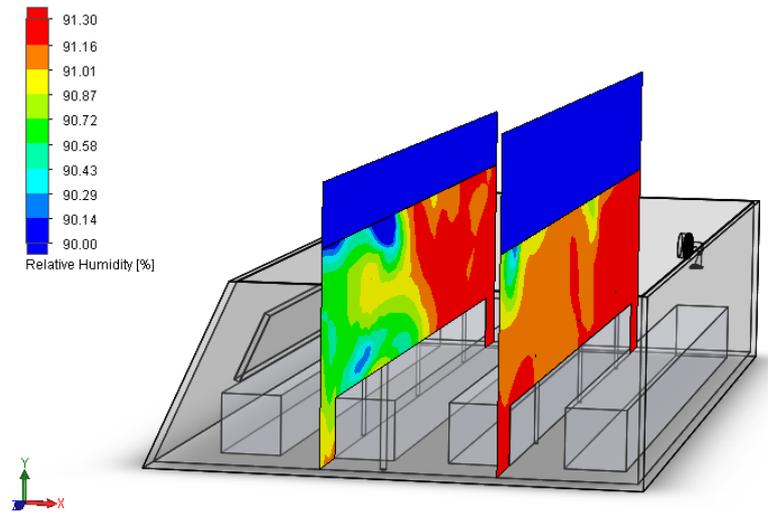
b) En bloques

Figura 26. Distribución de la temperatura a) en ejes y b) en bloques para el caso II

En la figura 27a, de acuerdo a la simulación se obtuvo mayor humedad relativa en el eje 3, la humedad relativa tanto en ejes como en bloques (27b) no es uniforme.



a) En ejes



b) En bloques

Figura 27. Distribución de la humedad relativa simulada a) en ejes y b) en bloques para el caso II

El flujo de aire dentro del invernadero para el caso II se observa en la figura 28, el viento exterior está en calma con 0m/s, los ventiladores interiores se encuentran encendidos de tal manera que me permita enfriar el ambiente interior del invernadero, como se puede observar en la parte superior e inferior la temperatura del clima no se encuentra muy uniforme, los ventiladores están cumpliendo su función de enfriar el recinto pero faltan los aires acondicionados para poder enfriar más el recinto, en la parte superior derecha y en la parte inferior se puede observar que con el modelo de turbulencia existe una acumulación de torbellinos.

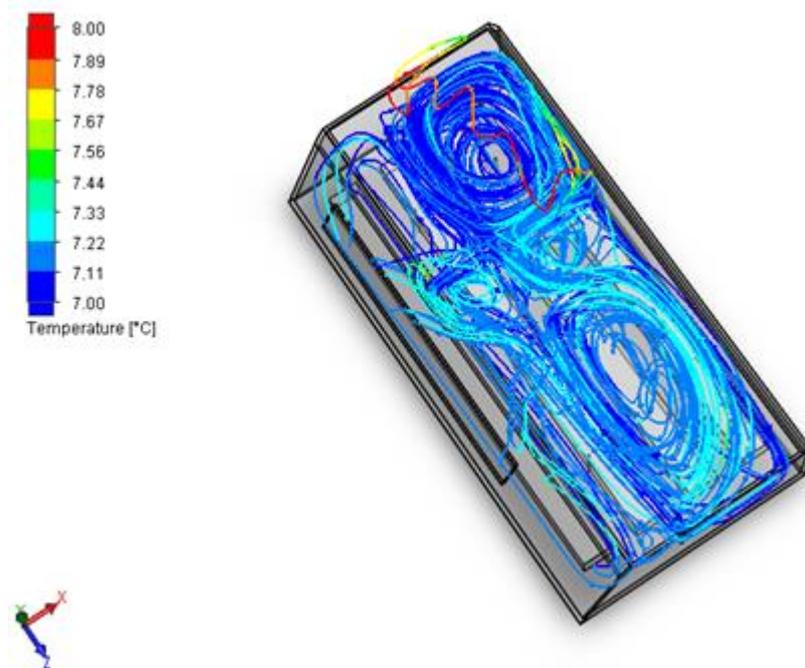


Figura 28. Distribución de los vectores de viento dentro del invernadero para el caso II

Los resultados indican que en el caso II de temperaturas bajas demuestra que es más representativo a la realidad debido a que en la noche la radiación solar no tiene gran efecto.

En el intervalo diurno requiere más modelos como lo es de radiación y evapotranspiración, mientras que en el intervalo nocturno no.

Los resultados del caso que no fue validado para el modelo se encuentran en los anexos.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Las variables climáticas más críticas que afectan al desarrollo de un cultivo son la temperatura, humedad relativa, radiación y viento, por lo que se tomaron estas variables para la simulación.
- Los resultados estadísticos demostraron que no existe una variación muy significativa de los datos medidos entre ejes y entre bloques para los dos casos estudiados.
- Para el caso I los resultados simulados se obtuvieron una diferencia de gradiente térmico entre ejes de 0.36°C y entre bloques una diferencia de 0.13°C , para la humedad relativa se obtuvo una diferencia de gradiente entre ejes de 1.52% y entre bloques una diferencia de 0.42%.
- Para el caso II los resultados simulados se obtuvieron una diferencia de gradiente térmico entre ejes de 0.01°C y entre bloques una diferencia de 0°C , para la humedad relativa se obtuvo una diferencia de gradiente entre ejes de 0.38% y entre bloques una diferencia de 0.64%.
- Los dos casos simulados fueron representativos respecto a los valores medidos, en las curvas de convergencia se puede observar que en el caso II los valores de los sensores tienden a estabilizarse a 7.1°C con respecto a la temperatura y para la humedad relativa de 91.7% a 91.9 %, para el caso I los valores simulados se estabilizan entre 26.9°C y 27.5°C mientras que la humedad relativa entre 46.3% y 48% respectivamente por lo que el caso II es más viable por su semejanza a los datos medidos.

- Los ventiladores en gran parte hicieron su trabajo al mantener un clima óptimo en el interior del invernadero, con los resultados obtenidos mediante simulación de temperatura y humedad relativa se pudo constatar que en la parte superior derecha del invernadero se forma un torbellino manteniendo esa parte más fría que el resto del invernadero.

4.2 Recomendaciones

- Para una mejor precisión del modelamiento en CFD se recomienda medir el flujo de calor de suelo y determinar las características térmicas, medir la temperatura de las paredes del invernadero cubiertas de polietileno debido a que existe una diferencia de gradiente a la exposición de la radiación, integrar el modelo de evapotranspiración a la simulación de clima interior.
- La simulación se la realizo en estado estacionario por la facilidad de manejar los datos con los modelos, se recomienda simular en estado transitorio para una comparación de resultados entre modelos de cada estado.
- Los aires acondicionados no se los incluye en el modelo por qué tienen ciertas fallas al momento de funcionar y también porque hubo daños en los aires acondicionados por terceras personas por lo que se recomienda más seguridad en el invernadero.
- Para la toma de datos en el invernadero se utilizó una placa Arduino que no es industrial pero fue escogido por menor costo, para hacerlo más industrial se recomienda utilizar un PLC para la adquisición de datos al igual que sensores industriales.
- Debido a la falta de mantenimiento en el invernadero el factor suciedad puede afectar a las condiciones climáticas y cultivo.

4.3 Referencias

- [1] M. R. González, «Revista El Agro,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.revistaelagro.com/desordenes-fisiologicos-en-rosas-de-exportacion/>.
- [2] K. Morejón, «El Ciudadano,» 22 Agosto 2015. [En línea]. Available: <http://www.elciudadano.gob.ec/ecuador-tiene-uno-de-los-invernaderos-mas-modernos-de-america-latina/>.
- [3] Y. Molina, «Interempresas,» 26 Agosto 2005. [En línea]. Available: <http://www.interempresas.net/Horticola/Articulos/77307-Control-climatico-en-invernaderos.html>.
- [4] D. A. Jiménez, «La importancia de la automatización en invernaderos para el cultivo de jitomate en el estado de Morelos,» 2011.
- [5] O. Aguado, O. Hernández y E. González, *Control de riego mediante el monitoreo de temperatura, humedad e intensidad solar en un invernadero implementado con labview*, México, 2015.
- [6] Agriculturers, «Agriculturers,» 22 Julio 2015. [En línea]. Available: <http://agriculturers.com/los-invernaderos-mas-modernos-de-latinoamerica-estan-en-ecuador/>.
- [7] A. León, «Interempresas,» 12 Enero 2011. [En línea]. Available: <http://www.interempresas.net/Horticola/Articulos/46898-Almeria-alberga-el-primer-invernadero-robotizado-y-sostenible-del-pais.html>.
- [8] M. Santillán, «Ciencia Unam,» 31 Octubre 2016. [En línea]. Available: http://ciencia.unam.mx/leer/598/El_primer_modelo_de_invernadero_inteligente_en_Mexico.
- [9] Pawlowski, A.; Guzmán, J. L.; Rodríguez, F.; Berenguel, M.; Sánchez, J.; Dormido, S., «Simulation of Greenhouse Climate Monitoring and Control with Wireless Sensor Network and Event-Based Control,» *Sensors*, pp. 232-252, 2009.
- [10] F. Rodríguez, «Modelado y control jerárquico de crecimiento de cultivo en invernadero,» 2002.
- [11] Molina, J.; Martín, B.; Vásquez, S.; Sánchez, F., «Desarrollo de un sistema de adquisición de datos climáticos para un invernadero,» *International Conference on Project Engineering*, pp. 1429-1435, 2008.
- [12] A. Rojas, «Análisis del comportamiento térmico de un invernadero construido en ladera, aplicando dinámica de fluidos computacional,» 2015.
- [13] Molina-Aiz, F. D.; Fatnassi, H.; Boulard, T.; Roy, J. C.; Valera, D. L., «Comparison of finite element and finite volume methods for simulation of natural ventilation in greenhouses.,» *Computers and Electronics in Agriculture*, pp. 69-86, 2010.
- [14] J. Flores Velázquez y F. Villarreal Guerrero, «Diseño de un sistema de ventilación forzada para un invernadero cenital usando CFD,» *Mex. Cienc. Agríc.*, vol. 6, n° 2, 2015.
- [15] J. Flores Velásquez, E. Mejía Saenz, J. Montero-Camacho y A. Rojano, «Análisis numérico del clima interior en un invernadero de tres naves con ventilación mecánica,» *Agrociencia* 45, pp. 545-560, 2011.

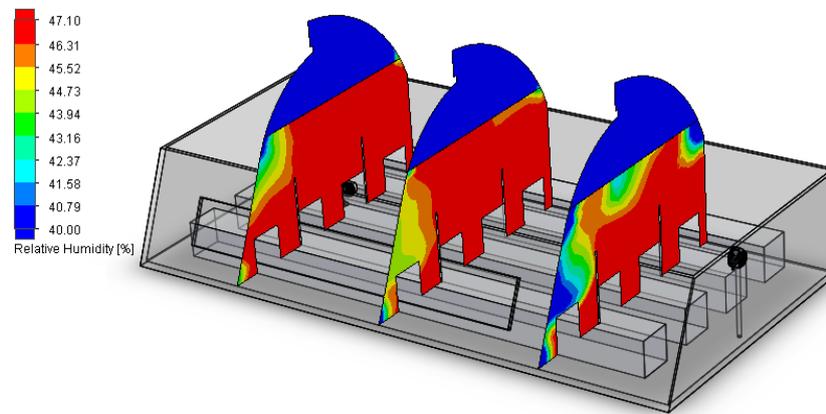
- [16 M. A. Arellano García, D. L. Valera Martínez, M. Urrestarazu Gavilán, M. d. R. Quezada Martín, J. Murguía López y A. Zermeño González, «Ventilación Natural y Forzada de Invernaderos Tipo Almería y su relación con el Rendimiento de Tomate,» *Terra Latinoamericana*, vol. 29, nº 4, pp. 379-386, 2011.
- [17 M. Ruiz, «Aplicación de la dinámica de fluidos computacional al control de las mermas de vino en naves de crianza climatizadas.,» 2002.
- [18 Cedillo, J. A.; Marín, J. P., «Estudio experimental y computacional mediante CFD Ansys del flujo de aire a través de techos de edificaciones usando un túnel de viento,» 2015.
- [19 C. Simental, «Ecuaciones de Gobierno Fundamentales para CFD,» 2015.
- [20 J. Flores Velásquez, *Estudio del clima en los principales modelos de invernaderos en México (Malla Sombra, Multitúnel y Baticenital), mediante la técnica del CFD (Computational Fluid Dynamics)(Tesis doctoral)*, Universidad de Almería, 2010.
- [21 Carrillo, D. A.; Vásquez, J. L.; Villela, R.; Beltrán, A.; Reyes, C.; González, M. E., «Control del clima de un invernadero,» *Investigación Científica*, 2008.
- [22 De la Torre, G.; Soto, G M.; López, I.; Torres, I.; Rico, E., «Computational fluid dynamics in greenhouses: A review,» *African Journal of Biotechnology Vol. 10(77)*, pp. 17651-17662, 2011.
- [23 Mostafa, E; Lee, I B; Song, S H; Kwon, K S; Seo, I H; Hong, S w; Hwang, H S; Bitog, J; Han, H T, «Computational fluid dynamics simulation of air temperature distribution inside broiler building fitted with duct ventilation system,» *Biosystems Engineering*, vol. 112, nº 4, pp. 293-303, 2012.
- [24 Rodríguez, L; Collado, M; Rodríguez, E; Patiño, L, «ANÁLISIS NUMÉRICO DEL COMPORTAMIENTO DEL AIRE EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE ACONDICIONADO EMPLEANDO LOS MODELOS DE TURBULENCIA k-ε, RNG k-ε Y EL MODELO DE LAS TENSIONES DE REYNOLDS,» *Ingeniare*, vol. 16, nº 2, pp. 370-382, 2008.
- [25 Aich, W.; Kolsi, L.; Borjini, M.; Al-Rashed, A.; Aissia, H.; Oztop, H.; Abu-Hamdeh, N., «Three-dimensional computational fluid dynamics analysis of Buoyancy-driven natural ventilation and entropy generation in a prismatic greenhouse,» *Thermal Science*, pp. 73-85, 2018.
- [26 H. Madjoubi, T. Boulard, H. Fatnassi y L. Bouirden, «Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: An experimental and CFD assisted study,» *Agricultural and Forest Meteorology*, pp. 1050-1062, 2009.
- [27 Tadj, N.; Draoui, B.; Kittas, C., «Influence of insect screens' porosity on greenhouse climate: CFD approach,» 2017.
- [28 Romero-Gómez, P.; Choi, C.; López-Cruz, I., «Mejora de las tasas de ventilación de invernaderos bajo condiciones climáticas del centro de México,» *Agrociencia*, pp. 1-15, 2010.
- [29 J. Flores, L. López, E. Mejía y I. Montero, «Evaluación del desempeño climático de un invernadero baticenital del centro de México mediante dinámica de fluidos computacional (CFD),» *Agrociencia*, vol. 48, nº 2, 2014.
- [30 T. Liu, «Sparkfun,» [En línea]. Available: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>.

- [31 Caicedo, W.; Jijón, D.; «Incidencia de la densidad de siembra en la producción de semilla de papa (*Solanum tuberosum* L) variedad superchola en el sistema aeropónico, en la granja experimental Yuyucocha, Caranqui, Ibarra, Ecuador,» 2016.
- [32 O. Guadarrama, «Automatización de Clima Para un Invernadero,» 2014.
- [33 J. C. Gázquez, M. Sáez, J. C. López, J. Perez Parra y E. Baeza, «Influencia de tres sistemas de refrigeración en la presencia de plagas y en enfermedades en un cultivo de pimiento california,» 2007.
- [34 J. I. Montero, A. Antón y P. Muñoz, «Refrigeración de Invernaderos I: Ventilación Natural,» *Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentària*, 2015.
- [35 A. Perdignes, I. Peralta, J. Nolasco, M. A. Muñoz y V. Pascual, «Sensores para el control climático en invernadero,» *HORTICULTURA*, pp. 44-49, 2004.
- [36 F. Rodriguez Ramirez, I. García Ortega, S. A. Vásquez Gamboa y L. Juarez Mendoza, «Análisis, diseño e implementación de un invernadero automatizado para la producción de fresa en Tehuacán,» *Revista del Desarrollo Tecnológico*, vol. 1, nº 3, pp. 8-17, 2017.
- [37 A. Ruiz García, I. L. López Cruz, R. Arteaga Ramírez y J. A. Ramírez Arias, «Tasas de ventilación natural de un invernadero del centro de México estimadas mediante balance de energía,» *Agrociencia*, vol. 49, nº 1, 2015.
- [38 Díaz, H. O.; Solano, O. F.; «Diseño y simulación del control climático para un invernadero y base de datos de registro,» 2006.
- [39 J. A. Palacios, «Diseño de una red de sensores (wsn) con tecnología 802.15.4, basado en el concepto agricultura de precisión para el control y monitoreo de cultivos de hortalizas bajo invernadero en la granja la pradera de la Universidad Técnica del Norte,» 2017.
- [40 Prado, J. V.; Rojano, A.; León, B.; Carrillo, M.; Ibáñez, L.; Montiel, V.; López, I.; «Simulación del movimiento del aire en un invernadero tipo venlo,» *Terra Latinoamérica*, pp. 325-337, 2013.
- [41 Aguilar, C.; Flores, J.; Ojeda, W.; Arzeta, A.; «Innovación tecnológica basada en dinámica de fluidos computacional para el desarrollo de la agricultura protegida.,» 2017.
- [42 Solidworks, Solidworks Flow Simulation 2011 Tutorial, SOLIDWORKS, Inc, 2011.
- [43 Bouchet, E; Freyre, C; Bouzo, C; Favaro, J; «Efecto de las dimensiones de un invernadero sobre la temperatura interna en períodos cálidos».

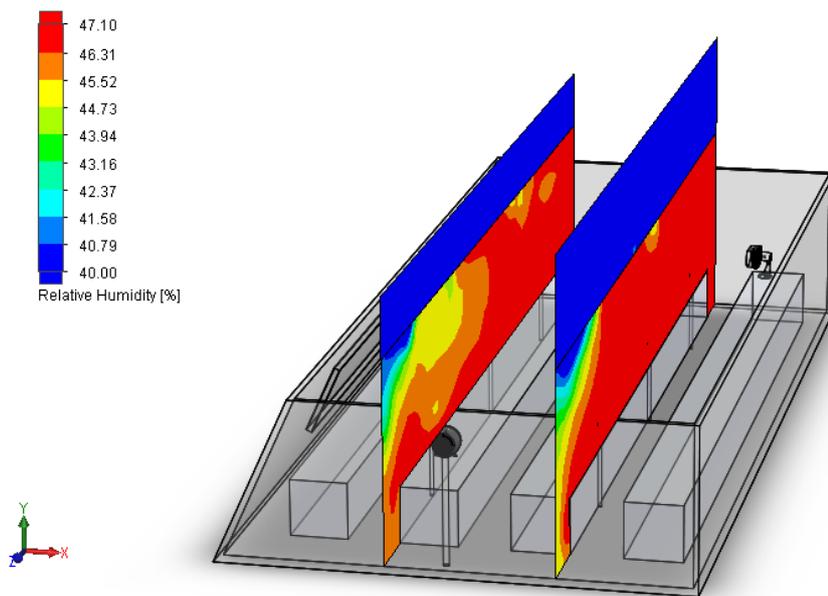
4.4 Anexos

4.4.1 Anexo1

Simulación en Solidworks de la variable humedad relativa no válida del caso I.



a) Ejes



b) Bloques

Figura 29. Distribución de la humedad relativa simulada a) en ejes y b) en bloques para el caso I

4.4.2 Anexo 2

Código del programa para obtener las variables en la placa Arduino con los sensores DHT22.

```
TESES_INVERNADERO $
//Incluimos libreria
#include<DHT.h>

//Definimos el pin digital donde se conecta el sensor
#define DHTPIN 2
#define DHTPIN2 3
#define DHTPIN3 4
#define DHTPIN4 5
#define DHTPIN5 6
#define DHTPIN6 7

//Dependiendo del tipo de sensor
#define DHTTYPE DHT22

//Inicializamos el sensor DHT11
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
DHT dht2(DHTPIN2, DHTTYPE);
DHT dht3(DHTPIN3, DHTTYPE);
DHT dht4(DHTPIN4, DHTTYPE);
DHT dht5(DHTPIN5, DHTTYPE);
DHT dht6(DHTPIN6, DHTTYPE);

int LABEL = 1;
void setup() {
  //Inicializamos comunicacion serie
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("CLEARDATA"); // Reset de la comunicación serial
  Serial.println("LABEL, Hora, Sensor1H, Sensor1I, Sensor2H, Sensor2I, Sensor3H, Sensor3I, Sensor4H, Sensor4I, Sensor5H, Sensor5I, Sensor6H, Sensor6I"); // Nombres de columnas
}
```

a)

```
//Comenzamos el sensor DHT
dht.begin();
delay(100);
dht2.begin();
delay(100);
dht3.begin();
delay(100);
dht4.begin();
delay(100);
dht5.begin();
delay(100);
dht6.begin();
delay(100);

}

void loop() {
  //Esperamos 5 segundos entre medidas
  delay(5000);

  //Leemos la humedad relativa
  float h=dht.readHumidity();
  float h2=dht2.readHumidity();
  float h3=dht3.readHumidity();
  float h4=dht4.readHumidity();
  float h5=dht5.readHumidity();
  float h6=dht6.readHumidity();
}
```

b)

```

//Leemos la temperatura en grados centigrados (por defecto)
float t=dht.readTemperature();
float t2=dht2.readTemperature();
float t3=dht3.readTemperature();
float t4=dht4.readTemperature();
float t5=dht5.readTemperature();
float t6=dht6.readTemperature();

//Leemos la temperatura en grados Fahrenheit
//float f=dht.readTemperature(true);

//Comprobamos si ha habido algun error en la lectura
if(isnan(h)||isnan(t))
{
  Serial.println("Error obteniendo los datos del sensor1 DHT22");
  return;
}
if(isnan(h2)||isnan(t2))
{
  Serial.println("Error obteniendo los datos del sensor2 DHT22");
  return;
}
if(isnan(h3)||isnan(t3))
{
  Serial.println("Error obteniendo los datos del sensor3 DHT22");
  return;
}

```

c)

```

if(isnan(h4)||isnan(t4))
{
  Serial.println("Error obteniendo los datos del sensor4 DHT22");
  return;
}
if(isnan(h5)||isnan(t5))
{
  Serial.println("Error obteniendo los datos del sensor5 DHT22");
  return;
}
if(isnan(h6)||isnan(t6))
{
  Serial.println("Error obteniendo los datos del sensor6 DHT22");
  return;
}
//
//Calcular el indice de calor en Fahrenheit
//float hif=dht.computeHeatIndex(f,h);

//Calcular el indice de calor en grados centigrados
//float hic=dht.computeHeatIndex(t,h,false);

Serial.print("DATA,TIME,");
//Serial.print("Humedad: ");
Serial.print(h);
Serial.print(" % ");
Serial.print(",");
//Serial.print("Temperatura: ");
Serial.print(t);
Serial.print(" C ");

```

d)

```

Serial.print(",");
//Serial.println();

//Serial.print("Humedad2: ");
Serial.print(h2);
Serial.print(" % ");
Serial.print(",");
//Serial.print("%\t");
//Serial.print("Temperatura2: ");
Serial.print(t2);
Serial.print(" C ");
Serial.print(",");
//Serial.println();

//Serial.print("Humedad3: ");
Serial.print(h3);
Serial.print(" *% ");
Serial.print(",");
//Serial.print("%\t");
//Serial.print("Temperatura3: ");
Serial.print(t3);
Serial.print(" C ");
Serial.print(",");
//Serial.println();

//Serial.print("Humedad4: ");
Serial.print(h4);
Serial.print(" % ");
Serial.print(",");
//Serial.print("%\t");
//Serial.print("Temperatura4: ");

```

e)

```

Serial.print(t4);
Serial.print(" C ");
Serial.print(",");
//Serial.println();

//Serial.print("Humedad5: ");
Serial.print(h5);
Serial.print(" % ");
Serial.print(",");
//Serial.print("%\t");
//Serial.print("Temperatura5: ");
Serial.print(t5);
Serial.print(" C ");
Serial.print(",");
//Serial.println();

//Serial.print("Humedad6: ");
Serial.print(h6);
Serial.print(" % ");
Serial.print(",");
//Serial.print("%\t");
//Serial.print("Temperatura6: ");
Serial.print(t6);
Serial.print(" C ");
Serial.println();
}

```

f)

Figura 30. Imágenes del código en Arduino (a,b,c,d,e y f)